



Hochschule Bremen  
City University of Applied Sciences



Tagungsband

10.–11. September 2025  
Hochschule Bremen

# 3. Konferenz der Norddeutschen Wärmeforschung



# 3. Konferenz der Norddeutschen Wärmeforschung 10. – 11. September 2025

## IMPRESSUM

### Herausgeber:

Prof. Dr. Jürgen Knies

Timmy Schwarz

Yannick Elias Gerling

Hochschule Bremen  
Fakultät 2  
Neustadtswall 30  
28199 Bremen

### Layout:

Referat Kommunikation und Marketing Hochschule Bremen, Cedric Müller (Cover)

Lisa Mackowiak, Johanna Rex und Timmy Schwarz (inhaltliche Gestaltung / Lektorat)

Bildnachweise:

Copyright Sabrina Peters (Cover); Thomas Ferstl / privat (wissenschaftlicher Beirat)

**DOI:** [10.26092/elib/5016](https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:hbz:5:1-65862-p0011-9)

**Jahr:** 2026

SuUB - Staats- und Universitätsbibliothek Bremen

Book of Abstracts - 1. Konferenz der Norddeutschen Wärmeforschung

DOI: [10.48547/202311-000](https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:hbz:5:1-65862-p0011-9)

Book of Abstracts - 2. Konferenz der Norddeutschen Wärmeforschung

DOI: [10.34712/142.56](https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:hbz:5:1-65862-p0011-9)

Book of Abstracts - 3. Konferenz der Norddeutschen Wärmeforschung

DOI: [10.26092/elib/4323](https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:hbz:5:1-65862-p0011-9)

Tagungsband zur 1. Konferenz der Norddeutschen Wärmeforschung

DOI: [10.48547/202505-000](https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:hbz:5:1-65862-p0011-9)

Tagungsband zur 2. Konferenz der Norddeutschen Wärmeforschung

DOI: [10.34712/142.68](https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:hbz:5:1-65862-p0011-9)

Dieses Werk steht unter der freien Creative-Commons-Lizenz [CC BY 4.0: Creative Commons Namensnennung 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

# Vorwort

Liebe Leserinnen und Leser,

die 3. Konferenz der Norddeutschen Wärmeforschung 2025 in Bremen stand ganz im Zeichen des Austausches verschiedener Disziplinen zu aktuellen Themen der Wärmewende. So konnte ein Bogen gespannt werden von ingenieur-wissenschaftlichen Vertiefungen bis hin zu sozial-wissenschaftlichen Perspektiven.

Die Themenfelder, die sich in diesem Band finden, zeigen die Vielfalt und Relevanz der Forschung: *Nutzung von Raumdaten, Simulationstools, Großanlagen für erneuerbare Wärme, Kommunale Wärmeplanung, Praxisbeispiele zur Umsetzung der Wärmewende sowie Wärmewende und Gesellschaft.*

Die Beiträge wurden oft in interdisziplinären Teams entwickelt. Ihre Arbeit zeigt, dass die Wärmewende heute nicht mehr nur eine technische, sondern eine kooperative, vernetzte Aufgabe ist.

Der vorliegende Tagungsband ist somit ein Spiegel dieser interdisziplinären Arbeit. Von den insgesamt 69 eingereichten Abstracts und Vorträgen auf der Konferenz haben sich 16 Autor\*innen-Teams (insgesamt 53 Autor\*innen) entschieden, ihre Forschungsbeiträge als Fullpaper zu veröffentlichen und dabei das zweifache Peer-Review-Verfahren des wissenschaftlichen Beirats zu durchlaufen. Der Beirat sieht dies als Vertrauen in die Wertigkeit der Konferenzreihe, die Dank Autor\*innen zu einem hohen Niveau im wissenschaftlichen Diskurs beiträgt.

Die Mitglieder des wissenschaftlichen Beirats engagieren sich in der Fachgruppe Wärme der norddeutschen Energieverbände und verfolgen das Ziel, eine Plattform für die norddeutsche Wärmeforschung zu etablieren. Diese soll nicht nur die beschleunigte Wärmewende in Norddeutschland unterstützen, sondern auch den Austausch und die Zusammenarbeit zwischen Wissenschaft, Wirtschaft und Kommunen stärken.

Dieser Tagungsband ist mehr als eine Dokumentation der Konferenz: Er ist ein Beitrag zur wissenschaftlichen und praktischen Weiterentwicklung der Wärmewende in Norddeutschland. Wir hoffen, dass der Tagungsband nicht nur als Quelle für Forschung und Lehre dient, sondern auch Impulse für neue Ideen in Forschung, Wirtschaft und Gesellschaft gibt.

Wir danken allen Autor\*innen herzlich für ihre engagierte Arbeit, ihre wissenschaftliche Sorgfalt und die Bereitschaft, ihre Ergebnisse in diesem Band zu teilen. Ebenso danken wir den Gutachter\*innen des wissenschaftlichen Beirats, die mit ihrer Expertise die Qualität der Beiträge sicherstellten.

Wir freuen uns auf ein Wiedersehen auf der 4. Konferenz der Norddeutschen Wärmeforschung (s. letzte Seite) und wünschen Ihnen eine anregende Lektüre und viel Inspiration aus diesem Band.

Mit herzlichen Grüßen,

Prof. Dr. Jürgen Knies  
Timmy Schwarz  
Yannick Elias Gerling

# Wissenschaftlicher Beirat



**Dr.-Ing. FEDERICO GIOVANNETTI** ist seit 2002 am Institut für Solarenergieforschung als Wissenschaftler und Projektleiter tätig. Seit 2010 koordiniert er als Gruppenleiter die Aktivitäten im Bereich Niedertemperatur-Solarthermie. Sein Fokus liegt auf der solar- und wärmepumpenbasierten Wärmeversorgung von Gebäuden und auf der solaren Aktivierung der Gebäudehülle.

Institut Solarenergieforschung GmbH in Hameln (ISFH)  
[www.isfh.de](http://www.isfh.de)  
[giovannetti@isfh.de](mailto:giovannetti@isfh.de)



**Prof. Dr.-Ing. STEFAN HOLLER** ist Professor für Energie- und Umwelttechnik an der HAWK in Göttingen und Leiter des Fachgebietes Nachhaltige Energie- und Umwelttechnik (NEUTec). Im Schwerpunkt „Green Engineering und Ökosystem“ arbeitet er an der Transformation von Energiesystemen mit dem Fokus einer klimaneutralen Wärmeversorgung. Er besitzt langjährige Erfahrung in der Leitung von nationalen und internationalen Projekten.

Hochschule für Angewandte Wissenschaft und Kunst  
[www.hawk.de](http://www.hawk.de)  
[stefan.holler@hawk.de](mailto:stefan.holler@hawk.de)



**Prof. Dr. JÜRGEN KNIES** vertritt in der Fakultät Architektur, Bau und Umwelt an der Hochschule Bremen das Lehrgebiet „Infrastrukturplanung umwelt- und energietechnischer Anlagen“. In Lehre und Forschung liegt der Fokus auf der räumlichen Analyse von technischen Potentialen und planerischen Rahmenbedingungen sowie auf der Frage, wie bürgerschaftliche Potentiale in der Wärmewende aktiviert werden können.

Hochschule Bremen  
[www.hs-bremen.de](http://www.hs-bremen.de)  
[juergen.knies@hs-bremen.de](mailto:juergen.knies@hs-bremen.de)



**Prof. Dr.-Ing. VOLKER LENZ** leitet am Deutschen Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH (DBFZ) den Bereich Thermochemische Konversion und beschäftigt sich mit allen Fragen rund um erneuerbare Wärme mit und aus Biomasse sowie gekoppelte stoffliche Fragestellungen. Er ist mit regelmäßigen Vorlesungen an der TUHH und der Universität Rostock eingebunden.

DBFZ  
[www.dbfz.de](http://www.dbfz.de) und [www.auf.uni-rostock.de/aw](http://www.auf.uni-rostock.de/aw)  
[volker.lenz@dbfz.de](mailto:volker.lenz@dbfz.de)



**Prof. Dr. rer. nat. OLIVER OPEL** ist Professor für die energetische Optimierung von Gebäuden an der FH-Westküste und leitet das Institut für die Transformation des Energiesystems (ITE). Er forscht zu Korrosion in Heiz- und Kühlwassersystemen, Trinkwasseraufbereitung und Gebäudeeffizienz sowie Wasserstoff-Infrastruktur und Energiespeicherung.

FH Westküste  
[www.fh-westkueste.de](http://www.fh-westkueste.de)  
[opel@fh-westkueste.de](mailto:opel@fh-westkueste.de)



**Dr.-Ing. JOHANNES PELDA** ist wissenschaftlicher Mitarbeiter an der HAWK im Fachgebiet Nachhaltige Energie- und Umwelttechnik (NEUTec), wo er seit 2016 im Bereich der Optimierung von Energiesystemen tätig ist. Zuvor führte er Energieaudits nach DIN EN 16247 durch und beriet Unternehmen zur effizienteren Energienutzung. Sein derzeitiger Schwerpunkt liegt in der Optimierung von Energiesystemen mit Fokus auf Fernwärme und die Integration von Erneuerbaren Energien in Wärmesysteme.

Nachhaltige-Energie- und Umwelttechnik (NEUTec)

[www.hawk.de](http://www.hawk.de)

[johannes.pelda@hawk.de](mailto:johannes.pelda@hawk.de)



**Dipl.-Ing. PETRIT VUTHI** ist Innovationsmanager im Competence Center Erneuerbare Energien und Energieeffizienz (CC4E) der HAW Hamburg. Er beschäftigt sich mit der Akquise und der Projektleitung von Forschungsprojekten mit den Schwerpunkten nachhaltige Energiesysteme sowie Energieversorgung im Bereich Gebäude und Quartier.

HAW-Hamburg: Competence Center für Erneuerbare Energien und Energieeffizienz

[www.haw-hamburg.de](http://www.haw-hamburg.de)

[petrit.vuthi@haw-hamburg.de](mailto:petrit.vuthi@haw-hamburg.de)



**Prof. Dr.-Ing. INGO WEIDLICH** ist in der Energieforschung mit einem Schwerpunkt auf Wärmeversorgungssysteme tätig. Neben methodischen Forschungsfragen im Bereich des Asset Managements von Fernwärmesystemen sind insbesondere Forschungsthemen der Bautechnik von Wärmenetzen und Forschungsfragen der damit verbundenen Kreislaufwirtschaft im Fokus. Dabei kommen moderne Computer- und experimentelle Methoden zum Einsatz.

HafenCity Universität Hamburg (HCU)

[www.hcu-hamburg.de](http://www.hcu-hamburg.de)

[ingo.weidlich@hcu-hamburg.de](mailto:ingo.weidlich@hcu-hamburg.de)



**MARLIES WIEGAND, M.Sc.** ist wissenschaftliche Mitarbeiterin und Teamleiterin der Gruppe Gebäudetechnik an der Fachhochschule Westküste. Sie betreut mehrere laufende Forschungsprojekte im Bereich erneuerbare Wärmeversorgung, Kalte Nahwärme und Quartiersenergiemanagement und ist überdies in der Mittelakquise tätig.

Institut für die Transformation des Energiesystems (ITE), Fachhochschule Westküste

[www.energieforschung.sh/de/forscher-in/marlies-wiegand-df51c3](http://www.energieforschung.sh/de/forscher-in/marlies-wiegand-df51c3);

und [www.fh-westkueste.de](http://www.fh-westkueste.de)

[wiegand@fh-westkueste.de](mailto:wiegand@fh-westkueste.de)

# Inhalt

## Nutzung von Raumdaten

Automatische Abgrenzung und multikriterielle Bewertung energetischer Quartierszellen für die Transformation lokaler Wärmeenergiesysteme .....	7
---	---

## Simulationstools

Definition typischer sanierter niedersächsischer Wohngebäude als Basis für die dynamische Gebäudesimulation – Niedersächsisches Mehrfamilienhaus .....	13
Ein thermisches Gebäudemodell für das Training von Algorithmen zur Gebäudekonditionierung .....	19
The impact of level of complexity in techno-economic analysis of high temperature heat pumps .....	25
Open Source Web Dashboard zur Unterstützung der Konzeption von Wärmeversorgungssystemen .....	31
Versorgungstemperaturen und Trinkwarmwasserbedarf typischer sanierter niedersächsischer Wohngebäude als Basis für die dynamische Gebäudesimulation – Niedersächsisches Mehrfamilienhaus (Archetyp MFH) .....	37

## Großanlagen für EE (Wärme)

Einfluss von Energiepreisen und Förderungen auf betriebswirtschaftlich getriebenen Ausbau klimaneutraler Fernwärmeerzeugung im Vergleich zum systemdienlichen Optimum .....	42
Modellierungsansatz und erste Ergebnisse zur gemeinschaftlichen Wärmeerzeugung und -versorgung eines Gewerbegebiets .....	48
Großwärmepumpen für den kurz- bis mittelfristigen Einsatz in multivalenten Wärmeversorgungssystemen .....	54

## Kommunale Wärmeplanung

Municipal Heat Planning with a Single Click – Using Open Data for a Scalable Planning Tool.....	60
Simulationsgestützte Decision Workshops zur Umsetzung der Kommunalen Wärmeplanung .....	66

## Praxisbeispiele Umsetzung der Wärmewende

Automatisierte Abgrenzung kleinräumiger Wärmeversorgungsgebiete unter Berücksichtigung der Klimaschutzstrategien von Wohnungsbaugesellschaften.....	72
---	----

## Wärmewende und Gesellschaft

Instrumente für die „Graue Zone“: die Entwicklung erneuerbarer Nahwärme im urbanen Bestand lokal fördern. Ein Screening des Forschungsstandes zur Governance der Wärmewende.....	78
Rethinking Acceptance through Energy Democracy: Public Expectations and the Democratic Legitimacy of the Energy Transition in Germany .....	83
Who Drives the Heat Transition? How Intermediaries Shape Building Owners' Willingness to Install Heat Pumps.....	89
Zielgruppenspezifische Hemmnisse von Verbraucher*innen in der Wärmewende – Ergebnisse einer Fallstudie in Bremen .....	95

# Automatische Abgrenzung und multikriterielle Bewertung energetischer Quartierszellen für die Transformation lokaler Wärmeenergiesysteme

Philip GROESDONK<sup>1\*</sup>, Luis BLANCO<sup>1</sup>, Sankalp AGRAWAL<sup>1</sup>, René WINKELS<sup>1,2</sup>, Jana STENGLER<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), Institut für Solarforschung, Im Langenbroich 13, 52428 Jülich

<sup>2</sup> Fachhochschule Aachen, Campus Jülich, Heinrich-Mußmann Straße 1, 52428 Jülich

\* philip.groesdonk@dlr.de

## Kurzfassung

Ein zellulärer Aufbau des zukünftigen Energiesystems kann ein Weg sein, vielfältige und veränderliche Versorgungsanforderungen effizient zu erfüllen. Dessen Zellen lassen sich bereits früh, z. B. bei der kommunalen Wärmeplanung (KWP), definieren. Dieser Beitrag beschäftigt sich am Beispiel der Stadt Jülich mit einer innovativen Methode zur räumlichen Abgrenzung energetischer Quartierszellen für den Neubau von Wärmenetzen. Auf Basis von deutschlandweit verfügbaren Geodaten wird ein Ansatz zur Definition von Minimaleinheiten als Urban Energy Units (UEUs) statt der in der KWP üblichen Baublöcke präsentiert. Für das Zusammenfügen von UEUs zu Zellen werden Clustering-Algorithmen auf Basis von Straßengeometrieverknüpfungen als am vielversprechendsten identifiziert. Die Wärmenetzeignungsanalyse auf Ebene der UEUs profitiert von adressscharfen Gasverbräuchen, was bei KWP-Bestandsanalysen berücksichtigt werden sollte.

## Schlagworte

Abwärme; Energiegemeinschaften; Fernwärme; Nahwärme; Kommunale Wärmeplanung; Wärmenetze

## 1. Einleitung

Für die Wärmewende werden in den nächsten Jahren lokale Energieinfrastrukturen umfangreich transformiert und neu gebaut. Das umfasst Strom-, Gas- und insbesondere Wärmenetze. Vielerorts werden während der kommunalen Wärmeplanung (KWP) Gebiete für verschiedene erneuerbare Wärmeversorgungs-lösungen definiert.

Die Planung und Auslegung dieser Energieinfrastrukturen bewegen sich in einem Spannungsfeld räumlich unterschiedlicher Anforderungen an die Versorgung, begrenzter Potenziale für erneuerbare Energien und limitierter finanzieller Ressourcen für Investitionen. Ein zukünftiges Energiesystem muss so konzipiert werden, dass es den aktuell schon diversen und sich zukünftig verändernden Randbedingungen z. B. an Vorlauftemperaturen und Verfügbarkeit von Wärmequellen gerecht werden kann. Daher gilt es bereits in einem frühen Stadium, etwa während der KWP oder direkt daran anschließend, Gebiete für den Netzbau bzw. die -transformation zu definieren. Hier bietet sich eine lokale Gliederung in zelluläre Systeme oder energetische Quartiere an, da

- die Gebiete untereinander priorisiert,
- Investition und Risiko einzelner Projekte sowie Aufwand späterer Anpassungen reduziert und
- die Versorgung gezielt auf die Anforderungen dort vorhandener Abnehmer angepasst werden können.

Eine Herausforderung besteht jedoch darin, potenzielle Zellen im Gebäudebestand optimal zu definieren: Dieser Konferenzbeitrag beschäftigt sich am Beispiel des Stadtgebiets Jülich mit der Bildung und räumlichen Abgrenzung energetischer Quartierszellen. Ziel ist die Nutzbar-machung einer vordefinierten Wärmequelle, hier der Abwärme eines Rechenzentrums. Beleuchtet werden auch die Auswirkungen der genutzten Daten auf die Ergebnisse der räumlichen Gliederung, insbesondere einer fein aufgelösten Wärmenetzeignungsanalyse.

Eine Beschreibung des Gebiets und der Vorgehensweise für die Quartiersbildung erfolgt in drei Schritten. Schlussfolgerungen aus der Fallstudie der Stadt Jülich und die Relevanz von Datenquellen sowie Berechnungs- und Clustering-Methoden für die lokale Wärmewende werden in der Diskussion herausgearbeitet.

### Stand der Technik zur Gebietsdefinition/Clustering

Für die Transformation der Wärmeversorgung spielt aufgrund hoher Leitungsbau- und Betriebskosten die räumliche Nähe günstiger Energiequellen eine zentrale Rolle. Historisch galt dies für die Nutzung von Abwärme aus Stromerzeugung oder Industrieproduktion, heute für erneuerbare Quellen wie Biomasse. Auch Ankerkunden können die Erschließung anliegender Gebiete befördern.

Um in einer strategischen Herangehensweise kleinräumige Anforderungen zu berücksichtigen, kann Clustering helfen. Zudem ermöglicht die vorherige Abgrenzung

konkreter Versorgungsgebiete eine Effizienzsteigerung in der Optimierung von Energie- und Wärmesystemen, da sie die Modellkomplexität reduziert, jedoch wesentliche räumliche und nachfrageseitige Muster bewahrt.

Die KWP definiert in Deutschland Gebiete und Eignung für Wärmeversorgungssysteme auf Blockebene konform zum Wärmeplanungsgesetz (WPG), ermittelt die Eignung für Fernwärme aber auch über die Wärmelinien. Da die Wärmelinien (Straßen) gerade die Grenzen von Blöcken sind, **harmonisieren die Ansätze kleinräumig nicht**.

Auch Blanco et al. [1] stellen einen Mittelweg zwischen einer detaillierten gebäudeorientierten Perspektive und der zu groben Gesamtbetrachtung eines Stadtteils vor, indem das urbane Gefüge einer Stadt in sogenannte Urban Energy Units (UEUs) unterteilt und diese energetischen Siedlungstypen (16 Klassen, orientiert an Dettmar et al. [2]) zugeordnet werden. Quartiere werden mithilfe von Voronoi-Clustering mit Zentren an Niederspannungs-Transformatoren abgegrenzt. Auch hier zeigt sich in den Ergebnissen eher eine Blockstruktur.

Graphenbasierte Clustering-Methoden als weitere Möglichkeit modellieren Daten als Netzwerk aus Knoten (Datenpunkten) und Kanten (Beziehungen) und lassen Cluster durch Optimierungskriterien wie im Baukastenprinzip automatisch entstehen, ohne dass die Clusteranzahl vorab festgelegt werden muss. Sie sind flexibel, können komplexe Strukturen erfassen und benötigen wenig Benutzereingriff. In der Energiesystemanalyse wenden z. B. Simonsson et al. [3] solche Methoden an.

In allen Fällen notwendig ist eine Datengrundlage über den Gebäudebestand und ggf. eine Vorabklassifizierung in Minimaleinheiten (Blöcke, UEUs, Knoten).

Trotz vieler Forschungsarbeiten und methodischen Innovationen in der Energie- und Wärmesystemoptimierung besteht noch eine Diskrepanz zur Anwendung in realen Transformationsprojekten, insbesondere bezüglich gesetz- und fördermittelkonformer Prozesse.

## 2. Material und Methoden

Die hier vorgestellte Methodik umfasst drei Schritte:

- Klassifizierung der Stadt in Gebietstypen, Ermittlung von Minimaleinheiten („Urban Energy Units“, UEUs),
- Berechnung energetisch relevanter Parameter dieser Einheiten (z. B. Wärmenachfrage, Temperaturniveau)
- Zusammenfügen von Minimaleinheiten zu energetischen Quartierszellen

Alle Schritte, die im Folgenden vorgestellt werden, basieren auf Geodaten über das Untersuchungsgebiet. Die Zusammenstellung dieser Geodaten wird hier kurz beschrieben, für weitere Erklärungen jedoch auf die Dokumentation der jeweiligen Datenquellen verwiesen.

### Zusammenstellung grundlegender Geodaten

Voraussetzung für die Beschreibung und Gliederung des Gebäudebestands ist die Zusammenstellung einer möglichst ausführlichen Datenbasis. Diese wird für Jülich mit der auf der BauSIM 2024 vorgestellten Methodik [4] aus LoD2-3D-Gebäudemodellen, Zensus-Baujahrsdaten, der IWU-Gebäudetypologie für Wohn- [5] und Nichtwohngebäude [6], Daten aus der OpenStreetMap (OSM), Wetter-Testreferenzjahren sowie historischen Wetterdaten erstellt. Ergänzend werden den Gebäude(-teile)n höherrangige geographische Elemente zugewiesen, nämlich Adresspunkte, Flurstücke, Straßen und Baublöcke aus

offenen Landesgeodaten. Nicht immer ist eine eindeutige Zuweisung über Lagebeziehungen möglich. Die Zuordnung zu den Adressen erfolgt zusätzlich über die Lage auf den Flurstücken, die der Adressen zu den Straßen über Straßennamen und Nähe.

Auf diese Weise entstehen für alle Gebäude im Stadtgebiet einzeln berechenbare Modelle, deren Parameter in Verbrauchspunkten an den jeweiligen Adresskoordinaten gesammelt werden um die geoinformatische Verarbeitung zu vereinfachen. Die Siedlungstypen können wie bei Blanco et al. [1] klassifiziert werden.

Die Vorgehensweise lässt sich im Wesentlichen wie hier für Nordrhein-Westfalen (NRW) vorgestellt auf alle Bundesländer übertragen, auch wenn manche Basisdaten nicht öffentlich sind oder aufbereitet werden müssten.

### Definition von Minimaleinheiten/Urban Energy Units

Das Konzept der UEUs verfolgt das Ziel, für die Optimierung von Energiesystemen nicht jedes Gebäude einzeln zu betrachten, sondern zusammengehörige Gruppen zu identifizieren, für die sich aufgrund geographischer Lage und gleicher Anforderungen mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit eine gemeinsame (oder gleichermaßen dezentrale) Versorgung am besten eignet. Dies reduziert einerseits die Rechenlast beispielsweise für Optimierungsmodelle, kann aber auch für Datenschutzbelange relevant sein. Ähnlich des bei Dettmar et al. [2] gewählten Ansatzes zum Zusammenfügen von Sektionen zu Quartieren sollen hier UEUs beim Clustering bzw. einer Energiesystemoptimierung zu Zellen zusammengesetzt werden, die physisch und/oder organisatorisch die Minimaleinheit im Zielenergiesystem bilden.

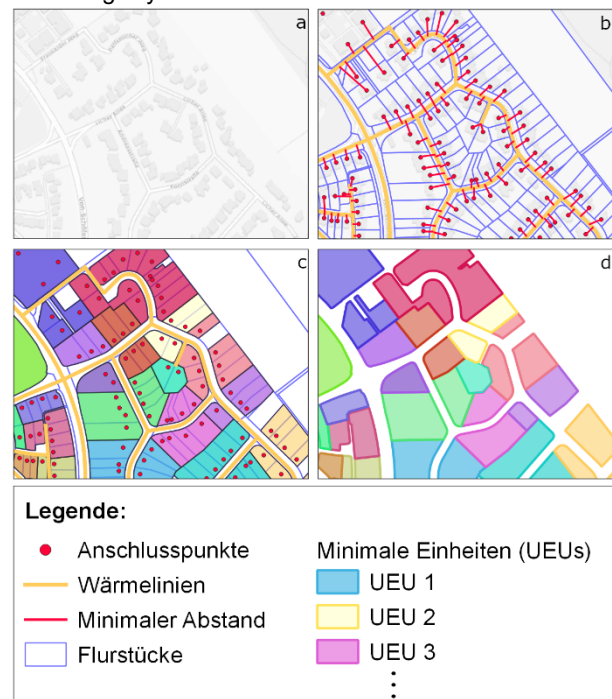


Abb. 1: Beispielhafte Darstellung anhand einer Einfamilienhaussiedlung in Jülich: Zuordnung von Anschlusspunkten zu Straßen (b), UEU-Gruppierung nach Straßenabschnitten (c) und Einfärbung der Flurstücke (d)

In diesem Beitrag wird vorgeschlagen, als UEU eine Gruppe von Verbrauchspunkten zu definieren, die demselben Straßenabschnitt und dem gleichen energetischen Quartierstyp zugeordnet sind. Abb. 1 enthält eine beispielhafte Darstellung eines Ausschnitts von

Jülich mit einer Zuordnung von Gebäuden zu Verbrauchspunkten und Straßenabschnitten. Hier umfasst eine farbliche UEU-Markierung alle Verbrauchspunkte und deren Flurstücke. An allen Straßenabschnitten kommt jeweils nur eine Nutzung vor. Nicht anwendbar ist die Vorgehensweise dort, wo unterschiedliche Quartierstypen im Wohngebäudebereich (z. B. lose Einfamilienhaus- (EFH-) und Mehrfamilienhaus-(MFH-)Bebauung, die in der Regel durch Wohnfläche pro Gebietsgröße eingeteilt wird) am selben Straßenabschnitt auftreten. Die automatische Typisierung auf Flurstücksebene ist zu ungenau, weil Flurstücke zu heterogen sind. Wurden jedoch bereits Gebäudegruppen gebildet, ist es methodisch herausfordernd, diese wieder aufzutrennen. Ersatzweise erfolgt eine gemeinsame Typisierung aller Wohngebäude an einem Straßenabschnitt. Gegenüber den in der KWP üblichen Blöcken haben die UEUs den Vorteil, dass sie von vornherein die für die spätere Infrastruktur relevanten Straßen als Grundlage nutzen.

### Berechnung energetisch relevanter Parameter

Für die weitere Verarbeitung sind mehrere Parameter auf Ebene der UEUs erforderlich. Tab. 1 zeigt eine Liste dieser Parameter und ihrer Bedeutung.

Tab. 1: UEU-Parameter und Bedeutung

Parameter	Formelzeichen	Bedeutung
Wärmebedarf (unsaniert, saniert, aktuell)	$Q_{h,std}$ $Q_{h,ret}$ $Q_{h,act}$	Nutzwärmebedarf Raumwärme und Warmwasser
Sanierungstiefe	$f_{ret}$	Mittl. Sanierungstiefe der Wohngebäude
Benötigtes Temperaturniveau	$T_{VL,std}$ $T_{VL,ret}$ $T_{VL,act}$	Benötigte Vorlauftemperatur für Raumwärme (Wohngebäude)
Lastprofil(typ)	-	Zeitliche Auflösung des Wärmebedarfs

Die Wärmebedarfe werden unter Nutzung der Gebäudehülleneigenschaften typischer sanierter bzw. unsanierter Gebäude [5] und der LOD2-3D-Geometrie angelehnt an DIN V 18599 berechnet (siehe [4]). Die aktuelle Sanierungstiefe  $f_{ret}$  lässt sich unter Nutzung des gemessenen Endenergieverbrauchs  $Q_{use}$  (zum Beispiel für Gas) aus einem Vergleich mit dem Bedarf im sanierten  $Q_{h,ret}$  und unsanierten Fall  $Q_{h,std}$ , jeweils berechnet unter Verwendung historischer Wetterdaten, abschätzen:

$$f_{ret} = \begin{cases} 0, & Q_{use} \cdot \eta_{bld} \geq Q_{h,std} \\ 1, & Q_{use} \cdot \eta_{bld} \leq Q_{h,ret} \\ \frac{Q_{h,std} - Q_{use} \cdot \eta_{bld}}{Q_{h,std} - Q_{h,ret}}, & \text{sonst} \end{cases}, \quad Gl. 1$$

Zu beachten ist:

- Endenergie und Nutzwärme sind nicht direkt vergleichbar. Die Effizienz der Heizung bei der Umwandlung von Endenergie in Erzeugernutzwärme sowie die Verteilverluste im Gebäude werden hier als Gesamteffizienz im Gebäude  $\eta_{bld}$  zusammengefasst.
- Die Gebäudeteile, auf die sich Bedarf und Verbrauch beziehen, müssen deckungsgleich sein. Das erfordert

in Einzelfällen eine Nachbearbeitung der Zuordnung.

- Alle bei der Transformation der Versorgung zu ersetzenden Endenergieträger müssen berücksichtigt werden. Während vorhandene Umwelt- oder Solarwärmenutzung die ermittelte Sanierungstiefe erhöhen und korrekterweise den zu versorgenden Bedarf verringern, können Verbräuche z. B. von Heizöl, Flüssiggas und ggf. Biomasse über zusätzliche Datenquellen wie Kehr buchdaten abgeschätzt werden, um eine vollständige Datenbasis zu erhalten.

Falls eine Ermittlung der Sanierungstiefe nicht gebäudescharf möglich ist, kann Gl. 1 auch auf Gebäudegruppen angewendet werden. In Jülich ermöglichen die von den Stadtwerken eingebrachten Verbrauchsdaten aus dem Gasnetz einen Vergleich auf Adressebene und so eine Berechnung von aktuellen Sanierungstiefen. Üblich sind in der KWP aufgrund von Datenschutzvorgaben jedoch aggregierte Verbrauchswerte. Da keine Kehr buchdaten als Datengrundlage für eine alters- oder typabhängige Heizungseffizienz vorliegen, wird pauschal  $\eta_{bld} = 0,95 \cdot 0,9 = 0,855$  angenommen.

Auch wenn individuelle Einflüsse wie Nutzungsunterschiede und Leerstand bei dieser Vorgehensweise vernachlässigt werden, entsteht eine detaillierte Beschreibung der lokalen Nachfrage, die auch als Grundlage für Prognosen des zukünftigen Wärmebedarfs im Jahr  $y$  dienen kann, wofür eine Prognose der zukünftigen Sanierungstiefe  $f_{ret,y}$  benötigt wird:

$$Q_{h,act,y} = Q_{h,std} - f_{ret,y} \cdot (Q_{h,std} - Q_{h,ret}) \quad Gl. 2$$

Das benötigte Temperaturniveau lässt sich abschätzen, wenn die jeweiligen Wärmebedarfe ins Verhältnis zur beheizten Fläche gesetzt werden. Der Lastprofiltyp kann durch Einzelsimulation der Gebäude oder über Standardlastprofile, was jeweils eine Zuordnung von Nutzungsdaten benötigt, ermittelt werden.

### Zusammensetzen von UEUs zu Quartierszellen

Für die Zusammensetzung von Zellen oder energetischen Quartieren aus mehreren UEUs können verschiedene Bewertungskriterien herangezogen werden. Hier ergibt sich die Fragestellung: Welche Kombination aus Gruppierungsmethodik und Bewertungskriterien sind am besten dazu geeignet, Cluster aus UEUs zu bilden und zu charakterisieren? Ziel der Gruppierung ist nicht die endgültige Entscheidung über den Anschluss einer Zelle an das Wärmenetz, sondern die Aufbereitung der Daten über die abgegrenzten Gebiete in einer Weise, dass sie für eine nachfolgende Optimierung des Gesamtsystems verwendbar sind. Für die weitere Beurteilung werden folgende Methoden in Betracht gezogen:

- Voronoi-Diagramme via Nähe zu Transformatoren,
- Clustering-Algorithmen, Kantengenerierung via Nähe,
- Clustering-Algorithmen, Kanten aus Straßendaten.

Kriterien für die Beurteilung sind:

- Vorteilhaftigkeit des Zusammenschließens gerade dieser UEUs, z. B. für die Erschließungspraxis,
- Schnittstellen für lokale Energiesystemoptimierung,
- Deutschlandweite Verfügbarkeit notwendiger Daten.

### 3. Ergebnisse

Die oben beschriebene Methodik wurde beispielhaft am Stadtgebiet Jülich durchgeführt, einschließlich der Bewertung von Möglichkeiten zum Clustering. Im Folgenden

werden zunächst Ergebnisse aus der Datenzusammenstellung und UEU-Bildung vorgestellt. Als Vergleichswert stehen die KWP-Basisdaten des Landes NRW [7], mit u. a. Wärmebedarfswerten für einzelne Gebäude sowie Blockdefinitionen zur Verfügung. Eine auf Blockebene ermittelte Sanierungsquote ist dort bereits in den Bedarfsdaten der einzelnen Gebäude berücksichtigt.

**Wärmebedarf**

Aus der Zuordnung der adressbezogenen Gasverbräuche des Jahres 2023 zu den Bedarfen lassen sich ausgehend von einem kumulierten Gesamtverbrauch von 227 GWh Erdgas (Endenergie) als Nutzwärmeverbräuche der Sektoren für Wohnnutzung 153,7 GWh, für öffentliche Gebäude 33,1 GWh, für Industrie 15,0 GWh und für Gewerbe, Handel und Dienstleistungen 7,4 GWh ermitteln. Die Differenz in der Summe entsteht durch  $\eta_{bld}$ , Blockheizkraftwerke, nicht lokalisierbare Verbräuche und Verbräuche außerhalb des Betrachtungsgebiets – insbesondere im Forschungszentrum Jülich, das separat untersucht wird. Die Wohngebäude erreichen nach der Definition aus Gl. 1 eine mittlere Sanierungstiefe von  $f_{ret} = 0,47$ . Dieser Wert erscheint angesichts des visuellen Sanierungszustandes in Jülich unrealistisch hoch, was darauf zurückzuführen ist, dass  $Q_{h, std}$  in Gl. 1 nicht die u. a. von Loga et al. [5, S. 80] dokumentierten tatsächlichen Verbräuche berücksichtigt, die in schlecht sanierten Gebäuden durch angepasstes Nutzungsverhalten üblicherweise deutlich unter berechneten Bedarfsdaten liegen. Wird die ermittelte Sanierungstiefe auch auf nicht gasversorgte Gebäude übertragen, ergibt sich für das gesamte Stadtgebiet ein Nutzwärmebedarf für Wohngebäude (bezogen auf das Testreferenzjahr 2015) in Höhe von 278,5 GWh. Die KWP-Daten des Landes NRW [7] weisen für dieselbe Größe 251,0 GWh aus.

Für Nichtwohngebäude wird statt Bedarfsdaten der Verbrauch genutzt, da erstere aufgrund der Nutzungsheterogenität und der Nichtverfügbarkeit von Baujahrsdaten erfahrungsgemäß ungenauer sind als bei Wohngebäuden.

**Indikatoren für die Wärmeplanung auf UEU-Ebene**

Abb. 2 zeigt die UEU im Stadtgebiet von Jülich (erstellt wie in Abb. 1 gezeigt). Diese lassen sich aufgrund ihres Bezugs zu einem Straßenabschnitt auch bzgl. ihrer Wärmenetzsignung nach KWP-Leitfaden [8] bewerten (s. Tab. 2). Diese Klassen dienen hier lediglich als Beispiel – eine pauschale Empfehlung für oder gegen ein Wärmenetz kann allein aufgrund der Wärmelinien-dichte nur bei sehr niedrigen Werten getroffen werden, da u. a. auch die Kosten potenzieller Wärmequellen – hier Abwärme aus einem Rechenzentrum – zu berücksichtigen sind.

Tab. 2: Wärmenetzsignung je nach Wärmelinien-dichte gemäß KWP-Leitfaden [8, S. 54]

Wärmelinien-dichte in $MWh\ m^{-1}\ a^{-1}$	Empfehlung zur Errichtung von Wärmenetzen
< 0,7	Kl. 1: Kein technisches Potenzial
0,7–1,5	Kl. 2: Bei Neuerschließung
1,5–2,0	Kl. 3: In bereits bebauten Gebieten
> 2,0	Kl. 4: Bei Hürden (z. B. Infrastrukturquerungen) für die Verlegung

Um die Eignung der Vorgehensweise für die Wärmeplanung zu beurteilen, d. h. inwiefern diese durch die Kombination von Bedarfs- und Verbrauchsdaten beeinflusst

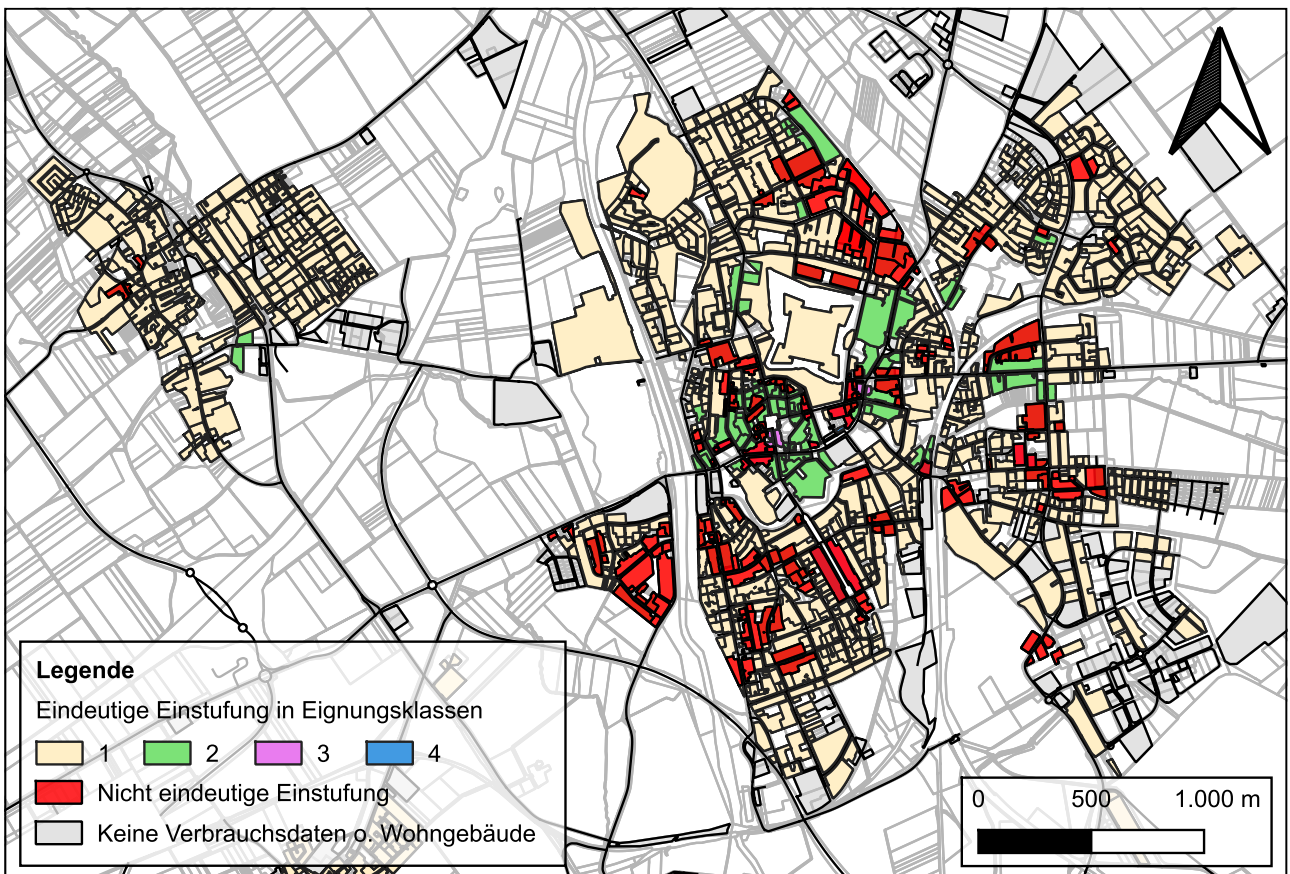


Abb. 2: Urban Energy Units im Stadtgebiet von Jülich und Einstufung in Wärmenetz-Eignungsklassen (s. 2)

wird, bietet es sich an, die Eignungsklassen auf verschiedenen Wegen zu berechnen und die Unterschiede zu analysieren. Folgende Optionen werden hier verfolgt:

1. Berechnung der UEU-Wärmelinienichte aus Bedarfsdaten des Landes NRW und
2. Berechnung der UEU-Wärmelinienichte aus mit dem Verbrauch kalibrierten Bedarfsdaten, wobei die Kalibrierung der Sanierungstiefe a) gebäudescharf, b) straßenzugsweise und c) stadtweit vorgenommen wird.

Die drei Varianten der Verbrauchskalibrierung werden genutzt, da gebäudescharfe Verbrauchsdaten wie oben beschrieben üblicherweise nicht verfügbar sind. So lässt sich hier nicht nur die Eignung der UEU-Methode, sondern auch der Einfluss der Nutzung aggregierter Verbrauchsdaten für die KWP bewerten. Um die Ergebnisse nicht durch Datenlücken oder methodische Unterschiede zu beeinflussen, werden für alle Auswertungen nur Wohngebäude mit Verbrauchswerten berücksichtigt. Enthält eine UEU auch Nichtwohngebäude oder Gebäude ohne Verbrauchswerte, wird der Bezugswert (Straßenlänge) nur anteilig berücksichtigt.

Aus dieser Berechnung ergeben sich die in Abb. 2 und Tab. 3 aufgeführten Klassifizierungen für die 1386 beurteilten UEUs im Stadtgebiet. Tab. 4 vergleicht die Eingliederungen paarweise nach Berechnungsoptionen, um zu veranschaulichen, wie viele der UEUs, die nicht von vornherein als ungeeignet erscheinen ( $> 0,5 \text{ MWh m}^{-1} \text{ a}^{-1}$ ), bei geänderter Berechnung ihre Einstufung ändern.

Tab. 3: Anzahl der den jeweiligen Eignungsklassen zugeordneten UEUs je Berechnungsoption

Option	Kl. 1	Kl. 2	Kl. 3	Kl. 4
1 (NRW-Daten)	1066	95	13	6
2a ( $f_{\text{ret}}$ pro Adresse)	1074	91	12	3
2b ( $f_{\text{ret}}$ pro Straße)	1107	64	8	1
2c ( $f_{\text{ret}}$ stadtweit)	957	206	11	6

Tab. 4: Paarweiser Vergleich abweichender Zahl von Eignungsklassenzuordnung nach Berechnungsoptionen. Prozentangaben bezogen auf Minimaleinheiten mit Wärmelinienichten von mehr als  $0,5 \text{ MWh m}^{-1} \text{ a}^{-1}$

Klasse n. → kleiner als ↓	Opt. 1	Opt. 2a	Opt. 2b	Opt. 2c
Opt. 1	-	27 19,3 %	46 32,9 %	11 7,9 %
Opt. 2a	18 12,9 %	-	34 24,3 %	2 1,4 %
Opt. 2b	8 5,7 %	3 2,1 %	-	2 1,4 %
Opt. 2c	49 35,0 %	50 35,7 %	79 56,4 %	-

Auffällig ist, dass die Kalibrierung auf Stadtebene (Option 2c) dazu führt, dass mehr UEUs in Klasse 2 einsortiert werden. Ein Grund dafür sind größere Verbraucher (wie z. B. schlecht sanierter MFH-Bestand), die den über alle Gebäude gemittelt berechneten  $f_{\text{ret}}$ -Wert auch für

lose MFH- und große EFH-Bebauung andernorts verringern, welche dadurch die Schwelle überschreiten.

Auf Straßenebene (2b) macht sich dies nicht bemerkbar. Hier treten die Unterschiede vor allem bei längeren Straßenzügen zutage, von denen einzelne Straßenabschnitte mit knapp oberhalb der Schwellwerte befindlichen Wärmelinienichten „geglättet“ werden.

Der Vergleich zwischen NRW-Daten (1) und Gebäudekalibrierung (2a) zeigt ähnliche Werte in Tab. 3, jedoch signifikante Abweichungen von  $> 10 \%$  in Tab. 4. Hier ist zu vermuten, dass die Anzahl zugewiesener Sanierungen zwar insgesamt stimmt, diese jedoch nicht unbedingt auf das richtige Gebäude innerhalb des Blocks und damit ggf. auch auf fehlerhafte Straßenabschnitte platziert werden.

#### 4. Diskussion

Die vorgestellten Ergebnisse für die Berechnung der UEU-Parameter und ihre Klassifikation werden im Folgenden diskutiert. Schlussfolgerungen daraus für die KWP sowie die Eignung von Datenquellen sowie Berechnungs- und Clustering-Methoden für die Transformation lokaler Wärmeenergiesysteme werden herausgearbeitet.

##### Zuverlässigkeit der Berechnung

Die vorgestellten Ergebnisse basieren auf einer von den NRW-Wärmeplanungsdaten unabhängigen Berechnungsweise. Lediglich Teile der Datengrundlage sind gleich. Daher wurden die berechneten Wärmebedarfswerte zunächst mit den offenen Bedarfsdaten verglichen. Sowohl für den gesamten Wärmebedarf von Wohngebäuden (278,5 zu 251,0 GWh) als auch für die Klassifizierung in Tab. 3 ergeben sich sehr ähnliche Zahlenwerte, sodass die berechneten Ergebnisse als plausibel eingestuft werden.

Gleichzeitig zeigt sich, dass die Zuverlässigkeit der Berechnung der UEU-Wärmebedarfe von der Kombination einer Modellierung auf Basis offener und öffentlicher Daten mit lokalen Daten (hier: Verbrauchsdaten vom Versorger) gegenüber der für die NRW-Daten gewählten Vorgehensweise mit teilweise aggregierten Daten profitiert. Ein Anteil von über 10 % der als grundsätzlich für Wärmenetze in Frage kommenden UEUs (mit Wärmelinienichten von über  $0,5 \text{ MWh m}^{-1} \text{ a}^{-1}$  in allen Berechnungsweisen) wurde in unterschiedliche Eignungsklassen nach Leitfadens-Wärmeplanung eingestuft.

Für die anderen beiden in Tab. 1 genannten UEU-Parameter gilt: Der Lastprofiltyp lässt sich entweder aus Versorgerdaten (sofern die zugeordneten Standardlastprofile bekannt sind) oder aus öffentlichen Daten (Funktionen im Kataster, OpenStreetMap) erschließen. Für Vorlauftemperaturen, die aus spezifischen Wärmebedarfen erschlossen werden können, müssen Bedarfe mit in der Regel nur aus Geodaten berechenbaren Nutzflächen kombiniert werden. Auch hier ist eine Kombination aus Geo- und Energiedaten folglich geboten.

##### Rückschlüsse auf Wärmeplanungsdaten

All dies führt zu der Erkenntnis, dass eine wo möglich **adressscharfe** (sofern nach WPG erlaubt, d. h. für Nichtwohngebäude und Verbraucher  $> 50 \text{ MWh a}^{-1}$  [9]) **und ansonsten nur auf Blockseiten aggregierte** Übergabe von **Verbrauchsdaten für genaue Ergebnisse in der KWP unverzichtbar** ist. Außerdem muss klar bekannt sein, an welchen Adressen überhaupt Verbräuche vorliegen. Dass dies in der Praxis oft nicht erfolgt

(Aggregationen auf große Hausnummernbereiche sind erfahrungsgemäß die Regel), schränkt die Eignung von KWP-Ergebnissen für Folgeschritte wie Machbarkeitsstudien für Wärmenetze oder die Identifikation von Engstellen im Stromnetz durch neue Wärmepumpen unnötig ein.

### Clustering-Kriterien

Im Zuge der Optimierung des Gesamtsystems werden die Minimaleinheiten zu Zellen zusammengefügt. Als mögliche Methoden dafür werden wie oben genannt

- Voronoi-Diagramme via Nähe zu Transformatoren,
- Clustering-Algorithmen, Kantengenerierung via Nähe,
- Clustering-Algorithmen, Kanten aus Straßendaten

untersucht. Kriterien für die Beurteilung sind:

- Vorteilhaftigkeit des Zusammenschließens gerade dieser UEUs, z. B. für die Erschließungspraxis,
- Schnittstellen für lokale Energiesystemoptimierung,
- Deutschlandweite Verfügbarkeit notwendiger Daten.

Die Erfüllung der Kriterien zeigt Tab. 5. Transformatorbezogene Voronoi-Diagramme sind zwar für die Sektorkopplung in der Energiesystemoptimierung praktisch, da jedoch eine vorhandene Niederspannungs-Transformator-Region nicht notwendigerweise einer Wärmenetzzele entspricht, ist die Erschließungspraxis nicht gegeben. Zudem fehlen deutschlandweite Daten. Die anderen beiden Methoden erfüllen die Kriterien im Mittel gleichermaßen gut. Für die Energiesystemoptimierung sind in beiden Fällen Anpassungen notwendig, da die Sektorkopplung bei ungleicher Zellgröße komplizierter zu händeln ist. Während das straßenorientierte Clustering für die Erschließungspraxis besser geeignet ist, wird es in manchen Bundesländern (z. B. Niedersachsen, Bayern) durch fehlende offene Adresspunktdaten erschwert, die für ein nähebasiertes Clustering nicht zwingend notwendig sind. Jedoch können Adressdaten bundesweit erworben werden, sodass dieser Aspekt als weniger wichtig eingeschätzt wird.

Tab. 5: Erfüllung der Bewertungskriterien für drei Clustering-Methoden

Kriterium ↓ Methode →	a	b	c
1	-	(x)	x
2	x	(x)	(x)
3	-	x	(x)

Schlussfolgernd erscheint ein Clustering der UEUs auf Basis von Straßengeometrie-Verknüpfungen am vielversprechendsten und wird für die nächsten Projektschritte prioritär verfolgt.

## 5. Zusammenfassung

Der notwendige umfangreiche Umbau der lokalen Energieinfrastruktur für die Wärmewende, insbesondere für Wärmenetze, erfordert eine zielgerichtete und optimierte Allokation von Investitionsmitteln. Ein zellulärer Aufbau kann ein Weg sein, um vielfältige und veränderliche Versorgungsanforderungen effizient zu erfüllen. Dessen Zellen lassen sich bereits frühzeitig während der kommunalen Wärmeplanung (KWP) definieren. In diesem Beitrag wurde am Beispiel der Stadt Jülich eine Methodik zur effizienten Aufbereitung vielfältiger Gebietsdaten und der darauf aufbauenden Definition von Minimaleinheiten bzw. Urban Energy Units (UEUs) vorgestellt. Die Ergebnisse zeigen, dass die Zuverlässigkeit der Berechnung der

UEU-Parameter von der Kombination einer Modellierung auf Basis offener und öffentlicher Daten mit nicht-öffentlichen Messdaten (insb. Verbrauchsdaten vom Versorger) profitiert. Dies lässt auch Rückschlüsse auf die Datenaufbereitung für die KWP zu, deren Ergebnisse durch die aktuell vorherrschende zu starke Aggregation von Verbrauchsdaten nur eingeschränkt weiterverwendbar sind. Für die an die UEU-Definition anschließende Zellbildung wurden verschiedene Wege bewertet. Clustering auf Basis von Straßengeometriedaten wurde als am besten geeignet identifiziert, um Eingangsdaten für die nachfolgende Energiesystemoptimierung zu liefern.

## Danksagung

Die Autoren danken den Stadtwerken Jülich für die Zusammenarbeit und die Bereitstellung der Verbrauchsdaten sowie dem Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWE) für die Förderung im Rahmen des Forschungsprojekts PreJuCells (FKZ 03EN3113B).

## Literatur

- [1] L. Blanco, A. Alhamwi, B. Schiricke und B. Hoffschmidt, „Data-driven classification of Urban Energy Units for district-level heating and electricity demand analysis,“ *Sustainable Cities and Society*, Jg. 101, S. 105075, 2024, doi: 10.1016/j.scs.2023.105075.
- [2] J. Dettmar, C. Drebes und S. Sieber, Hg. *Energetische Stadtraumtypen: Strukturelle und energetische Kennwerte von Stadträumen*, 2. Aufl. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2020.
- [3] J. Simonsson, K. T. Atta und W. Birk, „Reduced-Order Modeling of Thermal Dynamics in District Energy Networks using Spectral Clustering,“ in *2022 IEEE Conference on Control Technology and Applications (CCTA)*, Trieste, Italy, 2022, S. 144–150, doi: 10.1109/CCTA49430.2022.9965996.
- [4] L. Blanco, P. Groesdonk, J. Estevam Schmiedt und B. Hoffschmidt, „Automated Generation of Building Stock Databases and High-Resolution Heat Load Profiles for Districts and Municipalities in Germany,“ 2024, doi: 10.34726/7587.
- [5] T. Loga, B. Stein, N. Diefenbach und R. Born, *Deutsche Wohngebäudetypologie: Beispielhafte Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von typischen Wohngebäuden*, 2. Aufl. Darmstadt: IWU, 2015.
- [6] Michael Hörner und Julian Bischof, „Typologie der Nichtwohngebäude in Deutschland - Methodik, Anwendung und Ausblick,“ 2022, doi: 10.13140/RG.2.2.31628.80008.
- [7] Landesbetrieb Information und Technik Nordrhein-Westfalen. „Daten kommunale Wärmeplanung.“ Zugriff am: 10. Juli 2025. [Online.] Verfügbar unter: [https://www.opengeodata.nrw.de/produkte/umwelt\\_klima/energie/kwp/](https://www.opengeodata.nrw.de/produkte/umwelt_klima/energie/kwp/)
- [8] S. Ortner et al., „Leitfaden Wärmeplanung: Empfehlungen zur methodischen Vorgehensweise für Kommunen und andere Planungsverantwortliche,“ Heidelberg, Freiburg, Stuttgart, Berlin, 2024.
- [9] A. Bartsch und J. Voigt, „Rechtsgutachten zur Datenaggregation nach dem Gesetz für die Wärmeplanung und zur Dekarbonisierung der Wärmenetze (WPG),“ dena, Berlin, 2025.

# Definition typischer sanierter niedersächsischer Wohngebäude als Basis für die dynamische Gebäudesimulation – Niedersächsisches Mehrfamilienhaus

Tanja MEHRING<sup>1\*</sup>, Felix KLEFF<sup>1</sup>, Abdulraheem SALAYMEH<sup>2</sup>, Stefan HOLLER<sup>2</sup>, Sebastian FÖSTE<sup>1</sup>, Erik BERTRAM<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Hochschule für angewandte Wissenschaft und Kunst Hildesheim/Holzminde/Göttingen, Billerbeck 2, 37603 Holzminde

<sup>2</sup> Hochschule für angewandte Wissenschaft und Kunst Hildesheim/Holzminde/Göttingen, Rudolf-Diesel-Straße 12, 37075 Göttingen

\* tanja.mehring@hawk.de

---

## Kurzfassung

Mit der in der Wissenschaft etablierten Referenzhausmethode wird ein für Niedersachsen charakteristisches Wohngebäudemodell für Mehrfamilienhäuser (MFH), der sogenannte Archetyp MFH, entwickelt. Dieser kombiniert sowohl den Gebäudebestand, als auch die aktuellen Sanierungsvorgaben für den klimaneutralen Zielzustand 2040 miteinander. Der Archetyp MFH wird als Basis für die dynamische Gebäudesimulation verwendet, um die Auswirkungen verschiedener Parameter auf den Wärmebedarf und die Systemtemperaturen zu untersuchen und somit die Grundlage für die Erstellung von Temperatur- und Wärmekatastern bilden. Zudem werden für jeden Archetyp frei zugängliche digitale Gebäudemodelle im IFC-Format sowie entsprechende Dokumentationen erstellt, um die Nutzbarkeit in Planungs- und Simulationsprozessen zu ermöglichen.

## Schlagworte

Energetische Gebäudesanierung; Niedersächsischer Archetyp Mehrfamilienhaus; Niedersächsischer Wohngebäudebestand; Referenzmethode; Wärmeversorgung

---

## 1. Einleitung

Die Erreichung der klimawandelbedingten Klimaschutzziele setzt laut Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG) [1] Netto-Treibhausgasneutralität in allen Sektoren bis spätestens 2045 voraus. Gemäß KSG erfordert eine zielgerichtete und effiziente Umsetzung der Klimaschutzziele eine priorisierte Emissionsminderung in jenen Sektoren mit dem größten Einsparpotenzial. Haushalte tragen mit etwa 28 % zum jährlichen Endenergieverbrauch in Deutschland bei, was ungefähr 632 TWh entspricht. Davon entfallen etwa 70 % auf die Bereitstellung von Raumwärme [2]. Folglich können die Haushalte einen erheblichen Beitrag zur Erreichung der angestrebten Klimaneutralität leisten.

Die lange Lebensdauer bestehender Gebäude [3], der erhebliche Sanierungsbedarf sowie der Fachkräftemangel [4], insbesondere im ingenieurwissenschaftlichen Bereich, bedingen akuten Handlungsbedarf zur Entwicklung effektiver Strategien und Methoden mit dem Ziel, die Energieeffizienz zu verbessern, die CO<sub>2</sub>-Emissionen zu senken und die Klimaanpassung sicherzustellen.

In diesem Zusammenhang werden für Niedersachsen repräsentative Wohngebäudemodelle, die sog. „Archetyphen“, definiert, die den derzeitigen Gebäudebestand mit den geltenden niedersächsischen Sanierungszielen [5]

kombinieren. Dieser Ansatz basiert auf der in der Wissenschaft etablierten Referenzhausmethode, die detaillierte, instationäre thermische Simulationen sowie die Bewertung und den Vergleich von Komponenten, Bauteilen, Energieversorgungssystemen und Sanierungsstrategien ermöglicht [6], [7].

Während klassische Referenzhäuser eine großflächige Abbildung unterschiedlicher Regionen bspw. Mitteleuropa mit variierenden Dämmstandards (z. B. saniert/ unsaniert) darstellen und auf aktuellen Bauvorschriften, Querschnittsstudien oder Annahmen beruhen [7], [8], sollen die entwickelten Archetyphen die spezifischen regionalen Gegebenheiten Niedersachsens abbilden, aktuelle und zukünftige Anforderungen vorwegnehmen und somit ein Modell zur Verfügung stellen, das die Planung lokaler Sanierungsstrategien gezielt und nachhaltig unterstützen kann.

Mit dem Ziel, sowohl Wärmebedarfe als auch Systemtemperaturen differenziert nach Gebäudetypen, gebäudescharf in das niedersächsische Kataster zu integrieren, wird für die Gebäudetypen Einfamilienhaus (EFH), Mehrfamilienhaus (MFH) und Reihenhaus (RH) jeweils ein repräsentatives niedersächsisches Modell entwickelt. Auf diese werden drei in der Baupraxis etablierte energetische Standards als zukünftige Sanierungszustände angewandt und simuliert. Als Sanierungsziele werden das

Gebäudeenergiegesetz (GEG), der Effizienzhaus-55-Standard (EH 55) und der Passivhaus-Standard (PH) festgelegt. Die repräsentativen Wohngebäudemodelle werden auf Grundlage von Schwerpunkt-Analysen der Gebäude- und Wohnungszählung „Zensus 2022“ [3] anhand der dominanten BAK und durchschnittlichen Wohnflächen abgeleitet. Die Festlegung der Archetyp-Bauformen erfolgt anhand der Deutschen Wohngebäudetypologie [9], wobei die dominante Baualtersklasse (BAK) in Verbindung mit regionsspezifischen Merkmalen berücksichtigt wird. Diese Methodik ist grundsätzlich auf andere Regionen übertragbar, um lokale Gegebenheiten differenziert bzw. detaillierter abzubilden.

Die Archetypen dienen der Durchführung simulationsgestützter Analysen der Heizlasten, Energiebedarfe sowie der Vor- und Rücklauftemperaturen, um charakteristische Werte für den sanierten, klimaneutralen Gebäudebestand zu ermitteln. Mit dieser Grundlage lassen sich anschließend Temperatur- und Wärmekatastern auf Basis von GIS-Daten für zukünftige Gebäudebestände ableiten.

Für jeden Archetyp werden öffentlich zugängliche digitale Gebäudemodelle im IFC-Format sowie begleitende Dokumentationen erstellt, um eine flexible Nutzung in Berechnungs- und Simulationswerkzeugen für die Sanierung von Gebäuden und Anlagen zu ermöglichen.

Die vorliegende Arbeit definiert den Archetyp MFH anhand der Gebäudekubatur, der energetischen Qualität der Gebäudehülle und der internen Lasten, wobei Parameter und Randbedingungen festgelegt werden.

### Kubatur

Im Verlauf der baulichen Entwicklung haben sich Baustile, Bauweisen und Anforderungen an Gebäude verändert [10], sodass die BAK als Indikator für charakteristische Volumen- und Struktureigenschaften herangezogen werden kann. Zur Festlegung der Gebäudekubatur des Archetyps MFH wurden die dominante BAK innerhalb der Kategorie MFH sowie die dazugehörige durchschnittliche Wohnfläche auf Basis der Gebäude- und Wohnungszählung „Zensus 2022“ [3] ermittelt. Dabei beschreibt die dominante BAK jene mit dem höchsten jährlichen Zuwachs an Gebäuden. Zur Reduktion von statistischen Ausreißern wurden die obersten und untersten 10 % der MFH, gemessen an der mittleren Wohnfläche, ausgeschlossen.

Die sich daraus ergebende BAK 1949 – 1978 (Mikrozealous-Klasse) wird auf den Archetyp MFH angewandt und mit einer für die BAK typischen Bauform kombiniert. Abweichend von der mittleren Wohnfläche von 500 m<sup>2</sup> (Mittelwert der IWU-Referenzgebäude MFH\_D und MFH\_F) wird eine Gesamtwohnfläche von 600 m<sup>2</sup> angenommen, gleichmäßig verteilt auf drei Vollgeschosse und sechs Wohneinheiten. Diese Annahme gewährleistet eine flexible Anpassung der Anzahl und Größe der Wohneinheiten. Die Kubatur des Archetyps MFH basiert auf einer Kombination des Referenzgebäudes „MFH\_F“ aus der Deutschen Wohngebäudetypologie des Instituts für Wohnen und Umwelt (IWU) [9], [11] sowie auf eigenen Einschätzungen für die regionalen Gegebenheiten Niedersachsens. Der Archetyp MFH zeichnet sich durch einen dreigeschossigen, quaderförmigen Baukörper mit vollständiger Unterkellerung und Flachdach aus (s. Abb. 1 und Abb. 2).

Es wird angenommen, dass der Archetyp MFH eine Ost-West-Ausrichtung besitzt, mit einer Abweichung von 90° von der Nordrichtung, bezogen auf die Längsseiten. Die Grundrisse orientieren sich an exemplarischen MFH mit

vergleichbarer Kubatur und Fläche (s. Abb. 3).

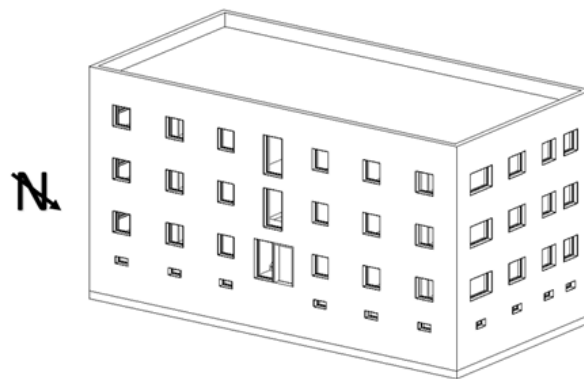


Abb. 1: Gebäudeansicht der Nord- und Ostfassade des niedersächsischen Archetyps MFH

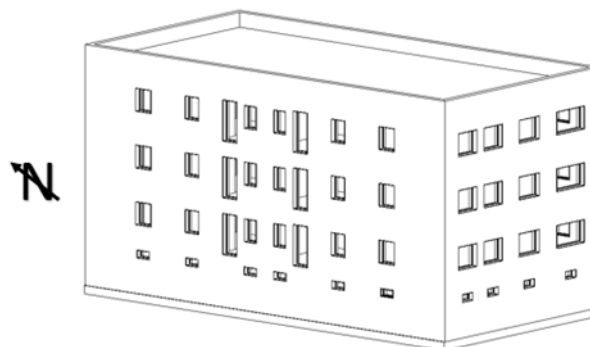


Abb. 2: Gebäudeansicht der Süd- und Westfassade des niedersächsischen Archetyps MFH

### Struktur und Grundrissgestaltung

Der Archetyp MFH ist als Zwei-Spanner über drei Vollgeschosse für die sechs Wohneinheiten konzipiert worden. Der Zugang zum Gebäude erfolgt über die nach Osten ausgerichtete Hauseingangstür. Die einzelnen Wohneinheiten sowie das gemeinsam genutzte Kellergeschoss sind durch ein ebenfalls nach Osten ausgerichtetes Treppenhaus miteinander verbunden. Jede Wohneinheit verfügt einheitlich über eine Wohnfläche von 100 m<sup>2</sup>, die jeweils auf neun Räume verteilt ist. Die Tab. 1 zeigt die flächenmäßige Verteilung der Wohnfläche auf die einzelnen Räume innerhalb einer Wohneinheit.

Tab. 1: Übersicht der Raumnutzungen und -flächen in m<sup>2</sup> (NGF) innerhalb einer Wohneinheit im AT MFH

Raum/Nutzung	Netto-Grundfläche (NGF) in m <sup>2</sup>
Abstellen	7
Arbeiten	10
Bad	8
Essen	12
Flur	10
Kind	12
Kochen	14
Schlafen	13
Wohnen	14
Gesamt	100

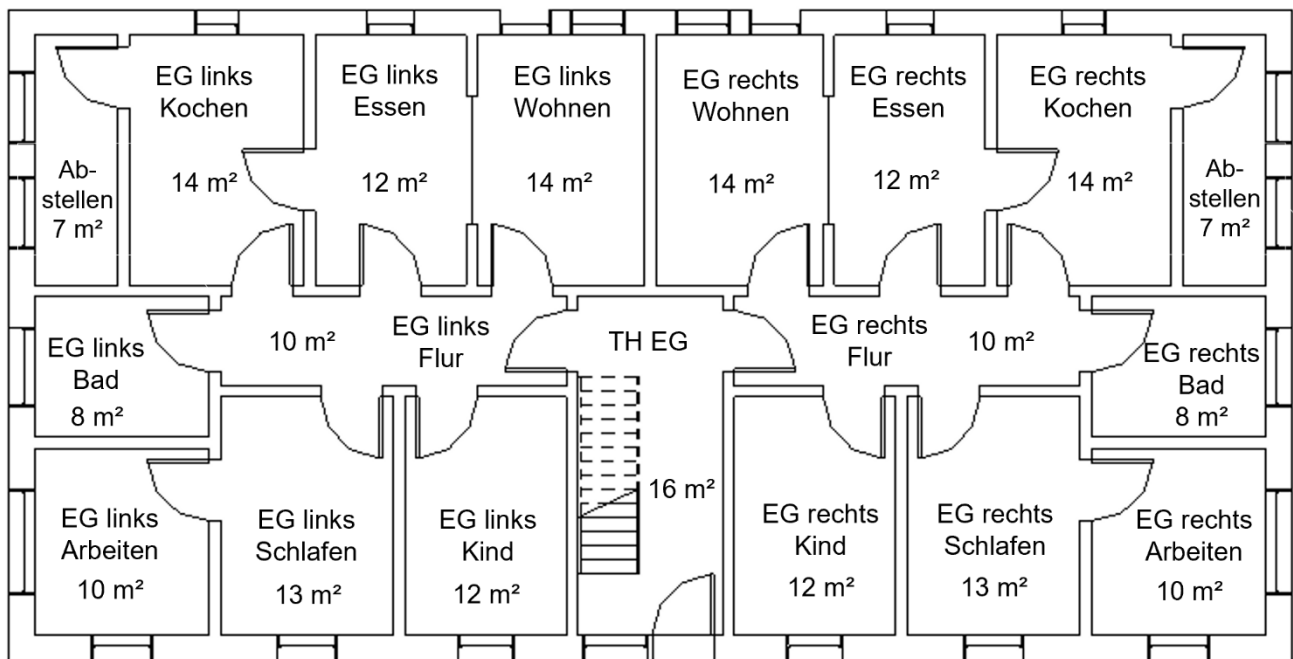


Abb. 3: Grundriss Erdgeschoss des Archetyps MFH

**Bauteile der Gebäudehülle**

Die Anforderungen an die Wärmedurchgangskoeffizienten der Außenbauteile werden anhand der ausgewählten Effizienzstandards – GEG [12], EH 55 [13] und PH [14] – spezifiziert und als bauteilbezogene Parameter festgesetzt. In diesem Zusammenhang werden Wärmebrücken in der Bewertung außer Acht gelassen. Die Referenzwerte des EH 55-Standards entsprechen den Grenzwerten, die als alternativer Nachweis bezüglich des spezifischen Transmissionswärmeverlusts ( $H_{tr}$ ) und des Jahresprimärenergiebedarfs ( $Q_P$ ) herangezogen werden können, um die Erfüllung des Effizienzstandards zu belegen [13]. Die Anforderungswerte der Effizienzstandards fasst Tab. 2 zusammen.

Ausgehend von den in Tab. 2 definierten Zielwerten und den typischerweise im Bestand vorhandenen Bauteilen wurden Aufbauten für die Sanierungsmaßnahmen abgeleitet. Dabei handelt es sich um Konstruktionen in massiver Bauweise, die den thermischen Mindestanforderungen des jeweiligen Effizienzstandards entsprechen.

Tab. 2: Mindestanforderungen an die Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Werte) der Außenbauteile entsprechend der Effizienzstandards GEG, EH 55 und PH

Bauteil	U-Wert in (W/m²K)		
	GEG	EH 55	PH
Außenwand	0,24	0,20	0,15
Kellerwand	0,30	0,25	0,15
Dach	0,24	0,14	0,15
Kellerboden	0,50	0,25	0,15
Oberste Geschossdecke	0,24	0,14	0,15
Kellerdecke	0,30	0,25	0,15
Hauseingangstür	1,80	1,30	0,80

**Fenster**

In Anlehnung an die Deutsche Wohngebäudetypologie und die Referenzgebäudemodelle für Mehrfamilienhäuser der BAK 1949 – 1978 erfolgt die Festlegung der Fensterflächen auf Grundlage des arithmetischen Mittels sowie deren Zuordnung zu den jeweiligen Fassadenflächen [9]. Diese sind der Tab. 3 zu entnehmen.

Abb. 1 und Abb. 2 zeigen mit einer vereinfachten Gebäudeansicht die Anordnung der Fenster. Da der Archetyp ein voll saniertes Repräsentanzmodell darstellt, wird unterstellt, dass die Bestandsfenster ausgetauscht und entsprechend den in der Einleitung definierten Mindestanforderungen der jeweiligen Effizienzstandards ausgeführt wurden. Der Rahmenanteil der Fenster beträgt dabei einheitlich 15 %.

Tab. 3: Fenster- und Verglasungsflächen in m<sup>2</sup>, opake und gesamte Wandinnenflächen in m<sup>2</sup> sowie der auf die opake Wandinnenfläche bezogene Fensterflächenanteil in % je nach Orientierung nach Nord, Ost, Süd und West

	Fensterfläche in m <sup>2</sup>	Verglasungsfläche in m <sup>2</sup>	Opake Wandinnen- fläche in m <sup>2</sup>	Ges. Wandinnen- fläche in m <sup>2</sup>	Fensterflächen- anteil in %
<b>Nord</b>	25,46	20,11	60,34	80,45	33
<b>Ost</b>	37,11	29,32	131,17	160,49	22
<b>Süd</b>	28,16	22,25	58,20	80,45	38
<b>West</b>	37,11	29,32	131,17	160,49	22
<b>gesamt</b>	127,84	101,00	380,88	481,88	27

### Infiltration und mechanische Lüftung

Auf Grundlage des Niedersächsischen Sanierungsleitfadens [5] werden, unter dem Aspekt der Energieeffizienz, als mindestens erforderliche Maßnahmen zur Ertüchtigung eines Bestandsgebäudes, die Sanierung der Gebäudehülle sowie die Optimierung der Belüftung und Anlagentechnik auf den AT MFH angewandt. Die im Folgenden dargestellten Annahmen zur Optimierung beziehen sich auf die für den jeweiligen Effizienzstandard definierten Anforderungen.

Bezugnehmend auf den § 26 des Gebäudeenergiegesetzes wird für den GEG-Standard ohne raumlufttechnische Anlagen die Luftdichtheit der Gebäudehülle mit einem Wert von  $n_{50} \leq 2,0 \text{ h}^{-1}$  [15] festgelegt. Für das EH 55 mit mechanischer Lüftung gilt eine Luftwechselrate von  $n_{50} \leq 1,5 \text{ h}^{-1}$  [13]. Im Rahmen des PH-Standards sind eine mechanische Lüftung mit Wärmerückgewinnung sowie ein Luftdichtheitskennwert von  $n_{50} \leq 0,6 \text{ h}^{-1}$  [14] vorgeschrieben.

Für den gesetzlichen Mindeststandard gemäß GEG wird ein konstanter Infiltrationsluftwechsel von  $0,3 \text{ h}^{-1}$  infolge baulicher Undichtigkeiten in den Außenbauteilen angenommen. Im Vergleich dazu werden für das EH 55 und PH mit einem Infiltrationsluftwechsel von jeweils  $0,15 \text{ h}^{-1}$  strengere Anforderungen berücksichtigt [13], [14].

Bei den Effizienzstandards EH 55 und PH wird jeweils eine zentrale Lüftungsanlage zur Be- und Entlüftung des jeweiligen Archetyps eingesetzt. Das Wohngebäude wird bei einem reduzierten Luftwechsel von  $0,55 \text{ h}^{-1}$  (einschließlich des Infiltrationsluftwechsels) mit Zuluft versorgt, wobei CO<sub>2</sub>, Feuchtigkeit und Gerüche abgeführt werden. Die Anlage ist mit einer Wärmerückgewinnung ausgestattet, die einen Wärmebereitstellungsgrad von 80 % aufweist [13], [14]. Eine Abschaltung der Lüftungsanlage im Tagesverlauf oder eine Anpassung des Betriebsmodus werden in der Betrachtung zunächst nicht berücksichtigt.

Weiterhin wird angenommen, dass für alle Effizienzstandards zweimal täglich (um 06:00 Uhr und 21:30 Uhr) eine Stoßlüftung durchgeführt wird, bei der jeweils ein Fenster pro Fassadenfläche und Wohneinheit geöffnet wird. Die Umsetzung der Fenster-Stoßlüftung erfolgt ungeachtet des Vorhandenseins bzw. Nutzung einer mechanischen Lüftungsanlage, um ein realitätsnahes Nutzerverhalten abzubilden.

Eine freie nächtliche Lüftung findet zur passiven Kühlung des Gebäudes ebenfalls für alle Effizienzstandards Berücksichtigung. Diese wird durch eine Querlüftung realisiert, indem in jedem Geschoss jeweils ein Fensterflügel

pro Fassadenseite gekippt wird, sofern die folgenden Konditionen erfüllt sind:

1. Zeiträumen: 21:00 Uhr bis 08:00 Uhr
2. Mittlere Außentemperatur der vergangenen 24 Std. > 12 °C
3. Zonentemperatur über 24 °C
4. Umgebungstemperatur mindestens 2 °C unterhalb der aktuellen Zonentemperatur

### Randbedingungen – Interne Lasten

Es werden für alle Effizienzstandards einheitlich folgende interne Lasten festgelegt:

Personenbelegung: Ausgehend von einer mittleren Anzahl von gerundet zwei Bewohnenden pro Wohneinheit eines Niedersächsisches Mehrfamilienhaus (Ermittlung auf Basis der Zensus 2022; Mittelwert für die BAK 1949 – 1978) werden die pauschalen täglichen Anwesenheits- und Abwesenheitszeiten mittels eines Zeitprofils (s. Abb. 4) definiert. Als Grundlage für dieses Zeitprofil dient die Erhebung zur Zeitverwendung privater Haushalte des Statistischen Bundesamtes (DESTATIS) [16], die mittlere tägliche Zeitaufwände enthält, differenziert nach verschiedenen Tätigkeiten. Zur Ableitung der An- und Abwesenheiten der Bewohnenden wird angenommen, dass die Tätigkeiten „Persönlicher Bereich“, „Physiologische Regeneration“, „Haushaltsführung“ und „Betreuung der Familie“ und „Mediennutzung“ ausschließlich zu Hause ausgeübt werden. Längere Abwesenheitszeiten der Bewohnenden, bspw. infolge von Urlaubsaufenthalten, werden in der vorliegenden Analyse zunächst nicht berücksichtigt.

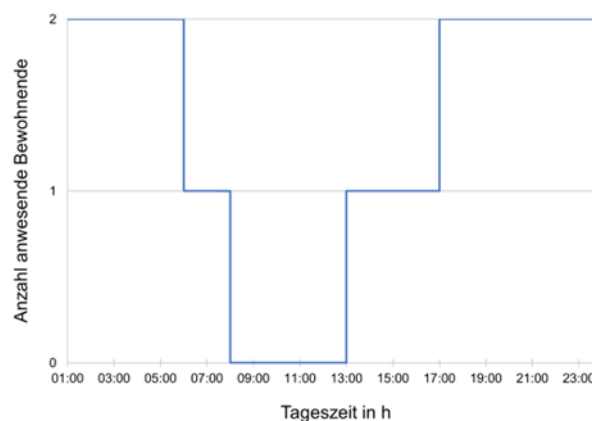


Abb. 4: Anzahl der im Tagesverlauf im Archetyp MFH anwesenden Bewohnenden abgeleitet aus der Erhebung zur Zeitverwendung privater Haushalte 2022 des Statistischen Bundesamtes

Der Eintrag sensibler und latenter Wärme in die Zone sowie die CO<sub>2</sub>-Produktion durch Personen sind gemäß ASHRAE [17] abhängig von Art und Umfang der Bekleidung (CLO) und dem Aktivitätslevel (MET) der Personen.

Für die Abschätzung der von den Hausbewohnenden abgegebenen Wärme wird angenommen, dass sie eine mittlere Aktivität aus sitzender und stehender Tätigkeit ausüben und dass Art und Umfang ihrer Bekleidung ebenfalls im Durchschnitt liegen. Daraus ergibt sich für eine durchschnittliche Körperoberfläche von 1,8 m<sup>2</sup> eines Erwachsenen eine gesamte entstehende Wärmeleistung von 115,5 W. Pro Wohneinheit beträgt die thermische Leistung bei Anwesenheit beider Bewohnenden folglich 231 W.

**Elektrische Geräte:** Auf Grundlage des Standardlastprofils für den Tagesgang des Haushaltsstromverbrauchs des Bundesverbands der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. wird ein repräsentatives Profil für den Niedersächsischen Archetypen MFH erstellt. Dieses Profil ist an einen durchschnittlichen Jahresverbrauch von 1.900 kWh pro Jahr für einen Haushalt mit zwei Personen angepasst [18]. Es umfasst mittlere stündliche Leistungswerte, die nach Jahreszeiten und Kalendertagen differenziert sind.

**Beleuchtung:** Ausgehend von einer zeitgemäßen, stromsparenden Beleuchtungsanlage mit LED-Leuchtmitteln wird eine spezifische Wärmeleistung von 4 W/m<sup>2</sup> festgelegt [19], um den vollständig sanierten Zielzustand des Referenzgebäudes angemessen abzubilden. Der Betrieb wird in Abhängigkeit von der Belegung und den Zonen-Sollwerten über ein Zeitprofil im Gebäudesimulationsmodell umgesetzt. Die Regelungswertwerte für die Beleuchtungsstärke orientieren sich mit 75 lx (Minimum) und 300 lx (Maximum) an einem energieeffizienten und -suffizienten Betrieb gemäß einer Studie des Instituts für Energie- und Umweltforschung Heidelberg (ifeu) [20].

## 2. Simulierte Vorlauftemperaturen im Jahresverlauf

Für den Archetyp MFH wurden umfangreiche dynamische Gebäudesimulationen mit der Software IDA ICE unter Einsatz von Mehrzonenmodellen durchgeführt, wobei jeweils eine Zone pro Wohneinheit sowie separate Zonen für das unbeheizte Treppenhaus und den unbeheizten

Keller berücksichtigt wurden. Die Simulationen erfolgten für den Standort Celle mit zukünftigen Wetterdaten (TRY 2045) und berücksichtigen ausschließlich die festgelegten Sanierungszustände, ohne einen Austausch der Bestandsheizkörper einzubeziehen.

Die in Abb. 5 dargestellte Heatmap veranschaulicht die simulierten stündlichen Vorlauftemperaturen im Jahresverlauf anhand der nebenstehenden Farbskala sowie die maximal erforderlichen Vorlauftemperaturen für die kälteste im Jahresverlauf auftretende Stunde, sowohl für den Archetypen im Bestand, als auch die festgelegten Sanierungszustände unter zukünftigen Wetterbedingungen. Die dargestellten Vorlauftemperaturen beziehen sich ausschließlich auf die Versorgung der Heizkörper und berücksichtigen nicht die Trinkwarmwasserbereitung. Die Auslegungsvorlauftemperatur beträgt 70 °C. Basierend auf aktuellen Wetterdaten ergaben die Simulationsergebnisse des Bestandsgebäudes eine Vorlauftemperatur von 56,6 °C. Diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass klimatische Änderungen gegenüber den heutigen Bedingungen eine Reduktion der maximal erforderlichen Vorlauftemperatur um etwa 1 K im laufenden Betrieb erwarten lassen.

Die Ergebnisse aus Abb. 5 zeigen die Reduktion der Vorlauftemperaturen infolge von durchgeführten energetischen Sanierungsmaßnahmen: Während im unsanierten Bestand noch eine maximale Vorlauftemperatur von 55,6 °C erforderlich ist, sinkt diese im GEG-Sanierungsstandard auf 45,2 °C und bei weitergehenden Sanierungszuständen (EH 55 und PH) auf 42,2 °C und 41,6 °C. Die energetische Sanierung des Gebäudes zwischen GEG und Passivhaus wirkt sich direkt mit einer signifikanten Absenkung der maximal benötigten Vorlauftemperaturen von 10,4 – 14 K aus.

Die Ergebnisse ermöglichen mit dem Archetyp sowohl die Abschätzung von Sanierungspotenzialen, als auch die Bestimmung erreichbarer Vorlauftemperaturen z. B. als zentrale Grundlage für die kommunale Wärmeplanung. Gleichzeitig erlaubt das Modell das Ableiten vieler weiterer Grundsätzlicher Aussagen z. B. zur Bewertung von Bauteilen, Regelungsstrategien oder die Abschätzung von Emissionsreduktionen, wodurch Maßnahmen gezielt auf die Erreichung der Klimaschutzziele ausgerichtet werden können.

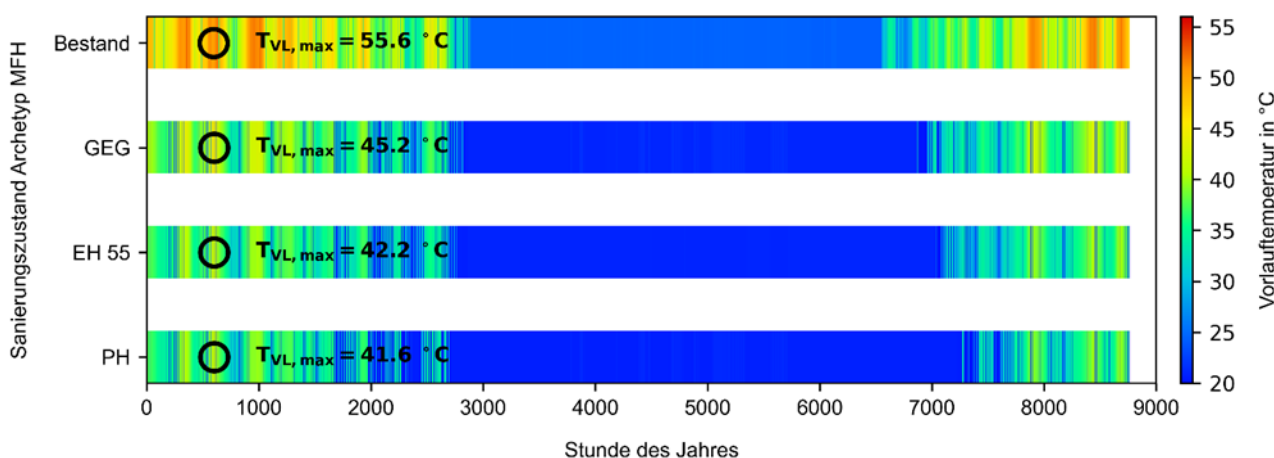


Abb. 5: Stündliche Heizkörper-Vorlauftemperaturen im Jahresgang für den AT MFH: Vergleich von Bestandsgebäude und energetischen Sanierungszuständen (GEG, EH 55, PH; ohne HK-Tausch)

### 3. Zusammenfassung und Ausblick

Der vorgestellte Archetyp MFH ist ein repräsentatives und flexibel einsetzbares Referenzgebäudemodell für niedersächsische MFH und ermöglicht die realistische Abbildung zukünftiger Sanierungszustände. Mit dem Modell lassen sich Sanierungspotenziale bewerten und Vorlauftemperaturen realistisch prognostizieren, sodass dieser bspw. eine belastbare Grundlage für die kommunale Wärmeplanung bietet. Darüber hinaus eröffnet der Archetyp vielfältige weitere Anwendungsmöglichkeiten, etwa die Übertragung auf andere Regionen, detaillierte Bauteilanalysen, Ökobilanzierungen oder die Regelungsoptimierung. Die exemplarische Untersuchung der Vorlauftemperaturen ergab eine Temperaturreduktion von 10,4 - 14 K für sanierte Gebäude ohne Austausch der Heizkörper. Der signifikante Einfluss der Sanierung auf zukünftig sinnvolle Nutzungspotenziale, Energiekonzepte und Anlagentechnik wird so überdeutlich.

Eine Weiterverwendung des Archetyps für Folgeuntersuchungen und die praktische Anwendung wird ausdrücklich gewünscht und unterstützt. Zu diesem Zweck werden die 3D-Gebäudemodelle, Dokumentationen und Ergebnisse über ein Repository öffentlich zugänglich gemacht (<https://doi.org/10.60631/hqjr-pm33>).

Darüber hinaus ist die Durchführung simulationsbasierter Detailanalysen geplant, in denen sowohl der Einfluss einzelner Parameter (OFAT), als auch verschiedener Parameterkombinationen systematisch untersucht wird. Auf Basis der daraus hervorgehenden Ergebnisse werden Planungsparameter abgeleitet, die die Erstellung von Temperatur- und Wärmekatastern unter Verwendung von GIS-Daten ermöglichen.

### Danksagung

Diese Studie wird im Rahmen des Forschungsprojektes „Transformationsstrategien für Wohngebäude und -quartiere mit modellbasierten Wärme- und Temperaturkatastern (TraWoKat)“ (Kennzeichen ZN4155) aus Mitteln des Programms „zukunf.niedersachsen“ unterstützt. Großer Dank gilt den Fördermittelgebern (MWK und VolkswagenStiftung) sowie den kooperierenden Wirtschaftspartnern.

### Literatur

- [1] KSG - Bundes-Klimaschutzgesetz. 2024. Zugriff am: 7. April 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.gesetze-im-internet.de/ksg/BJNR251310019.html>
- [2] S. Wilke, „Endenergieverbrauch nach Energieträgern und Sektoren“, Umweltbundesamt. Zugriff am: 10. April 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/energieverbrauch-nach-energietraegern-sektoren>
- [3] Statistisches Bundesamt, „Zensus 2022: Gebäude (Baujahr; Jahrzehnte)“, Statistisches Bundesamt, Wiesbaden, 3000G–1002, Mai 2022. Zugriff am: 7. April 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://ergebnisse.zensus2022.de/datenbank/online/statistic/3000G/table/3000G-1002>
- [4] „VDI-/IW-Ingenieurmonitor 2024/III“, Jan. 2025.
- [5] Klimaschutz- und Energieagentur Niedersachsen GmbH, Hrsg., „Energetische Sanierung - Ein Praxisleitfaden zur Gebäudehülle.“ Klimaschutz- und Energieagentur Niedersachsen GmbH, 2022.
- [6] R. Dott, M. Y. Haller, J. Ruschenburg, F. Ochs, und J. Bony, „A technical report of subtask C Report C1 Part B,“ International Energy Agency, 2013.
- [7] T. Loga, „Gebäudetypologien europäischer Länder – Schema für die energetische Bewertung nationaler Gebäudebestände,“ Bauphysik, Bd. 34, 2012.
- [8] R. Vollmer u. a., „Bericht zu AP 3.1: LowEx-Bestand Referenzgebäude: Geometrie, Bauphysik, Last-Zeitreihen und Sanierungsszenarien,“ 2022.
- [9] T. Loga, B. Stein, N. Diefenbach, R. Born, Institut Wohnen und Umwelt, Hrsg., Deutsche Wohngebäudetypologie: beispielhafte Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von typischen Wohngebäuden, 2., erw. Aufl. Darmstadt: IWU, 2015.
- [10] W. Peht, Deutsche Architektur seit 1900. Deutsche Verlags-Anstalt, 2005.
- [11] „Deutsche Gebäudetypologie - Systematik und Datensätze,“ 2003
- [12] „Anlage 1 GEG (zu § 15 Absatz 1) Technische Ausführung des Referenzgebäudes (Wohngebäude).“ Zugriff am: 12. Oktober 2023. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.buzer.de/Anlage\\_1\\_GEG.htm?m=W%C3%A4rmedurchgangskoeffizient#hit](https://www.buzer.de/Anlage_1_GEG.htm?m=W%C3%A4rmedurchgangskoeffizient#hit)
- [13] Kreditanstalt für Wiederaufbau (KfW), Hrsg., „Anlage zum Merkblatt: Energieeffizient Bauen.“ Januar 2020. Zugriff: 9. Februar 2024. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.kfw.de/PDF/Download-Center/F%C3%B6rderprogramme-\(Inlandsf%C3%B6rderung\)/PDF-Dokumente/6000003465\\_M\\_153\\_EEB\\_TMA\\_2018\\_04.pdf](https://www.kfw.de/PDF/Download-Center/F%C3%B6rderprogramme-(Inlandsf%C3%B6rderung)/PDF-Dokumente/6000003465_M_153_EEB_TMA_2018_04.pdf)
- [14] Passivhaus Institut, Hrsg., „Gebäudekriterien - Passivhaus - EnerPHit - PHI-Energiesparhaus.“ 2023.
- [15] Gesetz zur Einsparung von Energie und zur Nutzung erneuerbarer Energien zur Wärme- und Kälteerzeugung in Gebäuden\* (Gebäudeenergiegesetz - GEG) § 26 Prüfung der Dichtheit eines Gebäudes. 2024. Zugriff am: 25. September 2024. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.gesetze-im-internet.de/geg/\\_26.html](https://www.gesetze-im-internet.de/geg/_26.html)
- [16] Destatis, Hrsg., „Zeitverwendungserhebung - Aktivitäten in Stunden und Minuten für ausgewählte Personengruppen - 2012/2013.“
- [17] American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. Atlanta, Georgia, Hrsg., „ASHRAE Handbook-Fundamentals.“ 2021.
- [18] „Stromverbrauch im Haushalt: Durchschnitt für 1-5 Personen.“ Zugriff: 20. August 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.stromspiegel.de/stromverbrauch-verstehen/Stromverbrauch-im-haushalt/>
- [19] T. Meyer und C. Fieberg, „Analyse der Lastarten bei der Kühllastberechnung von bestehenden Gebäuden,“ KI Kälte Luft Klimatechnik, Sep. 2018.
- [20] F. Lehmann, U. Weiß, und D. L.-A. Brischke, „Stromeinspareffekte durch Energieeffizienz und Energiesuffizienz im Haushalt - Modellierung und Quantifizierung für den Sektor private Haushalte in Deutschland,“ Nov. 2015.

# Ein thermisches Gebäudemodell für das Training von Algorithmen zur Gebäudekonditionierung

Pavel PAULAU <sup>1\*</sup>, Johannes HURKA <sup>2</sup>, Jan MIDDELBERG <sup>2</sup>, Sascha KOCH <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institut für Angewandte Photogrammetrie und Geoinformatik (IAPG), Jade Hochschule Wilhelmshaven/Oldenburg/Elsfleth, Ofener Straße 16/19, 26121 Oldenburg

<sup>2</sup> Jade Hochschule Wilhelmshaven/Oldenburg/Elsfleth, Ofener Straße 16/19, 26121 Oldenburg

\* pavel.paulau@jade-hs.de

## Kurzfassung

Machine-Learning-Algorithmen sind für die effiziente Steuerung der Gebäudekonditionierung in Gebäuden aussichtsreich. Da die für die Gebäudesteuerung interessanten Reinforcement-Learning-Algorithmen viel „Exploration“ benötigen, wobei auch ungewünschte Operationen ausprobiert werden, sind thermische Gebäudemodelle notwendig, welche die Zeitdynamik der Aufheiz- und Abkühl-Vorgänge in einem Gebäude berechnen lassen. Daraus ergibt sich die Forschungsfrage, ob ein Machine-Learning-Algorithmus zur Gebäudesteuerung mit Hilfe eines thermischen Gebäudemodells trainiert werden und dann in realen Gebäuden eingesetzt werden kann. Ein thermisches Gebäudemodell eines einfachen Gebäudes mit einfachem Heizungssystem bei simuliertem Außenklima wurde konzipiert. Das Training und die Steuerung wurden mit der Methode „Proximal Policy Optimierung“ erfolgreich realisiert.

## Schlagworte

Deep Reinforcement Learning; thermische Gebäudemodelle; Gebäudekonditionierung

## 1. Einleitung

Anwendungen für die Heizungssteuerung in Gebäuden mit künstlicher Intelligenz (KI) werden in letzter Zeit in der Literatur diskutiert [1]. Sowohl theoretische [2–4] als auch experimentelle [5] Studien sind bekannt. Ein spezieller Bereich der KI sind selbstlernende Algorithmen, wie zum Beispiel Deep Reinforcement Learning (DRL), das bereits zur Steuerung von Gebäudesystemen untersucht wird [6].

Das Trainieren von Algorithmen benötigt eine sogenannte Explorationsphase: Der Algorithmus versucht beliebige Operationen in zufälliger Reihenfolge, wodurch es auch zu ineffizientem oder schädlichem Betrieb von Gebäudetechnik kommen würde. Um dieses Problem zu umgehen, sind Modelle für das Training notwendig [7]. Hierfür können physikalische oder datengetriebene Modelle verwendet werden [7]. In dieser Arbeit wird der Ansatz mit numerischen physikalischen Modellen untersucht.

KI-Algorithmen sind ziemlich komplex und es ist nicht immer vorhersehbar, welche Entscheidungen die KI in bestimmten Situationen trifft. Ebenso ist es nicht immer klar, warum die Entscheidung auf diese Weise getroffen wurde. In dieser Arbeit wird zunächst ein sehr einfaches numerisches Modell betrachtet, das sich auf die gleiche Weise verhält wie ein Gebäude. In dem Modell ist es genau bekannt, wie das System gesteuert werden muss. Eines der Ziele dieser Arbeit ist es, die Qualität der Steuerung beim Einsatz von DRL-Algorithmen zu bewerten. Dafür werden die Steuerungen durch den trainierten

Agenten mit den bekannten optimalen Lösungen der Steuerungsaufgabe verglichen. Der KI-Agent wird mit dem numerischen Modell gekoppelt und einem Training unterzogen. Nachdem das Training abgeschlossen ist, wird die KI mit dem numerischen Modell verbunden und kann das Heizungssystem mit zufriedenstellenden Ergebnissen steuern. Der Aufbau des Artikels ist wie folgt: In Abschnitt 2 wird das untersuchte System formuliert. In Abschnitt 3 wird das Simulation Framework dargestellt. In Abschnitt 4 wird das Simulation Environment für die Simulation des Gebäudemodells vorgestellt. In Abschnitt 5 wird die grundlegende Nutzung selbstlernender Algorithmen beschrieben. In Abschnitt 6 wird die Umsetzung der (Lern-)Umgebung Gymnasium für das untersuchte System formuliert. In Abschnitt 7 werden die Beispiele des erfolgreichen Trainings demonstriert. In Abschnitt 8 folgen Diskussion und Fazit.

## 2. Thermisches Gebäudemodell

Im vereinfachten Fall kann das thermische Verhalten eines Gebäudes sehr einfach mathematisch modelliert werden. Dabei wird angenommen, dass die Hauptmasse und Wärmekapazität des Gebäudes sich innerhalb einer sehr leichten thermischen Gebäudehülle befinden. Dann kann das Gebäude mit der Wärmekapazität  $C$  und dem spezifischen Wärmeverlust  $H$  charakterisiert werden. Dieses sehr einfache dynamische Gebäudemodell (im Folgenden BuildingT genannt) lässt sich so formulieren:

$$\frac{dT_i}{dt} = \frac{1}{C} (P_H - H(T_i - T_e)), \quad \text{Gl. 1}$$

wobei  $T_i$  Innentemperatur,  $T_e$  Außentemperatur,  $P_H$  Heizleistung. Dabei wird ein idealisiertes Heizungssystem betrachtet, wo die Leistung  $P_H$  mit einem einzelnen Schalter  $a_1$  definiert wird:

$$P_H = \begin{cases} P_{max}, & \text{if } (a_1 = 1), \\ 0, & \text{if } (a_1 = 0) \end{cases} \quad \text{Gl. 2}$$

In Folgenden werden ganz einfache Aufgaben betrachtet:

Tab. 1: Ziele des Trainings

1)	Zieltemperatur $T_T$ im Innenraum erreichen
2)	Zieltemperatur $T_T$ im Innenraum halten
3)	Zieltemperatur $T_T$ im Innenraum erreichen und halten

Diese Aufgaben können relativ leicht mit einfachen Regeln gelöst werden, z. B. mit:

$$a_1 = \begin{cases} 1, & \text{if } (T_i < T_T), \\ 0, & \text{if } (T_i > T_T) \end{cases} \quad \text{Gl. 3}$$

wobei  $T_T$  die Zieltemperatur ist. Der Zeitschritt  $\Delta t$  bestimmt, wie viel Zeit zwischen den diskreten Schaltvorgängen des Aktuators vergeht, die zu den Zeitpunkten  $t_i$  erfolgen:

$$t_i = i\Delta t, \quad \text{Gl. 4}$$

wobei  $i$  eine natürliche Zahl ist.

### 3. Abstrakte Simulation

Die erste typische Aufgabe bei der numerischen Modellierung ist es, eine Lösung der Differentialgleichungen Gl. 1 zu finden. Um eine weitestgehende Wiederverwendbarkeit des Codes für andere Modelle zu ermöglichen, wurde eine Abstraktionsebene eingezogen. Dafür wird ein Objekt *engine* mit Hilfe des Konstruktors der Klasse  $X$  konstruiert und initialisiert. Klasse  $X$  kann durch jede umgesetzte Klasse für ein anderes dynamisches System ersetzt werden. Ein Objekt der Klasse  $X$  muss sowohl die Properties  $t$  und  $t\_end$  (für welchen Zeitraum soll das dynamische System gelöst werden), die Methoden *OutputState()* für die Ausgabe der Systemzustände zu gewünschten Zeitpunkten für die spätere Analyse/Visualisierung, *GetNextState()* für die Berechnung des Systemzustandes zum nächsten Zeitpunkt, *MakeControl()* für Einsatz der Steuerung, als auch Konstruktor (initialisiert alle notwendigen Parameter).

Somit wird der Begriff „Simulation Environment“ formuliert als eine Zusammenstellung von Parameterquelle und Klasse, welche alle in diesem Abschnitt beschriebenen Properties und Methoden enthält und die numerische Lösung des entsprechenden Systems erlaubt.

### 4. Simulation Environment „BuildingT“

Für die Lösung des Systems wird eine Klasse *ModelBuildingT* umgesetzt. Die Methode *GetNextState()* löst die Differentialgleichungen des Modells Gl. 1 und berechnet den Zustand des Systems mit der Runge-Kutta Methode für den nächsten Zeitschritt.

Für das hier betrachtete System lässt sich der Systemzustand mit einem einkomponentigen Vektor  $\vec{s} = (T_i)$  beschreiben.  $T_i$  ist normalerweise eine private Property der Klasse. Der Konstruktor sollte alle Systemparameter als private Properties der Klasse initialisieren, zum Beispiel aus einer ini-Datei, und auch eine andere gegebenenfalls

neue Datei für den Output öffnen. Da hinein schreibt die Methode *OutputState()* dann den Zustand des Systems. Die Methode *\_del\_(self)* schließt die Outputdatei. Für die Nutzung des Simulation Environment mit Deep Learning Algorithmen muss die abstrakte Klasse von Simulation Environment noch erweitert werden: Die Methode *reset()* ermöglicht die mehrmalige Nutzung eines Objekts.

### 5. Abstraktes Learning

Verschiedene Systeme werden mit verschiedenen KI-Methoden gesteuert. Deshalb ist ein abstraktes Trainings-Environment hilfreich, in dem sowohl beliebige Systeme, als auch beliebige Machine Learning Methoden eingesetzt werden können. Der ‚action space‘ (die Menge aller möglichen Aktionen) und der ‚observation space‘ (die Menge aller möglichen Zustände, in denen sich ein System befinden kann), sowie die Methoden, welche für Training und Evaluation der Systeme benötigt werden, werden für jeden einzelnen Fall definiert. Jede solche Trainings- bzw. Steuerungsaufgabe für ein einzelnes System kann mit einem relativ kleinen Satz von Methoden gelöst werden.

Mit dem Gymnasium API [8] können sogenannte Gymnasium Environments sowohl für das Training als auch für die Nutzung der trainierten Algorithmen für das gewünschte System und die Steuerungsaufgabe umgesetzt werden. Die benötigten Bibliotheken und Algorithmen werden dabei einheitlich zur Verfügung gestellt. Für die Arbeit mit DRL-Algorithmen [9] im Gymnasium Environment wird ein virtuelles Python-Environment innerhalb eines virtuellen Ubuntu 22 unter Windows 11 benutzt.

### 6. Learning Environment „TEnvStepsInStep“

Um die Methoden des Deep Reinforcement Learning und das Framework von Gymnasium für die Lösung eines bestimmten Problems zu verwenden, muss eine Klasse als Gymnasium Environment für dieses Problem umgesetzt werden. Innerhalb der Klasse müssen Properties wie „State Space“ und „Action Space“, sowie Methoden (z. B. *Step()*, Belohnungsfunktion, Terminationsbedingung) formuliert werden. Das Gymnasium Environment für die Ziele (Tab. 1 zur Steuerung des Systems (1,2,4)) wird als „TEnvStepsInStep“ umgesetzt.

#### Observation space

Im Kontext des maschinellen Lernens wird der Zustandsraum (state space [10]) manchmal auch als observation space [8] bezeichnet.

Zur Beschreibung des physikalischen Systems Gl. 1 ist grundsätzlich die Zustandsvariable  $T_i$  ausreichend. Wenn die Anfangsbedingung  $T_{i0}$  bekannt ist, lässt sich mit Gl. 1 der Systemzustand zu jedem Zeitpunkt berechnen. Dabei ist allerdings zu beachten, dass  $T_e$  eine Funktion der Zeit ist.

$T_i$  beschreibt das physikalische System Gebäude, seine Dynamik ist durch Gleichungen definiert.  $T_e$  beschreibt die Umgebungstemperatur des Gebäudes und wird in dieser Arbeit durch explizite Zeitreihen von simuliertem Wetter definiert. In einem realen Experiment wird  $T_e$  aus Wetterstations-Messungen oder Prognosen ermittelt.

Wie aus Gl. 3 (vorab formulierte Regel, um die Ziele von Tab. 1 zu erreichen) ersichtlich, lässt sich auf Basis der zwei Werte  $T_i$  und  $T_T$  die Entscheidung treffen, ob die Heizung an- oder ausgemacht werden muss.

Wenn alle Systemparameter einschließlich  $T_T$  fixiert sind und nur die Dynamik von  $T_e(t)$  berücksichtigt wird, dann kann der Zustandsvektor  $s$  für die Lösung der gestellten Aufgaben mit nur einer Komponente dargestellt werden:

$$\vec{s} = (T_i) \quad \text{Gl. 5}$$

Wenn auch Variationen von  $T_T$  zulässig sind, beispielsweise für jede Episode ein zufälliger gleichverteilter Wert aus dem Intervall  $[T_{Tmin}, T_{Tmax}]$ , kann das System ohne Kenntnis von  $T_T$  nicht lernen. Der Zustandsvektor muss also erweitert werden:

$$\vec{s} = (T_i, T_T) \quad \text{Gl. 6}$$

Schließlich kann der Zustandsvektor auch noch um die Außentemperatur erweitert werden:

$$\vec{s} = (T_i, T_T, T_e). \quad \text{Gl. 7}$$

Auch für solch einen einfachen observation space, wird ein Box space mit 3 Variablen benötigt, der die Grenzwerte für die Variablen festlegt  $[-50, +100]$ ,  $[-50, +100]$ ,  $[-50, +100]$ .

Alle oben beschriebene Möglichkeiten wurden untersucht und die Auswahl des gewünschten space ist in *TEnvStepsInStep* möglich. Im weiteren Verlauf wird angegeben, welche der drei Varianten des observation space für den jeweiligen Versuch verwendet wurde.

### Action space

In Gymnasium stehen unterschiedliche fundamentale Typen für den action space zur Verfügung [8]: Box, Discrete, MultiBinary, MultiDiscrete, Text. Im untersuchten Fall hat der einzige Aktuator  $a_1$  die möglichen Werte 0 und 1, es wird also ein discrete space benötigt:

$$\vec{a} = (a_1). \quad \text{Gl. 8}$$

### Einbindung des Simulation Environment im Gymnasium Environment

Gymnasium definiert die Anforderungen an die Klasse und Methoden, um ein System mit den DRL-Bibliotheken (z. B. Stable Baseline3 [11]) zu nutzen. Diese Klasse wird als Gymnasium Environment bezeichnet und muss insbesondere den Schritt (Step) für das dynamische System zu Verfügung stellen.

Für die Nutzung der Simulationsumgebung „BuildingT“ aus der Gymnasium-Umgebung heraus wird im Konstruktor des Gymnasium-Environments eine Klassen-Property *self.engine* definiert.

### Step

Die Methode *step()* ist im Gymnasium Environment so konzipiert, dass innerhalb eines Schrittes  $\Delta t$  nur einmal eine Aktion stattfindet, aber die Dynamik des Modells durch die mehrfache Ausführung der Methode *GetNextState()* des Simulation Environment für den Zeitschritt  $h$  detaillierter berechnet werden kann. In dieser Arbeit werden die Trainings immer mit  $\Delta t > h$  durchgeführt. Die benutzten Werte von  $h$  und  $\Delta t$  werden für jeden numerischen Versuch angegeben.

### Episode und Trainingsdaten

Es gibt verschiedene Möglichkeiten, eine Episode für die Steuerungsaufgaben in Tab. 1 zu definieren. Das sind zum Beispiel:

- Eine Episode ist ein Tag.
- Eine Episode ist ein Ablauf von Steuerungsvorgängen, der am Ende die Zieltemperatur erreicht hat.

Für andere vorstellbare Steuerungsaufgaben, wie zum Beispiel die verbrauchte Energie innerhalb einer Heizsaison zu minimieren, wäre auch eine komplette Heizsaison als Episode sinnvoll.

Das in dieser Arbeit betrachtete System wird durch die Gleichungen (Gl. 1, Gl. 2, Gl. 4) und Tab. 1 beschrieben. Das System beinhaltet damit sowohl die konstanten Gebäudeparameter  $C, H, P_{max}$ , die variable Zieltemperatur  $T_T$ , den Zeitschritt  $\Delta t$  sowie die zeitabhängige Außentemperatur  $T_e(t)$ . Es ergibt sich ein 5-dimensionaler Parameterraum.

Da die Ermittlung der Parameter  $C$  und  $H$  für ein gegebenes Gebäude mit Unsicherheiten belegt ist, werden für die Untersuchung in dieser Arbeit bestimmte Bereiche  $[C_{min}, C_{max}]$  und  $[H_{min}, H_{max}]$  um diese Werte herum ausgewählt. Auch die Leistung der Heizung wird in einem relativ kleinen Intervall  $[P_{min}, P_{max}]$  variiert. Schließlich wird auch für die Zieltemperaturen das gewünschte Intervall  $[T_{Tmin}, T_{Tmax}]$  ausgewählt.

Der Parameter  $\Delta t$  ist schwieriger zu variieren, weil er im Programm als Vielfaches des Zeitschritts  $h$  der numerischen Lösung der Differentialgleichung umgesetzt ist. Einige unterschiedliche Werte von  $\Delta t$  wurden untersucht. Es ist zusätzlich möglich, durch Variation von  $h$  auch  $\Delta t$  kontinuierlich zu variieren, wurde hier aber nicht genutzt.

Da nur eine begrenzte Menge an Außentemperatur-Zeitreihen  $T_e(t)$  von Wetterstationen zur Verfügung stand, wurden für die Zwecke dieser Untersuchung simulierte Außentemperatur-Zeitreihen mit ausreichender Komplexität als Trainingsdaten verwendet.

Dafür wurden die Außentemperaturen mit Hilfe der Gl. 9 modelliert.

$$T_e(t) = A_0 + \sum_{i=1}^9 A_i \sin(k_i t + \phi_i), \quad \text{Gl. 9}$$

$$k_i = \frac{2\pi i}{\Delta t_e}$$

$$A_0 = A_{00} + R_{A0} \xi_0$$

$$A_i = A_{i0} \frac{\eta_i}{(T_{comfort} - A_0)/9.0}$$

$$\phi_i = 2\pi \zeta_i$$

wobei  $\xi_0$  eine gleichverteilte Zufallsvariable im Intervall  $(-1, 1)$ , sowie  $\eta_i$  und  $\zeta_i$  gleichverteilte Zufallsvariablen aus  $(0, 1)$  sind. Die Parameter für die Außentemperaturen sind so gewählt, dass nur Winter-Situationen betrachtet werden, wo die Außentemperaturen unterhalb von  $T_T$  zwischen  $0^\circ\text{C}$  und  $30^\circ\text{C}$  liegen. Das entspricht einem geplanten Experiment, in dem statt eines Gebäudes eine wärmeisolierte Box mit elektrischer Heizung untersucht wird. Auf diese Weise sind experimentelle Versuche auch im Frühling und Sommer umsetzbar. Dabei werden die Zieltemperaturen in der Box im Bereich zwischen  $40^\circ\text{C}$  und  $50^\circ\text{C}$  angesteuert. In Abb. 1 sind 20 beispielhafte Außentemperatur-Zeitreihen dargestellt.

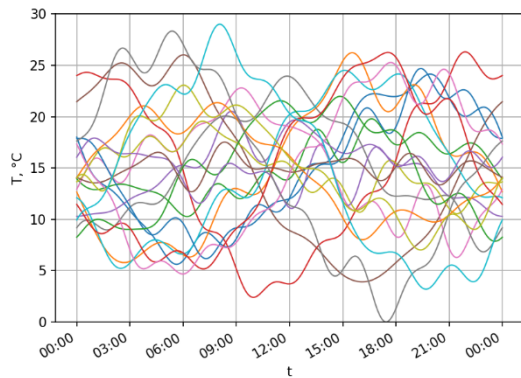


Abb. 1: 20 Zeitreihen, exemplarisch generiert mit Gl. 9.  $A_0 = 15$ ,  $A_1 = 14$ , (vergleichsweise hohe Amplitude entsprechend der typischen Tagesschwankung),  $A_i = 1$  für  $i = 2 \dots 9$ .  $\Delta t_e = 24$  h. Die Parameter sind so gewählt, dass alle Außentemperaturen unterhalb der möglichen Zieltemperaturen [30 °C; 40 °C] liegen

Die restlichen Parameter für eine Episode werden zufällig mit gleichförmiger Wahrscheinlichkeitsverteilung aus den in Tab. 2 dargestellten Intervallen definiert. Dabei bleiben sie konstant innerhalb einer Episode.

Tab. 2: Die Intervalle der Parameter für das Training des DRL-Algorithmus am Modell (1,2,4)

Parameter	Symbol	Intervall	Einheit
Außentemperatur	$T_e$	[0; 30]	°C
Spezifischer Wärmeverlust	$H$	[0,48; 0,72]	W K <sup>-1</sup>
Wärmekapazität	$C$	[4,8; 7,2]	kJ K <sup>-1</sup>
Heizleistung	$P_H$	[27; 33]	W
Zieltemperatur	$T_T$	[40; 50]	°C
Anfangs-Innentemperatur	$T_0$	[40; 50]	°C

Für alle Ergebnisse in dieser Arbeit wurde der Wert 10 s für  $h$  ausgewählt.

### Belohnungsfunktion

Obwohl die Gymnasium API die Möglichkeit vorsieht, nach jedem Steuerungsschritt eine Belohnung an den Lern-Algorithmus auszugeben, wird diese Variante hier nicht benutzt. Dieses Vorgehen beschränkt die Exploration und verhindert das Auffinden nicht-trivialer Lösungen. In dieser Arbeit wird stattdessen der Ansatz gewählt, nur eine kumulative Belohnung am Episodenende auszugeben. Auf alle Steps innerhalb der Episode wird hingegen 0 als Belohnung ausgegeben.

**Steuerungsaufgabe „Erreichen“:** In manchen Fällen ist es nicht wichtig, wie der Algorithmus das System durch Aktions- und Phasenraum führt, sondern nur das Endergebnis ist wichtig. Dabei kann eine extrem einfache Belohnungsfunktion  $R$  benutzt werden: nach jedem Step  $R = 0$  und am Episodenende  $R = 1$ , falls das Ziel erfolgreich erreicht wurde, oder  $R = 0$ , falls das Ziel nach Durchführung der maximal erlaubten Schritte nicht erreicht wurde. Dieser Ansatz funktioniert gut für die Steuerung des Systems aus Abschnitt 2 bei Steuerungsaufgabe 1) aus Tab. 1. Die entsprechenden Ergebnisse sind in Abschnitt 7 dargestellt.

**Steuerungsaufgabe „Erreichen und halten“:** Für die Steuerungsaufgaben 2) und 3) aus Tab. 1 muss das Episodenende anders definiert werden, weil nach Erreichen der Zieltemperatur diese noch für eine bestimmte Zeit gehalten werden muss. In diesem Fall wird eine fixierte

Episodendauer  $t_{end}$  eingesetzt. Verschiedene Funktionen wurden ausprobiert, mit besonders guten Ergebnissen bei Verwendung folgender Formel für die Belohnung  $R$ :

$$R = \frac{1}{t_{end}} \int_0^{t_{end}} \frac{1}{|\Delta T|^2 + 1} dt, \quad \text{Gl. 10}$$

wobei  $\Delta T = T_i - T_T$  ist. Wenn  $|\Delta T| = 0$  für alle Zeitpunkte zwischen 0 und  $t_{end}$ , gilt  $R = 1$ . Je mehr Zeitschritte mit  $|\Delta T| > 0$  existieren, desto kleiner wird  $R$  am Ende sein. Die Ergebnisse für die Steuerungsaufgabe 2), 3) aus Tab. 1 mit Belohnungsfunktion (10) werden in Abschnitt 7 vorgestellt.

## 7. Training

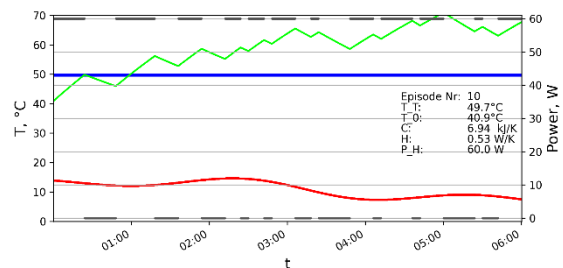


Abb. 2: Eine Episode der Steuerung mit dem untrainierten DRL Modell (PPO von [11]). Die Aktionen passieren zufällig. Rot: Außentemperatur  $T_e$ , blau: Zieltemperatur  $T_T$ , grün: Innentemperatur  $T_i$ , schwarz: Heizleistung  $P_H$ . Parameter:  $t_{end} = 6$  h,  $\Delta t = 6.0$  min.  $A_0$ ,  $\Delta t_e$ ,  $A_i$  wie in Abb. 1

Das Training des KI-Agenten wird mit der Proximal Policy Optimisation aus der Stable Baseline3 Bibliothek [11] durchgeführt. Dabei startet der Algorithmus mit einem komplett „zufälligen“ Ansatz und probiert, alle Aktuatoren in zufälliger Weise zu betätigen. Im betrachteten Fall gibt es nur einen Aktuator, welcher daher bei jedem Steuerungsschritt mit Wahrscheinlichkeit 50 % an-, und mit Wahrscheinlichkeit 50 % ausgemacht wird. Das entspricht im Schnitt einer konstanten Heizung mit halber Leistung. Das Ergebnis einer solchen Steuerung verursacht einen Anstieg der Innentemperatur bis zum Ende der Episode und ist exemplarisch in Abb. 2 gezeigt. In den folgenden Abschnitten werden die Ergebnisse des Trainings gezeigt, wie aus diesem zufälligen Anfangsansatz eine funktionsfähige Steuerung wird.

### Training 1: „Erreichen“

Die Einfachheit der Steuerungsaufgabe 1) aus Tab. 1 nach dem Modell gemäß Gl. 1, Gl. 2, Gl. 4 erlaubt es, ein Maß „Qualität der Steuerung“  $C_Q$  zu definieren, weil von Anfang an bekannt ist, wie die korrekte Lösung aussehen soll: wenn die Anfangstemperatur unterhalb der Zieltemperatur ist, soll die Heizung angehen und so lange aktiv bleiben, bis die Zieltemperatur erreicht ist.

$$C_Q = \frac{n_{on}}{n_e} \quad \text{Gl. 11}$$

mit  $n_e$  Anzahl der „an“-Befehle und  $n_e$  Gesamtanzahl der Befehle in der Episode. Wenn umgekehrt die Anfangstemperatur oberhalb der Zieltemperatur liegt, sollen alle Befehle in der Episode „aus“ sein, bis die Zieltemperatur erreicht ist. In diesem Fall ist:

$$C_Q = \frac{n_{off}}{n_e} \quad \text{Gl. 12}$$

wobei  $n_{off}$  die Anzahl der „Aus“-Befehle in einer Episode ist. Für ein Training am Modell aus Abschnitt 2 ist der Trainingsvorgang in Abb. 3 visualisiert. Es ist zu sehen, wie am Anfang des Trainings die Qualität der Steuerung zwischen 0 und 1 springt und am Ende des Trainings konstant 100 % erreicht.

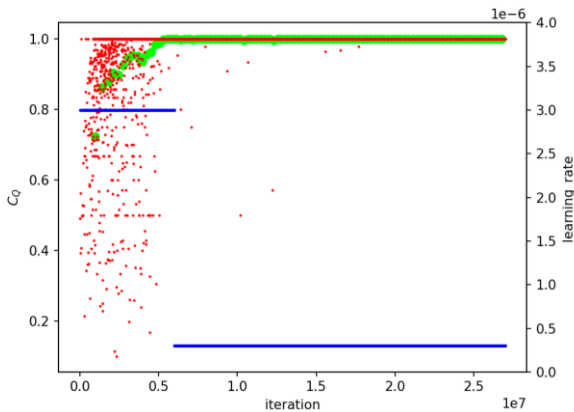


Abb. 3: Die Qualität der Steuerung  $C_Q$  konvergiert gegen 100 % beim Trainieren des selbstlernenden Algorithmus mit Proximal Policy Optimierung am Modell (Gl. 1, 2, 4), Parameter aus Tab. 2, Trainingsdata (9).  $\Delta t = 1$  min. Parameter  $A_0$ ,  $\Delta t_e$ ,  $A_i$  wie in Abb. 1. Definition von Episode und Belohnungsfunktion aus Abschnitt 6 („Erreichen“). Rot: Qualität der Steuerung für einzelne Episoden während Training, Blau: manuelle Einstellung des Parameters  $learning\_rate$  während des Trainings, grün: mittleres  $C_Q$ . Als observation space wurde Gl. 7 benutzt

Die zwei typischen Beispiele einer Episode für die Aufgabe „Erreichen“ sind in Abb. 4 gezeigt. Bei Anfangsinnentemperatur oberhalb der Zieltemperatur lässt der Algorithmus die Heizung „aus“, bis die Zieltemperatur ungefähr erreicht ist (Subplot (a)), und bei Anfangsinnentemperatur unterhalb der Zieltemperatur wird ohne Lücken geheizt, bis ungefähr die Zieltemperatur erreicht ist (Subplot (b)).

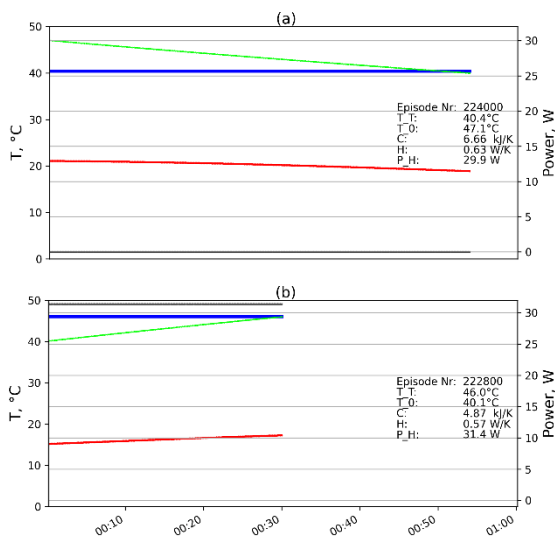


Abb. 4: Verhalten fertig trainierter Agenten bei der Aufgabe „Erreichen“. (a): Abkühlen; (b): Aufheizen. Rot: Außentemperatur  $T_e$ , blau: Zieltemperatur  $T_T$ , grün: Innentemperatur  $T_i$ , schwarz: Heizleistung  $P_H$ .

$\Delta t = 6.0$  min. Parameter  $A_0$ ,  $\Delta t_e$ ,  $A_i$  wie in Abb. 1. Die restlichen Parameter wurden automatisiert generiert aus den in Tab. 2 vorgegebenen Intervallen und sind in der Legende aufgeführt. Als observation space wurde Gl. 7 benutzt. Parameter des DRL-Algorithmus: `policy = 'MlpPolicy'`, `batch_size = 16`, `n_epochs = 4`, `max_episode_steps = 480`, `n_steps = 512`, `gamma = 0.998`, `gae_lambda = 0.95`, `ent_coef = 0.01`, `verbose = 0`, `learning_rate = 0.000003`, `clip_range = 0.2`, `use_sde = False`

Nach dem Erreichen der Zieltemperatur gibt es einen kurzen weiteren Verlauf der Aufheizung oder Abkühlung, bedingt durch den fixierten Wert von  $\Delta t$ . Die Steuerung kann nicht sofort, sondern erst nach dem nächsten Zeitschritt umschalten. Als Deep Learning Algorithmus kam Proximal Policy Optimisation aus der Bibliothek `stable baseline3` zum Einsatz, Episode und Belohnungsfunktion entsprachen Abschnitt 6 („Erreichen“).

### Training 2,3: „Halten“, „erreichen und halten“

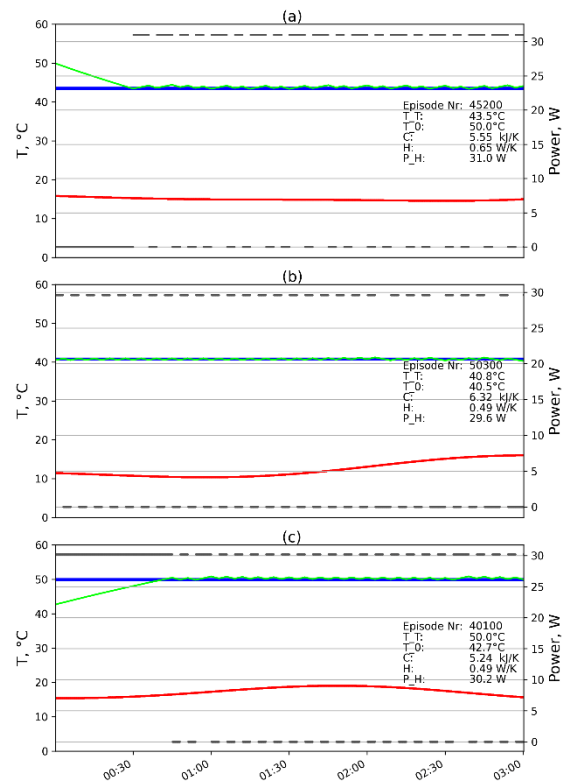


Abb. 5: Verhalten fertig trainierter Agenten für „Erreichen und halten“. Rot: Außentemperatur  $T_e$ , blau: Zieltemperatur  $T_T$ , grün: Innentemperatur  $T_i$ , schwarz: Heizleistung  $P_H$ . a) Anfangsinnentemperatur über  $T_T$ , b) Anfangsinnentemperatur nah an  $T_T$ , c) Anfangsinnentemperatur unter  $T_T$ . Parameter:  $t_{end} = 6$  h,  $\Delta t = 3.0$  min.  $A_0$ ,  $\Delta t_e$ ,  $A_i$  wie in Abb. 1. Belohnungsfunktion nach Gl. 10. Parameter: `policy = 'MlpPolicy'`, `batch_size = 16`, `n_epochs = 4`, `max_episode_steps = 480`, `n_steps = 512`, `gamma = 0.998`, `gae_lambda = 0.95`, `ent_coef = 0.01`, `verbose = 0`, `learning_rate = 0.00003`, `clip_range = 0.2`, `use_sde = False`

In diesem Abschnitt ist das System gemäß Gl. 1, 2, 4 modelliert, die Trainingsdaten nach Gl. 9 und die Parameter wurden aus Tab. 2 entnommen. Belohnungsfunktion und Definition der Episode entsprechen Abschnitt 6 „Erreichen und halten“. Als observation space wurde Gl. 6 benutzt. Auch in diesem Fall lässt sich der selbstlernende

Algorithmus erfolgreich trainieren und drei typische Episoden sind in Abb. 5 gezeigt. In Abb. 5a kühlt der Agent das Gebäude von der höheren Anfangstemperatur zur Zieltemperatur ab und hält dann die Temperatur nahe an der Zieltemperatur, bis das Episodenende  $t_{end}$  erreicht ist. In Abb. 5c wird das Gebäude von der niedrigeren Anfangstemperatur zur Zieltemperatur aufgeheizt. Nachdem die Zieltemperatur erreicht ist, hält der Agent die Temperatur nah an der Zieltemperatur bis zum Episodenende. In Abb. 5b ist ein Sonderfall dargestellt. Da sowohl  $T_0$  als auch  $T_T$  zufällig mit gleichförmiger Wahrscheinlichkeitsverteilung aus den Intervallen in Tab. 2 ausgewählt werden, kommt es vor, dass die Anfangstemperatur bereits fast der Zieltemperatur entspricht. In diesem Fall hält der Agent die Gebäudetemperatur bei  $T_T$ , bis das Episodenende  $t_{end}$  erreicht wird. Dieser Sonderfall von Ziel 3) ist eigentlich das Ziel 2) aus Tab. 1.

## 8. Diskussion und Fazit

Das Training von Deep Learning Algorithmen anhand realer technischer Gebäudesysteme ist problematisch, weil die Algorithmen, bevor sie fertig trainiert sind, auch die für die Gebäudesteuerung ungünstigsten Pfade ausprobieren werden. Deshalb sollte das Training anhand mathematischer Gebäudemodelle erfolgen. Die technischen Systeme im Gebäude und deren genaue mathematische Modelle sind sehr komplex und aufwendig, sogar für ein sehr vereinfachtes System wie hier betrachtet. Eine mögliche Lösung wäre der Einsatz von datengetriebenen Modellen [7], die auch ohne Domainwissen die Systemdynamik modellieren können und für das Training von DRL-Agenten eingesetzt werden können. Allerdings ist auch für diese Modelle Vorarbeit und Aufwand erforderlich. Zum Beispiel muss geklärt werden, wie groß der Zustandsraum eines realen Gebäudes mit realen komplexen technischen Systemen sein muss, um ein zielführendes und praktikables Training zu ermöglichen.

Ziel dieser Arbeit war es, einen funktionierenden Deep-Reinforcement-Learning-Algorithmus umzusetzen, der ein vereinfachtes System steuert, welches Relevanz für die thermische Dynamik von Gebäuden und technische Gebäudeausrüstung hat. Dieses Ziel wurde erreicht und dient als Zwischenschritt in Richtung der Steuerung von komplexeren Systemen in komplexeren Gebäuden. Die trainierten DRL-Agenten dieser theoretischen Arbeit werden auch für experimentelle Versuche benutzt.

Eine weitergehende Fragestellung ist die Energieeinsparung. Um eine Komforttemperatur schnellstmöglich zu erreichen und zu halten, wird eine bestimmte Energie benötigt, dabei stehen Komfort und Energieeffizienz in Konkurrenz. In realen komplexen Systemen stehen meistens Mechanismen zur Verfügung, um bei Wahrung des Komforts die Energieeffizienz zu steigern. Ein Beispiel ist die Ausnutzung der Unterschiede in der Arbeitszahl der Wärmepumpe, abhängig von der Außentemperatur. Der Betrieb der Wärmepumpe zusammen mit einem Speicher kann dafür benutzt werden, um überschüssige Wärme bei höherer Arbeitszahl zu erzeugen und im Speicher vorzuhalten für Situationen, in denen die Arbeitszahl der Wärmepumpe niedriger ist.

## Danksagung

Wir danken dem Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt für die finanzielle Unterstützung im Rahmen des Forschungsprojekts „Wärmewende Nordwest“ (Förderkennzeichen 03SF0624).

## Literatur

- [1] David Weinberg, Qian Wang, Thomas Ohlson Timoudas und Carlo Fischione, „A Review of Reinforcement Learning for Controlling Building Energy Systems From a Computer Science Perspective,“ *Sustainable Cities and Society*, Jg. 89, S. 104351, 2023. doi: 10.1016/j.scs.2022.104351. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2210670722006552>
- [2] Zhanhong Jiang et al., „Building HVAC control with reinforcement learning for reduction of energy cost and demand charge,“ *Energy and Buildings*, Jg. 239, S. 110833, 2021. doi: 10.1016/j.enbuild.2021.110833. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778821001171>
- [3] Davide Coraci, Silvio Brandi, Tianzhen Hong und Alfonso Capozzoli, „Online transfer learning strategy for enhancing the scalability and deployment of deep reinforcement learning control in smart buildings,“ *Applied Energy*, Jg. 333, S. 120598, 2023. doi: 10.1016/j.apenergy.2022.120598. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261922018554>
- [4] Kari Alanne und Seppo Sierla, „An overview of machine learning applications for smart buildings,“ *Sustainable Cities and Society*, Jg. 76, S. 103445, 2022. doi: 10.1016/j.scs.2021.103445. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2210670721007186>
- [5] Alberto Silvestri et al., „Real building implementation of a deep reinforcement learning controller to enhance energy efficiency and indoor temperature control,“ *Applied Energy*, Jg. 368, S. 123447, 2024. doi: 10.1016/j.apenergy.2024.123447. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261924008304>
- [6] Zhe Wang und Tianzhen Hong, „Reinforcement learning for building controls: The opportunities and challenges,“ *Applied Energy*, Jg. 269, S. 115036, 2020, doi: 10.1016/j.apenergy.2020.115036.
- [7] X. Zhang, M. Pipattanasomporn, T. Chen und S. Rahman, „An IoT-Based Thermal Model Learning Framework for Smart Buildings,“ *IEEE Internet of Things Journal*, Jg. 7, Nr. 1, S. 518–527, 2020, doi: 10.1109/JIOT.2019.2951106.
- [8] „Gymnasium Dokumentation.“ Zugriff am: 14. Oktober 2025. [Online.] Verfügbar unter: <https://gymnasium.farama.org/>
- [9] „Deep RL Course.“ Zugriff am: 14. Oktober 2025. [Online.] Verfügbar unter: <https://huggingface.co/learn/deep-rl-course/unit0/introduction>
- [10] A. Zai und B. Brown, *Einstieg in Deep Reinforcement Learning: KI-Agenten mit Python und PyTorch programmieren*. Carl Hanser Verlag GmbH Co KG, 2020.
- [11] „Stable-Baselines3 Docs - Reliable Reinforcement Learning Implementations.“ Zugriff am: 14. Oktober 2025. [Online.] Verfügbar unter: <https://stable-baselines3.readthedocs.io/en/master>

# The impact of level of complexity in techno-economic analysis of high temperature heat pumps

Nils Hendrik PETERSEN <sup>1\*</sup>, Robert SAGER <sup>1</sup>, Manfred WIRSUM <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institut für Kraftwerkstechnik, Dampf- und Gasturbinen, RWTH Aachen University, Mathieustraße 9, 52074 Aachen, Germany

\* petersen@ikdg.rwth-aachen.de

## Abstract

While previous studies on operational planning of high-temperature heat pumps (HTHP) often rely on simplifications of the technological characteristics, this work aims to challenge these simplifications and evaluate their impact on the leveled cost of heat (*LCOH*). By defining three levels of complexity, the operation of HTHP with storage is determined, integrating day-ahead and intraday market data as well as part load, off-design and transient effects. As an example, a transcritical CO<sub>2</sub> heat pump is investigated. It is shown that *LCOH* increases between 10-50 %, if operation is optimized by Mixed-Integer Linear Programming (MILP) instead of an annual electricity price duration curve. If the coefficient of performance (*COP*) is assessed as season-depending, the change in *LCOH* is below 10 %. The analysis highlights that a seasonal *COP* and MILP should be used for a reliable *LCOH*.

## Keywords

CO<sub>2</sub>-free heat supply; dispatch optimization; model-based analysis; leveled cost of heat; transcritical CO<sub>2</sub>

## 1. Introduction

With a global share of >50 % in final energy consumption and less than 20 % renewable energy supply, the heating sector has a significant impact on global emissions [1]. Hence, to combat climate change, decarbonization of the heating sector is crucial. To achieve this goal, an increasing number of Power-to-Heat (PtH) facilities are being constructed. High-temperature heat pump (HTHP) is a promising PtH technology as it offers high efficiencies and flexibility, especially when combined with thermal energy storage (TES). However, the intermittency and volatility of renewable electricity, and fluctuating electricity prices challenge a competitive renewable heat supply.

Previous research on HTHP can be distinguished by its technical and economic level of complexity (LoC). Technical LoC typically covers the optimization of the Coefficient of Performance (*COP*); from full load operation using different cycle designs and working fluids to part load (i.e., reduced heat output compared to nominal load) and off-design (i.e., varying boundary conditions) operation as well as the dynamic response of the HTHP during load changes due to thermal inertia [2], [3], [4]. The economic LoC comprises variations of the well-known Net Present Value (*NPV*) method [5]. The *NPV* can be calculated as the sum of the discounted cash flows and the initial investment. *NPV* must be greater than zero for an investment decision. As the heat produced by the HTHP is sold to the customer, a market price for heat is required to evaluate the *NPV* method. However, the market price for heat is often not known a-priori but desired. Thus, the *NPV* method can be rearranged to calculate the so-called Levelized Cost of Heat (*LCOH*) [6]. The *LCOH* can be considered as a minimum market price for heat, which

leads to an *NPV* of zero. Alternatively, *NPV* differences can be calculated (i.e., for the same cash flow of market price for heat) to compare two investment decisions for a specific lifetime [7]. If *NPV* differences are rearranged, a payback period can be calculated after which one investment has a higher *NPV* than the other investment [8]. Typically, all presented economic performance indicators are evaluated based on seasonal or constant efficiency, loads, boundary conditions and electricity prices. To investigate the impact of those seasonal or constant parameters, sensitivity analyses are conducted.

To further enhance the economic LoC, recent studies on HTHP employ mathematical optimization methods to analyze deployment and operation strategies. In these studies, typically a heat supply portfolio is dimensioned for a specific application (e.g., district heating) and its cost-optimal operation is determined while considering participation in the electricity market (dispatch optimization) [9]. However, these studies lack technological characteristics (e.g., part-load and dynamic behavior), which may considerably influence the overall system performance.

In summary, previous studies on HTHP have primarily focused on high LoC in the technical dimension but low LoC in the economic dimension. An in-depth discussion of the role and implications of model complexity in techno-economic evaluations is still missing. Thus, the present study evaluates the impact of three LoC, spanning around *COP* estimation, operational profile and storage capacity on the *LCOH*. The objective is to identify the impact of increasing LoC on the corresponding *LCOH*, exemplified by a transcritical CO<sub>2</sub> heat pump (tCO<sub>2</sub>HP).

## 2. Methods and Methodology

Among HTHPs, a Rankine-based system utilizing transcritical CO<sub>2</sub> cycles is promising due to several advantageous characteristics, for example:

- inherently safe working medium (CO<sub>2</sub>),
- high power density leading to compact machines and heat exchangers,
- widely usable temperature in heat source (-10-25 °C) and sink (up to 200 °C), e.g., for district heating and cooling or industrial applications [10].

A general representation of a tCO<sub>2</sub>HP is displayed in Fig. 1. The tCO<sub>2</sub>HP extracts heat from a heat source (in the present study a sewage water treatment plant) to evaporate the working medium (i.e., CO<sub>2</sub>) (HP5 - HP1) in an evaporator. The evaporated CO<sub>2</sub> is then compressed to the upper cycle pressure by a compressor, rising both temperature and pressure (HP1 - HP2). The heat is transferred to a heat sink (in the present study a district heating network) via a gas cooler (HP2 - HP3). The CO<sub>2</sub> is expanded onto the saturation line by an expander, where mechanical work can be extracted (HP3 - HP4). An expansion valve is used for two-phase expansion given that two-phase expansion remains a technical challenge.

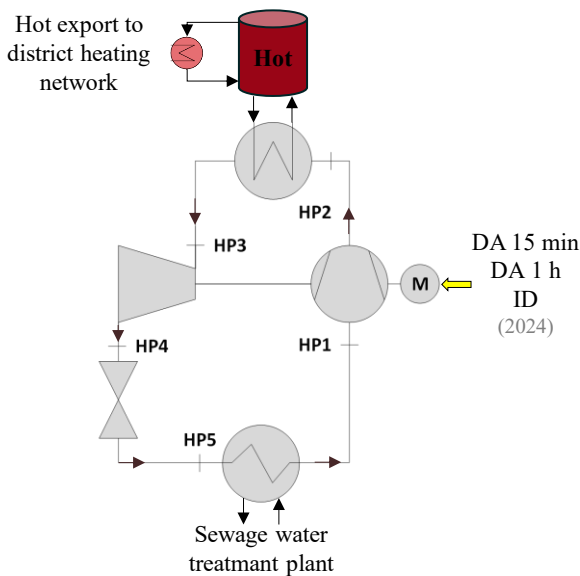


Fig. 1: General layout of a tCO<sub>2</sub>HP

By adopting the tCO<sub>2</sub>HP shown in Fig. 1 as the case study, this study defines three different LoCs. Tab. 1 shows the three LoC for the categories *COP*-estimation, market data resolution and storage tank assessment. The associated modeling approaches used in literature are shaded in grey.

The simplest LoC considers a constant *COP*, estimated using the Lorentz-*COP* (*L-COP*) formula (cf. Annex 58 [11]) and evaluated for the known summer and the winter conditions. Moreover, an unspecified but sufficiently high storage capacity is assumed, allowing to access the market data as an annual electricity price duration curve. No storage investment cost is considered. This approach requires minimal information on the underlying technology and market dynamics. The moderate LoC still considers constant *L-COP* but uses dispatch optimization and discrete storage capacities to assess the economic performance. The storage is assumed to be ideal, i.e., heat losses are neglected. For the complex LoC, the season-

dependent *COP* is used to account for efficiency changes throughout the year. Moreover, part load operation is allowed within full load and thermal turndown (i.e., the minimum load to maintain the required supply temperature) and evaluated based on the relative part load curve displayed in Fig. 2. Transients, i.e., starts, stops and load changes, are considered with a linear penalty on the generated heat, depending on the load change rate and the absolute load change as well as through a monetary start-up penalty. For all LoC, three capacity factors are considered, i.e., 25, 50 and 75 % for a constant demand profile. For all LoC, a constant rated heat sink capacity of 30 MW<sub>th</sub> is assumed.

Tab. 1: LoC (literature modeling approaches in grey)

	Simple	Moderate	Complex
<i>COP</i>	Const. 50 % Lorentz- <i>COP</i>		Cycle calculation
Operation	Annual electricity price duration curve	Dispatch optimization	
Storage	Unspecified but sufficiently high capacity	Specified and varied capacity	

For the dispatch optimization, a Mixed-Integer Linear Programming (MILP) problem is formulated in Python for quantitative evaluation of the electricity market-driven operation of the tCO<sub>2</sub>HP. First, the boundary conditions are specified: this covers the markets investigated as price time series, the technology specifications (e.g., power and efficiency) as well as general information such as solver settings, the interval length (i.e., time step, here 15 minutes) or the rolling horizon. The rolling horizon method is deployed to limit the perfect price foresight used in the present study to a shorter period (i.e., 1.5 days). The boundary conditions are forwarded to the optimization function. Based on the time interval and rolling horizon, market data is extracted, and the current storage level is calculated based on the initial storage level or the previous calculation step. Then, the problem is defined by:

- binary decision variables, e.g., to indicate which markets are active,
- continuous decision variables, e.g., resembling the charging or discharging power at that instant,
- constraints, e.g., energy balances and physical system boundaries such as storage capacity,
- objective function, i.e., maximizing the profit consisting of the sum of the product of the consumed and supplied electrical energy and associated prices for each market.

The overall optimization result (i.e., the operation schedule, total net revenue and *LCOH*) is based on a series of successive optimizations of daily operation. The operation of the tCO<sub>2</sub>HP is driven by varying prices on the markets and constrained by underlying technological characteristics. The optimization model is solved using the commercially available Gurobi solver [12].

The present study considers three energy markets: the Day-Ahead market on a 15-minute and 1-hour basis (DA15/DA1) as well as the continuous Intra-Day market on a 15-minute basis (ID) within the German electricity market framework. Historical price data is obtained from Entso-E grid operator platform DA1 and DA15 [13] and

Energy Charts (ID) [14]. For the simple LoC, only the DA15 market is considered, while all three markets are considered for the moderate and complex LoC.

The technical design parameters such as the storage duration, the *COP*, and the electrical power are specified based on available literature data or process calculations. The part load curve for different heat source temperatures is taken from [4], [15] and displayed in Fig. 2:

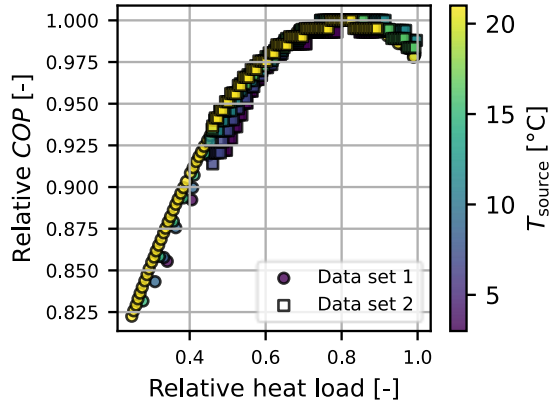


Fig. 2: Relative part load curve for efficiency

The y-axis shows the relative *COP* (related to its maximum value at the respective heat source temperature), the x-axis shows the relative thermal capacity. From Fig. 2 it can be seen that for the same supply and return temperature, the relation between the relative variables is independent of the heat source temperature. Moreover, it can be assumed that the relative *COP* trend is only minorly independent of return and supply temperature combinations, as it represents the general characteristics of the process: The first data set is based on 95/40 °C supply and return temperature, while the second data set is based on 150/45 °C gas cooler inlet and outlet temperature. As a result, the relative trends of the *COP* displayed in Fig. 2 can be multiplied with the results from the process calculation tool to obtain boundary condition dependent *COP* as time series. The process calculation tool deployed in the present study is introduced in [15], [16] and [17] and is based on a series of energy and mass balances to estimate the state points of the heat pump process. The main technical parameters used are displayed in Tab. 2:

Tab. 2: Assumption on technical parameters used in the process calculation tool

Variable	Value	Unit
Isentropic efficiencies of machinery	0.8	-
Pinch point temperature difference	5	K
Cooling of heat source	5	K

To estimate transients, publicly available literature on the load change of a tCO<sub>2</sub>HP is taken from [18]. In their study, Wolscht et al. display experimental and numerical results for transient load changes, from which the following relationship can be withdrawn: a load change between 100 to 30 % rated power takes 30 s, which is then assumed to be constant over the entire load range. Moreover, load change rate is assumed to be the same for start-up and shut down. From [19], an economic penalty is withdrawn to incorporate the impact of transients on the

maintenance cost (considered in fixed *OPEX*).

The main evaluation parameter in this study is Levelized Cost of Heat, *LCOH*, defined by:

$$LCOH = \frac{4.16 \cdot CAPEX + \sum_{t=1}^N \frac{OPEX_t}{(1+i)^t}}{\sum_{t=1}^N \frac{Q_t}{(1+i)^t}} \quad Eq. 1$$

*CAPEX* represents the equipment cost in Euro (€), *OPEX* equals the sum of fixed and variable operational cost in Euro per year (€/a), *Q* the yearly exported thermal energy in Kilowatthours (kWh), *N* equals the economic lifetime of the system in years (a), *t* is a counter variable iterating through the individual years and *i* is the interest rate in percent (%). The economic lifetime is assumed to be 20 a, the interest rate is equal to 8 %.

The factor 4.16 accounts for all other product-related cost such as labor, design, engineering, production, profits and overheads as well as installation and integration cost at the site in accordance with [20].

From the IEA Annex 58 – Task 1 Technologies [11], the equipment cost can be withdrawn and a power law relationship can be derived, which is used for further analysis. Thereby, it is assumed that the high specific investment cost relates to the smaller thermal capacity due to economy of scale reasons. The resulting cost function can be expressed as:

$$\text{spec. } CAPEX = 1,038.4 \frac{\text{€}}{\text{kW}_{\text{th}}} \cdot \left( \frac{\dot{Q}_{\text{rated}}}{\text{MW}_{\text{th}}} \right)^{-0.317} \quad Eq. 2$$

$\dot{Q}_{\text{rated}}$  equals the rated power of the HTHP in Megawatt (MW). The storage costs are estimated based on literature data and on realized projects for pressurized hot water tanks [21], [22], [23] assuming a *CAPEX* share of 65 % in accordance with [24]. This leads to the following expression:

$$CAPEX = 1,975,526 \text{ €} + 53,418 \text{ €} \cdot \left( \frac{V}{1 \text{ m}^3} \right)^{0.41} \quad Eq. 3$$

*V* equals the storage volume and is assessed using the biggest difference between the supply and return temperature and assuming a temperature-independent specific heat capacity equal to 4.18 kJ/kg/K.

The city under investigation in the present study is Flensburg (Germany), as data on the heating network and the outdoor temperature is publicly available. In Fig. 3, time series data for the outdoor temperature, supply and return of the district heating network and a sewage water treatment plant are displayed. The y-axis shows the temperature in °C, the x-axis shows the time of the year 2024.

The outdoor temperature can be accessed by the Deutscher Wetterdienst data basis [25]. As there is no weather station in Flensburg, data from Glücksburg is used for Flensburg. This approach is considered valid for the purpose of this study, as the distance between the two cities is less than 10 km. For the district heating network, data on the outdoor, supply and return temperature is available for the years 2014-2016 [26]. From this data, the heating curve is withdrawn, which is subsequently combined with the outdoor temperature of 2024 to derive the supply and return temperature of 2024. The sewage water treatment plant temperature is taken from publicly available data in Stockholm [27]. No clear trend is observed between the sewage water treatment plant temperature and the outdoor temperature. A comparison of

the Stockholm data set with available yet confidential German data set reveals no qualitative differences. Thus, the Stockholm data set is used for Flensburg under the assumption that the heat source holds enough volume flow to provide the required heat throughout the year.

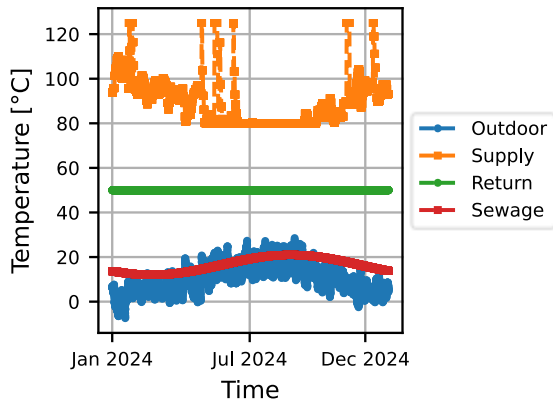


Fig. 3: Time series data on outdoor, supply, return and sewage water treatment plant temperature

### 3. Results

First, a validation of the complex LoC COP estimation method shall be presented. Second, the results for the LCOH over LoC are evaluated.

In Fig. 4, the COP estimation method used in the complex LoC is shown.

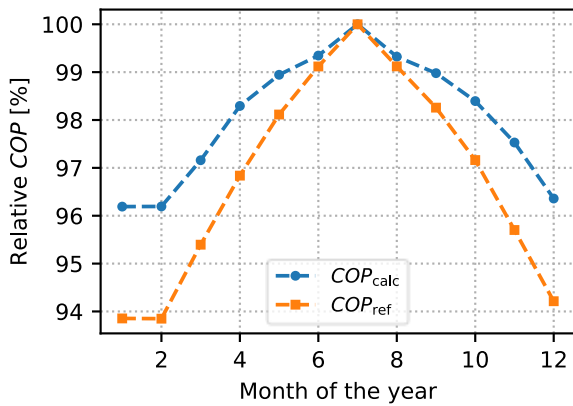


Fig. 4: Validation of COP-approach

The y-axis shows the relative COP, the x-axis shows the month of the year. Publicly available data of the tCO<sub>2</sub>HP from a stationary, part load capable process model [4] is displayed along with the results obtained using the in-house stationary process calculation tool. The in-house model deviates below 2 %-points throughout the year. This confirms the validity of the chosen COP-estimation approach. Nevertheless, it should be mentioned that the absolute COP values differ throughout the year with an offset between 0.43 (summer) and 0.49 (winter). The reason lies in non-optimized assumptions regarding component efficiencies.

For the simple and moderate LoC, the resulting COP for summer and winter are derived based on the best and worst combination of supply, return and sewage water treatment plant temperature, respectively. A constant Lorentz efficiency of 50 % is assumed, resulting in a summer L-COP of 3.6 and a winter L-COP of 2.3. For the

simple LoC, the average electricity procurement cost for the three investigated capacity factors, i.e., 25, 50 and 75 %, are 17.4, 41.1 and 57.3 €/MWh<sub>el</sub>, respectively.

Fig. 5 shows the results for the LCOH for the investigated LoC and capacity factors.

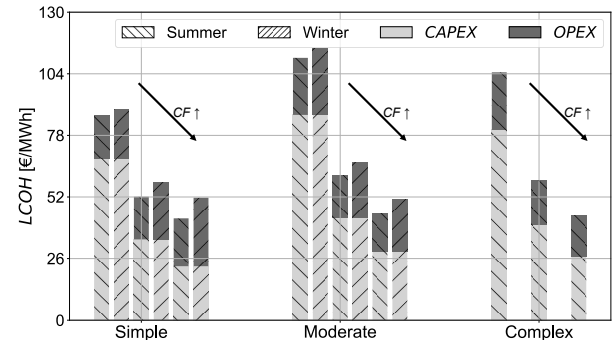


Fig. 5: LCOH for investigated LoC and CF

The y-axis shows the LCOH in €/MWh<sub>th</sub>, the x-axis shows the LoC. The investigated capacity factors (CF) are indicated by different markers, summer and winter values are highlighted as full and empty markers, respectively. Data points associated with the same season and CF are connected by dashed lines. In case of the complex LoC, no season can be specified as the COP is evaluated based on the season.

The results are generally as expected between three different LoC regarding the following aspects:

- LCOH decreases with increasing CF
- LCOH is lower in summer compared to winter
- LCOH difference between summer and winter increases with increasing CF

Moving from the simple to the moderate LoC leads to increasing LCOH regardless of the season and the CF. Moving from the moderate to the complex LoC leads to a decrease in LCOH compared to the moderate LoC.

### 4. Discussion

The deviation between the in-house tool and the reference is comparatively small because the boundary conditions, i.e., district heating temperatures and heat source temperature, do not change significantly throughout the year. As a result, the turbomachinery can operate close to their design points with only minor impact on overall efficiency. However, if the system operates further away from its design point, e.g., triggered by more notable deviations in the boundary conditions, the chosen modelling approach must be reassessed. Unfortunately, such data set is not available to the authors, so this task is considered as future work.

The main findings on LCOH can be explained as follows:

- LCOH decreases with increasing CF because CAPEX can be distributed over more generated heat.
- LCOH is lower in summer compared to winter because of the higher COP, which decreases OPEX.
- LCOH difference between summer and winter increases with increasing CF, because the COP lever can be better exploited for higher operating hours.

The increase in LCOH between the simple and moderate LoC is impacted twofold: first, higher CAPEX due to the consideration of a storage tank, and second, higher

*OPEX* as the limited storage capacity leads to higher electricity procurement cost. Although multi-market trading (in case of moderate LoC) can generally reduce the electricity procurement cost and negative prices can be utilized more efficiently, high price events must be used to fulfil the heat demand profile resulting in an increase in *OPEX*. However, the relative increase in *LCOH* is lower for higher *CF*, as the “unlimited storage” advantage of the simple LoC decreases for increasing operating hours. In case of a *CF* of 100 %, *OPEX* would be the same for all LoC. Considering that HTHP is expected to run at higher *CF* (due to the high *CAPEX*), an absolute deviation between simple and moderate LoC of 10-15 % can be expected, which is quite substantial, although potentially within the uncertainty range of the *LCOH* assessment.

The development of the *LCOH* from moderate to complex LoC can also be explained by the *CAPEX-OPEX*-ratio. For the moderate and complex LoC, *CAPEX* is almost the same (deviation only due to different storage dimensions), as a constant rated heat sink capacity is assumed. However, for the complex LoC, the design point is chosen at the lowest *COP* calculated by the design tool. This yields a higher electrical input power compared to the moderate LoC. Consequently, heat production during periods of high *COP*, e.g., during summer, yields more absolute heat generation at times with comparatively low (and negative) electricity prices. As a result, for low *CF*, the *LCOH* decreases. However, this lever becomes a disadvantage when *CF* increases as more high price intervals must be used to fulfill the heat demand profile, thus increasing the electricity procurement cost between the summer and winter value of the moderate LoC, respectively.

The displayed LoC in Fig. 5 considers seasonal *COP*, the part load trend presented in Fig. 2 as well as transient penalties and a startup penalty. This setup is numerically expensive. Thus, in a further study, the impact of the individual “add-ons” is studied: first, only part load operation between thermal turndown (50 %) and full load using the seasonal *COP* has been considered. Second, transient penalties and the startup penalty are introduced. Both are compared to the complex LoC. The results are presented in Tab. 3.

Tab. 3: *LCOH* [€/MWh<sub>th</sub>] of different LoC and *CF*

<i>CF</i>	“Seasonal <i>COP</i> ”	“Seasonal <i>COP</i> + transients”	“Seasonal, part load <i>COP</i> + transients”
0.25	98.9	99.6	99.6
0.5	60.0	60.4	60.7
0.75	48.9	49.2	49.8
Calc. time	3 min	5 min	571 min

The *LCOH* does not change notably if the HTHP performance is expressed further than through a seasonal *COP* (i.e., < 2 %), regardless of the *CF*. However, the calculation time increases significantly with increasing complexity. As a result, it is suggested that the “complex” LoC should consider part load operation between thermal turndown and full load and a seasonal *COP* estimation, if similar characteristics, i.e., negligible part load behavior and fast dynamics, can be assumed.

A comparison with absolute *LCOH* values from other studies, which utilize LoC “simple” [28] (90-180 €/MWh<sub>th</sub>)

and “moderate” [29] (25-40 €/MWh<sub>th</sub>) shows that the results of the present study are within a realistic range. However, the purpose of the present study is not to serve a generally applicable *LCOH*, as this is a site-specific task. The goal is more to evaluate the relative difference between different assessment methods.

For future studies, several open questions remain:

- In case of off-design operation, the maximum heat supply varies, which is not considered in the present study.
- In case of fast dynamics, the general startup penalty used might be inaccurate, which could have an impact on the economic attractiveness of a startup of the system (i.e., the trade-off between exploiting changes in the electricity procurement cost and economic penalties of transients).
- The current study focuses on the German electricity market framework, which should be expanded to the European level.
- Different technologies might exhibit different characteristics. It is suggested to expand the view to subcritical and Brayton-based systems.

## 5. Conclusion

The present study highlights the critical role of model complexity in the techno-economic evaluation of high-temperature heat pumps (HTHPs) for renewable heat supply. By comparing simple, moderate, and complex levels of complexity (LoC) in *COP* estimation, market data resolution, and storage modeling, the results demonstrate that the chosen LoC significantly impacts the Levelized Cost of Heat (*LCOH*): *LCOH* increases 50 % for 25 % capacity factor and 10 % for 75 % capacity factor, respectively, if the operation is optimized by a MILP instead of an annual duration curve. If the coefficient of performance (*COP*) is assessed as a seasonal-depending *COP*, the change in *LCOH* is below 10 %. The consideration of part load and transient effects shows an impact below 1 % but increases the computational effort exponentially.

The study shows that for the transcritical CO<sub>2</sub> based heat pump evaluated, the inclusion of detailed part load behavior, transients, and associated penalties has only a minor effect (< 2 %) on *LCOH* but substantially increases computational effort. Consequently, for practical techno-economic assessments, a complex LoC that allows part load operation between thermal turndown and full load using a constant, seasonal *COP* but neglects minor dynamic effects is recommended to balance accuracy and computational efficiency.

In future studies, the LoC must be assessed in more broadness, to derive tangible guidelines in how to assess the techno-economic performance of HTHP in a simple, yet sufficiently accurate way.

## Acknowledgement

We would like to thank Lennart Frantz for supporting the literature survey which lays the foundation of this work.

## References

- [1] REN21, Renewables 2022 Global Status Report. Paris, 2022. 11.
- [2] L. Wolscht, M. Podeur, M. Adams, and E. Jacquemoud, “Off-Design Heat Exchanger Modelling for Transcritical CO<sub>2</sub> Heat Pump Cycles,” in Proceedings of ASME Turbo Expo 2024:

- Turbomachinery Technical Conference and Exposition (GT2024): June 24–28, 2024, London, United Kingdom, doi: 10.1115/GT2024-126683.
- [3] B. Yu, J. Yang, D. Wang, J. Shi, and J. Chen, “An updated review of recent advances on modified technologies in transcritical CO<sub>2</sub> refrigeration cycle,” *Energy*, vol. 189, p. 116147, 2019. doi: 10.1016/j.energy.2019.116147.
- [4] P. Gabrielli, G. Sansavini, S. Singh, L. S. Garcia, E. Jacquemoud, and P. Jenny, “Off-Design Modeling and Operational Optimization of Trans-Critical Carbon Dioxide Heat Pumps,” *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, vol. 144, no. 10, 2022, Art. no. 101004, doi: 10.1115/1.4055233.
- [5] A. Kijo-Kleczkowska, P. Bruś, and G. Więciorkowski, “Economic analysis of heat pump exploitation – A case study,” *Energy*, vol. 280, p. 128184, 2023. doi: 10.1016/j.energy.2023.128184.
- [6] E. Vieren, K. Couvreur, M. de Paepe, and S. Lecompte, “High-temperature heat pumps in industrial heating networks: A study on energy use, emissions, and economics,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 259, p. 124799, 2025. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2024.124799.
- [7] A. Vannoni, A. Sorce, A. Traverso, and A. Fausto Massardo, “Techno-economic optimization of high-temperature heat pumps for waste heat recovery,” *Energy Conversion and Management*, vol. 290, p. 117194, 2023. doi: 10.1016/j.enconman.2023.117194.
- [8] H. Sadeghi, A. Ijaz, and R. M. Singh, “Current status of heat pumps in Norway and analysis of their performance and payback time,” *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 54, p. 102829, 2022. doi: 10.1016/j.seta.2022.102829.
- [9] S. Siddiqui, J. Macadam, and M. Barrett, “The operation of district heating with heat pumps and thermal energy storage in a zero-emission scenario,” *Energy Reports*, vol. 7, pp. 176–183, 2021. doi: 10.1016/j.egy.2021.08.157.
- [10] MAN Energy Solutions, “MAN Heat Pump,” Accessed: Oct. 14, 2025.
- [11] Benjamin Zühlsdorf et al., IEA HPT Annex 58: High-Temperature Heat Pumps. Task 1 report: Technologies, 2023. 1111.
- [12] L. L. Gurobi Optimization, Gurobi Optimizer Reference Manual. <https://www.gurobi.com/###1212>.
- [13] European TSOs, Day-ahead Prices. 1313.
- [14] Fraunhofer ISE, Stromproduktion und Börsenstrompreise in Deutschland 2023. 1414.
- [15] N. H. Petersen et al., “Nutzung transkritischer CO<sub>2</sub>-Prozesse für Wärmepumpen und elektro-thermische Energiespeicher,” in *Kraftwerkstechnik 2021*, M. Beckmann and A. Hurtado, Eds., Freiberg: SAXONIA, 2021, pp. 1388–1403. 1515.
- [16] N. H. Petersen et al., “Potentialanalyse der Nutzung transkritischer Co<sub>2</sub>-Prozesse zur Fern- und Industrierwärmebereitstellung in Nordrhein-Westfalen,” in *17. Symposium Energieinnovation 2022*, pp. 1–13.
- [17] N. H. Petersen, M. Arras, M. Wirsum, and L. Ma, “Integration of large-scale heat pumps to assist sustainable water desalination and district cooling,” *Energy*, vol. 289, p. 129733, 2024. doi: 10.1016/j.energy.2023.129733.
- [18] L. Wolscht, R. Somaini, E. Jacquemoud, and P. Jenny, “Full-Scale Demonstration and Validation of a 35 MW Transcritical CO<sub>2</sub> Heat Pump,” in *Proceedings of ASME Turbo Expo 2023: Turbomachinery Technical Conference and Exposition (GT 2023)*: June 26–30, 2023, Boston, Massachusetts, USA, doi: 10.1115/GT2023-101356.
- [19] Danish Energy Agency, Technology Data - Energy Plants for Electricity and District heating generation, 2016. 1919.
- [20] G. Kosmadakis, C. Arpagaus, P. Neofytou, and S. Bertsch, “Techno-economic analysis of high-temperature heat pumps with low-global warming potential refrigerants for upgrading waste heat up to 150 °C,” *Energy Conversion and Management*, vol. 226, p. 113488, 2020. doi: 10.1016/j.enconman.2020.113488.
- [21] A. Kraft and M. Maximini, “Wärmespeicher für Nah- und Fernwärmenetze,” 2021.
- [22] A. C. Christidis et al., EnEff:Wärme - Einsatz von Wärmespeichern und Power-to-Heat-Anlagen in der Fernwärmeezeugung (in ger), *Forschung und Entwicklung / AGFW*. Frankfurt am Main: AGFW, vol. 44, doi: 10.2314/GBV:1023701839. 2222.
- [23] M. Morandin, M. Mercangöz, J. Hemrle, F. Maréchal, and D. Favrat, “Thermoeconomic design optimization of a thermo-electric energy storage system based on transcritical CO<sub>2</sub> cycles,” *Energy*, vol. 58, pp. 571–587, 2013. doi: 10.1016/j.energy.2013.05.038.
- [24] European Commission. Joint Research Centre., ILF Consulting Engineers Austria GmbH., and AIT Austrian Institute of Technology GmbH., Long term (2050) projections of techno-economic performance of large-scale heating and cooling in the EU. Publications Office, 2017. 2424.
- [25] “Index of /climate\_environment/CDC.” Accessed: Oct. 14, 2025. [https://opendata.dwd.de/climate\\_environment/CDC/###2525](https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/###2525).
- [26] Stadtwerke Flensburg GmbH, District heating network data for the city of Flensburg from 2014–2016. Zenodo. <https://zenodo.org/records/2562658/###2626>.
- [27] F. Golzar, D. Nilsson, and V. Martin, “Forecasting Wastewater Temperature Based on Artificial Neural Network (ANN) Technique and Monte Carlo Sensitivity Analysis,” *Sustainability*, vol. 12, no. 16, p. 6386, 2020. doi: 10.3390/su12166386.
- [28] Agora Energiewende and Fraunhofer IEG, “Roll-out von Großwärmepumpen in Deutschland: Strategien für den Markthochlauf in Wärmenetzen und Industrie,” 2023.
- [29] U. Trabert et al., “Techno-economic evaluation of electricity price-driven heat production of a river water heat pump in a German district heating system,” (121–142 Pages / *International Journal of Sustainable Energy Planning and Management*, Vol. 31 (2021)), *IJSEPM*, vol. 31, pp. 121–142, 2021. doi: 10.5278/ijsepm.6291.

# Open Source Web Dashboard zur Unterstützung der Konzeption von Wärmeversorgungssystemen

Malte FRITZ<sup>1\*</sup>, Jonas FREIßMANN<sup>1</sup>, Ilja TUSCHY<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Zentrum für nachhaltige Energiesysteme (ZNES), Europa-Universität/Hochschule Flensburg, Kanzleistr. 91-93, 24943 Flensburg

\* malte.fritz@hs-flensburg.de

---

## Kurzfassung

Um die Einstiegshürde in die Energiesystemanalyse für fachfremde Interessengruppen abzusenken, wird ein auf dem Pythonframework Streamlit und der Software oemof.solph basierendes Open Source Web Dashboard zur Konzeption von Wärmeversorgungssystemen vorgestellt. Mit dem Tool stehen eine breite Auswahl typischer Wärmeversorgungseinheiten sowie eine umfangreiche Datenbank mit Lastdaten, Preiszeitreihen und Emissionsfaktoren zur Verfügung. Zudem können eigene Daten integriert werden, um individuelle Szenarien zu simulieren. Dabei ist es möglich, zwischen einer reinen Einsatzoptimierung mit vordefinierten Anlagenkapazitäten und einer kombinierten Auslegungs- und Einsatzoptimierung zu wählen. Damit erlaubt das Dashboard die Analyse komplexer Fragestellungen, die regelmäßig in der Konzeption und Planung von Wärmeversorgungssystemen aufkommen.

## Schlagworte

Auslegungs- und Einsatzoptimierung; Einsatzoptimierung; MILP; oemof.solph; Simulationstool; Streamlit; Wärmewende

---

## 1. Einleitung

Die Transformation von Wärmesystemen hin zur klimaneutralen Energieversorgung ist zu einem zentralen Anliegen globaler Nachhaltigkeitsbemühungen geworden [1]. Besonders bei der Konzeption von nachhaltigen Wärmeversorgungssystemen gibt es oft Vorbehalte in der Bevölkerung hinsichtlich Wirtschaftlichkeit und Effizienz einzelner Wärmeversorgungsanlagen. Da diese häufig auf mangelnde Transparenz und fehlende Vergleichsmöglichkeiten zurückzuführen sind, wird im Rahmen eines transferorientierten Forschungsprojekts [2] an der Hochschule Flensburg ein niederschwelliges Wärmetool mit benutzerfreundlicher Oberfläche entwickelt, das eine bessere Nachvollziehbarkeit und Bewertung verschiedener Wärmeversorgungsszenarien ermöglicht.

Dazu wird in Zusammenarbeit mit Wärmeversorgern, Beratern und Planer\*innen sowie Kommunen bereits in der Wissenschaft etablierte Open Source Software für alle relevanten Stakeholder zugänglich gemacht und mit offenen Daten hinterlegt. Durch einfache und bedarfsgerechte Nutzung der Software soll eine gemeinsame Konzeption von Wärmeversorgungssystemen niederschwellig und nachvollziehbar gestaltet werden. Anhand von transparenten Optimierungen sollen wichtige Erkenntnisse und Einsichten gewonnen werden, um die Transformation der Wärmeversorgung zu beschleunigen.

Der hier vorgestellte Beitrag zeigt dieses Open Source Web Dashboard zur Unterstützung der Konzeption von Wärmeversorgungssystemen. Im folgenden Abschnitt wird ein Überblick von den in der Wissenschaft relevanten Simulationssoftware gegeben sowie die zugrunde liegende Energiesystemoptimierung und der Aufbau des

Dashboards beschrieben. In einer Beispielanwendung wird anhand einer Fallstudie der Einfluss der energiepolitischen und -wirtschaftlichen Rahmenbedingungen auf die Gestaltung von Wärmeversorgungssystemen in Form von zwei verschiedenen Gaspreisniveaus untersucht.

## 2. Wärmetool

In der Wissenschaft sowie der Wirtschaft werden eine Vielzahl verschiedenster Softwaretools zur Modellierung, Simulation, Analyse und Optimierung von Energiesystemen eingesetzt [3]. Sie dienen Planern und anderen Stakeholdern in allen Phasen der Projektierung als zentrales Werkzeug und ermöglichen frühzeitig den Vergleich verschiedenster technologischer Konzepte, welche anhand technischer, ökonomischer und immer häufiger ökologischer Kriterien bewertet werden können. Aufgrund der äußerst umfangreichen und sich ständig im Wandel befindenden Toollandschaft wird regelmäßig der Versuch unternommen, diese innerhalb von Metastudien übersichtlich darzustellen. Dort werden die sich zum Teil stark unterscheidenden Softwaretools nach verschiedensten Kriterien sortiert, um einen Überblick über die Funktionsfähigkeit, die zugrundeliegende Methodik und das Einsatzgebiet zu schaffen.

Eine aktuelle und sehr umfangreiche Metastudie dieser Art wurde von Klemm et al. im Jahre 2021 durchgeführt [3]. Dort wurden 145 verschiedene Softwaretools zur Modellierung von Energiesystemen analysiert und einander gegenübergestellt. Im Wesentlichen unterscheiden sich die untersuchten Tools in den Kriterien Anwendungsgegenstand, Methodik, räumliche Abdeckung, sektorale Abdeckung und zeitliche Auflösung. Diese Kriterien wurden für eine Vorauswahl herangezogen, um geeignete

Softwaretools zur Planung und Optimierung von thermischen Energiespeichern innerhalb von Wärmeversorgungssystemen zu identifizieren.

Aufgrund des quelloffenen Ansatzes und der Möglichkeit, das Verfahren der Gemischt Ganzzahligen Linearen Optimierung (MILP, von engl.: *Mixed Integer Linear Programming*) zu nutzen, wird das Softwaretool *oemof.solph* [4] verwendet.

## 2.1 Energiesystemoptimierung

Um eine Wärmelast mithilfe verschiedener Versorgungsanlagen zu jeder Zeit aus Sicht eines wirtschaftlich handelnden Akteurs bestmöglich zu decken, können Auslegung und Einsatz der verfügbaren Anlagen hinsichtlich der Kosten und Erlöse optimiert werden. Mithilfe von MILP wird eine Zielfunktion definiert, deren Ergebnis im Lösungsverfahren minimiert wird. Der Lösungsraum kann über zusätzliche lineare Nebenbedingungen, sogenannte *Constraints*, beschränkt werden. [5]

Die Zielfunktion besteht aus den in jedem Zeitschritt  $t$  auftretenden Kosten  $K_a$ , abzüglich möglicher Erlöse  $E_a$  aller im System betrachteten Anlagen  $a$ . Wenn darüber hinaus die Kapazitäten einer bestimmten Untermenge von Anlagen  $b$  zu dimensionieren sind, werden zusätzlich deren Annuitäten der Investitionen  $A_{Inv,b}$  sowie deren Fixkosten  $K_{fix,b}$  in der Zielfunktion berücksichtigt, wie in Gl. 1 zu erkennen ist.

$$\min \left[ \sum_t \left( \sum_a (K_a(t) - E_a(t)) \right) + \sum_b (A_{Inv,b} + K_{fix,b}) \right] \quad \text{Gl. 1}$$

Nichtsdestotrotz werden die Annuitäten und Fixkosten der nicht zu dimensionierenden Anlagen in der nachgelagerten Wirtschaftlichkeitsbetrachtung berücksichtigt.

Alle Kosten und Erlöse sind abhängige Variablen des Optimierungsproblems und ergeben sich aus Nebenbedingungen, die in [5] vollständig abgebildet sind. Bei der Auslegungsoptimierung wird die optimale Zusammensetzung der im Wärmeversorgungssystem vorkommenden Versorgungsanlagen ermittelt. Die unabhängigen Variablen im Sinne der Auslegungsoptimierung sind beispielsweise die minimalen und maximalen Kapazitäten der Versorgungsanlagen. Demgegenüber sind die unabhängigen Variablen der Einsatzoptimierung die zur Deckung der Wärmelast nötigen Wärmeströme im Versorgungssystem. Somit werden bei der kombinierten Auslegungs- und Einsatzoptimierung die verfügbaren Wärmeströme aller Versorgungsanlagen durch die Limitierung ihrer jeweiligen Kapazitäten begrenzt. [5]

Zur Übersetzung in ein abstraktes mathematisches Modell wird von *oemof.solph* intern das ebenfalls quelloffene Pythonpaket *Pyomo* genutzt [6]. Nach der mathematischen Formulierung der Lösungsmatrix ist das MILP Problem zu lösen. Die Lösung des Optimierungsproblems erfolgt durch externe Lösungsalgorithmen, sogenannte *Solver* (Open Source: *HiGHS* [7], *SCIP* [8], Proprietär: *Gurobi* [9]). In den nachfolgenden Fallstudien wird der proprietäre Solver Gurobi verwendet, der zumindest mit einer akademischen Lizenz kostenlos zur Verfügung steht. [5]

## 2.2 Aufbau des Dashboards

Um die Einstiegshürde in die Energiesystemanalyse für fachfremde Interessengruppen zu senken und Bedienbarkeit so niederschwellig wie möglich zu gestalten, wurde für das Tool eine benutzerfreundliche Oberfläche

entwickelt. Diese basiert auf dem quelloffenen Python-Framework *Streamlit* [10] und kann mithilfe eines Web Dashboards bedient werden.

Das Dashboard besteht aus einer Begrüßungs- und drei Hauptseiten, die schrittweise zu bearbeiten sind. Auf der ersten Hauptseite ist zunächst das *Energiesystem* zu definieren, das sich aus fünf Abschnitten zusammensetzt:

- Wärme
- System
- Anlagen
- Versorgung
- Sonstiges

Innerhalb dieser Abschnitte werden die für die Optimierung relevanten Inputdaten festgelegt. Neben den zu verwendenden Wärmelastdaten gehören dazu die in der Optimierung einsetzbaren Wärmeversorgungsanlagen sowie deren technische und wirtschaftliche Parameter. Dabei ist es möglich, für jede Anlage zwischen einer reinen Einsatzoptimierung mit vordefinierten Anlagenkapazitäten und einer kombinierten Auslegungs- und Einsatzoptimierung zu wählen. Darüber hinaus sind die Rahmenparameter wie Elektrizitäts- und Gasversorgungsdaten sowie Emissionsfaktoren und CO<sub>2</sub>-Preise aus einer vorkonfigurierten Datenbank festzulegen. Als letzter Schritt sind sonstige Parameter auszuwählen, die für die wirtschaftliche Nachberechnung und die Optimierung relevant sind. Zudem ist es auch möglich, eigene Daten zu verwenden oder die vorhandenen Daten zu skalieren bzw. anzupassen, um über die vorhandene Datenbank hinaus auch individuelle Szenarien simulieren zu können.

Danach gelangen Nutzende zur Hauptseite *Optimierung*. Bei dieser Seite handelt es sich zunächst um eine Zusammenfassung der zuvor definierten Inputdaten. Neben dem ausgewählten Energiesystem sind Mittelwert, Minimalwert, Median und Maximalwert der Zeitreihen sowie relevante Parameter der Optimierung dargestellt. Darüber hinaus können auf dieser Seite die Inputdaten und das Energiesystem abgespeichert werden, um dieses für andere Simulationen wiederzuverwenden. Nach dem Starten der Optimierung von dieser Seite aus wird schließlich das ausgewählte Energiesystem simuliert.

Nach erfolgreicher Optimierung gelangen Nutzende zur letzten Hauptseite *Simulationsergebnisse*. Diese setzt sich aus bis zu fünf Abschnitten zusammen:

- Überblick
- Anlageneinsatz
- Stromproduktion
- Speicherstand
- Erweitert

Wie in Abb. 1 dargestellt, sind die gegebenenfalls in der Optimierung ermittelten oder laut Vorgabe installierten Kapazitäten sowie die damit optimale Wärmeproduktion der einzelnen Anlagen abgebildet. Zudem werden relevante wirtschaftliche Kennzahlen, wie die Wärmegestehungskosten (LCOH, von engl.: *Levelized Cost Of Heat*) oder ökologische Kennzahlen, wie die verursachten Emissionen, angezeigt.

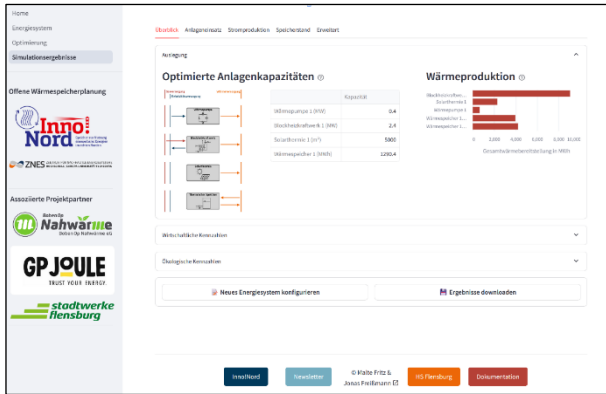


Abb. 1: Ausschnitt des Web Dashboards: Simulationsergebnisse

Beim Anlageneinsatz können anhand der geordneten Jahresdauerlinien und des tatsächlichen Anlageneinsatzes Erkenntnisse über die Fahrweise der einzelnen Anlagen gewonnen werden. Falls eine Anlage Strom produziert oder aber diesen bezieht, erscheint der Abschnitt Elektrizität, der Informationen über Stromkosten, -erlöse und -produktion enthält. Das gleiche Prinzip gilt beim Abschnitt Speicherstand, der nur vorhanden ist, wenn ein Speicher im System integriert ist. Dieser beinhaltet Simulationsergebnisse über den Speicherstand sowie Speicherbe- und -entladungsmengen. Zusätzlich kann der sogenannte *Solver Log* der Optimierung im Abschnitt Erweitert eingesehen werden.

### 3. Fallstudie

Ziel der folgenden Fallstudie ist es, die Anwendbarkeit des Tools zu demonstrieren und den Einfluss der energiepolitischen und -wirtschaftlichen Rahmenbedingungen in Form von zwei verschiedenen Gaspreinsniveaus auf Auslegung und Betrieb von Wärmeversorgungssystemen zu untersuchen.

#### a. Wärmeversorgungssystem

In diesem Fallbeispiel wird ein Wärmeversorgungssystem konzipiert und mithilfe kombinierter Auslegungs- und Einsatzoptimierungen werden optimale Dimensionierung und optimaler Betrieb der Versorgungsanlagen ermittelt. Als Datengrundlage dienen Wärmelastdaten des Jahres 2019 aus dem Versorgungssystem der deutschen Stadt Flensburg. Die Modellierung umfasst ein Stadtquartier mit 500 angeschlossenen Wohnungseinheiten, sodass die in Abb. 2 dargestellte Wärmelast entsprechend den angeschlossenen Wohnungseinheiten skaliert ist.

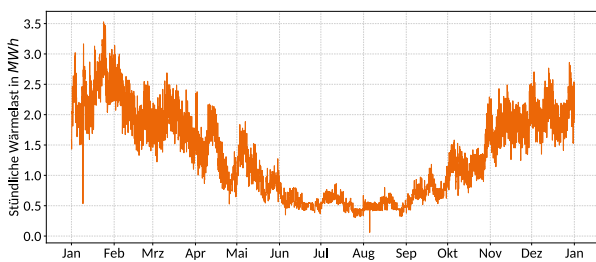


Abb. 2: Auf 500 Wohnungseinheiten skalierte Zeitreihe der Wärmelast von Flensburg aus dem Jahr 2019 [11]

Wie in Abb. 3 zu erkennen, können zur Deckung der Wärmelast eine Wärmepumpe (WP), ein Blockheizkraftwerk (BHKW) und eine Solarthermieanlage

(Solar) in Kombination mit einem thermischen Energiespeicher (TES) eingesetzt werden.

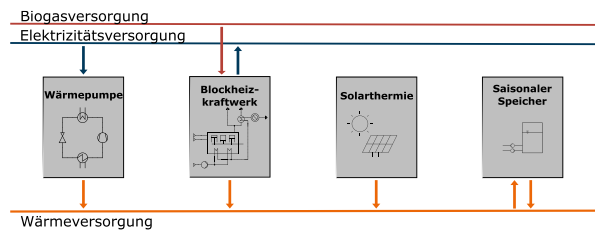


Abb. 3: Topologie des Wärmeversorgungssystems

Im Gegensatz zu den anderen Versorgungseinheiten, die im Sinne der Auslegungsoptimierung keiner Limitierung der maximalen Kapazität unterliegen, wird angenommen, dass die Solarthermie aufgrund der verfügbaren Fläche maximal mit einer Kapazität von 5.000 m<sup>2</sup> dimensioniert werden kann. Darüber hinaus wird festgelegt, dass der Speicherfüllstand zu Beginn und Ende der Betrachtungsperiode das gleiche Niveau aufweisen muss. Im Sinne einer saisonalen Speicherung ist der Startfüllstand des Speichers ad hoc auf 50 % festgelegt. Alle anderen Parameter der Wärmeversorgungsanlagen sind die Standardwerte, die im Tool hinterlegt sind.

#### b. Rahmenbedingungen

Auch als Grundlage der übrigen Rahmenbedingungen dienen Daten des Jahres 2019. Dieses Jahr markiert den letzten Zeitpunkt vor dem Einsetzen der Corona-Pandemie und die durch den russisch-ukrainischen Krieg hervorgerufene Energiekrise. Um den Einfluss der energiepolitischen und -wirtschaftlichen Rahmenbedingungen in Form von zwei verschiedenen Gaspreinsniveaus zu untersuchen, werden jedoch die Gaspreise der Jahre 2019 und 2022 betrachtet. Sie sind in Abb. 4 neben den Spotmarktpreisen des Jahres 2019 dargestellt.

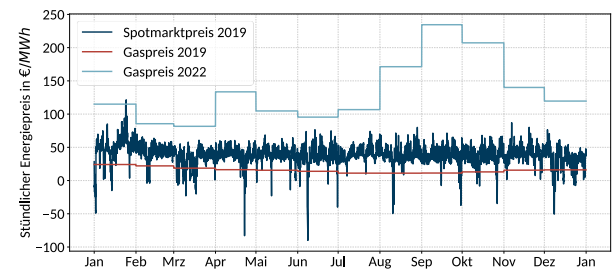


Abb. 4: Zeitreihen der Spotmarkt- und Gaspreise

Die weiteren für diese Fallstudie relevanten Rahmenparameter des Jahres 2019 sind im Input des entsprechenden Repository [12] zu finden.

#### c. Ergebnisse

Aus der kombinierten Auslegung und Einsatzoptimierung werden Simulationsergebnisse wie Kapazitäten, Anlageneinsatz, Wirtschaftlichkeit und Systemwirkungen ermittelt und analysiert. Dabei wird im Folgenden das Gaspreinsniveau des Jahres 2019 als Setup 1 und das des Jahres 2022 als Setup 2 bezeichnet.

In Tab. 1 sind die Ergebnisse der optimierten Auslegung der unterschiedlichen Setups dargestellt. Im Rahmen von Setup 1 zeigt sich, dass das BHKW mit einer installierten Leistung von 2,4 MW in Kombination mit dem Wärmespeicher die Wärme allein bereitstellt. Der Wärmespeicher ist in der Lage, eine Energie von 170 MWh

aufzunehmen, was ca. 70 Volllaststunden der KWK-Anlage und damit dem vorgegebenen Maximalwert entspricht. Weder Wärmepumpe noch Solarthermie sind wirtschaftlich attraktiv genug, um in diese Technologien zu investieren. Im Setup 2 erweist sich ebenfalls das BHKW mit einer installierten Leistung von 2,1 MW als die dominierende Erzeugungseinheit für die Wärmebereitstellung und ist nur minimal kleiner als im Setup 1. Die Wärmepumpe hat hier aber eine installierte Leistung von 300 kW und die Solarthermie wird sogar bis zu dem festgelegten Maximum von 5000 m<sup>2</sup> ausgebaut. Wie im Setup 1 ist der Wärmespeicher mit der maximalen Kapazität in der Lage, eine Energie von 170 MWh aufzunehmen, was in diesem Fall ca. 80 Volllaststunden der KWK-Anlage entspricht.

Tab. 1: Simulationsergebnisse der Kapazitäten

	WP	BHKW	Solar	TES
	MW	MW	m <sup>2</sup>	MWh
Setup 1	-	2,4	-	170
Setup 2	0,3	2,1	5.000	170

Neben den Ergebnissen der Auslegung sind in Abb. 5 die im Einsatz resultierenden Deckungsanteile dargestellt. Wie zu erwarten, wird das BHKW im Setup 1 monovalent betrieben. Dies ist darauf zurückzuführen, dass neben der Bereitstellung von Wärme ebenfalls Elektrizität ausgekoppelt wird, welcher am Spotmarkt zusätzliche Erlöse erzielt. Auch im Setup 2 ist die KWK-Anlage trotz des höheren Gaspreisniveaus der primäre Wärmeversorger und deckt mit ca. 73 % den größten Anteil der Wärmelast. Mit knapp 20 % nimmt die Solarthermie den zweitgrößten Deckungsanteil ein. Würde eine noch größere maximale Kapazität des Speichers oder ein Verwerfen von solarthermischer Energie akzeptiert, könnten sich andere Deckungsanteile ergeben. Dem wird an dieser Stelle aber nicht weiter nachgegangen. Trotz der hohen Effizienz mit einem COP von 4 erzielt die Wärmepumpe mit ca. 7 % die geringsten Deckungsanteile, was auf die Strombezugskosten und die hohen sonstigen Strompreisbestandteile (vgl. [12]) zurückzuführen ist.

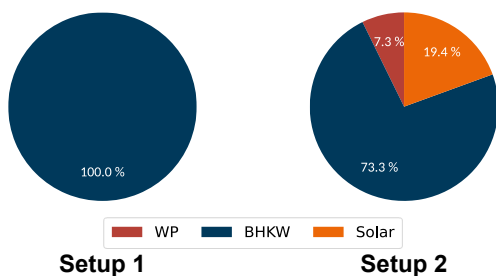


Abb. 5: Deckungsanteile der beiden Einsatzzeitreihen

Aufgrund des monovalenten Betriebs des BHKW in Setup 1 und der Beschränkung der Seitenzahl in diesem Konferenzpapers wird an dieser Stelle darauf verzichtet, die monatlichen Gesamtwärmemengen nach Anlage, die Speicherbewirtschaftung und geordneten Jahresdauerlinien des Setups 1 zu zeigen. Ein multivalentes Bild ergibt sich hingegen für das Setup 2 mit dem hohen Gaspreisniveau des Jahres 2022. Anhand der in Abb. 6 dargestellten monatlichen Gesamtwärmemengen ist der saisonal stark schwankende Ertrag der Solarthermieanlagen sichtbar. In den Monaten mit vielen Sonnenstunden wird durch dessen Einsatz in Kombination mit dem Wärmespeicher vor allem die Einsatzzeiten des BHKW verringert. Trotzdem ist das BHKW die dominierende Erzeugungseinheit,

welches besonders im Zeitraum vom Oktober bis März ersichtlich ist. Ein Wärmepumpeinsatz ist in den Übergangszeiten und Wintermonaten zu erkennen, was auf die vereinfachte Abbildung der Wärmepumpen mit einem konstanten COP zurückzuführen ist. Auch wenn in Setup 2 ein deutlich höheres Gaspreisniveau vorliegt, reicht dieses nicht aus, um mit dem Einsatz der Wärmepumpe einen hohen Deckungsanteil zu erzielen. Neben dem Einfluss der Bezugsenergiekosten spielt für das BHKW zudem der Verkauf von elektrischer Energie eine Rolle. Bei der Wärmepumpe bestimmen neben der Effizienz in Form des COP die Strompreise und deren Preisbestandteile maßgeblich, wann und in welchem Umfang der Einsatz günstiger ist als der des BHKW.

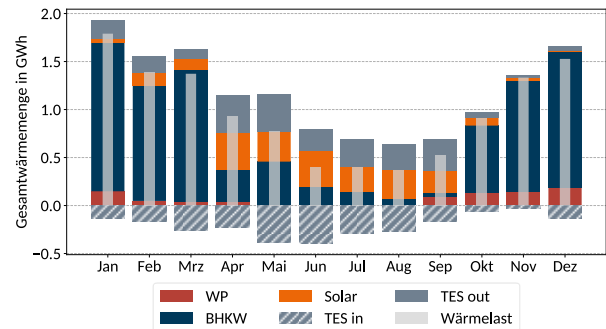


Abb. 6: Monatliche Gesamtwärmemenge nach Versorgungsanlage für das Setup 2

In Abb. 7 ist die Speicherbewirtschaftung über eine Betriebsperiode des Setup 2 dargestellt. In diesem Fall wird der Speicher über die Pufferung hinaus auch saisonal eingesetzt, da dieser in Kombination mit der Solarthermie insbesondere in den Sommermonaten beladen wird. Darüber hinaus fällt auf, dass der Speicher im März mit überschüssiger Wärme des BHKW vollständig beladen wird, da zu dieser Zeit die niedrigsten Gaspreise (vgl. Abb. 4) vorliegen.

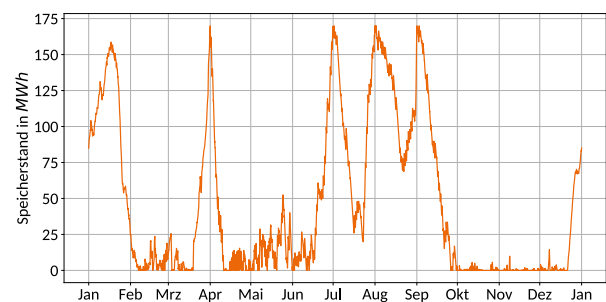


Abb. 7: Verlauf des Speicherstands über eine Betriebsperiode für das Setup 2

Auch anhand der Jahresdauerlinien in Abb. 8 ist ein unterschiedlicher Anlageneinsatz zu erkennen. Im Gegensatz zum Setup 1 wird das BHKW nur noch ca. 3000 Stunden in Volllast und dafür ca. 2000 Stunden in Teillast eingesetzt. Zudem wird ersichtlich, dass der Speicher weniger eingesetzt wird und die Wärmepumpe ca. 3000 Betriebsstunden aufweist.

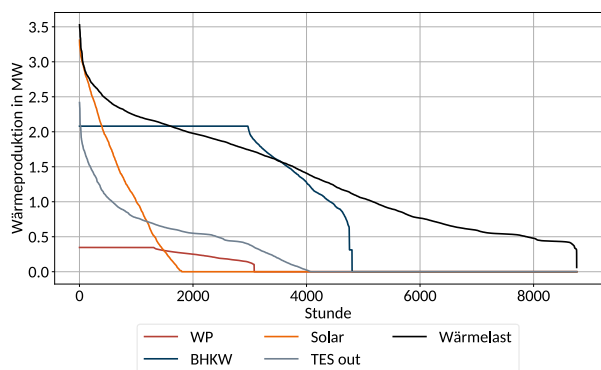


Abb. 8 Geordnete Jahresdauerlinien für das Setup 2

Zusätzlich zum Anlageneinsatz kann mithilfe der Wärme-gestehungskosten die Wirtschaftlichkeit des Systems bewertet werden. Mit LCOH von 23,30 €/MWh ist das Setup 1 als deutlich wirtschaftlicher einzuordnen als das Setup 2 mit LCOH von 223,16 €/MWh. Das Zustandekommen der LCOH kann mit Abb. 9 erklärt werden. Dazu sind die Einflussgrößen in spezifischer Form für beide Setups dargestellt. Dabei leisten Kosten einen positiven und Erlöse einen negativen Beitrag zu den Wärme-gestehungskosten. Den größten Einfluss auf den LCOH haben in diesem Fallbeispiel die zu untersuchenden Gaskosten. Beim Gaspreisniveau von 2022 sind diese ca. vier Mal so hoch wie beim Gaspreisniveau von 2019, obwohl das BHKW im Vergleich weniger eingesetzt wird.

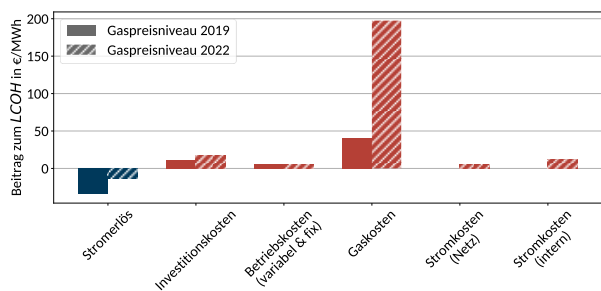


Abb. 9: Anteile zu den LCOH für beide Setups

Abschließend kann die Systemdienlichkeit der Setups anhand der bilanziell hervorgerufenen Treibhausgas-emissionen beurteilt werden. Tab. 2 zeigt, dass die Gesamtemissionen des Gesamtmixes des Setup 1 ca. drei Mal so niedrig sind wie die des Setups 2. Dies ist auf den Deckungsbeitrag des BHKW zurückzuführen, da die am Spotmarkt verkaufte Elektrizität mit Emissionsgutschriften belegt wird und folglich aus Sicht des Wärmeversorgungssystems negative Emissionen aufgrund von Verdrängung anderer Anlagen im Netz der allgemeinen Versorgung aufweist. Darüber hinaus ist im Setup 2 die Wärmepumpe auch selbst mit Emissionen belastet, solange nicht vollständig auf regenerativ erzeugten Strom für dessen Betrieb zurückgegriffen werden kann. Insgesamt ist aber festzuhalten, dass beide Setups unter den angenommenen Randbedingungen systemdienlich betrieben werden können.

Tab. 2: Ökologische Ergebnisse für beide Setups

Emissionsbestandteil in t	Setup 1	Setup 2
Gesamtemissionen Gesamtmix	-3.297,3	-1.098,3
Emissionen durch Gasbezug	5,3	3,9
Emissionen durch Strombezug	0	123,2
Emissionsgutschriften durch Stromproduktion	-3.302,6	-1.225,4

Es lässt sich zusammenfassen, dass sich durch den starken Anstieg des Gaspreises sowohl die optimale Anlagengröße als auch das Einsatzverhalten signifikant verschoben. Bei dem geringerem Gaspreisniveau des Jahres 2019 sind weder Wärmepumpe noch Solarthermie wirtschaftlich attraktiv genug, um in diese zu investieren. Der Preisanstieg des Jahres 2022 verschiebt jedoch das Marktverhältnis und beide Anlagentypen werden installiert. Die Solarthermie wird sogar bis zu dem festgelegten Maximum von 5000 m<sup>2</sup> ausgebaut, dennoch bleibt das BHKW der Primärversorger des Systems.

#### 4. Diskussion

Die Ergebnisse der Fallstudie zeigen, dass mit dem Tool der Einfluss der energiepolitischen und -wirtschaftlichen Rahmenbedingungen in Form von zwei verschiedenen Gaspreisen zu unterschiedlicher Ausprägung von Auslegung und Einsatz sowie Wirtschaftlichkeit und Systemwirkung führen. Somit eignet sich das vorgestellte Tool grundsätzlich zur Konzeption von Wärmeversorgungssystemen nach diesen Kriterien.

Bei der Verwendung des Tools muss aber beachtet werden, dass aufgrund des niederschweligen Zugangs alle Wärmeversorgungseinheiten linear abgebildet sind und somit auch in Teillast konstante Effizienzen aufweisen. Zudem werden Mindestbetriebszeiten oder Wartungsintervalle und Stillstandszeiten sowie die Temperaturabhängigkeiten der Anlagen vernachlässigt. Darüber hinaus werden keine Temperaturen im Netz berücksichtigt, sodass die simulierte Wärmeversorgung auf ein gleichbleibendem Temperaturniveau stattfindet. Auch die für den ökonomischen Erfolg der KWK-Anlagen wichtige Stromsenke, welche unbegrenzt und bei inelastischen Preis Strom aufnehmen kann, ist unter realen Bedingungen (Netzengpässe und -stabilität, usw.) kritisch zu betrachten. In diesem Tool ist die Kalkulation der Wärme-gestehungskosten von einem konstanten Betrieb ausgegangen, was absehbar nicht der Realität entspricht. Insgesamt sollten die errechneten Wärme-gestehungskosten nicht als tatsächlicher Fernwärmepreis interpretiert werden, da Kosten für Wärmenetz, Personal, Verwaltung und vieles mehr nicht berücksichtigt werden konnten. Nichtsdestotrotz ist es gegeben, dass Nutzende die Effekte einer Gaspreissteigerung anhand der deutlich höheren LCOH sowie der veränderten Auslegung und des angepassten Einsatzes erkennen können. Da die Bewertung der Systemdienlichkeit anhand der Emissionsberechnung nur Teil des Postprocessings ist, bleibt diese Zielgröße eher ein Nebenprodukt der Optimierung.

Insgesamt ist das Open Source Web Dashboard zur Konzeption von Wärmeversorgungssystemen nicht als Tool zu betrachten, dass die Planung eines Ingenieurbüros

ersetzen soll, sondern als Werkzeug, dass die Akzeptanz und Entscheidungsfähigkeit stärkt, die Umsetzung von Projekten beschleunigt und Fehlinvestitionen vermeidet.

## 5. Schlussbetrachtung

Das in diesem Artikel vorgestellte Tool bietet eine Vielzahl praxisrelevanter Funktionen zur Konzeption von Wärmeversorgungssystemen. Diese reichen von einer breiten Auswahl typischer Wärmeversorgungseinheiten, über eine umfangreiche Datenbank mit Lastdaten, Preiszeitreihen und Emissionsfaktoren bis hin zu der Möglichkeit diese zu skalieren. Zudem können eigene Daten integriert werden, um individuelle Szenarien zu simulieren und analysieren. Dabei ist es möglich, zwischen einer reinen Einsatzoptimierung mit vordefinierten Anlagenkapazitäten und einer kombinierten Auslegungs- und Einsatzoptimierung zu wählen. Anhand der Fallbeispiele wird deutlich, dass energiepolitischen und -wirtschaftlichen Rahmenbedingungen in Form unterschiedlicher Gaspreisniveaus einen erheblichen Einfluss auf Auslegung, Einsatz, Wirtschaftlichkeit und Systemdienlichkeit haben. Das Dashboard sowie die zugrundeliegende Software werden kontinuierlich erweitert und laden durch den quelloffenen Ansatz zur kollaborativen Entwicklung ein.

## Danksagung

Die Autoren bedanken sich herzlich bei dem *Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt (BMFT)*, die dieses Transferprojekts im Rahmen der Programmes *TransferRäume für die Zukunft von Regionen (T!Raum)* unter den Namen *Inno!Nord - Offene Wärmespeicherplanung* mit der Kennung 03TR06W04 gefördert haben. Des Weiteren gilt der Dank der Autoren den assoziierten Projektpartnern der Boben Op Nahwärme eG, GP JOULE GmbH und Stadtwerke Flensburg GmbH.

## Literatur

- [1] D. Connolly, H. Lund, B. V. Mathiesen, S. Werner, B. Möller, U. Persson, T. Boermans, D. Trier, P. A. Østergaard und S. Nielsen, „Heat Roadmap Europe: Combining district heating with heat savings to decarbonise the EU energy system,“ *Energy Policy*, Bd. 65, pp. 475-489, 2014. [Online]. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.10.035>
- [2] Hochschule Flensburg, Inno!Nord: Innovationslabor: Speicher zur Nutzung erneuerbarer Energien im echten Norden, 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://hs-flensburg.de/forschung/fue/forschungsprojekte/innonord-innovationslabor-speicher-zur-nutzung-erneuerbarer>
- [3] C. Klemm und P. Vennemann, „Modeling and optimization of multi-energy systems in mixed-use districts: A review of existing methods and approaches,“ *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021. [Online]. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110206>
- [4] U. Krien, P. Schönfeldt, J. Launer, S. Hilpert, C. Kaldemeyer und G. Pleßmann, „oemof.solph - A model generator for linear and mixed-integer linear optimisation of energy systems,“ *Software Impacts*, 2020. [Online]. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1016/j.simpa.2020.100028>
- [5] J. Freißmann, M. Fritz und I. Tuschy, „Hochtemperaturwärmepumpen in der Nah- und

Fernwärmeversorgung - Technologieperspektive für den kurz- und mittelfristigen Einsatz in multivalenten Systemen,“ 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.5281/zenodo.13946407>

- [6] W. E. Hart, C. D. Laird, J.-P. Watson, D. L. Woodruff und G. A. Hackebeil, „Pyomo — Optimization Modeling in Python,“ 2017. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.ebook.de/de/product/33462170/william\\_e\\_hart\\_carl\\_d\\_laird\\_jean\\_paul\\_watson\\_](https://www.ebook.de/de/product/33462170/william_e_hart_carl_d_laird_jean_paul_watson_)
- [7] Q. Huangfu und J. A. J. Hall, „Parallelizing the dual revised simplex method,“ *Mathematical Programming Computation*, Bd. 10, Nr. 1, pp. 119-142, 2018. [Online]. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1007/s12532-017-0130-5>
- [8] T. Achterberg, „SCIP: solving constraint integer programs,“ *Mathematical Programming Computation*, Bd. 1, Nr. 1, p. 1–41, 2009. [Online]. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1007/s12532-008-0001-1>
- [9] L. Gurobi Optimization, *Gurobi Optimizer Reference Manual*, 2019. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.gurobi.com>
- [10] A. Treuille, A. Kelly und T. Teixeira, *Streamlit: A framework for creating interactive apps*, 2019. [Online]. Verfügbar unter: <https://streamlit.io/>
- [11] Stadtwerke Flensburg GmbH, „Network Data of the District Heating System of the city of Flensburg from 2017-2019,“ 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.5281/zenodo.10508280>
- [12] M. Fritz und J. Freißmann, „owp\_milp\_optimization (GitHub Repository),“ 2024. Zugriff am: 30. Juli 2025. [Online]. Available: [https://github.com/malte-fritz/owp\\_milp\\_optimization](https://github.com/malte-fritz/owp_milp_optimization).

# Versorgungstemperaturen und Trinkwarmwasserbedarf typischer sanierter niedersächsischer Wohngebäude als Basis für die dynamische Gebäudesimulation – Niedersächsisches Mehrfamilienhaus (Archetyp MFH)

Felix KLEFF <sup>1\*</sup>, Tanja MEHRING <sup>1</sup>, Abdulraheem SALAYMEH <sup>2</sup>, Stefan HOLLER <sup>2</sup>,  
Erik BETRAM <sup>1</sup>, Sebastian FÖSTE <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Hochschule für angewandte Wissenschaft und Kunst Hildesheim/Holzminde/Göttingen, Billerbeck 2, 37603 Holzminde

<sup>2</sup> Hochschule für angewandte Wissenschaft und Kunst Hildesheim/Holzminde/Göttingen, Rudolf-Diesel-Straße 12, 37075 Göttingen

\* felix.kleff@hawk.de

---

## Kurzfassung

Die vollständige energetische Sanierung von Mehrfamilienhäusern reduziert die Heizlast sowie die notwendigen Vorlauftemperaturen in den Heizkörpern zur Deckung des Raumwärmebedarfs signifikant. Durch ergänzenden Heizkörperaustausch können Werte deutlich unter 55 °C erreicht. Während die Anforderung an das Temperaturniveau zur Deckung des Raumwärmebedarfs maßgeblich von Dämmstandard und Heizflächen bestimmt wird, bleibt für die Trinkwarmwasserbereitung ein Temperaturniveau von mindestens 60 °C bei zentralen Anlagen erforderlich. Dezentrale Konzepte ermöglichen eine weitere Absenkung. Die Ergebnisse zeigen, dass durch gezielte Sanierungsmaßnahmen ein effizienter und hygienischer Niedertemperaturbetrieb von Mehrfamilienhäusern möglich ist.

## Schlagworte

Dynamische Gebäudesimulation; Energetische Gebäudesanierung; Heizflächenermittlung; Niedersächsischer Archetyp Mehrfamilienhaus; Niedersächsischer Wohngebäudebestand; Trinkwarmwasserbedarf; Wärmeversorgung

---

## 1. Einleitung

Die Bereitstellung von Wärme für Wohngebäude ist für ca. 32 % des deutschen Endenergieverbrauchs verantwortlich [1]. Um diesen Energiebedarf in Zukunft klimaneutral decken zu können, ist es notwendig, den Großteil dieses Energiebedarfs aus erneuerbaren Energien zu beziehen. Je niedriger das erforderliche Temperaturniveau ist, auf dem diese Energie bereitgestellt werden kann, desto größer ist das Potenzial für die Integration erneuerbarer Energiequellen [2]. Daher kommt der Absenkung des Temperaturniveaus der Wärmeversorgung von Gebäuden eine entscheidende Rolle zu.

In diesem Beitrag werden die Annahmen erläutert, die im Rahmen des Projekts „Transformationsstrategien für Wohngebäude- und Quartiere mit modellbasierten Wärme- und Temperaturkatastern“ (TraWoKat) für den typischen niedersächsischen Mehrfamilienhaus-Archetyp (Archetyp MFH) entwickelt wurden, um das erforderliche Temperaturniveau der Wärmeversorgung zu bestimmen.

Detailliertere Informationen zu den gewählten Heizkörperarten und den vorgestellten Trinkwarmwasser-Zapfprofilen können auf Anfrage vom Erstautor zur Verfügung gestellt werden.

## 2. Material und Methoden

Nicht jedes einzelne Wohngebäude Niedersachsens kann im Rahmen dieses Forschungsprojekts detailliert untersucht werden. Aus diesem Grund wurden repräsentative Gebäudetypen (sogenannte Archetypen) entwickelt, die stellvertretend für eine ganze Gruppe eines bestimmten Gebäudetyps (Einfamilienhaus, Mehrfamilienhaus, Reihenhaushaus) mithilfe hochaufgelöster, dynamischer Simulationsrechnungen analysiert werden. Der Fokus dieses Beitrags liegt auf dem „Archetyp MFH“, dem typischen niedersächsischen Mehrfamilienhaus, das auf die nachfolgend aufgeführten Dämmstandards saniert wird:

- 1.) Standard gemäß Gebäudeenergiegesetz (GEG)
- 2.) Effizienzhaus 55-Standard (EH 55)
- 3.) Passivhausstandard (PH)

Das Gebäude stammt aus der Baualtersklasse 1949 – 1978, besitzt drei bewohnte Stockwerke, einen unbeheizten Keller sowie ein Flachdach. Die 6 Wohneinheiten (WE) des Archetyps MFH verfügen über gleich große Grundrisse mit einer Wohnfläche von jeweils 100 m<sup>2</sup>.

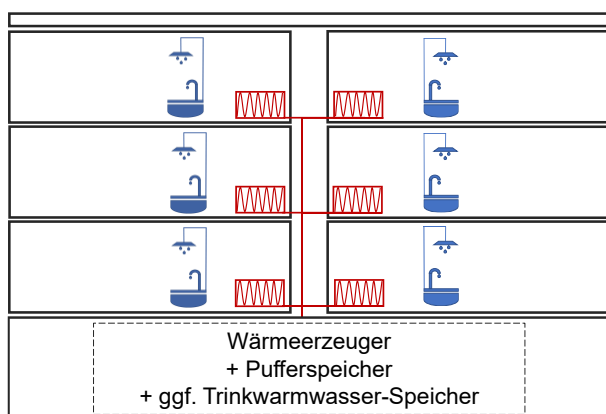


Abb. 1: Schematische Darstellung der 6 Wohneinheiten des Archetyps MFH als Vertikalschnitt

Das vom Wärmeerzeuger bereitzustellende Temperaturniveau, das zur Deckung des Gesamtwärmebedarfs des Archetyp MFH benötigt wird, wird von den Teilbereichen „Raumwärme“ (RW) und „Trinkwarmwasser“ (TWW) bestimmt – diese Teilbereiche werden nachfolgend vorgestellt.

### Raumwärme (RW)

Um zu bestimmen, welche Temperaturen ein Wärmeerzeuger bereitstellen muss, um den Raumwärmebedarf zu decken, werden eine raumweise Heizlastberechnung nach DIN EN 12831-1 [3] und Informationen bzgl. der Größe und des Typs der verbauten Heizkörper benötigt.

Der Ansatz zur Ermittlung der für jeden Raum verfügbaren Heizfläche wird in [4] vorgestellt. Im Archetyp MFH wird auf dieser Grundlage in Räumen mit einer Norm-Innentemperatur von 20 °C ein grundflächenbezogener Heizflächenanteil von 12,7 % berücksichtigt. Bei einer Norm-Innentemperatur von 15 °C bzw. 24 °C werden 10,7 % bzw. 14,3 % angesetzt, um so die Unterschiede in der Temperaturdifferenz zwischen Außen- und Innentemperatur zu berücksichtigen. Der jeweilige Heizkörpertyp wird anschließend so gewählt, dass eine Vorlauftemperatur von 70 °C und eine Rücklauftemperatur von 55 °C ausreichend sind, um die berechnete Heizlast des Raums zu decken. Wie auch in der Realität [5], sind die Heizkörper im Archetyp MFH unterschiedlich ausgeprägt überdimensioniert. Der kritische Heizkörper ist ebenfalls, wenn auch nur sehr geringfügig, überdimensioniert und benötigt im unsanierten Archetyp MFH eine maximale Vorlauftemperatur von 67,4 °C bei der Norm-Außentemperatur von Celle von -11,1 °C.

### Trinkwarmwasser (TWW)

Insbesondere in energetisch sanierten Wohngebäuden nimmt die Bedeutung der TWW-Bereitung zu, da ihr Anteil am Gesamtwärmebedarf bei höherem Dämmstandard steigt.

In diesem Abschnitt werden die getroffenen Annahmen zur Erstellung von Zapfprofilen auf Basis statistischer Betrachtungen mithilfe von DHWcalc [6] vorgestellt und Aussagen zu den nötigen Temperaturniveaus getroffen.

Der Trinkwarmwasserbedarf wird gemäß DIN V 18599-10 [7] ermittelt und in Anlehnung an das Trinkwarmwasser-Zapfprofil des Archetyps EFH [4] auf drei definierte Zapfzeiträume verteilt (vgl. Tab. 1). Eine Unterscheidung zwischen Werktagen, Wochenendtagen oder Ferienzeiten erfolgt nicht.

Tab. 1: Übersicht über die angesetzten Zeiträume der Trinkwarmwasser-Zapfungen und die zugehörigen Anteile am Tagesbedarf

Zeitraum	Anteil in %	Tagesbedarf pro WE in Wh
07:00 – 07:30	36	1.134
12:30 – 13:00	8	252
20:30 – 21:30	56	1.764
$\Sigma$	100	3.150

Wie beim Archetyp EFH [4] wird eine Kaltwassertemperatur von 10 °C angenommen. Die Trinkwarmwasser-Zapftemperatur für den Archetyp MFH wird in Anlehnung an [8] konstant auf 45 °C festgelegt und im Unterschied zum Archetypen EFH [4] nicht variiert. Der durchschnittliche Tagesbedarf einer WE beläuft sich entsprechend auf 77,4 l.

Der maximale Zapfvolumenstrom einer WE wird analog zu [9] auf 12 l/min festgelegt. Unter Anwendung eines Gleichzeitigkeitsfaktors von 0,312, der mithilfe der VDI 2072 [10] bestimmt wurde, ergibt sich ein maximaler Zapfvolumenstrom des Gebäudes von 1.350 l/h. Auf statistischer Basis (DHWcalc [6]) wird anschließend ein einheitliches Trinkwarmwasser-Zapfprofil für alle untersuchten Anlagentechnik-Varianten erstellt.

Um die Trinkwarmwasserhygiene sowie geringe Vorlaufzeiten bis zur gewünschten Zapftemperatur zu gewährleisten, wird in den meisten Mehrfamilienhäusern eine Zirkulationsleitung installiert, die das Trinkwarmwasser kontinuierlich in Bewegung hält. Dadurch entstehen teils erhebliche Wärmeverluste, deren Ausmaß maßgeblich von der Betriebsdauer, der Isolierung und dem Temperaturniveau innerhalb der Zirkulationsleitung abhängt.

Diese als Zirkulationsverluste bezeichneten Wärmeverluste werden auf Basis von Literaturdaten, insbesondere publizierter Simulationsstudien [9, 11], für die nachfolgend dargestellten Anlagenvarianten (vgl. Abb. 2) und die jeweils zugeordneten Temperaturniveaus ermittelt:

- 1.) Zentraler Trinkwarmwasserspeicher, 60 °C
- 2.) Dezentrale Wohnungsstation (WS), 50 °C
- 3.) Dezentrale TWW-Wärmepumpe (WP), 60 °C

Zur Veranschaulichung sind die drei Varianten in Abb. 2 dargestellt.

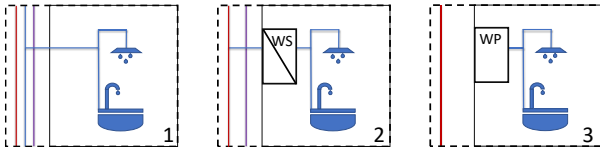


Abb. 2: Schematische Darstellung der definierten Trinkwarmwasser-Konzepte „zentraler Trinkwarmwasserspeicher“ (1), „dezentrale Wohnungsstation“ (2), „dezentrale TWW-Wärmepumpe“ (3)

In [9] werden für eine sanierte Trinkwarmwasseranlage Verteil- und Speicherverluste von 6,7 kWh/m<sup>2</sup>a (zentral, 60 °C) sowie 4,3 kWh/m<sup>2</sup>a (dezentrale Wohnungsstation „WS“, 50 °C) angegeben. Die Speicherverluste werden in diesem Beitrag herausgerechnet, indem die Wärmeverlustleistung unter Annahme einer Temperaturdifferenz von 45 K (60 °C Speicher, 15 °C Keller) bzw. 35 K (50 °C Speicher, 15 °C Keller) und einer Wärmeverlustleistung von 0,9 W/K [9] berechnet und anschließend mit 8.760 Stunden eines Jahres multipliziert wird.

Die Betriebszeit der Zirkulation beträgt in der zugrunde liegenden Studie [9] nur 20 Stunden pro Tag. Daraus ergibt sich für einen 24-stündigen Dauerbetrieb ein flächenspezifischer Zirkulationswärmeverlust von 7,33 kWh/(m<sup>2</sup>a) (bei 60 °C) bzw. 4,61 kWh/(m<sup>2</sup>a) (bei 50 °C).

Das Verhältnis zwischen Zirkulationsverlusten und Trinkwarmwasserbedarf (11,8 kWh/(m<sup>2</sup>a)) liegt entsprechend bei 62,1 % (60 °C) bzw. 39,1 % (50 °C). Die Temperaturabsenkung von 60 °C auf 50 °C führt folglich zu einer Reduktion der Zirkulationsverluste um 37 %.

Für die Variante mit zentralem Trinkwarmwasserspeicher werden nach Kropp et al. [10] Zirkulationsverluste von 7,7 kWh/(m<sup>2</sup>a) ermittelt. In Bezug auf den Trinkwarmwasserbedarf von 11,8 kWh/(m<sup>2</sup>a) entspricht das einem Anteil von 65,3 %. Unter der Annahme, dass eine Absenkung des Temperaturniveaus auf 50 °C dieselbe Einsparung nach sich zieht wie in [9], ergeben sich 4,84 kWh/(m<sup>2</sup>a) Zirkulationsverluste für die Variante mit 50 °C und dezentralen Wohnungsstationen.

Die ermittelten Werte aus [9, 11], die für die Varianten mit zentralem Trinkwarmwasserspeicher sowie mit dezentralen Wohnungsstationen angesetzt wurden, werden anschließend gemittelt (vgl. Tab. 2) und für die weiteren Betrachtungen dem Archetyp MFH zugeordnet. Aus den spezifischen Zirkulationsverlusten ergeben sich die jährlichen Zirkulationsverluste. Diese werden gleichmäßig auf die gesamte Zeit eines Jahres ohne Zapfung (504.777 Minuten) verteilt. Die daraus resultierende durchschnittliche Zapfleistung beträgt 535,6 W (zentral, 60 °C) und 336,6 W (dezentrale Wohnungsstationen, 50 °C). Die Wärmeverluste werden in der Anlagensimulation in Form einer kontinuierlichen konstanten Dauerzapfung mit einem Volumenstrom von 13,15 l/h bzw. 8,27 l/h abgebildet.

Bei der Variante mit dezentralen Trinkwarmwasser-Wärmepumpen werden keine Zirkulationsverluste berücksichtigt, da diese Variante ohne Zirkulation ausgeführt werden kann. Eine Zusammenfassung der festgelegten Größen ist in Tab. 2 zu finden.

Tab. 2: Zusammenfassung der Zirkulationsverluste der Trinkwarmwasser-Konzepte „zentraler TWW-Speicher“ und „dezentrale Wohnungsstationen“

	Zentr. TWW-Speicher 60 °C	Dezentr. WS 50 °C
Zirkulationsverluste in kWh/m <sup>2</sup> a	7,51	4,72
Verhältnis Verlust/Nutzenergie in %	65,3	41,0
Zirkulations- Zapfvolumenstrom in l/h	13,15	8,27

### 3. Ergebnisse und Diskussion

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse vorgestellt, die auf den definierten Annahmen basieren, und es werden deren Auswirkungen auf das nötige Temperaturniveau des Wärmeerzeugers analysiert und diskutiert.

#### Raumwärme

Die Sanierung der Gebäudehülle auf die drei genannten Standards (GEG, EH 55 und PH) führt nicht nur zu einer signifikanten Reduktion der Heizlast und des Raumwärmebedarfs des Archetyps MFH, sondern senkt auch die erforderlichen Vorlauftemperaturen der Heizkörper im Auslegungspunkt.

Abb. 3 zeigt die berechneten Auslegungstemperaturen in Abhängigkeit vom Dämmstandard, jeweils ohne und mit durchgeführtem Heizkörperaustausch. Die durch die Sanierung verminderten Transmissions- und Lüftungswärmeverluste bewirken, dass die Auslegungstemperatur der Heizkörper von 67,4 °C (unsanierter Zustand) auf 52,9 °C (GEG), 49,1 °C (EH 55) bzw. 48,3 °C (PH) reduziert werden kann (vgl. Abb. 3). Dies entspricht einer Reduktion der Auslegungstemperatur um 14,5 K bis 19,1 K.

Der gezielte Austausch der temperaturbestimmenden Heizkörper (d. h. der Heizkörperertyp wird verändert – Breite und Höhe bleiben unberührt) erhöht das Potenzial zur weiteren Temperaturabsenkung, und der Unterschied zwischen den betrachteten Dämmstandards wird verringert. Durch die Kombination der Maßnahmen kann das Temperaturniveau um 21,0 K (GEG) bis zu 24,4 K (PH) geringer ausfallen. Für diese Optimierung ist der Austausch von 14 (GEG), 8 (EH 55) bzw. 6 (PH) Heizkörpern erforderlich.

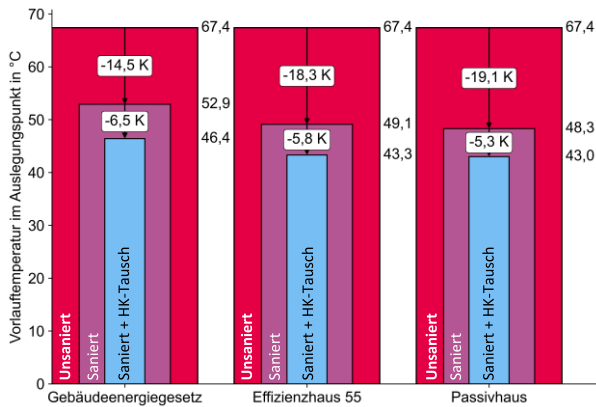


Abb. 3: Säulendiagramm zur Verdeutlichung der Absenkung der Vorlauftemperatur im Auslegungspunkt in Abhängigkeit zum erreichten Sanierungsstandard mit und ohne Heizkörpertausch (HK-Tausch)

In Abb. 3 wird deutlich, dass alle drei gewählten Dämmstandards eine Deckung des Raumwärmebedarfs mit maximalen Vorlauftemperaturen ermöglichen, die deutlich unterhalb von 55 °C liegen. Dies liegt unterhalb der häufig als kritisch für den effizienten Betrieb von Wärmepumpen und den Anschluss an Niedertemperatur-Wärmenetzen angesehenen Grenze und erfüllt damit das Kriterium „Niedertemperatur-Ready“ [12].

#### Trinkwarmwasser

Basis für die Entwicklung der Trinkwarmwasser-Zapfprofile eines typischen, sanierten niedersächsischen Mehrfamilienhauses sind die Trinkwarmwasserbedarfe gemäß DIN V 18599-10 [7]. Darüber hinaus wurden Temperaturen für unterschiedliche Trinkwarmwasserkonzepte festgelegt, mit denen eine hygienisch einwandfreie Bereitung von Trinkwarmwasser möglich ist.

Während die Dämmmaßnahmen an der Gebäudehülle einen erheblichen Einfluss auf die benötigten Temperaturen der Heizflächen ausüben, bleibt das Temperaturniveau zur Deckung des Trinkwarmwasserbedarfs davon unberührt.

Erfolgt die Trinkwarmwasserbereitung vollständig zentral, wird aus hygienischen Gründen ein Temperaturniveau von mindestens 60 °C benötigt. Die Temperatur kann auf ca. 50 °C abgesenkt werden, wenn die Erwärmung des Trinkwassers erst dezentral mithilfe von Wohnungsstationen erfolgt, da das Risiko der Kontamination mit Legionellen deutlich reduziert ist. Unter der Annahme, dass an einer Hausübergabestation eines Fernwärmenetzes ein Temperaturabfall von 5 K entsteht, müssten mindestens 55 °C an das Gebäude geliefert werden. Bei dezentraler Wärmeerzeugung durch z. B. Wärmepumpen, können die 50 °C bis 60 °C direkt erzeugt werden und es muss kein Temperaturabfall berücksichtigt werden.

Eine vollständige Entkopplung der Trinkwarmwasserbereitung vom Temperaturniveau des zentralen Wärmeerzeugers, zum Beispiel mithilfe von dezentralen Trinkwarmwasser-Wärmepumpen, erzielt bei sanierten Gebäuden eine deutliche Absenkung der erforderlichen Vorlauftemperaturen. Das nötige Temperaturniveau des zentralen Wärmeerzeugers ist in diesen Systemen nicht mehr durch die Anforderungen an die Trinkwasserhygiene vorgegeben; das nötige Temperaturniveau wird entsprechend ausschließlich von den Heizflächen bestimmt.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Dezentralisierung der Trinkwarmwasserbereitung zu einer deutlichen Absenkung des nötigen Temperaturniveaus des Gebäudes führt und geringe Wärmeverteilerluste nach sich zieht.

#### 4. Zusammenfassung & Ausblick

Im Rahmen dieses Beitrags wurde untersucht, wie sich verschiedene Sanierungsstandards und Konzepte zur Trinkwarmwasserbereitung auf das erforderliche Temperaturniveau des Archetyps MFH auswirken. Die Ergebnisse zeigen, dass durch die vollständige energetische Sanierung und einen gezielten Austausch von Heizkörpern, die Auslegungstemperaturen selbiger deutlich abgesenkt werden können. Während eine zentrale Bereitung von Trinkwarmwasser trotz umfassender Sanierung der Gebäudehülle weiterhin hohe Temperaturen benötigt, ermöglichen dezentrale Konzepte die gewünschte Absenkung des Temperaturniveaus.

Die gewonnenen Erkenntnisse verdeutlichen, dass Raumwärme- und Trinkwarmwasserversorgung bei der Sanierung von Wohngebäuden und der Planung von Wärmeversorgungskonzepten gemeinsam betrachtet werden sollten, um zukunftssichere und effiziente Lösungen für die Wärmeversorgung im Gebäudebestand zu ermöglichen.

Der kontinuierliche Austausch mit Praxispartnern und der daraus resultierenden stetigen Anpassung des Gebäudemodells, ermöglicht es Herstellern (z. B. zur simulationsgestützten Produktentwicklung), Forschungsinstituten und Projektentwicklern, praxistaugliche und für Niedersachsen repräsentative Wohngebäudemodelle nutzen zu können.

#### Danksagung

Diese Studie wird im Rahmen des Forschungsprojekts „TraWoKat“ (Kennzeichen ZN4155) aus Mitteln des Programms „zukunft.niedersachsen“ unterstützt. Großer Dank gilt den Fördermittelgebern sowie den kooperierenden Wirtschaftspartnern.

#### Literatur

- [1] „Energieverbrauch für fossile und erneuerbare Wärme,“ Umweltbundesamt. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/energieverbrauch-fuer-fossile-erneuerbare-waerme>
- [2] J. E. Thorsen, H. Lund, und B. V. Mathiesen, „Progression of District Heating – 1st to 4th generation.“ Aalborg University, 2018. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://vbn.aau.dk/files/280710833/1\\_4gdh\\_progression\\_revised\\_may2018.pdf&ved=2ahUKEwi--d\\_MtsqMAxVASvEDHck5IM0QFnoECBo-QAQ&usq=AOvVaw1jzLPbNUFAx4U8L0weBaz7](https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://vbn.aau.dk/files/280710833/1_4gdh_progression_revised_may2018.pdf&ved=2ahUKEwi--d_MtsqMAxVASvEDHck5IM0QFnoECBo-QAQ&usq=AOvVaw1jzLPbNUFAx4U8L0weBaz7)
- [3] DIN EN 12831-1:2017-09, Energetische Bewertung von Gebäuden\_ - Verfahren zur Berechnung der Norm-Heizlast\_ - Teil\_1: Raumheizlast, Modul M3-3; Deutsche Fassung EN\_12831-1:2017. doi: 10.31030/2571775.
- [4] T. Mehring, F. Kleff, A. Salaymeh, S. Holler, S. Föste, und E. Bertram, „Definition typischer sanierter niedersächsischer Wohngebäude als Basis für

die dynamische Gebäudesimulation: Gebäudehülle und Heizkörper und Warmwasserprofile für ein repräsentatives Niedersächsisches Einfamilienhaus (Archetyp EFH) Version 14.08.2024,“ HAWK Hochschule für angewandte Wissenschaft und Kunst, 2024. doi: 10.48547/202411-000.

- [5] K. Jagnow, „Verfahren zur energetischen und wirtschaftlichen Bewertung von Qualitätssicherungsmaßnahmen in der Heizungsanlagentechnik.“
- [6] U. Jordan und K. Vajen, DHWcalc. (2017). Universität Kassel Institut für Thermische Energietechnik Solar und Anlagentechnik, Kassel.
- [7] DIN V 18599-10:2018-09, Energetische Bewertung von Gebäuden\_ - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung\_ - Teil\_10: Nutzungsrandbedingungen, Klimadaten. doi: 10.31030/2874436.
- [8] U. Jordan und K. Vajen, „Influence Of The DHW Load Profile On The Fractional Energy Savings,“ Sol. Energy, Bd. 69, S. 197–208, Juli 2001, doi: 10.1016/S0038-092X(00)00154-7.
- [9] C. Graf, P. Pärish, A. Marszal-Pomianowska, M. Frandsen, B. Bendinger, und A. Cadenbach, „Domestic hot water systems in well-insulated residential buildings: A comparative simulation study on efficiency and hygiene challenges,“ Energy, Bd. 313, S. 133587, Dez. 2024, doi: 10.1016/j.energy.2024.133587.
- [10] VDI 2072:2019-11, Wärmeübergabestation mit Wasser-Wasser-Wärmeübertrager für Durchfluss-Trinkwassererwärmung/Raumwärmeversorgung, November 2019.
- [11] M. Kropp, M. Lämmle, S. Herkel, H.-M. Henning, und A. Velte-Schäfer, „Enhancing heat pump performance for domestic hot water preparation: A comparative analysis in existing multi-family houses,“ Energy Build., Bd. 328, S. 115155, Feb. 2025, doi: 10.1016/j.enbuild.2024.115155.
- [12] P. Mellwig, D. M. Pehnt, und J. Lempik, „Energieeffizienz als Türöffner für erneuerbare Energien im Gebäudebereich.“

# Einfluss von Energiepreisen und Förderungen auf betriebswirtschaftlich getriebenen Ausbau klimaneutraler Fernwärmeerzeugung im Vergleich zum systemdienlichen Optimum

Leander KIMMER <sup>1\*</sup>, Annika THELING <sup>1</sup>, Jacob KÜHLKAMP <sup>1</sup>, Max FETTE <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Fraunhofer IFAM, Wiener Straße 12, 28359 Bremen

\* leander.kimmer@ifam.fraunhofer.de

## Kurzfassung

Um die Wärmeversorgung in der Fernwärme klimaneutral zu gestalten, bedarf es einem Aus- und Umbau der Wärmeerzeuger. In diesem Paper wird das betriebswirtschaftliche Optimum des Baus und Betriebs von klimaneutralen Wärmeerzeugern in Fernwärmenetzen unter Einfluss unterschiedlicher Rahmenbedingungen für das Jahr 2030 bestimmt. Dazu wird das Energiesystemmodell MuGriFlex genutzt. Die Ergebnisse werden mit dem gesamtwirtschaftlich optimierten Ausbau, welcher durch das DLR mit dem Energiesystemmodell REMix erarbeitet wurden, verglichen, um zu betrachten, welche Rahmenbedingungen einen systemdienlichen Ausbau bei betriebswirtschaftlicher Rentabilität fördern. Es ergibt sich, dass besondere Relevanz im Verhältnis der vorherrschenden Strom- und Gaspreise liegt.

## Schlagworte

Betriebswirtschaftliche Optimierung; Energiesystemmodell; Energiesystemmodellierung; Förderung; Sektorenkopplung; Gesamtwirtschaftliche Optimierung; Wärmewende

## 1. Einleitung

Im Rahmen des Projekts „Fahrplan Gaswende - techno-ökonomische Analyse von Pfaden zu einer klimaneutralen und flexiblen Gasversorgung im integrierten Energiesystem der Zukunft“ [1] wird das Tool MuGriFlex (Multi Grid Flexibility) [2] eingesetzt, um den Ausbau und Betrieb verschiedener, dekarbonisierter Wärmetechnologien für Fernwärmenetze im Kontext politischer Ziele aus betriebswirtschaftlicher Sicht zu bewerten.

Das Modell bildet die Energieumwandlungsprozesse, Kostenstrukturen und Rahmenbedingungen ab, die für Betriebs- und Investitionsentscheidungen für Energiewandler und -speicher relevant sind. In der vorliegenden Betrachtung sind dies Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen, die mit grünem Wasserstoff oder Biomethan betrieben werden, Wärmepumpen, Elektro- und Gaskessel, sowie Wärmespeicher.

Als allgemeinen, internationalen politischen Rahmen für die Dekarbonisierung hat die Europäische Union (EU) im Europäischen Klimagesetz festgelegt, dass die EU bis 2050 CO<sub>2</sub>-neutral sein muss [3]. Eine Dekarbonisierung ist daher auch im Wärmesektor notwendig.

Das Projekt „Fahrplan Gaswende“ wurde gemeinsam vom Fraunhofer IFAM, dem Institut für Vernetzte Energiesysteme des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) und dem Gas- und Wärme-Institut Essen e.V.

(gwi) durchgeführt. Während das DLR Institut eine gesamtwirtschaftliche Optimierung des Energiesystems erstellte, beschäftigten sich die Arbeiten des Fraunhofer IFAM mit der Simulation von Wärmeerzeugern und -speichern für die Fernwärme aus betriebswirtschaftlicher Sicht. Das gwi recherchierte techno-ökonomische Parameter und modelltechnische Randbedingungen der Gasinfrastruktur. Die Fragen, um die es in diesem Paper gehen soll, sind:

- Welche Anlagen würden Fernwärme-Unternehmen unter den gegenwärtigen energiewirtschaftlichen Rahmenbedingungen bauen, und wie würden sie betrieben werden, um ihre Kund\*innen mit Wärme zu versorgen?
- Entsprechen diese Investitionen und der Betrieb der Anlagen dem, was unter gesamtwirtschaftlichen Gesichtspunkten als optimal ermittelt wurde?
- Falls nicht, wie können die energiewirtschaftlichen Rahmenbedingungen angepasst werden, damit der gesamtwirtschaftlich optimale Anlagenpark und dessen Betrieb auch betriebswirtschaftliche angereizt wird?

## 2. Material und Methoden

### Die Energiesystemmodelle REMix und MuGriFlex

Die für die hier gezeigten Ergebnisse verwendeten Eingangsgrößen aus der gesamtwirtschaftlichen

Optimierung wurden vom DLR mit dem Energiesystemmodell REMix (Renewable Energy Mix) [4] berechnet.

REMix ist ein Framework zur Modellierung und Optimierung von Gesamtenergiesystemen. Es bildet beliebige Commodities, Wandler, Speicher und Transportwege ab und ist sowohl in der zeitlichen als auch in der räumlichen Auflösung flexibel [4] [5]. Das im Projekt Fahrplan Gaswende aufgesetzte Modell umfasst große Teile Europas (inklusive aller EU-Staaten sowie Großbritannien, Norwegen und der Schweiz), aufgeteilt in 22 Regionen. Der Fokus liegt auf Deutschland, mit einer feineren örtlichen Auflösung, die 14 Regionen beansprucht. Es werden die Commodities Gas, Strom und Wärme simuliert und die angeschlossenen Energiewandler optimiert [1].

Im Gegensatz zu REMix, modelliert das Energiesystemmodell MuGriFlex das Optimum der Fernwärmeerzeugung aus betriebswirtschaftlicher Sicht. MuGriFlex wurde im Rahmen des Forschungsprojekts MuGriSto (Multi-Grid Storage) entwickelt und im Rahmen der Projekte MuSeKo (Multi-Sektoren-Kopplung) und Fahrplan Gaswende weiterentwickelt. Das Modell stellt die für operative und Investitionsentscheidungen relevanten Energieumwandlungsprozesse, Kostenstrukturen und Rahmenbedingungen der Energiebranche dar. Die Dimensionierung und Einsatzplanung verschiedener Wärmeerzeuger und Wärmespeicher können für definierte Zeiträume – typischerweise ein Jahr in stündlicher Auflösung – in geografischen Bereichen analysiert werden. Das Ergebnis der Analyse zeigt die optimale Dimensionierung und den Einsatz der Systemkomponenten, d. h. das Systemdesign, welches die niedrigsten Wärmegestehungskosten – Englisch: Levelised Cost of Heat (LCoH) – ergibt. Die Ergebnisse werden zur Bewertung der Systemdienlichkeit der Anlagen verwendet. Dies lässt eine Bewertung der regulatorischen Rahmenbedingungen zu.

Das Ergebnis der gesamtwirtschaftlichen Optimierung für das Jahr 2030 mit dem REMix-Modell wird für die folgenden Untersuchungen als erstrebenswertes Ziel für die Fernwärmeerzeugungsanlagen und als von außen gegebenen Rahmenbedingungen des restlichen Energiesystems angesehen. Es werden daher sowohl die Strompreiszeitreihe als auch der Gaspreis aus den Grenzkosten des Ergebnisses der REMix-Modellierung übernommen. Es wird das REMix-Ergebnis vom 07.06.2025 des Szenarios „Mix H2\_High 2030“ als Grundlage für die folgenden Berechnungen verwendet. Die im Projekt abgestimmten Eingangsdaten für beide Modelle umfassen die Fernwärme-Bedarfszeitreihen, die Wetterdaten, die Investitions- und Betriebskosten und die Umwandlungseffizienzen der Anlagen inklusive der Zeitreihe des Coefficient of Performance (COP) der Großwärmepumpe. Für deren Wärmequellentemperatur wird eine Mischung aus Außenluft, Flusswasser und industrieller Abwärme angenommen. Die in diesem Paper abgebildeten Energieumwandlungs- und Speichersysteme sind Gas- und Elektrokessel (GK und EK), Wärmepumpe (WP), Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen (KWK) und thermische Energiespeicher (TES). Die aktuellen Steuern und Abgaben werden in das Jahr 2030 extrapoliert. Diese betragen für Strom 7,41 ct/kWh (wenn sie nicht durch Förderungen reduziert werden). Für Gas betragen sie 5,47 ct/kWh. Die Optimierung des Systemeinsatzes basiert auf dem stündlichen Wärmelastprofil eines angenommenen Wärmenetzes. Dabei wird als Nebenbedingung gewährleistet, dass die installierte Gesamtkapazität aller Anlagen mindestens das 1,2-fache des Spitzenwärmebedarfs beträgt.

Solarthermie hat sich in Voruntersuchungen für das gesamtwirtschaftliche Optimum nicht durchgesetzt und wurde deshalb als Technikoption nicht betrachtet. Wärme aus Müllverbrennung und aus Geothermie wurde aus modelltechnischen Restriktionen ebenfalls dort nicht betrachtet.

## Szenarien

In allen Szenarien wird das Jahr 2030 betrachtet, da es in naher Zukunft liegt und somit anzunehmen ist, dass sich derzeitige Rahmenbedingungen nur wenig geändert haben und somit als Referenz genommen werden können.

Um den direkten Vergleich zum gesamtwirtschaftlichen Optimum herzustellen, wird zunächst mit dem sich aus der gesamtwirtschaftlichen Optimierung ergebenden Gaspreis von 3,16 ct/kWh und der Strompreiszeitreihe mit durchschnittlich 5,13 ct/kWh simuliert und optimiert. Hierbei gibt es zwei Szenarien: Um den Effekt der Förderung abzubilden, wird einmal mit der aktuellen Förderlandschaft und einmal ohne gerechnet.

Um die aktuelle Förderlandschaft abbilden zu können, werden die Investitionskostenförderung von 40 % für WP und TES aus der Bundesförderung für effiziente Wärmenetze (BEW) [6] und die Strom-Einspeiseförderung aus dem Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz (KWKG) [7] einbezogen. Die aktuell gültige Befreiung der WP von Umlagen wird als Förderung interpretiert und kommt entsprechend nur in den Szenarien „mit Förderung“ zum Tragen. Szenarien, in denen die Förderlandschaft einbezogen wird, sind als „mit Förderung“ gekennzeichnet, während solche, bei denen jegliche Förderung außer Betracht gelassen wird, die Bezeichnung „ohne Förderung“ tragen.

In weiteren Analysen werden die Strompreise und Gaspreise variiert. Die Strompreiszeitreihe, die aus den REMix-Daten ermittelt wurde, wird faktorisiert, so dass durchschnittliche Spotmarktpreise in einer Spanne von 4 bis 14 ct/kWh betrachtet werden können. Der angenommene Kostenbereich basiert auf den Ergebnissen anderer Studien, die den zu erwartenden mittleren Strompreis im Jahr 2030 prognostiziert haben [8]. Auch die Gaspreise werden variiert, um unterschiedliche mögliche Entwicklungen abzubilden. Der Marktpreis wurde hier von 3 bis 9 ct/kWh (angelehnt an [9], [10], [11]), erneut in Intervallen von einem ct, betrachtet. Die dargestellten Gaspreise sind inkl. CO<sub>2</sub>-Kosten (bzw. entfallen, wenn angenommen wird, dass das Gas biogen ist).

Um den möglichen Ausbau und die Nutzung von Wärmeerzeugern im Jahr 2030 realitätsnah abzubilden, muss der aktuelle Bestand an Anlagen einbezogen werden. Aus dem AGFW-Hauptbericht 2022 [12] wird ersichtlich, dass die meiste FW-Erzeugung aus KWK und GK kommt. Außerdem wird eine Erweiterung der Anschlussleistung angestrebt, die ebenfalls berücksichtigt wird. Aus diesen beiden Kriterien wird das Szenario „mit Bestand“ entwickelt. Die KWK erhält eine auf die Jahreshöchstlast des Wärmenetzes normierte thermische Leistung von 0,67 und der GK 0,17 (mit [12] ermittelt). Diese Bestandsleistung wird vom Algorithmus frei ergänzt, mit der Randbedingung, eine Gesamterzeugungskapazität von 1,2 vorzuweisen. Das Modell entscheidet also, welche Anlagen mit einer Leistung von insgesamt 36 % der Jahreshöchstlast des Wärmenetzes zugebaut werden. Im Szenario „ohne Bestand“ wird angenommen, dass zwar das Wärmenetz mit den hohen benötigten Vorlauftemperaturen bestehen bleibt, aber alle vorhandenen Wärmeerzeuger

das Ende ihrer Lebensdauer erreicht haben und ersetzt werden müssen. So zeigt sich, ob die KWK auch konkurrenzfähig ist, wenn die Investitionskosten berücksichtigt werden müssen.

Ergebnisse, die mit MuGrIFlex ermittelt wurden, werden im Folgenden als betriebswirtschaftliche Szenarien bezeichnet.

### 3. Ergebnisse

In Abb. 1, Abb. 2 und Abb. 3 sind respektiv die Ergebnisse der gesamtwirtschaftlichen Betrachtung, sowie der betriebswirtschaftlichen Szenarien ohne und mit aktueller Förderung dargestellt. Dabei sind die betriebswirtschaftlichen Szenarien mit den Strom- und Gaspreisen durchgeführt worden, die sich aus der gesamtwirtschaftlichen Berechnung ergeben. Die Abbildungen stellen die normierte thermische Leistung der unterschiedlichen Anlagenarten über den Volllaststunden dar. Zusätzlich ist der Anteil, den sie am Gesamtwärmebedarf bereitstellen als prozentuale Angabe gegeben.

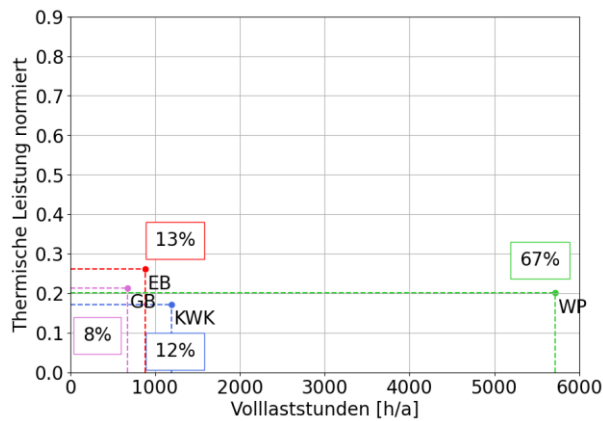


Abb. 1: Gesamtwirtschaftliches Optimum der Anlagengrößen und Nutzung mit der normierten thermischen Leistung über den Volllaststunden aufgetragen. In % angegeben ist der Anteil, den der Wärmeerzeuger für den Gesamtwärmebedarf bereitstellt. Daten von [1]

In der gesamtwirtschaftlichen Berechnung werden zwei Drittel der Wärmeversorgung über die WP gedeckt, die auch die meisten Volllaststunden aufweisen. Jedoch sind auch die anderen drei Technologien vertreten. Der EK weist dabei die größte thermische Leistung auf, wobei sich alle Anlagenarten in der maximalen thermischen Leistung nur um max. 0,09 unterscheiden (siehe Abb. 1). Die Summe der installierten Leistung beträgt nur 85 % der Jahreshöchstlast. Dies wird durch einen Wärmespeicher mit einer Kapazität, die 8,45 h der Jahreshöchstlast des Netzes beträgt, ermöglicht.

In der Realität sind Redundanzen bei den Erzeugungsanlagen erforderlich [13]. Dies wird in den betriebswirtschaftlichen Optimierungen dadurch berücksichtigt, dass die installierte Gesamtleistung immer das 1,2-fache der Jahreshöchstlast betragen muss. Die Ergebnisse werden in Abb. 2 und Abb. 3 gezeigt. In beiden Szenarien wird der EK nicht verwendet und die WP trägt einen noch größeren Anteil zur Wärmeversorgung bei: 81 % im Szenario ohne Förderung und sogar 94 % beim Szenario mit Förderung. In beiden Szenarien ist der GK vorhanden – mit einer thermischen Leistung von 0,21 ohne Förderung und 0,17 mit Förderung – jedoch wird er nicht zur Wärmeproduktion verwendet. Da 0,17 dem vorgegebenen Bestand

entspricht, werden sie folglich im Szenario mit Förderung nicht weiter ausgebaut. Im Szenario ohne Förderung wird der GK um 0,04 erweitert und trägt mit lediglich 0,3 % zur Bedarfsdeckung bei. Zusätzlich zu den Wärmeerzeugungsanlagen wird in den Szenarien der TES ausgebaut. Im Szenario mit Förderung wird ein TES mit normierter Kapazität von 16,73 gebaut. Ohne Förderung beträgt die Kapazität normiert 7,35. REMix baut den TES auf eine normierte Kapazität von 8,45 aus. Die LCoH betragen im Szenario mit Förderung 2,52 ct/kWh, während sie ohne Förderung 6,55 ct/kWh betragen.

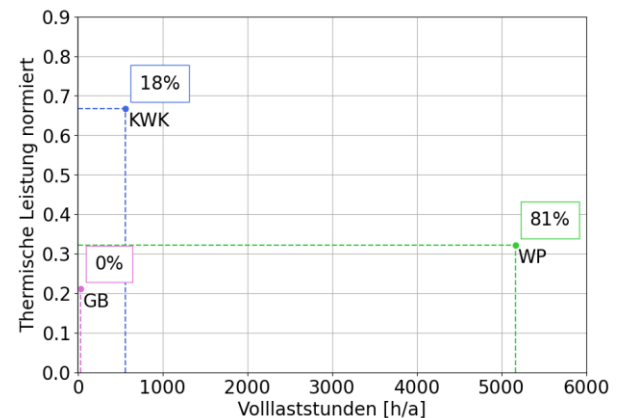


Abb. 2: Szenario „Betriebswirtschaftlich; mit Bestand; ohne Förderung“. Für jeden Wärmeerzeuger sind die thermische Leistung, die Volllaststunden und der Anteil an der Gesamtwärmeerzeugung in % dargestellt

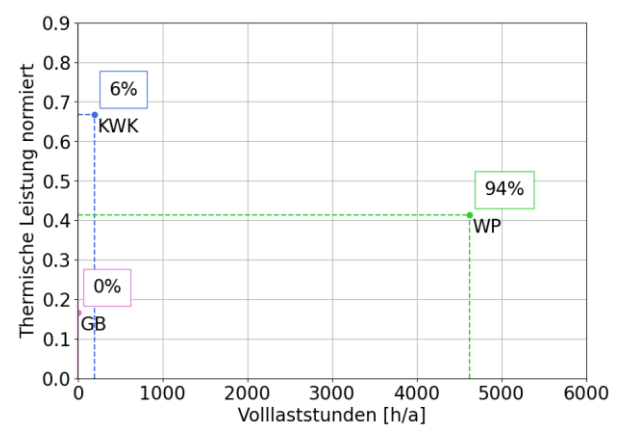


Abb. 3: Szenario „Betriebswirtschaftlich; mit Bestand; mit Förderung“. Für jeden Wärmeerzeuger sind die thermische Leistung, die Volllaststunden und der Anteil an der Gesamtwärmeerzeugung in % dargestellt

#### Variation Gas- und Strompreise

Die Ergebnisse der betriebswirtschaftlichen Optimierungen bei variierenden Gas- und Strompreisen sind in Abb. 4 bis 7 dargestellt. In jedem Quadrat ist dabei der Anteil der einzelnen Wärmeerzeuger an der Jahresgesamtwärmeerzeugung, jeweils für den angegebenen Strom- und Gaspreis, dargestellt. So ist beispielsweise in Abb. 4 unten links zu sehen, dass bei einem durchschnittlichen Strompreis von 4 ct/kWh und einem Gaspreis von 3 ct/kWh 97 % der Jahreswärme von der WP und der Rest von der KWK bereitgestellt wird.

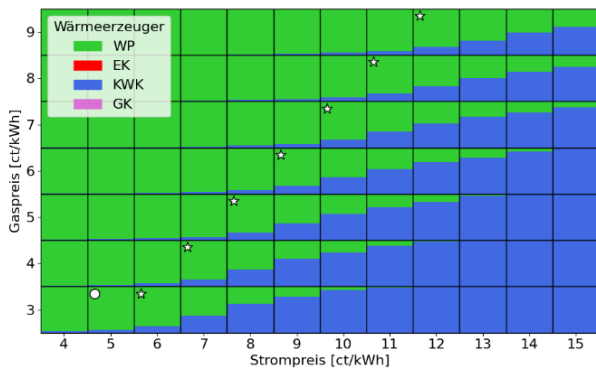


Abb. 4: Szenario „Betriebswirtschaftlich, mit Bestand, mit Förderung“. Zusammensetzung der Wärmeerzeugung. Indizierte Marktpreise in Simulation um Steuern, Abgaben und Förderungen ergänzt. Mit Stern markierte Ergebnisse entsprechen am nächsten dem gewünschten gesamtwirtschaftlichen Optimum. Das mit Punkt markierte Kästchen entspricht dem Gas- und Strompreis des REMix-Szenarios aus Abb. 1 am nächsten

Allgemein ist zu erkennen, dass, Wärmepumpen und KWK den überwiegenden Teil der Wärmeproduktion übernehmen, sowohl mit als auch ohne den Einbezug der aktuellen Förderung. Ohne Förderungen kommt bei einigen wenigen Szenarien ein kleiner Prozentsatz an Erzeugung durch den Gaskessel hinzu. Bei geringen Strompreisen überwiegt die Erzeugung durch Wärmepumpen. Wenn die Strompreise jedoch hoch sind und zusätzlich die Gaspreise gering, dann überwiegt die Erzeugung der Wärme durch KWK. Ein deutlicher Unterschied zeigt sich bei niedrigen Strompreisen: Ohne Förderung trägt die KWK über eine große Bandbreite mit geringem Anteil zur Wärmeproduktion bei, jedoch wird dies im Szenario mit Förderung zu großen Teilen durch die WP abgedeckt. Insgesamt nimmt die WP in den meisten Szenarien den größten Anteil ein.

In den Abb. 4 und 5 wurden bestehende KWK und GK in den Fernwärmenetzen in die Berechnungen einbezogen. Im Vergleich zu den Ergebnissen, die keine bestehenden Anlagen berücksichtigen (Abb. 6 und 7), fällt auf, dass die KWK stärker genutzt wird. Dadurch, dass für sie keine neuen Investitionen nötig sind, wird sie im Vergleich zur WP attraktiver, da hier nur die Betriebskosten der bestehenden Anlagen berücksichtigt werden. Trotzdem bleibt die WP insgesamt in den meisten Szenarien die dominierende Technologie. Der GK hingegen profitiert nicht, obwohl auch hier der Bestand berücksichtigt wird. Er wird fast gänzlich durch die KWK verdrängt. Der Grund ist, dass der GK im Vergleich zu ihr den Vorteil der geringen Investitionskosten verliert.

In allen Szenarien gibt es Verhältnisse von Strom- zu Gaspreisen, in denen sich das Verhältnis von WP zu KWK dem nähert, was sich aus der gesamtwirtschaftlichen Analyse als optimal ergeben hat. Der Bereich, in dem dieses Verhältnis annähernd besteht, ist in den Abb. 4 bis 7 durch Sterne markiert. Dieser gestaltet sich jedoch unterschiedlich groß. Die Szenarien, die hinsichtlich der Energiepreise dem gesamtwirtschaftlichen Szenario am nächsten sind, sind zusätzlich mit einem Kreis markiert.

Der EK kommt nur in den beiden Szenarien ohne Förderung geringfügig in Stunden mit sehr niedrigen Strompreisen zum Einsatz, was dem gesamtwirtschaftlichen Einsatz nicht entspricht.

Der TES wird nicht nur durch die Förderungen beeinflusst – mit Förderung wird mehr Kapazität als ohne gebaut – sondern auch durch die Strom- und Gaspreise. Größere Unterschiede zwischen Strom- und Gaspreis führen zu größeren TES-Kapazitäten (nicht auf den Abbildungen gezeigt). Das liegt daran, dass größere Speicher nötig sind, um Stunden mit günstigen Energiepreisen auszunutzen, da die teuren Stunden nicht durch den jeweils anderen Energieträger ersetzt werden können.

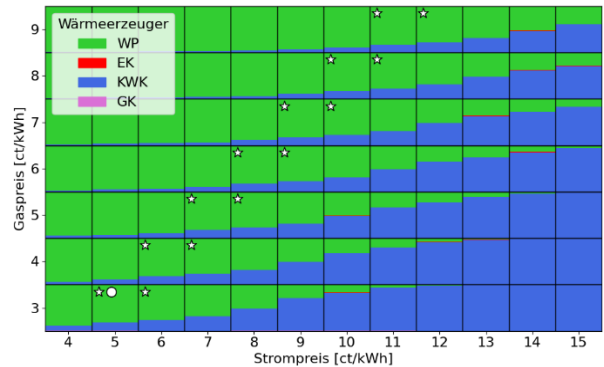


Abb. 5: Szenario „Betriebswirtschaftlich, mit Bestand, ohne Förderung“. Erläuterung siehe Abb. 4

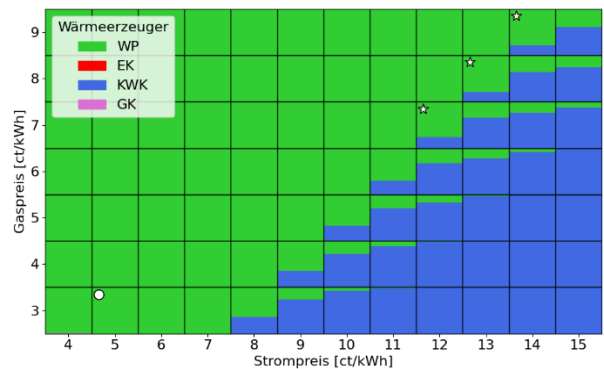


Abb. 6: Szenario „Betriebswirtschaftlich, ohne Bestand, mit Förderung“. Erläuterung siehe Abb. 4

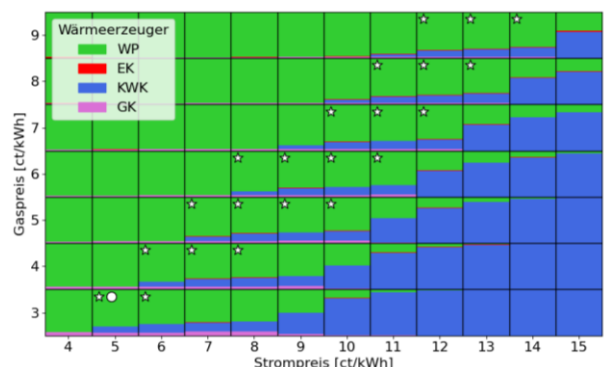


Abb. 7: Szenario „Betriebswirtschaftlich, ohne Bestand, ohne Förderung“. Erläuterung siehe Abb. 4

#### 4. Diskussion

Die Differenzen der Ergebnisse mit und ohne Förderung (siehe Abb. 2 und 3) ergeben sich daraus, dass die BEW-Förderung die Stromkosten für die WP um bis zu  $9,2 * (COP - 1)$  ct/kWh, für die ersten zehn Betriebsjahre, senkt. Zusätzlich werden Investitionskosten für die Anlagen zu 40 % subventioniert. Die KWK erhält zwar ebenfalls Förderung – hier wird ein fixer Zuschlag von 5 ct/kWh für auf den am Markt verkauften Strom für bis

zu 2500 h/a angenommen – jedoch erhält sie keine Investitionskostenzuschüsse. Somit wird der Bau und Betrieb von WP so angereizt, dass sie den anderen Wärmeversorgern ökonomisch überlegen ist. Die hohe, ausgebaute thermische Leistung der KWK bei geringen Volllaststunden zeigt, dass sich die Investitionskosten rentieren, wenn sie in Stunden mit hohem Strompreis viel Strom produziert und ihn verkauft. Der GK wird im Gegensatz zu KWK nur geringfügig gebaut. Der EK wird im Vergleich zur WP, auch wenn keine Förderung für die WP eingerechnet wird, kaum gebaut, da der Vorteil in der Effizienz der WP durch ihren hohen COP mehr Einfluss hat als die höheren Investitionskosten.

Während KWK-Anlagen in Wärmenetzen schon heute rund 100 TWh/a an Wärme bereitstellen [12], sind die Anreize zum Ausbau von WP zu diesem Zeitpunkt sinnvoll, um die Technologie in Deutschland zu etablieren. Es ist dem Vergleich zwischen dem Szenario mit Förderung und dem Szenario ohne Förderung jedoch zu entnehmen, dass mit weiter fortgeschrittenem Ausbau von WP die Fördermaßnahmen überprüft und potenziell angepasst werden sollten, damit WP nicht über einen systemdienlichen Punkt hinaus gefördert und somit gebaut werden. Jedoch muss bei einer potenziellen Überarbeitung der Förderungen in Betracht gezogen werden, dass die Förderlandschaft die LCoH um über die Hälfte senkt und somit ein relevanter Aspekt für die allgemeine Finanzierbarkeit des Wärmesystems ist.

Bei der Interpretation der hier gezeigten Ergebnisse ist zu beachten, dass nur die Ergebnisse mit bzw. ohne Förderung für beide Wärmeerzeugungstechniken (WP bzw. KWK) gezeigt werden. Mit der Variation von entweder nur der WP-Förderung über die BEW, bzw. nur der KWK-Förderung über das KWKG sind gezieltere Beeinflussungen der Anteile der Wärmeerzeugung und der installierten Leistung der beiden Wärmeerzeugungstechniken darstellbar (siehe Endbericht „Fahrplan Gaswende“ [1]). Es ist außerdem zu beachten, dass die WP vereinfacht mit einer Temperaturzeitreihe für alle möglichen Wärmequellen abgebildet ist. In Realität kann sie sich stark von Fall zu Fall unterscheiden, was auch Einfluss auf eine standortabhängig sinnvolle Förderung hat.

Die vergleichende Betrachtung der unterschiedlichen Kombinationen von Strom- und Gaspreisen zeigt besonders stark die unterschiedlichen Einsatzzeiten von KWK und WP auf. WP rentiert sich besonders bei einem geringen Strompreis, da sie Strom als Energieträger nutzen und von geringen Strompreisen profitieren. Umgekehrt profitieren KWK von geringen Gaspreisen, da Gas der genutzte Energieträger ist. Zusätzlich kommen der KWK hohe Strompreise zugute, nicht allein, weil die Erzeugungskosten der WP dadurch steigen, sondern ebenfalls, da sie den Strom, den sie erzeugen, zu hohen Preisen verkaufen können. Jedoch sind die Extremfälle, in denen der Preis für den einen Energieträger besonders hoch und der Preis für den anderen Energieträger besonders niedrig ist in Deutschland unwahrscheinlich [8]. Stromerzeugung aus Gas ist oft die teuerste Variante, je nach Annahmen zum CO<sub>2</sub>-Preis nur übertroffen von Kohle [8]. Umgekehrt kann ein niedriger Strompreis langfristig durch Umstellung der Industrie von Gas zu Strom dazu führen die Gasnachfrage zu senken und damit die Großhandelspreise für Gas zu senken. Zukünftig können Elektrolyseure bei einer technischen Weiterentwicklung und Senkung der Umwandlungsverluste günstiges Gas aus günstigem Strom herstellen. Jedoch zeigen die unterschiedlichen Spannweiten an Preisverhältnissen, in

denen sich systemdienliche Ergebnisse ergeben, dass bei der Förderung der beiden Techniken, die Auswirkungen auf den damit angereizten Betrieb sorgfältig abgewogen werden müssen.

### Ausblick

Die Ergebnisse zeigen nur die beiden Extremfälle mit und ohne Förderung. Nähere Betrachtungen, die nur KWKG-Förderung oder nur BEW-Förderung untersuchen, wären eine interessante Ergänzung für zukünftige Untersuchungen. Auch eine Variation der Förderhöhen wären eine weitere Möglichkeit.

Zusätzlich könnte betrachtet werden, welchen Einfluss die Förderung auf die Kostenstruktur im Vergleich zu dezentralen Wärmeversorgungslösungen im Hinblick auf die Energie- und Ressourceneffizienz auf nationaler Ebene hat.

Weiterhin könnten auch regional differenzierte Betrachtungen angestellt werden, die entweder gezielt einzelne Techniken in bestimmten Regionen fördern, oder die Aufteilung von Deutschland in mehrere Strompreiszonen untersuchen.

Schließlich könnte die Resilienz der betrachteten Anlagenkombinationen hinsichtlich möglicher Energiepreisänderungen in der Zukunft untersucht werden.

## 5. Zusammenfassung

Die vorliegende Untersuchung analysiert mittels MuGrIFlex den betriebswirtschaftlich optimalen Ausbau dekarbonisierter Wärmeerzeugungstechnologien in Fernwärmenetzen für 2030 und vergleicht diese Ergebnisse mit dem gesamtwirtschaftlichen Optimum aus REMix.

Die Ergebnisse zeigen deutliche Diskrepanzen zwischen beiden Betrachtungsweisen. Während die gesamtwirtschaftliche Optimierung einen ausgewogenen Technologiemix mit 67 % Wärme aus Wärmepumpen als optimal ergibt, dominiert in der betriebswirtschaftlichen Optimierung unter aktueller Förderung die Wärmepumpe mit 94 % der Wärmeerzeugung. Ohne Fördermaßnahmen reduziert sich dieser Anteil auf 81 %.

Die Variation von Strom- und Gaspreisen verdeutlicht die starke Preisabhängigkeit der Technologiewahl. Systemdienliche Anlagenkombinationen aus KWK und Wärmepumpen werden nur in einem engen Preisbereich erreicht.

Die Analyse beschränkte sich auf den Vergleich zwischen vollständiger und fehlender Förderung. Eine differenzierte Betrachtung einzelner Förderinstrumente könnte einen gezielteren Einfluss auf einen systemdienlichen Anlagenpark ermöglichen.

Regional differenzierte oder an Strom-Gas-Preisverhältnisse gekoppelte Förderungen könnten der Gegenstand weiterer Untersuchungen sein. Zukünftige Forschung sollte die separate Variation einzelner Förderinstrumente, die Resilienz verschiedener Anlagenkombinationen sowie eine ganzheitliche Bewertung unter Einbezug dezentraler Alternativen untersuchen, um eine kosteneffiziente Dekarbonisierung zu gewährleisten.

## Danksagung

Dank geht an das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWE) für die Förderung des „Verbundvorhaben Fahrplan Gaswende-Techno-ökonomische Analyse

von Pfaden zu einer klimaneutralen und flexiblen Gasversorgung im integrierten Energiesystem der Zukunft“; (Förderkennzeichen 03EI1030). Außerdem gilt großer Dank unseren Projektpartnern: dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Institut für Technische Thermodynamik, Abteilung Energiesystemanalyse, sowie dem Gas- und Wärme-Institut Essen e.V. (gwi), Abteilung Brennstoff- und Gerätetechnik.

(BGBl. I S. 742), die zuletzt durch Artikel 1 der Verordnung vom 13. Juli 2022 (BGBl. I S. 1134) geändert worden ist: AVBFernwärmeV, 2022.

## Literatur

- [1] IFAM, DLR, GWI, „Projekt Fahrplan Gaswende Endbericht,“ (noch unveröffentlicht).
- [2] M. Fette et al., „Multi-Sektor-Kopplung,“ 2020, doi: 10.24406/publica-fhg-300637.
- [3] VERORDNUNG (EU) 2021/1119 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 30. Juni 2021 zur Schaffung des Rahmens für die Verwirklichung der Klimaneutralität und zur Änderung der Verordnungen (EG) Nr. 401/2009 und (EU) 2018/1999 („Europäisches Klimagesetz“), 2021.
- [4] M. Wetzel et al., „REMix: A GAMS-based framework for optimizing energy system models,“ JOSS, Jg. 9, Nr. 99, S. 6330, 2024, doi: 10.21105/joss.06330.
- [5] M. Wetzel, H. C. Gils und V. Bertsch, „Green energy carriers and energy sovereignty in a climate neutral European energy system,“ Renewable Energy, Jg. 210, S. 591–603, 2023, doi: 10.1016/j.renene.2023.04.015.
- [6] Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, Richtlinie für die Bundesförderung für effiziente Wärmenetze „BEW“: BEW, 2022.
- [7] Gesetz für die Erhaltung, die Modernisierung und den Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung: KWKG, 2015.
- [8] C. Krüger, L. Springorum, F. Merten und F. Auschra, „Die Auswirkung unterschiedlicher Treiberentwicklungen auf den Strompreis: Vorstellung und Anwendung des WI-Merit-Order-Tools und Metaanalyse von Strompreisszenarien,“ 2024. [Online]. Verfügbar unter: [https://epub.wupperinst.org/frontdoor/deliver/index/docId/8655/file/8655\\_Strompreis.pdf](https://epub.wupperinst.org/frontdoor/deliver/index/docId/8655/file/8655_Strompreis.pdf)
- [9] L. Mantzos, T. Wiesenthal, F. Neuwahl und M. Rózsai, The POTEnCIA central scenario: An EU energy outlook to 2050 (JRC science for policy report). Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2019.
- [10] A. Roth, C. Gaete-Morales, D. Kirchem und W.-P. Schill, „Power sector benefits of flexible heat pumps in 2030 scenarios,“ Commun Earth Environ, Jg. 5, Nr. 1, 2024, doi: 10.1038/s43247-024-01861-2.
- [11] M. Pavičević et al., „The potential of sector coupling in future European energy systems: Soft linking between the Dispa-SET and JRC-EU-TIMES models,“ Applied Energy, Jg. 267, S. 115100, 2020, doi: 10.1016/j.apenergy.2020.115100.
- [12] Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e. V. (AGFW), „AGFW-Hauptbericht 2022,“ 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.agfw.de/zahlen-und-statistiken/agfw-hauptbericht>
- [13] Verordnung über Allgemeine Bedingungen für die Versorgung mit Fernwärme vom 20. Juni 1980

# Modellierungsansatz und erste Ergebnisse zur gemeinschaftlichen Wärmeerzeugung und -versorgung eines Gewerbegebiets

Ann-Kathrin RATHMANN<sup>1\*</sup>, Anne SCHIERENBECK<sup>1</sup>, Ulrike JORDAN<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Hochschule Osnabrück, Fakultät Management, Kultur und Technik, Kaiserstraße 10c, 49809 Lingen

<sup>2</sup> Universität Kassel, Institut für Thermische Energietechnik, Kurt-Wolter-Straße 3, 34109 Kassel

\* a.k.rathmann@hs-osnabrueck.de

---

## Kurzfassung

Die Energieversorgung von Unternehmen muss zukünftig CO<sub>2</sub>-neutral und kosteneffizient sein. Ziel des Beitrages ist es, einen Modellansatz zu entwickeln, um die wirtschaftlichen und technischen Synergien einer dezentralen und kooperativen Energieversorgung in Gewerbegebieten zu analysieren. Das Energiesystemmodell wird in oemof entwickelt. Es werden Energieversorgungskosten im Bestand mit denen des dezentralen Systems verglichen. Die Ergebnisse zeigen, dass PV-Anlagen, Wärmepumpen, Wärme- und Stromspeicher sowie ein Mix aus Abwärme, Strom- und Biomethanetzbezug eine kostenoptimale Deckung des Bedarfs ermöglichen. Trotz der Investition in die Technologien resultieren ähnliche jährliche Kosten wie bei der bestehenden erdgasbasierten Versorgung, jedoch mit einer CO<sub>2</sub>-Einsparung von 20.400 Tonnen.

## Schlagworte

Abwärmenutzung; Energiesystemanalyse; oemof; Temperaturniveau; Wasserstoff; Wärmenetz

---

## 1. Einleitung

Die direkte oder indirekte Elektrifizierung von Wärmeanwendungen unter der Voraussetzung einer emissionsarmen Stromerzeugung reduziert die Treibhausgasemissionen in Industrie und dem Gewerbe-, Handels- und Dienstleistungssektor. [1] Der Übergang von erdgasbasierten zu strombasierten Wärmetechnologien, beispielsweise durch den Einsatz von Wärmepumpen und elektrischen Kesseln oder durch Verfahren, die auf Wasserstoff und Methan basieren, ist von zentraler Bedeutung für die Dekarbonisierung der Prozesswärmeversorgung. [2] Aus der Perspektive eines Unternehmens ist die Dekarbonisierung der Wärmeerzeugung nur dann eine realisierbare Lösung, wenn diese wirtschaftlich vorteilhaft ist.

Aktuelle Transformationsprojekte [3–6] in Industrie- und Gewerbegebieten zeigen, dass gemeinschaftliche Energieversorgungskonzepte zunehmend durch koordinierte Kooperation zwischen Unternehmen geprägt sind. Ein Fokusthema ist die regenerative Wärmeversorgung durch Nutzung lokaler Abwärmepotenziale, Erschließung der Gewerbegebiete mit Wärmenetzen oder die gemeinschaftliche Wärmeerzeugung, -speicherung und -verteilung durch die ansässigen Unternehmen [7–9]. In [10] wurde gezeigt, dass in Gewerbegebieten lokale EE-Potenziale vollständig ausgeschöpft werden sollte. Die gemeinschaftliche Nutzung von Wärmepumpen und Strom- und Wärmespeicher wird empfohlen. Abhängig vom Wärmebedarf des Gewerbegebiets sind Wärmenetze essenziell, während dezentrale Wasserstofftechnologien nicht ökonomisch vorteilhaft sind.

Der vorliegende Beitrag widmet sich der Untersuchung technischer und wirtschaftlicher Synergien im Rahmen einer unternehmensübergreifenden Dekarbonisierungsstrategie zur Wärmeversorgung in Gewerbegebieten. Hierzu wird ein Energiesystemmodell entwickelt, um zu analysieren, ob die gemeinschaftliche Erzeugung, Speicherung und Nutzung von Strom und Wärme in einem Gewerbequartier ökonomische Vorteile bietet. Gewerbequartier beschreibt dabei die gemeinschaftliche Erzeugung, Speicherung und Verteilung von Energie zwischen den Unternehmen eines Gewerbegebietes. Diese Strategie ermöglicht nicht nur eine effizientere Nutzung der Ressourcen, sondern fördert auch den Austausch von überschüssiger Wärme und Energie zwischen den beteiligten Unternehmen, wodurch Potenziale zur Kostenreduktion und Emissionsminderung realisiert werden können.

Als Fallstudie dient ein Gewerbegebiet in Norddeutschland, das überwiegend aus kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) sowie wenigen Großunternehmen besteht. Dieses Gebiet weist derzeit einen Erdgasverbrauch von etwa 100 GWh/a auf, welcher für Raumwärme, Warmwasser und Prozesswärme verwendet wird. Die Analyse zielt darauf ab, eine erste Machbarkeit auf Modellebene dieses dezentralen kooperativen Energieversorgungsansatzes zu ermitteln, um zukünftig eine kosteneffizientere und CO<sub>2</sub>-neutrale Energieversorgung in den Bereichen Strom und Wärme für Gewerbegebiete zu gestalten.

## 2. Methodisches Vorgehen

### 2.1 Allgemeine Charakteristika und Modellstruktur

Das Modell ist in Python implementiert und basiert auf dem sogenannten *Open Energy Modelling Framework* (kurz *oemof*) [11], einem linearen Programmierungs-Framework zur Modellierung und Analyse von Energiesystemen. Mithilfe des auf der Pyomo-Bibliothek basierenden Moduls *oemof-solph* ist es möglich, Optimierungsmodelle für lineare Programmierung (LP) oder gemischt-ganzzahlige lineare Programmierung (MILP) zu erstellen und zu lösen. [11] Zur Lösung des linearen Optimierungsproblems wird der Solver Cbc [12] eingesetzt.

Das Energiesystemmodell besteht aus einem Netzwerk von Knoten (*nodes*) und Kanten (*flows*). Die Hauptkategorien der Knoten umfassen Sammelschienen (*buses*) und Komponenten (*components*), die weiter in Quellen (*sources*), Senken (*sinks*), Transformer (*transformers*) und Speicher (*storages*) unterteilt sind. Jede Komponente muss mit mindestens einer Sammelschiene durch Flüsse verbunden sein, wobei für jede Sammelschiene gilt, dass die Summe der eintretenden Flüsse gleich der Summe der austretenden Flüsse ist. [11]

Das *oemof*-Framework wird verwendet, um in einem Energiesystem die Kosten der Energieversorgung für eine gegebene Nachfrage zu minimieren. Das Erzeugerportfolio wird optimal dimensioniert, sodass die Energiebedarfe des Gewerbegebiets innerhalb der Grenzen dieses Portfolios zu jedem Zeitpunkt kostenoptimal gedeckt werden. Bei dieser Optimierung werden sowohl die Investitionsoptimierung (Dimensionierung) als auch die Betriebsoptimierung (Einsatzplanung) der Komponenten berücksichtigt. Dies führt zu einem kostenoptimierten Anlagenportfolio bestehend aus Erzeugern, Speichern und Transformatoren zur dezentralen Versorgung eines Gewerbegebiets.

Für die gleichzeitige Investitions- und Betriebsoptimierung wird die Zielfunktion zur Minimierung der Summe aller variablen Kosten  $c_{var}$  und der Investitionskosten  $c_{inv}$  eingesetzt (Gl. 1). Der Betrachtungszeitraum ist ein Jahr mit einer stündlichen Auflösung:

$$\min:\{c_{var} + c_{inv}\}$$

Gl. 1

Die variablen Kosten  $c_{var}$  umfassen die Kosten der Energieflüsse zwischen zwei Knoten. Die Investitionskosten  $c_{inv}$  umfassen die in Gl. 2 dargestellten annualisierten Investitionskosten (Equivalent Periodical Costs, kurz EPC).

$$EPC = CAPEX \cdot \frac{wacc \cdot (1 + wacc)^T}{(1 + wacc)^T - 1} + OPEX \quad \text{Gl. 2}$$

Die EPC-Kosten für jede Technologie (*component*) werden mit der Methode *annuity()* berechnet. Dafür müssen die Investitionskosten (*Capex*), Betriebskosten (*Opex*), ein Zinssatz (*weighted average cost of capital*, kurz *wacc*) und ein Abschreibungszeitraum (*T*) als Parameter übergeben werden.

Das entwickelte Energiesystemmodell zur Modellierung einer gemeinschaftlichen Energieerzeugung und -versorgung eines Gewerbegebiets besteht aus sechs Sammelschienen Strom, Biomethan, Wasserstoff und Wärme aufgeteilt in die Temperaturniveaus „bis 100 °C“, „100-200 °C“ und „200-500 °C“. Das Modell verfügt über Quellen (*sources*) in Form von Netzanschlusspunkten für Strom, Fernwärme, Biogas und Wasserstoff sowie PV-Aufdachanlagen und Abwärme. Die Abwärmemenge ist begrenzt auf die verfügbare Dachfläche im betrachteten Gewerbegebiet. Die Senken im Modell umfassen die Energieverbräuche der Unternehmen im Gewerbegebiet (Wärme und Strom). Der Wärmebedarf ist entsprechend der Temperaturniveaus der Sammelschienen aufgeschlüsselt.

Zur Deckung der Energiebedarfe stehen verschiedene Wandlertechnologien (z. B. Wärmepumpen) und Speichertechnologien (z. B. Batteriespeicher) zur Verfügung. In Abb. 1 ist der Modellaufbau mit allen berücksichtigten Technologien in der objektorientierten Graphenstruktur dargestellt.

### 2.2 Eingangsdaten und Annahmen

Im Energiesystemmodell werden technoökonomisch Annahmen für die Komponenten getroffen. Diese umfassen Investitions- und Betriebskosten, Lebensdauer sowie Wirkungsgrad und können aus dem Technologiecatalog

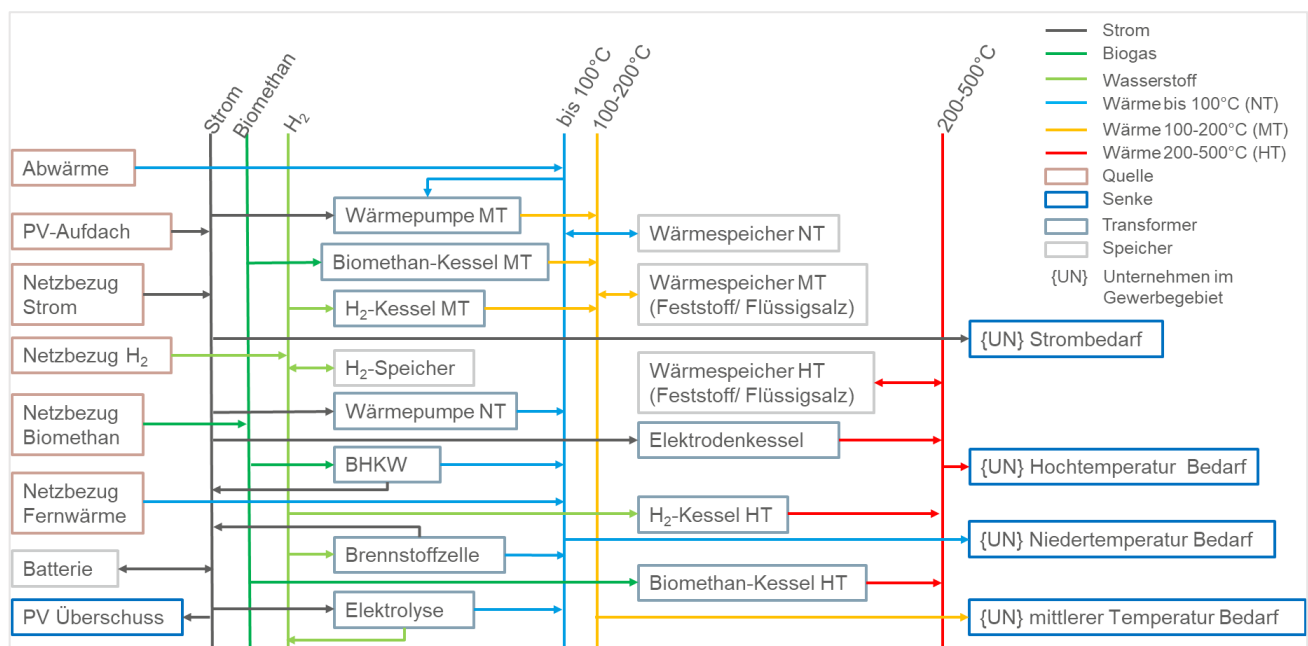


Abb. 1: Darstellung des Modells - Graphenstruktur in oemof

[13] entnommen werden. Referenzjahr für diese Angaben ist das Jahr 2025.

Neben den komponentenbezogenen Annahmen werden zusätzlich Preisannahmen für die Energieträger Strom, Fernwärme, Biogas und Wasserstoff getroffen, da das Energiesystemmodell Netzanschlusspunkte für diese Energieträger beinhaltet. Im Modell werden diese Netzanschlüsse durch die Quellen „Netzbezug Strom/ Fernwärme/ Biogas/ Wasserstoff“ repräsentiert. Die Preisannahmen basieren auf den Szenariendaten zum Ariadne-Report [14], der Strompreisanalyse des BDEW [15], der Fernwärmepreisübersicht der AGFW [16] und dem Technikatalog Kommunale Wärmeplanung [17]. Beim Stromnetzanschluss sind sowohl der Netzbezug als auch die Netzeinspeisung möglich, während für alle weiteren Energieträger nur der Netzbezug möglich ist. Die Kosten für den Netzbezug gliedern sich jeweils in Leistungspreis (LP) und Arbeitspreis (AP) auf (Tab. 1).

Tab. 1: Energiepreisannahmen

Energieträger	AP in €/kWh	LP in €/kWh/a	
Strom	0,18	115	[15]
Gas	0,08	15	[14]
Wasserstoff	0,30	80	[14]
Fernwärme	0,14	65	[16]
Biomethan	0,13	15	[17]

Als Untersuchungsgegenstand dient ein reales Gewerbegebiet in Niedersachsen. Abb. 2 zeigt die Anzahl der Unternehmen in verschiedenen Wirtschaftszweigen und deren Anteil am gesamten Energieverbrauch des Gebiets.

Das Gewerbegebiet umfasst etwa 70 Unternehmen auf einer Fläche von ca. 1,65 km<sup>2</sup> und wird sowohl mit Strom als auch mit Gas versorgt. Im Jahr werden ca. 5 GWh Strom und 100 GWh Gas bezogen. Das Gas wird zur Wärmeerzeugung genutzt und dient überwiegend der Raumwärme- und Warmwasserbereitstellung (ca. 58 GWh/a). Je ca. 22 GWh/a an Gas werden benötigt, um Prozesswärme in den Temperaturbereichen 100 °C - 200 °C sowie 200 °C - 500 °C zu erzeugen.

Eine Besonderheit dieses Gebiets ist, dass ein Großteil des Gasverbrauchs durch einige wenige Unternehmen im Wirtschaftszweig C (Verarbeitendes Gewerbe)

verursacht wird, die wärmeintensive Prozesse betreiben. Dadurch entfällt etwa 95 % des Gasbedarfs auf diesen Wirtschaftszweig. Auch beim Stromverbrauch hat dieser Wirtschaftszweig einen substantiellen Anteil von etwa 70 %. Der Handel, Wirtschaftszweig G, weist den zweitgrößten Anteil auf, mit ungefähr 20 % des Stromverbrauchs und 4 % des Gasverbrauchs im Gebiet.

Es liegen Strom- und Gaslastprofile einzelner Unternehmen des betrachteten Gewerbegebietes in stündlicher Auflösung über ein Jahr vor, die mittels registrierender Leistungsmessung erhoben wurden, sowie der kumulierte Strom- und Wärmeenergieverbrauch aller 70 Unternehmen. Im Gewerbegebiet wird der reale Stromverbrauch zu ca. 84 % und der reale Gasverbrauch zu ca. 94 % durch registrierende Leistungsmessungen kontinuierlich erfasst. Diese Strom- und Gaslastprofile sowie der jährliche Strom- und Gasbedarf dienen als Datengrundlage für den realen Energiebedarf. Da nicht jedes Unternehmen im betrachteten Gewerbegebiet über eine registrierende Leistungsmessung (RLM) verfügt, werden zur Abbildung des Gesamtgebietsbedarfs synthetische Strom- und Wärmebedarfsprofile [18] hinzugezogen.

### 3. Ergebnisse

#### 3.1 Anlagenportfolio zur dezentralen Versorgung

Zur kostenoptimalen Deckung des Energiebedarfs kommen folgende Quellen sowie Erzeuger-, Wandler- und Speichertechnologie zum Einsatz (Tab. 2).

Tab. 2: GewerbeQuartier 2025 - Technologieübersicht

Quelle/ Netzanschluss	Wandler	Speicher
PV-Anlage	Wärmepumpe NT, MT	Batterie
Abwärmenutzung		Wärmespeicher
Netzbezug Strom	Elektrodenkessel	NT, MT, HT
Netzbezug Biomethan	Biomethan-Kessel MT, HT	

Die ausgebaute Nennleistung der jeweiligen Technologien ist in Abb. 3 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass eine PV-Nennleistung von ca. 28,6 MWp im Modell abgerufen wird. Das entspricht einer Nutzung von nahezu allen im Gewerbegebiet verfügbaren Dachflächen.

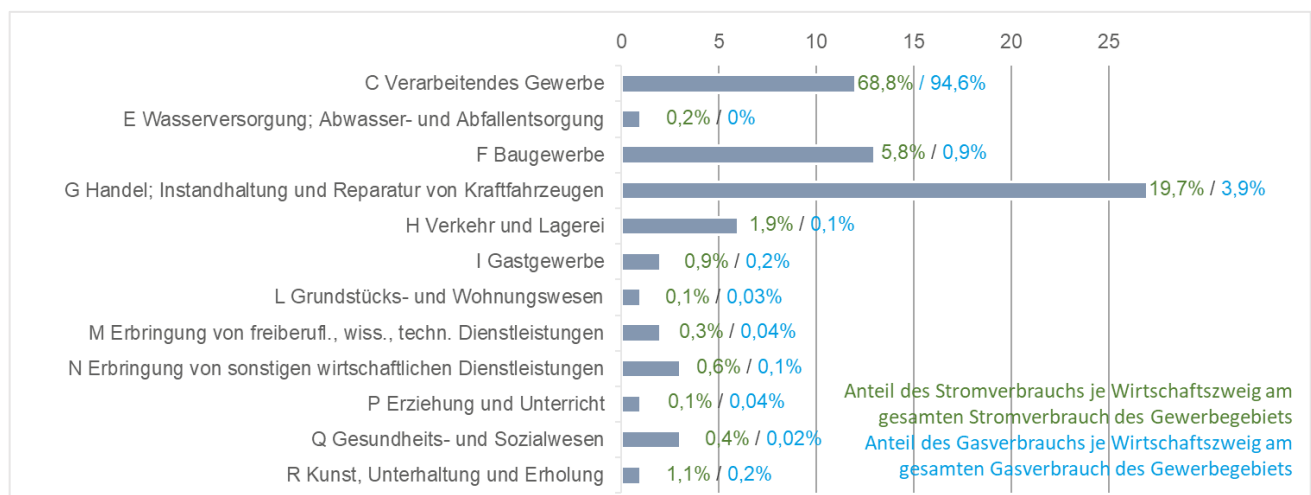


Abb. 2: Anzahl an Unternehmen je Wirtschaftszweig im Gewerbegebiet und ihr Anteil am Gesamtenergieverbrauch

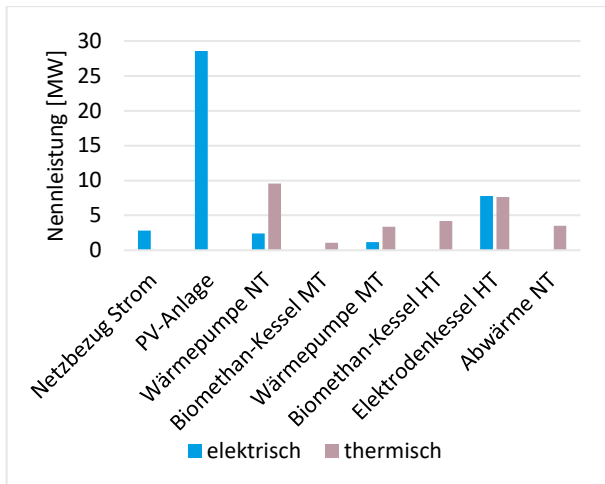


Abb. 3: Nennleistung der Erzeugungs- & Transformer-Technologien

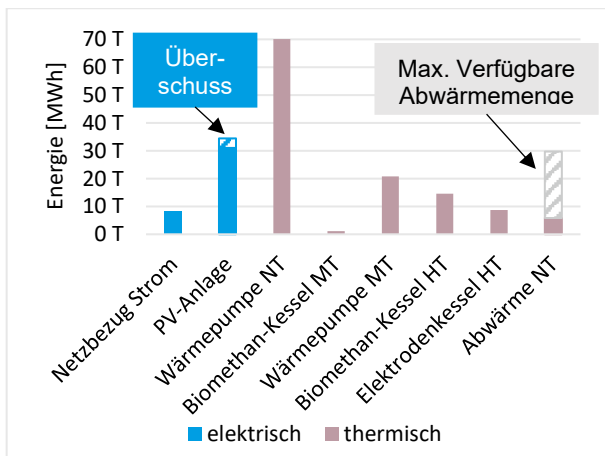


Abb. 4: Bereitgestellte Energiemengen durch Erzeugungs- & Transformer-Technologien

Bei der Analyse der bereitgestellten elektrischen und thermischen Energiemengen im betrachteten Optimierungsjahr (Abb. 4) zeigt sich, dass das verfügbare Abwärmepotenzial von knapp 24 GWh/a nur zu ca. 25 % im Optimierungsjahr ausgeschöpft wird, obwohl 58 GWh/a an Niedertemperaturwärme benötigt werden. Außerdem ist hervorzuheben, dass die Wärme im Niedertemperaturbereich durch Abwärmenutzung und Wärmepumpen im Modell erzeugt wird. Für Wärme bis 100 °C ist der Einsatz von Biomethan nicht wirtschaftlich im Vergleich zur Elektrifizierung mittels Wärmepumpentechnologien. Im mittleren Temperaturbereich überwiegt ebenfalls die Wärmebereitstellung über Wärmepumpen. Hier dient die verfügbare Abwärme sowie die NT-Wärme aus dem Wärmenetz als Wärmequelle für die MT-Wärmepumpe. Lediglich 5 % der benötigten MT-Wärmemenge wird im Optimierungsjahr über Biomethan-Kessel erzeugt. Für die Wärmeversorgung im Hochtemperaturbereich überwiegt im relativen Vergleich der Biomethaneinsatz mit ca. 63 %. Die verbleibenden knapp 8.800 GWh HT-Wärme, die die im Gewerbegebiet im Optimierungsjahr benötigt werden, werden strombasiert durch Elektrodenkessel gedeckt.

Neben den Wandlern umfasst das optimierte Energiesystem des GewerbeQuartiers Speichertechnologien zur Speicherung von Strom sowie Wärme in allen drei berücksichtigten Temperaturniveaus. In Tab. 3 ist die Kapazität der Speicher dargestellt. Auffällig ist die Kapazität

des Wärmespeichers im Niedertemperaturbereich von ca. 261 MWh.

Tab. 3: Kapazität der Speicher-Technologien

Speichertechnologie	Kapazität
Batterie	41 MWh
Wärmespeicher NT	261 MWh
Wärmespeicher MT	1,6 MWh
Wärmespeicher HT	33 MWh

Unter den getroffenen Annahmen zeigen die Modellergebnisse, dass Wasserstoff weder bezogen noch erzeugt wird. Somit entfallen auch alle Technologien zur Speicherung oder Wärmeerzeugung aus Wasserstoff. Wasserstofftechnologien tragen unter den getroffenen Annahmen in dem betrachteten Gewerbegebiet nicht zu einer ökonomisch vorteilhaften Energieversorgung bei. Außerdem wird nicht in einen Fernwärmenetzanschluss investiert, sodass keine Wärme für das GewerbeQuartier von außen bezogen wird. Stattdessen erfolgt die Wärmeerzeugung, Abwärmennutzung und Verteilung innerhalb des Quartiers über ein Nahwärmesystem. Ebenso wird das BHKW, das Strom und Niedertemperaturwärme aus Biomethan bereitstellen kann, nicht ausgebaut.

Diese Ergebnisse deuten an, dass es ökonomisch vorteilhaft ist, dass mit steigendem Temperaturniveau der Anteil der mittels direkter Elektrifizierung bereitgestellten Wärme sinkt. In Niedertemperaturbereich zeigt sich eine vollständige Elektrifizierung der Wärmebereitstellung. Im Hochtemperaturbereich dominiert zwar die biogasbasierte Wärmebereitstellung, aber auch hier wird ca. 1/3 der Wärme elektrisch erzeugt. Wasserstoffbasierte Technologien bieten im Bereich Wärme unter den getroffenen Annahmen keinen ökonomischen Vorteil.

### 3.2 Kostenanalyse

Im bestehenden Gewerbegebiet verursachen die Energieverbräuche im Referenzjahr unter Verwendung der Energiepreisannahmen (Tab. 1) ca. 10,3 Mio. €. 90 % der Kosten entfallen auf den Gasverbrauch von ca. 100 GWh/a inkl. resultierender Kosten für den CO<sub>2</sub>-Ausstoß. Die verbleibenden 10 % der jährlichen Energiekosten ergeben sich durch den Stromverbrauch von ca. 5 GWh/a im Gewerbegebiet. Unberücksichtigt sind Wartungs- und Instandhaltungskosten der bestehenden Anlagen der einzelnen Unternehmen.

Im Optimierungsjahr ergeben sich im Energiesystemmodell unter Anwendung des Quartiersansatzes Gesamtkosten von ca. 10,05 Mio. € unter Berücksichtigung der äquivalent periodischen Kosten der Technologien des Energiesystems sowie der Energiekosten verursacht durch den Netzanschluss. Ca. 56 % der jährlichen Kosten entfallen auf die Investitions- und Betriebskosten des Anlagenportfolios des GewerbeQuartiers. Die restlichen 44 % der Kosten verursacht der Netzbezug von Strom und Biomethan. Die höchsten äquivalent periodischen Kosten weisen das Wärmenetz und die PV-Anlagen auf, gefolgt von den Wärmepumpen NT. Die Ergebnisse des Kostenvergleichs zwischen den Energiekosten im Bestand und den äquivalent periodischen Kosten sowie jährliche Energiekosten sind in Abb. 6 dargestellt.

Neben den jährlichen Gesamtkosten sind in Abb. 5 die Energiegestehungskosten der einzelnen Energieträger dargestellt. Durch die Erzeugung von Strom mittels PV

und trotz Batteriespeicherung sind die Stromgestehungskosten mit 0,131 €/kWh niedriger als die angenommenen Netzbezugsstrompreise von 0,18 €/kWh. Die spezifischen Kosten für NT- und MT-Wärme sind auf ähnlichem Niveau wie der Gaspreis. Die HT-Wärme ist die teuerste Energieform im GewerbeQuartier mit ca. 0,153 €/kWh. Ein Erklärungsansatz dafür, dass die NT-Wärme nicht deutlich günstiger als die MT-Wärme ist, ist, dass im optimierten Energiesystem immense Speicherkapazitäten für die NT-Wärme ausgebaut wurden und die Kosten für den Bau und den Betrieb des Wärmenetz in den spezifischen Kosten berücksichtigt sind. Die Speicherkapazität der MT-Wärme ist im optimierten Energiesystemmodell vergleichsweise gering. Die hohen spezifischen HT-Wärmekosten ergeben sich aus den geringeren Wirkungsgraden im Bereich der Elektrifizierung von Hochtemperaturwärmerzeugung im Vergleich zu Wärmepumpen im Niedertemperaturbereich.

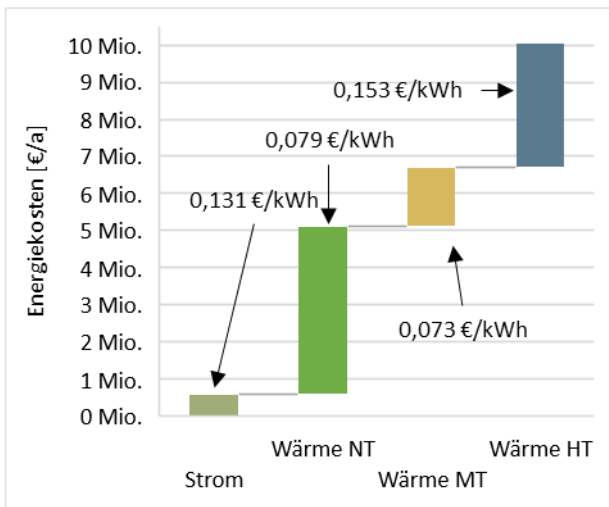


Abb. 5: Jährliche Kosten und Energiegestehungskosten nach Energieform im GewerbeQuartier

Die Ergebnisse aus der Modellierung des GewerbeQuartiers deuten für das betrachtete Gewerbegebiet unter den beschriebenen Annahmen an, dass trotz Investition in Erzeuger- und Speichertechnologien sowie Verteilungsinfrastruktur ähnliche jährliche Kosten resultieren, verglichen mit der bestehenden erdgasbasierten Energieversorgung. Ein entscheidender Vorteil des GewerbeQuartiers liegt in der Einsparung von CO<sub>2</sub>. Durch die Substitution des Erdgases können 20.400 t CO<sub>2</sub> eingespart

werden. Da das Energiesystem einen Netzanschluss an das Stromnetz hat, ist es nicht vollständig klimaneutral. Mit steigendem Anteil an erneuerbaren Energien im deutschen Strommix nähert sich das Energiesystem der CO<sub>2</sub>-Neutralität an.

#### 4. Diskussion

Die Ergebnisse zeigen, dass zur kostenoptimalen Deckung des Energiebedarfs im Gewerbegebiet Technologien wie PV-Anlagen, Abwärmenutzung, Wärmepumpen und Biomethan-Kessel zum Einsatz kommen. Das Modell berücksichtigt bereits einige Technologien zur Erzeugung, Wandlung und Speicherung von Energie, ist aber noch nicht vollständig. Beispielsweise können Solarthermie-Anlagen oder saisonale Wärmespeicher zukünftig ergänzt werden. Außerdem ist festzuhalten, dass insbesondere die spezifischen Kosten der Technologien, aber auch der Energieträger Annahmen aus der Literatur darstellen. Bei der Investitions- und Betriebsoptimierung haben die Technologie- und Energiepreisannahmen einen Einfluss auf das Anlagenportfolio und die resultierenden Kosten des Energiesystems. Entsprechend ist im nächsten Schritt neben der Erweiterung des Modells die Analyse der Sensitivität der Modellergebnisse erforderlich.

Es ist anzumerken, dass die Wärmeverteilung in Form eines Wärmenetzes mit einer Vorlauftemperatur von maximal 100 °C berücksichtigt wird. Die Dimensionierung und die annualisierten Investitions- und Betriebskosten des Wärmenetzes werden anhand des Bedarfs und des Wärmeerzeugerportfolios abgeleitet. Die Kosten des Netzes sind nicht Teil der Optimierung, sondern resultieren aus den Optimierungsergebnissen.

Eine erste Machbarkeit des GewerbeQuartiers ist bisher technisch und wirtschaftlich auf Modellebene erfolgt. Die Prüfung der gesetzlichen Rahmenbedingungen steht noch aus. Diese haben einen erheblichen Einfluss auf die Umsetzungschancen des GewerbeQuartier-Ansatzes.

#### 5. Zusammenfassung

Die durchgeführte Modellierung des GewerbeQuartiers zeigt, dass es möglich ist, ein net-zero-ready-Energiesystem für das Jahr 2025 zu realisieren. Dieses System bietet die Voraussetzungen für eine 100 % klimaneutrale Versorgung eines Gewerbegebiets, und das zu ähnlichen jährlichen Kosten verglichen mit der derzeitigen erdgasbasierten Energieversorgung. Die Umstellung auf ein Energiesystem mit geringeren CO<sub>2</sub>-Emissionen bringt

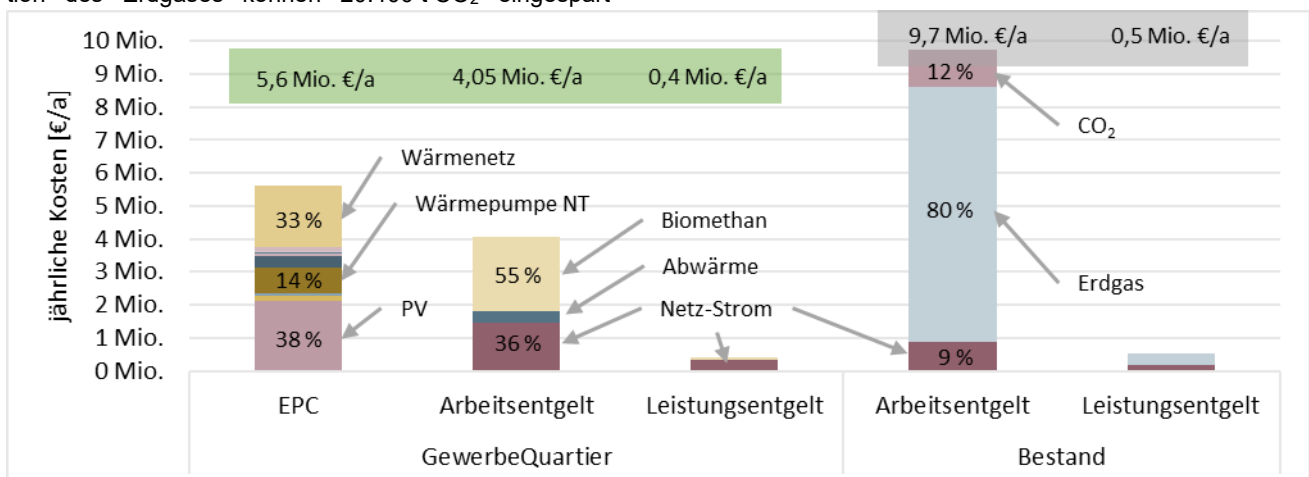


Abb. 6: Vergleich jährlicher Kosten der Energieversorgung zwischen Bestand und GewerbeQuartier

nicht nur unmittelbare ökologische Vorteile, sondern bietet auch langfristige strategische Vorteile, insbesondere bei einem weiter steigenden Anteil erneuerbarer Energien im deutschen Strommix. Diese Entwicklung unterstützt die CO<sub>2</sub>-Neutralität des GewerbeQuartiers. Die Analyse der technologischen Zusammensetzung des dezentralen Energiesystems zeigt, dass ein Energiemix aus Biomethan, speziell im Hochtemperaturbereich, und Strom, im Mittel- und Niedertemperaturbereich, ökonomisch vorteilhafter ist als eine vollständige direkte Elektrifizierung der Wärmeversorgung. Wasserstoffbasierte Technologien erweisen sich hingegen unter den getroffenen Annahmen als nicht wettbewerbsfähig. Zudem verursachen Wärmenetze etwa ein Drittel der gesamten Investitionen, was ihre Bedeutung in der Infrastrukturplanung unterstreicht.

Für die Zukunft ist geplant, die Analyse auf weitere Gewerbegebiete auszuweiten. Dies würde die Generalisierbarkeit der Ergebnisse stärken und mögliche Anpassungen für unterschiedliche lokale Gegebenheiten aufdecken. Darüber hinaus sollten zukünftige Studien weitere integrierbare Technologien und die rechtlichen Rahmenbedingungen berücksichtigen.

## Literatur

- [1] A. Guminski et al. „Energiewende in der Industrie: Potenziale und Wechselwirkungen mit dem Energiesektor.“ Zugriff am: 19. August 2024. [Online.] Verfügbar unter: [https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/E/energiewende-in-der-industrie.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=8](https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/E/energiewende-in-der-industrie.pdf?__blob=publicationFile&v=8)
- [2] J. Brandes, M. Haun, D. Wrede, P. Jürgens, C. Kost und H.-M. Henning. „Wege zu einem klimaneutralen Energiesystem: Die deutsche Energiewende im Kontext gesellschaftlicher Verhaltensweisen - Update November 2021: Klimaneutralität 2045.“ Zugriff am: 7. August 2024. [Online.] Verfügbar unter: <https://www.ise.fraunhofer.de/de/veroeffentlichungen/studien/wege-zu-einem-klimaneutralen-energiesystem.html>
- [3] Ministerium für Wirtschaft, Infrastruktur, Tourismus und Arbeit Mecklenburg-Vorpommern. „G<sup>3</sup> - Grüne Gewerbegebiete.“ Zugriff am: 3. Dezember 2025. [Online.] Verfügbar unter: <https://www.gruene-gewerbegebiete.de/>
- [4] Wachstumsregion Ems-Achse e.V. „Gewerbegebiets-Check.“ Zugriff am: 3. Dezember 2025. [Online.] Verfügbar unter: <https://info.emsachse.de/projekte/gewerbegebiets-check.html>
- [5] Stadt Kassel. „Transformationsplan Klimaneutralität Industriepark Waldau.“ Zugriff am: 3. Dezember 2025. [Online.] Verfügbar unter: [https://www.kassel.de/buerger/umwelt\\_und\\_klima/klimaschutz/unternehmen-und-klimaschutz/transformationsplan-waldau.php](https://www.kassel.de/buerger/umwelt_und_klima/klimaschutz/unternehmen-und-klimaschutz/transformationsplan-waldau.php)
- [6] Interreg North Sea. „Green Renewable Industrial Transition Hotspots.“ Zugriff am: 3. Dezember 2025. [Online.] Verfügbar unter: <https://www.interreg-northsea.eu/grith>
- [7] Stadtwerke Stuttgart GmbH. „Innovative Wärmelösung für den Synergiepark Stuttgart.“ Zugriff am: 3. Dezember 2025. [Online.] Verfügbar unter: [https://www.stadtwerke-stuttgart.de/aktuelles-](https://www.stadtwerke-stuttgart.de/aktuelles-presse/archiv/2023/nov/16/innovative-waermelo-sung-fur-den-synergiepark-stuttg/)
- [8] IZES gGmbH, empact GmbH und DENEFF EDL\_HUB gGmbH. „Abwärmenutzung zum Mainstream machen: AwaNetz.“ Zugriff am: 3. Dezember 2025. [Online.] Verfügbar unter: <https://www.awanetz.de/>
- [9] Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena). „Dekarbonisierung industrieller Prozesswärme durch Fernwärme: INTREPIDH-Projekt.“ Zugriff am: 3. Dezember 2025. [Online.] Verfügbar unter: <https://www.dena.de/projekte/dekarbonisierung-industrieller-prozesswaerme-durch-fernwaerme/>
- [10] M. Reckzügel, T. Wawer, Nils Karschuck und M. Höppner. „Energieautarke und ressourcenschonende Gewerbegebiete in der Metropolregion Nordwest.“ Zugriff am: 3. Dezember 2025. [Online.] Verfügbar unter: [https://www.hs-osnabrueck.de/fileadmin/HSOS/Homepages/autage/Projektbericht\\_Autage.pdf](https://www.hs-osnabrueck.de/fileadmin/HSOS/Homepages/autage/Projektbericht_Autage.pdf)
- [11] S. Hilpert, C. Kaldemeyer, U. Krien, S. Günther, C. Wingenbach und G. Plessmann, „The Open Energy Modelling Framework (oemof) - A new approach to facilitate open science in energy system modelling,“ Energy Strategy Reviews, Jg. 22, S. 16–25, 2018, doi: 10.1016/j.esr.2018.07.001.
- [12] J. Forrest et al. „coin-or/Cbc: Release releases/2.10.11.“ Zugriff am: 22. September 2025. [Online.] Verfügbar unter: <https://zenodo.org/records/10041724>
- [13] A.-K. Weidlich und A. Schierenbeck. „Erneuerbare Energiesysteme in Industrie- und Gewerbegebieten: Technologien und Modellierungsansatz.“ RET.Con 2024 Tagungsband. Zugriff am: 1. Oktober 2025. [Online.] Verfügbar unter: <https://www.hs-nordhausen.de/veranstaltungen/retcon/> und <https://netcase.hs-osnabrueck.de/index.php/s/lfzh9lvLYKa2OvX>
- [14] G. Luderer, F. Bartels und T. Brown. „Ariadne 2 Daten.“ [Online.] Verfügbar unter: <https://zenodo.org/records/15174592>
- [15] BDEW. „BDEW-Strompreisanalyse Juli 2025.“ Zugriff am: 22. September 2025. [Online.] Verfügbar unter: <https://www.bdew.de/service/daten-und-grafiken/bdew-strompreisanalyse/>
- [16] AGFW. „Zwischenergebnisse der Preisabfrage im Überblick: Fernwärmepreisübersicht April 2024.“ Zugriff am: 22. September 2025. [Online.] Verfügbar unter: <https://www.agfw.de/energiewirtschaft-rechtspolitik/wirtschaft-und-markt/markt-preise/preisanpassung>
- [17] KEA Klimaschutz- und Energieagentur Baden-Württemberg GmbH. „Technikkatalog zur kommunalen Wärmeplanung.“ Zugriff am: 22. September 2025. [Online.] Verfügbar unter: <https://www.keabw.de/waermewende/angebote/downloads>
- [18] A.-K. Weidlich, A. Schierenbeck und U. Jordan. „Analyse von Erdgas- und Stromlastprofilen für die Dekarbonisierungsstrategie eines Gewerbegebiets.“ IEWT Wien 2025 Tagungsband. Zugriff am: 1. Oktober 2025. [Online.] Verfügbar unter: <https://opus.hs-osnabrueck.de/frontdoor/index/index/docId/8003>

# Großwärmepumpen für den kurz- bis mittelfristigen Einsatz in multivalenten Wärmeversorgungssystemen

Jonas FREIßMANN <sup>1\*</sup>, Malte FRITZ <sup>1</sup>, Ilja TUSCHY <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Zentrum für nachhaltige Energiesysteme (ZNES), Europa-Universität/Hochschule Flensburg, Kanzleistraße 91-93, 24943 Flensburg

\* jonas.freissmann@hs-flensburg.de

## Kurzfassung

Großwärmepumpen gelten als Schlüsseltechnologie zur Kopplung von Wärme- und Stromsektor und können einen wesentlichen Beitrag zur Dekarbonisierung der Wärmeversorgung leisten. Dieser Beitrag berichtet aus dem Forschungsprojekt „Hochtemperaturwärmepumpen in der Nah- und Fernwärmeversorgung“, das ihre Integrationsperspektive mithilfe von kombinierter Auslegungs- und Einsatzoptimierung untersucht. So ist im ersten Fallbeispiel für die Integration von Großwärmepumpen in einem von konventionellen Technologien dominierten Bestandsnetz eine Betriebskostenförderung nötig. In einem progressiveren Beispielsystem sind aufgrund von hohen Biogaspreisen und Investitionskosten weder das Blockheizkraftwerk noch Solarenergie mit der Wärmepumpe konkurrenzfähig. Ein Zukunftsszenario und eine Sensitivitätsanalyse belegen, dass das Verhältnis von Strom- zu Gaspreisen maßgeblichen Einfluss auf das optimale Erzeugungsportfolio hat und Kippunkte in der Betriebsstrategie erzeugt.

## Schlagworte

Auslegungs- und Einsatzoptimierung; BEW-Förderung; MILP; oemof.solph; TESP; Streamlit; Wärmewende

## 1. Einleitung

Um im Sinne des Klimaschutzes den Wärme- und einen von erneuerbaren Energien geprägten Elektrizitätssektor miteinander zu koppeln, hat sich die Wärmepumpe als eine vielversprechende Technologie herausgebildet. Großwärmepumpen für die Integration in Wärmeversorgungssysteme weisen jedoch in technologischer Hinsicht signifikante Unterschiede gegenüber den bereits verbreiteteren Anlagen für den häuslichen Gebrauch auf.

Jesper et al. [1] haben eine Übersicht des Stands der Forschung sowie der am Markt erhältlichen Großwärmepumpen erstellt. Mit den aktuellen Entwicklungen der Schaltungstopologien von Hochtemperaturwärmepumpen setzen sich Adamson et al. [2] auseinander. Für die Integration einer Wärmepumpe in ein Wärmeversorgungssystem analysieren Pieper et al. [3] drei verschiedene Wärmequellen und ihre Kombinationen mithilfe von kombinierter Auslegungs- und Einsatzoptimierung. Ommen et al. [4] verzichten auf eine Optimierung, bewerten das Zusammenspiel aus Großwärmepumpe und Kraft-Wärme-Kopplungsanlage (KWK) aber dennoch anhand von Gesamtkosten aufgrund von Investition und Betrieb.

Darüber hinaus ist die wirtschaftliche Attraktivität von Großwärmepumpen wie auch ihr Beitrag zur Emissionsreduktion in hohem Maße von den Gegebenheiten des energiewirtschaftlichen und regulatorischen Umfelds abhängig. So betonen Jovet et al. [5] neben den Energiebezugskosten vor allem die CO<sub>2</sub>-Bepreisung als maßgebliches Kriterium. Auch Schlosser et al. [6] identifizieren das Verhältnis von Strom- zu Gaspreisen als entscheidend für eine gelungene Integration von Wärmepumpen.

Aus dieser kurzen Literaturstudie ergeben sich für die Untersuchung die folgenden zentralen Forschungsfragen:

1. Welche **Wärmepumpentechnologien** sind besonders für den Einsatz in multivalenten Wärmeversorgungssystemen geeignet?
2. Welche **Einbindungsoptionen** begünstigen die Integration bestimmter Wärmepumpen?
3. Welchen Einfluss haben energiewirtschaftliche und regulatorische **Rahmenbedingungen** darauf?

In diesem Beitrag werden einige zentrale Ergebnisse aus dem abgeschlossenen Forschungsprojekt „Hochtemperaturwärmepumpen in der Nah- und Fernwärmeversorgung“ [7] vorgestellt, in dem die kurz- bis mittelfristige Perspektive für den Einsatz von Großwärmepumpen in multivalenten Wärmeversorgungssystemen untersucht wurde. Für umfangreichere Analysen sowie die vollständige Dokumentation aller Annahmen und Rahmenparameter wird auf den dabei entstandenen Abschlussbericht verwiesen [7].

## 2. Methodik

Zur Bewertung des Potentials der Integration von Großwärmepumpen wird die Perspektive des Betreibers eines Wärmeversorgungssystems eingenommen. Da diese stets betriebswirtschaftlich agieren, steht eine kombinierte Auslegungs- und Einsatzoptimierung des multivalenten Anlagenportfolios nach wirtschaftlichen Kriterien im Zentrum der Methodik. Die verschiedenen Wärmeversorgungsanlagen werden darin je nach Erforderlichkeit entweder über technische Betriebsparameter oder mithilfe von thermodynamischen Prozesssimulationen abgebildet. Darüber hinaus fließen verschiedene weitere

Parameter und Zeitreihen in die Energiesystemmodelle ein. Dies ist schematisch in Abb. 1 dargestellt.

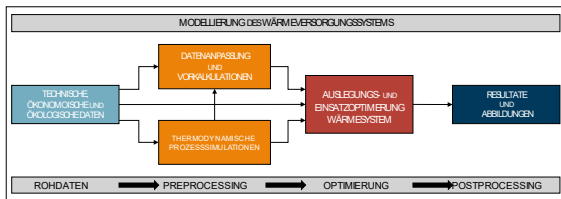


Abb. 1: Schema des methodischen Workflows

### 2.1 Anlagensimulation

Um insbesondere den ersten beiden Forschungsfragen zur Wärmepumpentechnologie und ihren Einbindungsoptionen gerecht zu werden, ist eine thermodynamische Modellierung auf Komponentenebene nötig. Nur so können unterschiedliche Wärmesenken, wie auch verschiedene Schaltungstopologien und Kältemittel untersucht werden. Dazu wird in dieser Studie die freie und quelloffene Simulationssoftware *Thermal Engineering Systems in Python (TESPy)* [8] verwendet. Diese ermöglicht stationäre Prozesssimulationen in Voll- und Teillast und nutzt die ebenfalls frei zugängliche Stoffdatenbank *CoolProp* [9] zur Berücksichtigung realer Fluide.

Dieses Vorgehen wird innerhalb von Auslegungssimulationen auf die in Abschnitt 3.1 genannten Wärmepumpensetups angewandt. Hierbei wird ein Betriebsfeld für alle auftretenden Konstellationen von Temperaturen erstellt und anschließend für die Verwendung in der Auslegungs- und Einsatzoptimierung linearisiert (vgl. Gl. 2). Die Simulationsergebnisse lassen außerdem Rückschlüsse auf die Dimensionierung und Kosten einzelner Komponenten zu. Mithilfe der von Kosmadakis et al. [10] auf industrielle Wärmepumpen angewandten komponentenbasierten Kostenregression sowie pauschaler Faktoren und einer Preisbereinigung unter Zuhilfenahme des *Chemical Engineering Plant Cost Index (CEPCI)* können Gesamtinvestitionskosten abgeleitet werden. Zur systematischen Durchführung dieses Workflows anhand einer umfangreichen Sammlung verschiedener Wärmepumpenmodelle wurde das quelloffene Tool *heatpumps* entwickelt [11].

### 2.2 Energiesystemoptimierung

Für die kombinierte Auslegungs- und Einsatzoptimierung wird mithilfe der gemischt-ganzzahlig linearen Optimierung (MILP, engl.: *Mixed Integer Linear Programming*) eine Zielfunktion definiert. Diese wird anhand eines mathematischen Verfahrens minimiert und kann über zusätzliche lineare Nebenbedingungen (*constraints*) beschränkt werden.

Im Falle eines Wärmeversorgungs-systems besteht die Zielfunktion aus den in jedem Zeitschritt  $t$  auftretenden variablen Kosten  $K_{var,a}$  der verschiedenen Anlagen  $a$ , abzüglich möglicher Erlöse  $E_a$  sowie den Annuitäten der Investitionen  $A_{inv,a}$  und Fixkosten  $K_{fix,a}$ , wie Gl. 1 zu entnehmen ist. Alle Kosten- und Erlösterme sind dabei abhängige Variablen, die sich wiederum aus Nennleistung und Einsatz der Erzeugungsanlagen ergeben.

$$\min \left[ \sum_t \left( \sum_a (K_{var,a}(t) - E_a(t)) \right) + \sum_a (A_{inv,a} + K_{fix,a}) \right] \quad \text{Gl. 1}$$

Um das Wärmeversorgungs-system möglichst realitätsnah abbilden zu können, werden verschiedene Nebenbedingungen definiert, wovon die Modellierung der Wärmepumpen an dieser Stelle exemplarisch vorgestellt wird.

Um Teillasteffekte sowie die ausgeprägte Abhängigkeit der Leistungszahl  $COP$  von Quellen- und Senktemperatur ( $T_{Quelle}$  und  $T_{Senke}$ ) angemessen abzubilden, wie Pieper et al. [3] als notwendig betonen, wird in Gl. 2 ein gemischt-ganzzahliger Ansatz mit Offset  $c_{0,WP}$  und proportionalem Faktor  $c_{1,WP}$  gewählt. Diese beiden Zeitreihen stammen aus den simulierten Betriebsfeldern und entsprechen den Quellen- und Senktemperaturen des jeweiligen Zeitschritts  $t$ . So enthält die Optimierung einen den technischen Rahmenbedingungen entsprechenden Zusammenhang zwischen dem bereitgestellten Wärmestrom  $\dot{Q}_{ab,WP}$  und der dafür benötigten elektrischen Leistung  $P_{zu,WP}$ . Die Binärvariable  $Y_{status,WP}$  dient dazu den Offset im Falle des ausgeschalteten Zustands zu eliminieren.

$$\dot{Q}_{ab,WP}(t) = c_{1,WP}(t) \cdot P_{zu,WP}(t) + c_{0,WP}(t) \cdot Y_{status,WP}(t) \quad \text{Gl. 2}$$

Für die Abbildung der Wärmeversorgungs-systeme wird die freie und offene Modellierungsbibliothek *oemof.solph* genutzt [12]. Zur Übersetzung in ein abstraktes mathematisches Modell verwendet dies intern das ebenfalls quelloffene Pythonpaket *Pyomo* [13]. Die Lösung des Optimierungsproblems erfolgt schließlich durch externe Lösungs-algorithmen. In den nachfolgenden Untersuchungen wird ein sogenannter *Solver* des Unternehmens Gurobi Optimization, LLC verwendet, der zwar proprietär ist, aber zumindest für die nicht-kommerzielle akademische Nutzung kostenlos zur Verfügung steht [14].

## 3. Untersuchungsgegenstand

Zunächst wird an dieser Stelle der Gegenstand der Untersuchung näher definiert. Das beinhaltet im Wesentlichen die zu betrachtenden Wärmepumpenschaltungen und -arbeitsmedien, die Wärmeversorgungs-systeme, in welche die Wärmepumpen integriert werden sollen, sowie die unterstellten energiepolitischen und -wirtschaftlichen Rahmenbedingungen.

### 3.1 Wärmepumpensetups

Kern der Untersuchung sind die verschiedenen Wärmepumpensetups, die sich aus Konstellationen von Schaltungstopologie und Kältemittel zusammensetzen. Dabei wurden im Rahmen einer im Forschungsbericht ausführlich beschriebenen Vorauswahl [7] die drei in Tab. 1 dargestellten Wärmepumpen entlang des Zielkonflikts zwischen Effizienz und Investitionskosten selektiert. Alle Setups nutzen Umweltgewässer (Flensburger Förde,  $\vartheta_m = 10 \text{ }^\circ\text{C}$ ) als Wärmequelle.

Tab. 1: Vorauswahl der Wärmepumpensetups

Setup 1	Setup 2	Setup 3
R717	R717	R1234ze(Z)
<b>COP im Nennbetrieb</b>		
2,45	2,70	2,75
<b>Investitionskosten (<math>\dot{Q}_{ab,N} = 10 \text{ MW}</math>)</b>		
3,90 Mio. €	4,06 Mio. €	10,00 Mio. €

### 3.2 Wärmeversorgungssysteme

Die zu untersuchenden Wärmepumpen werden als Teil des Erzeugungssportfolios eines Wärmeversorgungssystems eingesetzt. Dazu wird zunächst exemplarisch ein Bestandsnetz definiert, welches historisch gewachsen und primär durch konventionelle Erzeugungsstrukturen geprägt ist. Solche Systeme sind in Deutschland in Städten mit größeren Wärmenetzen, wie beispielsweise Flensburg, verbreitet. Somit werden Betriebsdaten des Fernwärmenetzes der Stadt Flensburg als für solche Anwendungsfälle typisch betrachtet und für die Energiesystemmodellierung herangezogen [15]. Dabei werden Zeitreihen der Wärmelast sowie Vor- und Rücklauftemperaturen des Jahres 2019 genutzt. Auch das Anlagenportfolio des Bestandsnetzes, dargestellt in Abb. 2, orientiert sich an dem in Flensburg. Neben der Wärmepumpe stehen insbesondere konventionelle Technologien, wie ein Gas- und Dampfkraftwerk (GuD) sowie ein Erdgaskessel (SLK) zur Verfügung. Ein thermischer Kurzzeitspeicher (K-TES) kann darüber hinaus für Flexibilität sorgen.

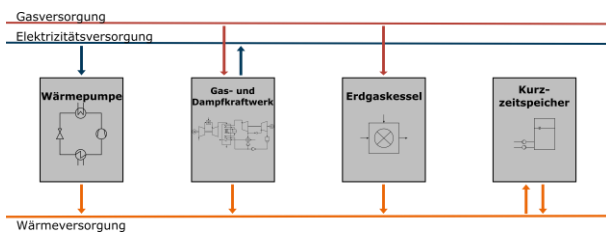


Abb. 2: Zu optimierendes Anlagenportfolio (Bestandsnetz)

Für die Untersuchung der zweiten Forschungsfrage mit Schwerpunkt auf Einbindungsoptionen wird zusätzlich ein progressiveres Wärmenetz der sogenannten vierten Generation (4GDH) zur Gegenüberstellung herangezogen. Die Lastdaten sowie die im Vergleich deutlich geringeren Vor- und Rücklauftemperaturen stammen aus dem Wärmenetz der dänischen Stadt Sønderborg [16]. Um auch das in Abb. 3 dargestellte Erzeugungsportfolio progressiv zu gestalten, wird hier als KWK-Technologie ein biogasgefeuertes Blockheizkraftwerk (BHKW) gewählt. Darüber hinaus stehen der kombinierten Auslegungs- und Einsatzoptimierung eine großflächige Solarthermieanlage sowie ein saisonaler Wärmespeicher (S-TES) zur Verfügung.

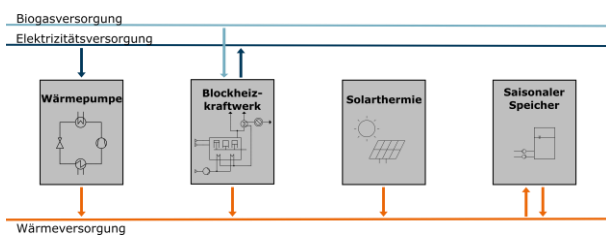


Abb. 3: Zu optimierendes Anlagenportfolio (4GDH-Netz)

Das 4GDH-Netz wird in dieser Studie lediglich innerhalb Forschungsfrage 2 näher untersucht. Ansonsten wird stets das Bestandsnetz für die Analyse herangezogen.

### 3.3 Rahmenbedingungen

Als energiepolitische und -wirtschaftliche Rahmenbedingungen der Optimierung werden als Ausgangspunkt historische Daten des Jahres 2019 verwendet, da diese zum Zeitpunkt der Untersuchung die letzten vollständigen Datensätze ohne außergewöhnlichen Einfluss der Corona-

Pandemie und des russischen Angriffskriegs gegen die Ukraine waren. Um die aktuellen Marktverhältnisse dennoch realitätsnah abzubilden, wird der in 2021 erfolgte Entfall der EEG-Umlage auch an dieser Stelle berücksichtigt. Darüber hinaus wird, neben der fortwährend bestehenden Förderung nach KWKG, auch die Bundesförderung für effiziente Wärmenetze (BEW) als wichtiges energiepolitisches Instrument mit einbezogen. Abb. 4 zeigt die für die Status-Quo-Betrachtung relevanten Preiszeitreihen und Abgaben.

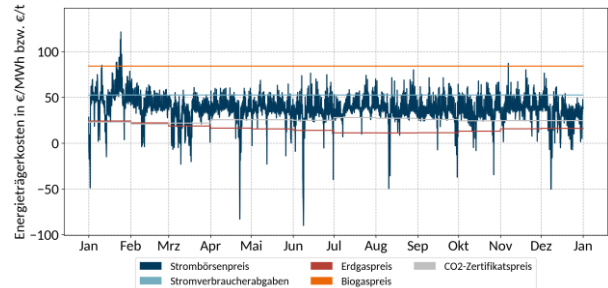


Abb. 4: Zeitvariable energiewirtschaftliche Rahmenbedingungen (2019)

Neben dem auf historischen Daten basierenden Status-Quo-Szenario wird im Rahmen der dritten Forschungsfrage auch ein mittelfristiges Zukunftsszenario des Jahres 2040 berücksichtigt. Dies wurde im Projekt ANGUS II entwickelt und basiert auf dem Netzentwicklungsplan (NEP) von 2019, dem Ten Year Network Developer Plan (TYNDP) von 2018 sowie den Studien der Heat Roadmap [17]. Die Darstellung in Abb. 5 weist insgesamt höhere Preisniveaus auf, wobei der Erdgaspreis weniger stark angestiegen ist als der Preis für Strom oder CO<sub>2</sub>-Zertifikate. Negative Strompreise treten, im Gegensatz zu dem historischen Datensatz, nicht mehr auf.

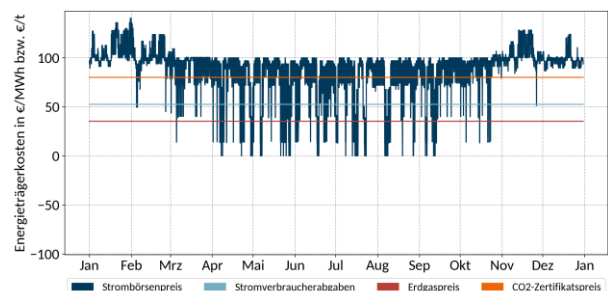


Abb. 5: Zeitvariable energiewirtschaftliche Rahmenbedingungen (Bestandsnetz 2040)

## 4. Ergebnisse

In den nachfolgenden Abschnitten werden entlang der eingangs definierten Forschungsfragen die Wärmepumpentechnologie, ihre Einbindungsoptionen sowie der Einfluss veränderlicher Rahmenbedingungen untersucht.

### 4.1 FF1: Wärmepumpentechnologie

Um die Eignung der drei vorausgewählten Wärmepumpensetups (vgl. Tab. 1) zu beurteilen, werden sie jeweils mithilfe der kombinierten Auslegungs- und Einsatzoptimierung in das Bestandsnetz integriert. Für das erste Setup mit einfacher Topologie und Ammoniak als Arbeitsmedium ist die monatliche Gesamtwärmeproduktion nach Anlage in Abb. 6 dargestellt.

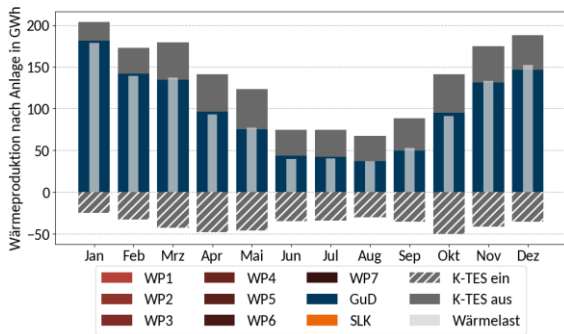


Abb. 6: Monatliche Gesamtwärmemengen nach Anlage (Bestandsnetz 2019, Setup 1)

Es ist sofort ersichtlich, dass das Wärmepumpensetup 1 gar nicht erst installiert und folglich nicht eingesetzt wird. Die nachgefragte Wärme wird ausschließlich vom Gas- und Dampfkraftwerk bereitgestellt, welches den Kurzzeitspeicher nutzt, um Stromerlöse zu maximieren. Der Spitzlastkessel ist dabei ebenfalls nicht konkurrenzfähig und bleibt ungenutzt. Entscheidender Faktor für das Ausbleiben der Integration der Wärmepumpe ist, dass ihr *COP* zu niedrig ist, um Investitions- und Betriebskostenförderung auf Grundlage der BEW zu erhalten. Damit fallen die nicht subventionierten Kosten, insbesondere der Strompreis, zu hoch aus, damit Setup 1 attraktiv ist. Selbst eine interne Nutzung des KWK-Stroms ändert daran, aufgrund der Opportunitätskosten durch ausbleibende Spotmarkterlöse, nichts. Ein anderes Bild zeigen die Ergebnisse von Setup 2, welche in Abb. 7 dargestellt sind.

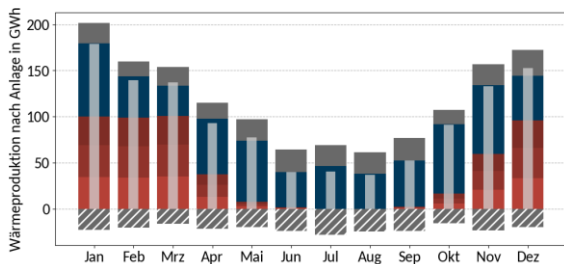


Abb. 7: Monatliche Gesamtwärmemengen nach Anlage (Bestandsnetz 2019, Setup 2)

Dort ist zu erkennen, dass drei Wärmepumpen installiert werden, die im Winterhalbjahr regelmäßig eingesetzt werden. Insgesamt decken sie etwa 45 % des Wärmebedarfs. Das GuD bleibt trotz deutlich reduziertem Anteil dennoch Primärversorger. Analog sinkt auch die Nutzung des Kurzzeitspeichers. Das liegt auch daran, dass in Zeiten unattraktiverer Strompreise der produzierte Strom der KWK-Anlage intern über die Wärmepumpe genutzt werden kann. Maßgeblich für den hohen Deckungsanteil der Wärmepumpen ist, dass Setup 2 die Mindestanforderung der BEW-Richtlinie erfüllt und somit förderfähig ist. Die darüber hinaus weiterhin geringen Investitionskosten sorgen dafür, dass sie konkurrenzfähig zum GuD wird. Abb. 8 zeigt anhand von Setup 3, welchen Einfluss weiter gestiegene Effizienz und Kosten auf die Wärmeproduktion haben.

Von Setup 3 werden lediglich zwei Wärmepumpen installiert, welche insgesamt ca. 28 % des Bedarfs decken. Umgekehrt erzielt das GuD einen höheren Deckungsanteil und auch der Wärmespeicher wird wieder vermehrt eingesetzt. Es lässt sich folglich schließen, dass die

geringfügig gesteigerte Effizienz die mehr als doppelt so hohen Investitionskosten nicht kompensieren kann. Dennoch ist auch Setup 3 mithilfe der BEW-Förderung in der Lage, einen signifikanten Deckungsbeitrag zu leisten. Insofern lässt sich im Rückbezug auf Setup 1 ableiten, dass die Subvention der Betriebskosten und nicht der Investitionskosten der zentrale Mechanismus für den Erfolg der Integration der Wärmepumpe darstellt.

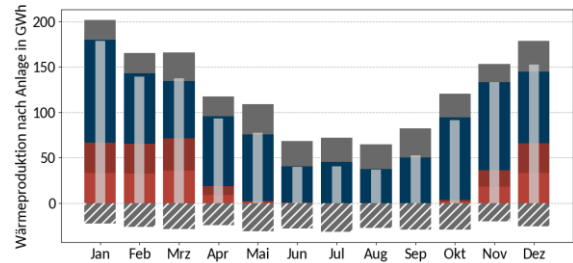


Abb. 8: Monatliche Gesamtwärmemengen nach Anlage (Bestandsnetz 2019, Setup 3)

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die untersuchten Wärmepumpensetups unter Voraussetzungen eine gewichtige Rolle im Wärmeversorgungssystem einnehmen können. Darüber hinaus ergibt die Analyse, dass ein nicht-triviales Optimum im Grad der Wärmepumpenintegration entlang des Zielkonflikts zwischen Effizienz und Investitionskosten existiert. Dabei ist jedoch festzustellen, dass die BEW-Förderung essenziell für die Konkurrenzfähigkeit der Wärmepumpen ist und somit die dort geforderte Effizienz eine Minimalanforderung darstellt.

#### 4.2 FF2: Einbindungsoptionen

Um die Integration von Wärmepumpen in unterschiedliche Einbindungsoptionen zu untersuchen, wird dem Bestandsnetz nun das 4GDH-Netz gegenübergestellt. Aus Gründen der Übersicht beschränkt sich diese Analyse auf Setup 2. Abb. 9 zeigt die Ergebnisse der entsprechenden Optimierung und ist zum Vergleich mit dem Bestandsnetz Abb. 7 gegenüberzustellen.

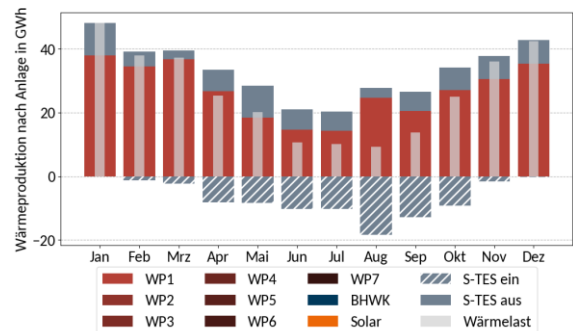


Abb. 9: Monatliche Gesamtwärmemengen nach Anlage (4GDH-Netz 2019, Setup 2)

Im 4GDH-Netz stellt demnach eine einzige Wärmepumpe den Alleinversorger dar. Gegenüber dem Bestandsnetz ist aufgrund des geringeren Temperaturhubs der *COP* der Wärmepumpe höher, so dass diese in Kombination mit dem saisonalen Wärmespeicher die Wärmelast vollständig deckt. Das biogasbetriebene BHKW ist im Gegensatz zum Erdgas-GuD im Bestandsnetz aufgrund des hohen Preisniveaus von Biogas nicht konkurrenzfähig.

Auch die nahezu kostenlose Wärme aus der Solarthermieanlage kann ihre Investitionskosten nicht recht-

fertigen, zumal der S-TES für einen hohen solaren Deckungsgrad ebenfalls größer ausfallen müsste. Dennoch ist die intensive und bisweilen saisonale Speichernutzung auch ohne Solarthermie hervorzuheben. Der S-TES unterstützt die Wärmebereitstellung bei hohen Strompreisen oder zur Vermeidung von Teillast. Dafür wird außerhalb der Heizperiode ein hoher Überschuss an Wärme produziert, um den S-TES wieder zu befüllen.

Insgesamt ist zu konstatieren, dass unter der zugrundeliegenden Förderkulisse die Integration von Wärmepumpen in konventionellen und progressiven Wärmeversorgungssystemen gelingen kann. Insbesondere gegen die gewählten CO<sub>2</sub>-armen Technologien können sich Wärmepumpen durchsetzen und profitieren von reduzierten Netztemperaturen. Allerdings ist die Bedeutung der BEW-Förderung auch an dieser Stelle zu betonen.

### 4.3 FF3: Veränderliche Rahmenbedingungen

Wie die bisherige Untersuchung bereits hervorgetan hat, haben Rahmenbedingungen wie Energiepreise oder Förderinstrumente einen erheblichen Einfluss auf das optimale Erzeugungsportfolio sowie die erzielten Deckungsanteile verschiedener Wärmeversorgungsanlagen. Um dies näher zu beurteilen, wird das Wärmepumpensetup 2 im Bestandsnetz bei gleicher Last unter den Rahmenbedingungen des Zukunftsszenarios 2040 betrachtet. Dabei entfallen entsprechend aktuelle Fördermechanismen wie die KWK- und BEW-Förderung. Für eine systematische Untersuchung wird darüber hinaus der Erdgaspreis einer Sensitivitätsanalyse unterzogen, da das Verhältnis von Strom- zu Gaspreisen von hoher Bedeutung für den Wettbewerb zwischen Wärmepumpen und konventionellen Wärmeerzeugern ist. Abb. 10 zeigt die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse anhand der Gesamtwärmeproduktion nach Anlage.

Zunächst wird der Ausgangsfall des Szenarios 2040 an der linken Seite des Diagramms betrachtet. Dabei fällt auf, dass ohne die BEW-Förderung auch die Wärmepumpen des Setups 2 nicht länger installiert werden. Stattdessen bedient das GuD den Großteil des Wärmebedarfs. In geringem Umfang kommt außerdem der Spitzenlastkessel zum Einsatz. Trotz leicht höherem Erdgas- und deutlich gestiegenen CO<sub>2</sub>-Zertifikatspreisen, sorgen der Entfall der BEW-Förderung sowie die ebenfalls gestiegenen Stromkosten dafür, dass die fossilen Erzeugungsanlagen ökonomisch am attraktivsten sind. Um das Verhältnis dieser Preise zugunsten der Wärmepumpe zu verbessern, wird nun die Erhöhung des Gaspreises untersucht.

Die beschriebene Portfoliokonstellation bleibt zunächst stabil, bis bei einem Preisanstieg von etwa 15 % erst eine und bis 18 % noch drei weitere Wärmepumpen installiert werden. Binnen weniger Prozentpunkte entsteht folglich ein Kipppunkt, der das Erzeugungsportfolio deutlich zugunsten der Wärmepumpe verschiebt. Von dort an wird das GuD gleichmäßig, aber deutlich langsamer, verdrängt, bis es bei einem Preisanstieg von 55 % ganz aus dem Portfolio fällt. Der SLK wird kurz nach dem Kipppunkt zunächst voll verdrängt, kommt aber in einem Bereich von 125-145 % relativem Gaspreis wieder zu geringfügigen Einsatzzeiten. Es gibt folglich Betriebsstunden des GuD, die nicht direkt durch die Wärmepumpen ersetzt, sondern vorerst durch den investitionskostenarmen SLK gedeckt werden. Letzterer scheidet jedoch bereits vor dem GuD bei etwa 45 % Preisanstieg aus dem Wärmesystem aus. Nicht abgebildet ist der Kurzzeit-Wärmespeicher, der in jeder Konstellation genutzt wird.

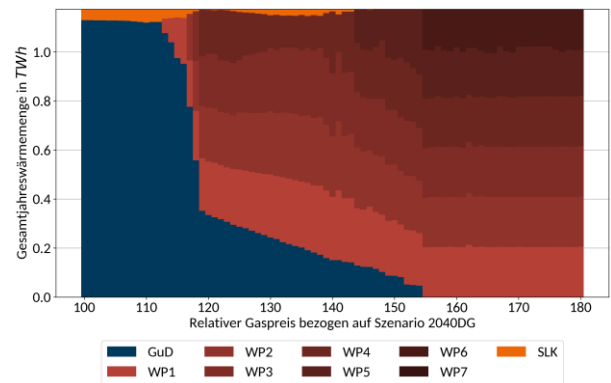


Abb. 10: Gesamtwärmeproduktion nach Anlage der Sensitivitätsanalyse des Erdgaspreises im Zukunftsszenario (Bestandsnetz 2040, Setup 2)

## 5. Diskussion

Die im vorherigen Kapitel analysierten Ergebnisse demonstrieren, dass die gewählte Methodik zur Untersuchung der drei Forschungsfragen geeignet ist. Jedoch sind an dieser Stelle auch einige Annahmen sowie methodische Limitationen kritisch zu würdigen. So ist die Auswahl der untersuchten Wärmepumpensetups zwar umfangreich, aber definitiv nicht vollständig. Die thermodynamischen Modelle beinhalten aufgrund von Annahmen und Vereinfachungen Unsicherheiten, die aus Ermangelung an realen Projekten und frei verfügbaren Daten nicht systematisch validiert werden konnten. Entsprechend ist vor allem der Vergleich zwischen den Setups belastbar und ein geringerer Fokus auf die absolute Höhe der Simulationsergebnisse zu setzen. Darüber hinaus ist auch die Kostenkalkulation unsicherheitsbehaftet, zumal Großwärmepumpen typischerweise Spezialanfertigungen erfordern und eine entsprechend hohe Varianz in den Gesamtprojektkosten mit sich bringen. Auch wenn für die Fallbeispiele zwei möglichst repräsentative Wärmeversorgungssysteme ausgewählt wurden, ist diese Betrachtungsdimension auf keinen Fall als vollumfänglich untersucht zu betrachten. So ist etwa die Auswahl an konkurrierenden Erzeugungsanlagen als typisch einzuordnen, jedoch konnte nur ein kleiner Ausschnitt aller möglichen (regenerativen) Anlagen berücksichtigt werden. Wie die Untersuchung darüber hinaus ergeben hat, sind die Ergebnisse stark durch die Rahmenbedingungen geprägt. Folglich lassen sie sich nicht ohne weiteres auf andere Rahmenbedingungen übertragen. Abschließend sind die notwendigen methodischen Vereinfachungen der linearen Optimierung zu betonen, welche im Abschlussbericht des zugrundeliegenden Forschungsprojekts diskutiert wurden [7].

## 6. Schlussfolgerungen

Mithilfe der komponentenbasierten Anlagensimulation konnte ein breites Spektrum verschiedener Wärmepumpen modelliert und hinsichtlich ihrer Effizienz und Investitionskosten charakterisiert werden. Die Untersuchung ausgewählter Setups ergab, dass unter historischen Rahmenbedingungen mit BEW-Förderung und Wegfall der EEG-Umlage die Investitionskosten der Wärmepumpen eine gewichtigere Rolle für den Grad der Integration in das Wärmeversorgungssystem einnehmen als ihre Effizienz. Das gilt jedoch nur so lange, wie die Leistungszahl den Mindestanforderungen der BEW-Betriebskostenförderung entspricht. Folglich ist die Förderung ein wichtiges Instrument, um Wärmepumpen unter historischen

Rahmenbedingungen in Wärmeversorgungssysteme zu integrieren. Die Untersuchung verschiedener Einbindungsoptionen hat ergeben, dass sich unter diesen Randbedingungen sowohl konventionelle als auch progressive Wärmeversorgungssysteme für die Integration von Wärmepumpen eignen, wie auch Ommen et al. [4] resümieren. Dabei können sie die höchsten Deckungsanteile erzielen, wenn sie nicht in Konkurrenz mit einer fossilgefeuerten KWK-Anlage stehen. Im konventionell geprägten System bleibt das Gas- und Dampfkraftwerk aufgrund der niedrigen Erdgaspreise und hohen Stromerlöse höchst profitabel und damit die dominierende Versorgungsanlage.

Durch die gesamte Analyse hinweg haben sich jedoch die energiewirtschaftlichen und -politischen Rahmenbedingungen als zentraler Faktor für die gelungene Integration der Wärmepumpen herausgestellt. Dies legen auch die Ergebnisse von Schlosser et al. [6] nahe. So hat innerhalb dieser Untersuchung der Wegfall der BEW-Betriebskostenförderung der Wärmepumpen, selbst bei gleichzeitiger Verteuerung fossiler Brennstoffe dafür gesorgt, dass unter den Rahmenbedingungen des Szenarios 2040DG keine Wärmepumpen in die konventionellen Versorgungssysteme installiert wurden. Anhand einer Sensitivitätsanalyse über den Gaspreis konnte allerdings für das Bestandsnetz ein Kippunkt identifiziert werden, bei dem das GuD nicht länger als Hauptversorger eingesetzt oder gar ganz verdrängt wird. Dabei handelt es sich um einen nahezu diskreten Punkt, bei dem bereits eine geringfügige Preiserhöhung eine drastische Umstellung der Versorgungsstruktur nach sich zieht. Dies konnten bisherige Untersuchungen zum Energiepreisverhältnis von Jesper et al. [1] sowie Schlosser et al. [6] noch nicht identifizieren. Darüber hinaus hat die Sensitivitätsanalyse gezeigt, dass sich konventionelle KWK-Anlagen selbst bei einem hohen Integrationsgrad erneuerbarer Energien in der Elektrizitätsversorgung weiterhin rentieren, solange hohe Strompreise vorherrschen. Erst bei einem deutlich höheren Gaspreisniveau schied das GuD vollständig aus der Versorgung aus. Folglich ist eine Entkopplung von Gas- und Strompreis ein zentraler Faktor für die Durchsetzung von Wärmepumpen in der Anlagenkonkurrenz.

## Danksagung

Die Autoren bedanken sich herzlich bei der *Gesellschaft für Energie und Klimaschutz Schleswig-Holstein (EKSH)*, die das zugrunde liegende Projekt im Rahmen des Förderprogramms *HWT Energie und Klimaschutz* gefördert haben. Des Weiteren danken wir der *ARCTOS Industriekälte GmbH* für die finanzielle Unterstützung und Begleitung des Projekts.

## Literatur

- [1] M. Jesper et al., „Large-scale heat pumps: Uptake and performance modelling of market-available devices,“ *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Bd. 137, p. 110646, 2021.
- [2] K.-M. Adamson et al., „High-temperature and transcritical heat pump cycles and advancements: A review,“ *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Bd. 167, p. 112798, 2022.
- [3] H. Pieper et al., „Assessment of a combination of three heat sources for heat pumps to supply district heating,“ *Energy*, Bd. 176, pp. 156-170, 2019.
- [4] T. Ommen, W. B. Markussen und B. Elmegaard, „Heat pumps in combined heat and power systems,“ *Energy*, Bd. 76, pp. 989-1000, 2014.
- [5] Y. Jovet et al., „Combined energetic, economic and climate change assessment of heat pumps for industrial waste heat recovery,“ *Applied Energy*, Bd. 313, p. 118854, 2022.
- [6] F. Schlosser et al., „Large-scale heat pumps: Applications, performance, economic feasibility and industrial integration,“ *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Bd. 133, p. 110219, 2020.
- [7] J. Freißmann, M. Fritz und I. Tuschy, „Hochtemperaturwärmepumpen in der Nah- und Fernwärmeversorgung - Technologieperspektive für den kurz- und mittelfristigen Einsatz in multivalenten Systemen,“ 2024.
- [8] F. Witte und I. Tuschy, „TESPy: Thermal Engineering Systems in Python,“ *Journal of Open Source Software*, Bd. 5, Nr. 49, p. 2178, 2020.
- [9] I. H. Bell et al., „Pure and Pseudo-pure Fluid Thermophysical Property Evaluation and the Open-Source Thermophysical Property Library CoolProp,“ *Industrial & Engineering Chemistry Research*, Bd. 53, Nr. 6, p. 2498–2508, 2014.
- [10] G. Kosmadakis et al., „Techno-economic analysis of high-temperature heat pumps with low-global warming potential refrigerants for upgrading waste heat up to 150 °C,“ *Energy Conversion and Management*, Bd. 226, p. 113488, 2020.
- [11] J. Freißmann und M. Fritz, „heatpumps (GitHub Repository),“ 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://github.com/jfreissmann/heatpumps>.
- [12] U. Krien et al., „oemof.solph - A model generator for linear and mixed-integer linear optimisation of energy systems,“ *Software Impacts*, 2020.
- [13] W. E. Hart et al., „Pyomo — Optimization Modeling in Python,“ 2017. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.ebook.de/de/product/33462170/william\\_e\\_hart\\_carl\\_d\\_laird\\_jean\\_paul\\_watson\\_](https://www.ebook.de/de/product/33462170/william_e_hart_carl_d_laird_jean_paul_watson_).
- [14] Gurobi Optimization, LLC, „Gurobi Optimizer Reference Manual,“ 2024. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.gurobi.com>.
- [15] Stadtwerke Flensburg GmbH, „Network Data of the District Heating System of the city of Flensburg from 2017-2019,“ 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://zenodo.org/record/10508280>.
- [16] Sønderborg Varme A/S, „Network Data of the District Heating System for the city of Sønderborg from 2016-2019,“ 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.5281/zenodo.7972964>.
- [17] S. Hilpert, M. Söhte und C. Wingenbach, „ANGUSII Scenarios: Pathways to 100% Renewable German Energy System,“ 2020. [Online]. Verfügbar unter: <https://github.com/znes/angus-scenarios>.

# Municipal Heat Planning with a Single Click – Using Open Data for a Scalable Planning Tool

Jonas LUFT<sup>1\*</sup>, Nazanin BAGHERINEJAD<sup>3</sup>, Ali RAZAVIAN<sup>1</sup>, Jannik REINKE<sup>1</sup>, Philipp SOMMER<sup>2</sup>, Julian RASCH<sup>1</sup>

<sup>1</sup> syte GmbH, Bremer Straße 42, 48155 Münster

<sup>2</sup> Fachbereich Energie Gebäude Umwelt, FH Münster, Stegerwaldstr. 39, 48656 Steinfurt

<sup>3</sup> Lehrstuhl für Methoden der Modellbasierten Entwicklung in den Computergestützten Ingenieurwissenschaften, RWTH Aachen, Eilfschornsteinstr. 18, 52062 Aachen

\* jonas.luft@syte.ms

## Abstract

The building sector remains a significant contributor to carbon dioxide emissions and continues to fall short of mandated climate targets. While the German Heat Planning Act mandates municipal heat planning (MHP), its implementation poses challenges for municipalities. A big obstacle is the fragmented and inconsistent data landscape, which makes data acquisition and analysis a resource-intensive bottleneck. This paper argues that a centralized, harmonized data platform is the key enabler for efficient, scalable, and reproducible MHP, and consequently sustainable and transparent heat supply strategies. As a proof-of-concept, this paper presents a tool for MHP built upon a proprietary, nationwide data warehouse based on open data. It automates key analytical steps of the MHP, demonstrating that complex tasks become manageable once the foundational challenge of data consolidation is solved.

## Keywords

Heat Planning; Open Data; Data Harmonization; Scalability; Energy Transition; Urban Planning

## 1. Introduction

The German government's Heat Planning Act (Wärmeplanungsgesetz, WPG) [1], which took effect on January 1, 2024, is a cornerstone of the national energy transition, mandating comprehensive municipal heat planning (MHP) to achieve a climate-neutral heat supply by 2045 [2]. The legislation imposes non-negotiable deadlines: municipalities with populations over 100.000 must complete their heat plans by mid-2026, while smaller municipalities are due mid-2028 [3]. The law establishes specific and ambitious targets for the decarbonization of heat networks, requiring existing grids to achieve a minimum of 30 % renewable or unavoidable waste heat by 2030 and 80 % by 2040 [1].

While the goals are clear, the process of drawing up heat plans in every municipality is fraught with practical difficulties, creating a significant gap between federal policy and local capacity. A recent study highlights the immense financial and logistical burden on local governments, estimating that the total cost for nationwide MHP could exceed €520 million [3]. The costs are particularly challenging for smaller municipalities: The KWW municipal survey [4] estimates the average cost per resident at around €2-4 for cities with between 10.000 and 50.000 residents, and as much as €6 for cities with fewer than 10.000 residents. Beyond financial constraints, a key barrier is the lack of specialized expertise and in-house resources, particularly in geographic information systems (GIS) and complex

data analysis, which forces many municipalities to rely on expensive external consultants [3, 4]. Reports from the German Federal Environment Agency (Umweltbundesamt) further underscore this challenge, noting that many local governments currently lack the long-term, climate-aligned strategies and the technical means required to effectively transform their heating systems [2]. This structural deficit in local administrative capacity threatens to undermine the ambitious objectives of the WPG. The traditional approach, relying on time-consuming manual data gathering and expensive external services, is not a scalable solution for the thousands of municipalities that must comply with the new legislation. And indeed, a recent study suggests that “with regard to data, it could be useful if these were centrally collected by an office in the state and made available to the municipalities, because the personnel resources are not available in many municipalities, nor are the professional expertise or the required data processing and storage systems.” [3, p. 97].

This study directly addresses this critical policy-practice gap by leveraging a proprietary, nationwide data platform to develop a scalable planning tool that streamlines the early stages of the MHP. The tool serves as an exemplary case, demonstrating that a unified and solid data foundation is a crucial component for removing complexity and effort from the MHP process. It can be accessed at <https://app.enersyte.de/>.

The major advancement lies in the strategic use of harmonized, open and publicly available data sources to

create a unified, foundational data model that can be used to build layer upon layer of more specialized analyses in the realm of MHP.

By automating the data-intensive initial phases of the MHP, tools like the one presented here enable municipalities to reallocate scarce personnel and financial resources from labor-intensive and challenging data acquisition (named as a major challenge by many municipalities [4, 5]) to more strategic and collaborative tasks, such as stakeholder engagement and the formulation of robust implementation plans [3]. This not only substantially accelerates the planning process but also democratizes access to MHP, making it a viable starting option for thousands of small and medium-sized municipalities that would otherwise struggle to comply with the new legal requirements. As suggested in [3], this democratization is a crucial enabler for widespread, standardized, and reproducible MHP, which is essential for scaling the national energy transition and meeting Germany's current and future climate targets.

## 2. Methods and Methodology

The exemplary MHP tool is built upon a multi-layered data architecture designed to synthesize diverse data sources into a comprehensive foundation for MHP, and aims to cover as many aspects and requirements of the WPG as possible, reproducible and “with a single click”. The methodology is outlined below, with specific focus on the required core data layers and modeling approaches.

### 2.1 The foundational data layer

The MHP tool's analyses are built upon a strategic integration of publicly available and proprietary datasets. A core concept is to perform all calculations on the most granular data level feasible (usually buildings), with any necessary aggregations occurring as late as possible in the workflow. Aggregation is necessary primarily to ensure privacy-preserving outputs for the end-user as mandated by the WPG, and secondarily, in cases where a more fine-grained analysis is not sensible.

**Cadastral and geometric data:** The spatial foundation of the tool rests on data from the official, authoritative cadastral information system in Germany (ALKIS, e.g., [6]), providing precise data for building footprints. This is complemented by Level of Detail 2 (LoD2) building models, which provide detailed 3D building geometries, including complex features like roof shape and orientation [7]. Building block geometries are created by grouping similar ALKIS usage areas. The availability of these structured, object-oriented data sources is critical, as it provides the necessary spatial context and geometric measures for all subsequent analyses, from heat demand estimation to solar potential calculations.

**Demographic and structural data:** The Zensus 2022 census provides a wealth of information crucial for MHP at a national scale, including data on population, buildings, and the predominant energy carriers used for heating [8]. The data is provided in a spatially resolved grid format, making it directly usable for GIS applications, however, is subject to a privacy-preserving process in which it is “slightly falsified” to prevent the identification of individuals. This fact necessitates a robust disaggregation methodology within the tool to transform the data from aggregated grid cells to a usable, building-level format. While a perfect, deterministic disaggregation to

individual buildings is not possible, established approaches such as CoGran offer robust solutions for this task [9].

**Open and public research data:** OpenStreetMap serves as a source for street network data and addresses, which is essential for linking address-based data (e.g. consumption) to buildings and performing spatial analysis on street segments (e.g. heat density lines) [10]. For solar potential, the methodology of the Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS) is used, a European Commission platform that leverages satellite data to calculate solar radiation and PV system performance across Europe [11]. This provides a validated, academically grounded approach for assessing the solar energy potential of a building stock. Similarly, waste heat potentials are modeled based on outputs from the European ReUseHeat project [12], which has investigated the technical and economic viability of recovering excess heat from unconventional urban sources, such as industry, supermarkets and sewage systems.

### 2.2 Data integration

Most of the data integration and standardization of the foundational data layer has been done by *syte* as part of its proprietary business model. This process, while conceptually straightforward, proved to be a complex and time-consuming undertaking, requiring months to years of dedicated work to unify, cleanse, and maintain the diverse datasets. This “data janitorial” work is often underestimated when addressing specific problems but is a crucial prerequisite for reproducible and scalable analyses. For example, even standardized data sources like ALKIS are managed by 16 different providers in Germany, and integrating these distinct data streams is a non-trivial task. *syte* spent roughly four years consolidating and unifying the German building data landscape, using a combination of Google Cloud Storage and a Google BigQuery data warehouse to be fast and scalable, as well as a combination of tools such as Airflow/Dataflow for managing interdependencies between datasets and consistent updates. Lining out the exact integration process exceeds the scope of this work; however, it is this centralized, harmonized data source that provides the foundation that enables the MHP tool to solve complex questions that would otherwise be a significant challenge.

### 2.3 Modeling of heat demand or consumption

A particular case and further data challenge in MHP is the lack of comprehensive, publicly available energy consumption data at the building level; data which most often needs to be inquired from energy utility providers in lengthy processes. The MHP tool addresses this by offering a dual-pathway approach: it can either integrate user-provided consumption data for a high-fidelity analysis or, in the absence of such data, employ an alternative, simplified heat demand model based on GIS data [13, 14, 15]. The employed model, named *syte Renovate* [16], is a simplified version of the German standard DIN-V-18599 for energy certificates [17]. The decision to use a simplified model is a deliberate choice that is well-supported by academic literature on building energy modeling to reduce computational complexity and data requirements [18], making it less complicated for the initial stages of large-scale municipal planning or for use by non-expert policymakers.

This heat demand model estimates energy demand based on geometric and structural building factors,

including roof and wall sizes, building and window areas, and their respective insulation values [16], complemented by estimated heat sources similar to, e.g., the THERMOS project [15]. To ensure scalability, the model can operate using default values from publicly available sources like TABULA [19] for parameters where precise information is lacking. The model enables municipalities to proceed with their planning despite a lack of granular consumption data (or any proprietary data whatsoever), making the tool highly accessible and operational with a “single click”. Critically, the model is currently only validated on residential space heating demand; estimating the heat demand of commercial and industrial buildings would be less meaningful without modelling process heat, for which no data was available.

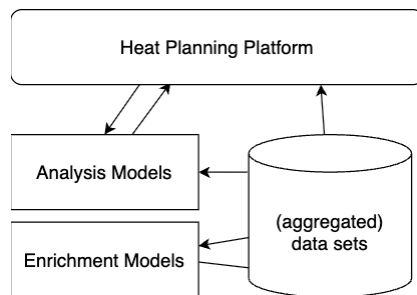


Fig. 1: The “flow” of data between components of the heat planning tool. The foundation data is aggregated in a warehouse and enriched with additional model layers like heat demand. Any models that use user-supplied data do not write their outputs to the data warehouse to prevent leaks of sensitive or proprietary data

## 2.4 User input data

The MHP tool provides an interface for municipalities to augment the foundational datasets with their own proprietary and more precise data, which can enhance the accuracy and fidelity of the resulting analyses. Key datasets that can be uploaded include existing heat and gas grid infrastructure, energy carrier data at a building or address level (e.g., from network operators or chimney sweeps), actual consumption values per building or address, and planned heat grid extensions. A central tenet of the tool’s design is data protection, with all user-provided data being processed on a per-session basis only and not stored on the servers. The data is processed and aggregated at the building block level (buildings enclosed by roads or natural boundaries) to further ensure that individual buildings cannot be identified in the final outputs. This ensures a high level of privacy and security for sensitive municipal data.

## 2.5 Calculated data

The tool processes the basic and user-input data to generate a comprehensive set of calculated datasets and respective visualizations essential for municipal heat planning. These outputs are aggregated at the building block level to ensure privacy. Key calculated datasets and visualizations include:

**Building and area-based data:** Total heat demand and most common building age classes, average energy efficiency, average refurbishment potential, and heat density per building block (MWh/(ha·a)).

**Infrastructure and supply data:** Heat density lines per street segment (MWh/(m·a)), visualizations of existing heat and gas grids (when provided by the user), and heat

grid suitability areas. These suitability areas can be supplemented by user-provided heat grid data or replaced by planned district heating areas.

**Potential data:** Solar heat potential on roofs and open areas, waste heat potentials, and heat demand forecast per building block. The model also calculates the energy carrier mix and the energy carrier per building block when user-provided data is available.

These models, in general, are fully parameterizable, allowing users to adjust assumptions and observe the impact on the final MHP outputs.

## 2.6 A workflow from raw data to planning metrics

Fig. 2 shows an example for two multi-layer pipelines that are at the center of the heat planning process, illustrating how a complex processing flow is implemented only once, and then allows for repeated and automated calculation for every municipality in Germany. It shows the workflow for calculating two key indicators for MHP: area-based heat density (MWh/(ha·a)) and linear heat density (MWh/(m·a)). This process begins by integrating disparate data sources such as cadastral data from ALKIS, 3D building geometries from LOD2, building age information, and street networks from OpenStreetMap. These foundational layers are then used to calculate building-specific heat demands, which are finally aggregated to produce the respective heat density metrics. Traditionally, each municipality or its service providers must gather this data on their own and then perform the processing steps and analyses in a manual process using GIS and spreadsheets. Without the necessary expertise, this process can lead to flaws, which can stay dangerously hidden after aggregation.

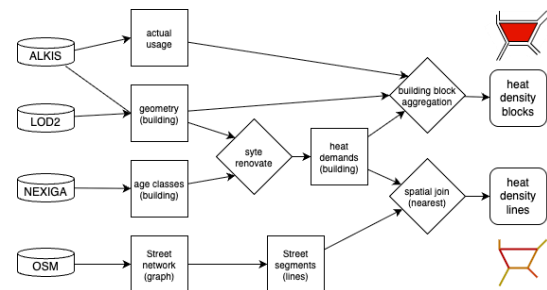


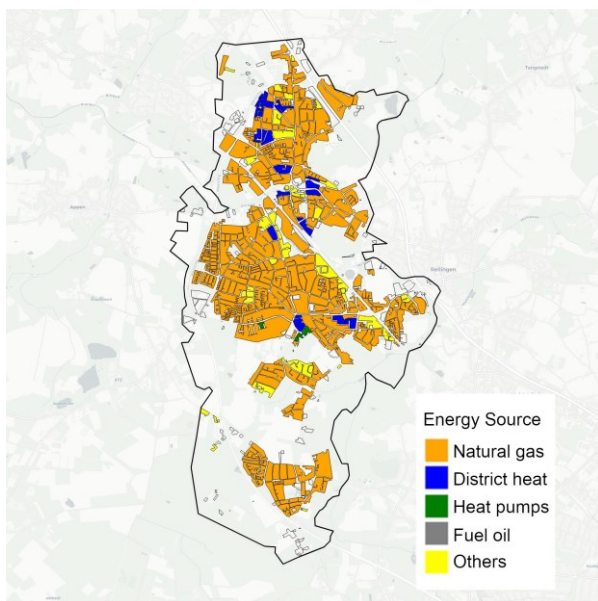
Fig. 2: Example process from foundational data layers to heat planning result layers. The foundational layers are collected from the respective public (ALKIS, LOD2 and OSM) and proprietary (Nexiga) sources and aggregated in multiple steps to produce various result layers, here the heat density (MWh/(ha·a)) in building blocks and heat density lines (MWh/(m·a)) over street segments

## 3. Results

The use of the exemplary tool demonstrates a significant acceleration and streamlining of the municipal heat planning process. By automating, in particular, the data-intensive steps of the inventory analysis (Bestandsanalyse), the tool effectively addresses a core challenge faced by municipalities, especially smaller ones with limited personnel and resources. Comprehensively using automation would allow for a fundamental shift in the MHP workflow. Municipalities can reallocate human and financial resources from labor-intensive data acquisition and analysis to the more strategic and collaborative phases of MHP, investing more time into solutions and policies resulting from the MHP rather than the tedious data stages

of the MHP process itself. This critical advantage would enable them to focus on developing targeted strategies, engaging with stakeholders, and formulating implementation plans.

The practical efficiency and scalability of the tool provided by the harmonized foundational data layer have already been demonstrated through several use cases. The local public utility provider of Pinneberg in Schleswig-Holstein successfully utilized the platform as a foundational basis for its heat planning in collaboration with the municipality. Due to the existing foundational data, the tool essentially allowed the status quo analysis of the MHP including required visualizations (see Fig. 3 for an example) to be finished within a very short timeframe, such that a large part of the resources could be used for the analysis of possible implementation measures. This initially validated the tool's ability to provide a rapid initial analysis. Furthermore, the tool has proven valuable for consultancy firms specializing in MHP, enabling them to offer their services to smaller municipalities at a significantly lower cost in a shorter timeframe. This not only makes the planning process more accessible but also ensures a standardized and reproducible approach across various projects. Ultimately, this is a direct result of the foundational data consolidation work, which makes these otherwise complex analyses simple and repeatable. A systematic evaluation of the usability of the tool and the accuracy of result layers is planned for the final phase of the project.



*Fig. 3: Exemplary output map of the heat planning tool: Predominant energy carrier aggregated over building blocks for the city of Pinneberg. Background map © OpenStreetMap contributors*

#### 4. Discussion

The developed approach is a viable solution to jump-start the MHP, particularly for small to medium-sized municipalities. However, it is most likely unsuited for large urban areas, as these contexts often require a higher degree of granularity and access to extensive proprietary specialized datasets that are not readily available at scale. In particular, non-residential buildings play a more crucial role here, and energy demand modeling for these is substantially more complicated due to the additional consideration of process heat. The primary strength of the

presented approach and tool lies in its ability to empower municipalities that lack the resources of major cities.

Another key limitation of any data-driven heat planning model is the inherent uncertainty and quality of the underlying data. While the tool leverages a wide range of open and public datasets, the quality of these sources can be variable. For instance, demographic data from sources like the Zensus needs to be disaggregated to the building level, introducing a degree of modeling uncertainty [8]. Similarly, the heat demand model relies on estimated values for parameters like building insulation, which are often inferred from building age due to a general lack of data on refurbishment status.

As an example, a supplementary simulation for the municipality of Pinneberg in a separate work underscored the critical impact of such “hidden” data: a convolutional neural network trained on aerial imagery, was able to identify buildings with a high likelihood of roof renovation, assuming that a renovated roof implies a more comprehensive insulation upgrade of walls and windows. This analysis identified approximately 28 % of the building stock as likely refurbished. Adjusting the heat demand model with new insulation parameters in line with standards for a “usual refurbishment” from the TABULA project [19] resulted in a significant redistribution of the calculated energy needs and a 15 % reduction of total heat demand for the municipality. This quantifies the substantial margin of error that MHP faces when relying solely on age-based assumptions without accounting for the actual refurbishment status.

Furthermore, the full functionality of any tool for evaluating alternative heat sources relies on the availability of rich geolocalized data. Accurate planning for specific potentials, such as waste heat from industrial plants or geothermal energy, requires the precise location and characteristics of these sources to be supplied by the user, a task that can present its own set of challenges.

Despite the limitations, this work's key finding is that a stable, harmonized data foundation is the ultimate enabler for effective and scalable municipal heat planning, making complex analyses and models significantly easier to create and deploy. It is important to point out, however, that the rapid development of the presented MHP tool was contingent upon a pre-existing, aggregated data warehouse, underscoring a critical finding: as most datasets are publicly accessible, the primary bottleneck is not the availability of data but its fragmented processing. Current practice often delegates data processing to the lowest administrative level, a workflow that results in significant work redundancy, inconsistent data quality, and a lack of comparability across municipal outcomes.

This underscores that the creation of a centralized data source is a critical, and often overlooked, prerequisite for meaningful public planning tools. However, it should be noted that solving the data foundation problem on its own does not resolve the challenges of the MHP; instead, it shifts the scarce, available resources towards the steps that really matter for finding solutions for the local challenges.

#### 5. Conclusion

The outlined approach can represent a significant advancement towards a streamlined, transparent and scalable approach to municipal heat planning. This research and case study demonstrate that by leveraging unified open data and robust analytical models, the most

resource-intensive phases of the planning process can be largely automated, providing a reproducible and transparent foundation for strategic decision-making. The MHP tool's primary goal and contribution lies in the potential of democratizing municipal heat planning, making it accessible to small and medium-sized municipalities that often lack the specialized resources of larger cities. While the model is not intended to replace comprehensive, deep-dive analyses of the local heat infrastructure, it provides a crucial and cost-effective entry point for widespread MHP.

To address the data gaps identified in the discussion, a key area for future development is the enhancement of data quality. This is not merely an opportunity for improvement but a mandatory step, as the current practice for MHP often relies on assumptions to close persistent data gaps. Bridging the data gap regarding a building's refurbishment status presents a significant opportunity to improve the accuracy of heat demand estimations. As mentioned before, a promising research trajectory involves the use of machine learning (ML) models to analyze aerial and street-level imagery and automatically infer building characteristics that are unknown. Academic work in this area has shown that computer vision and deep learning algorithms can extract valuable building features, such as envelope thermal characteristics, window-to-wall ratios, and material deterioration, from satellite and aerial photographs [20, 21, 22, 23]. Adapted approaches promise to reduce reliance on generalized data and improve the fidelity of the heat demand model outputs.

However, instead of estimations with ML approaches, the best way to plug the data gap would be to use actual energy performance certificates (EPC), which should contain detailed information not just about exact energy consumption or demand but also about past and recommended energy efficiency measures. These EPCs are mandatorily collected since at least 2024 [24] but not made available to the research community. The authors of this paper strongly urge this dataset of national value to be made publicly available to conduct studies about current and potential energy demands as well as for use as ground truth in training ML models for energy-related topics.

Another important line of research is novel building heat demand models. Current approaches consist of two main branches: physics-based simulations and machine learning models. Physics-based simulations, while highly accurate, are computationally expensive and challenging to scale for entire municipalities [25]. Machine learning models, on the other hand, are fast and efficient [26]; however, they often lack the necessary transparency and explainability for policymaking. A promising alternative is surrogate modeling, a hybrid approach that aims to resolve this dilemma by combining physics-based modeling with machine learning [27] and thereby proving to be an enabling technology for AI-based decision support.

The scientific literature offers a wide array of energy demand modelling approaches, each with its own assumptions and level of complexity. There is no single "correct" model, and the validity of their outputs is difficult to ascertain, particularly when they rely on different, non-standardized input data. A crucial step toward ensuring comparability and reproducibility between these different models is to share a more unified, consistent data basis for all of them as a benchmark. Without comparable data, there can be no comparable models. This emphasizes the core argument of this paper: that the establishment of

a centralized, harmonized data source as well as standardized and reproducible planning workflows is a fundamental prerequisite for moving the entire field of municipal heat planning forward.

## Acknowledgements

This work is part of the ENERsyte project, funded by the state of North Rhine-Westphalia through the EFRE/JTF programme "Grüne Gründungen" with funding code EFRE-20800322 and project number IN-GG-1-007a.

## References

- [1] WPG - Gesetz für die Wärmeplanung und zur Dekarbonisierung der Wärmenetze. Accessed: Jul. 02, 2024. [Online]. Available: <https://www.gesetze-im-internet.de/wpg/BJNR18A0B0023.html>
- [2] R. Riechel and J. Walter, "Kurzgutachten Kommunale Wärmeplanung," Umweltbundesamt Berlin, 2022.
- [3] F. Botta, K. Dziurla, A. Grüttner, and O. Rottmann, "Transformation der kommunalen Energieversorgung – Ziele, Herausforderungen und Perspektiven der kommunalen Wärmeplanung," KOWID, 2023. Accessed: Aug. 29, 2025. [Online]. Available: [https://kowid.de/case\\_study/neue-studie-des-kowid-transformation-der-kommunalen-energieversorgung-ziele-herausforderungen-und-perspektiven-der-kommunalen-waermeplanung/](https://kowid.de/case_study/neue-studie-des-kowid-transformation-der-kommunalen-energieversorgung-ziele-herausforderungen-und-perspektiven-der-kommunalen-waermeplanung/)
- [4] "Kommunenbefragung zur Kommunalen Wärmeplanung (KWP) 2023," Kompetenzzentrum Kommunale Wärmewende (KWW), Halle. Accessed: Aug. 29, 2025. [Online]. Available: [https://api.kww-halle.de/fileadmin/PDFs/KWW-Kommunenbefragung2023\\_Praesentation-gesamt\\_final.pdf](https://api.kww-halle.de/fileadmin/PDFs/KWW-Kommunenbefragung2023_Praesentation-gesamt_final.pdf)
- [5] Anna Billerbeck and Markus Fritz, "Umfrage zur Kommunalen Wärmeplanung – Einschätzungen zu Erfolgsfaktoren und Hemmnissen," Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI, Karlsruhe, Mar. 2025. Accessed: Sep. 19, 2025. [Online]. Available: <https://www.isi.fraunhofer.de/de/blog/2025/kommunale-waermeplanung.html>
- [6] "Amtliches Liegenschaftskatasterinformationssystem (ALKIS) | Landesamt für Geoinformation und Landesvermessung Niedersachsen." Accessed: Aug. 29, 2025. [Online]. Available: [https://www.lgln.niedersachsen.de/startseite/geo-daten\\_karten/afis\\_alkis\\_atkis/alkis/](https://www.lgln.niedersachsen.de/startseite/geo-daten_karten/afis_alkis_atkis/alkis/)
- [7] I. M. Pârvu, F. Remondino, and E. Ozdemir, "LOD2 Building Generation Experiences and Comparisons," *Journal of Applied Engineering Sciences*, vol. 8, no. 2, pp. 59–64, Feb. 2019, doi: 10.2478/jaes-2018-0019.
- [8] "Zensus 2022," Statistisches Bundesamt. Accessed: Aug. 29, 2025. [Online]. Available: [https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Bevoelkerung/Zensus2022/\\_inhalt.html](https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Bevoelkerung/Zensus2022/_inhalt.html)
- [9] J. Kröher, Philipp Loose, and H. Schneider, CoGran. Accessed: Sep. 24, 2025. 2lab, HafenCity Universität Hamburg. [Online]. Available: <https://gitlab.com/g2lab/cogran-python>
- [10] OpenStreetMap contributors, "Planet dump retrieved from <https://planet.osm.org>," 2017.

- Accessed: Aug. 29, 2025. [Online]. Available: <https://www.openstreetmap.org>
- [11] T. Huld, R. Müller, and A. Gambardella, "A new solar radiation database for estimating PV performance in Europe and Africa," *Solar Energy*, vol. 86, no. 6, pp. 1803–1815, June 2012, doi: 10.1016/j.solener.2012.03.006.
- [12] U. Persson, H. Averfalk, S. Nielsen, and D. Moreno, "ReUseHeat project - Accessible urban waste heat (Revised version)," Report, May 2020. [Online]. Available: [https://www.reuseheat.eu/wp-content/uploads/2021/02/D1.4-Accessible-urban-waste-heat\\_revised-compressed.pdf](https://www.reuseheat.eu/wp-content/uploads/2021/02/D1.4-Accessible-urban-waste-heat_revised-compressed.pdf)
- [13] A. Alhamwi, W. Medjroubi, T. Vogt, and C. Agert, "GIS-based urban energy systems models and tools: Introducing a model for the optimisation of flexibilisation technologies in urban areas," *Applied Energy*, vol. 191, pp. 1–9, Apr. 2017, doi: 10.1016/j.apenergy.2017.01.048.
- [14] F. Johari and J. Widén, "A simplified urban building energy model to support early-stage energy plans," *E3S Web Conf.*, vol. 362, p. 09002, 2022, doi: 10.1051/e3sconf/202236209002.
- [15] "THERMOS Project," THERMOS. Accessed: Sep. 03, 2025. [Online]. Available: <https://www.thermos-project.eu/home/>
- [16] syte, "Wie berechnet syte Renovate energetische Sanierungen?" Accessed: Sep. 19, 2025. [Online]. Available: <https://knowledge.syte.ms/wie-berechnet-syte-renovate-energetische-sanierungen>
- [17] "DIN V 18599-1 - 2011-12 - DIN Media." Accessed: Aug. 29, 2025. [Online]. Available: <https://www.dinmedia.de/en/pre-standard/din-v-18599-1/142650957>
- [18] M. Mrazek, D. Honc, E. Riva Sanseverino, and G. Zizzo, "Simplified Energy Model and Multi-Objective Energy Consumption Optimization of a Residential House," *Applied Sciences*, vol. 12, no. 20, p. 10212, Jan. 2022, doi: 10.3390/app122010212.
- [19] I. Ballarini, S. P. Corgnati, and V. Corrado, "Use of reference buildings to assess the energy saving potentials of the residential building stock: The experience of TABULA project," *Energy Policy*, vol. 68, pp. 273–284, May 2014, doi: 10.1016/j.enpol.2014.01.027.
- [20] S. Touzani, M. Pritoni, R. Singh, and J. Granderson, "Machine Learning for Automated Extraction of Building Geometry," Aug. 2020, Accessed: Sep. 01, 2025. [Online]. Available: <https://escholarship.org/uc/item/4vr8r3vk>
- [21] G. Mutreja and K. Bittner, "Efficient Building Roof Type Classification: A Domain-Specific Self-Supervised Approach," Mar. 28, 2025, arXiv: arXiv:2503.22251. doi: 10.48550/arXiv.2503.22251.
- [22] J. Kim, H. Bae, H. Kang, and S. G. Lee, "CNN Algorithm for Roof Detection and Material Classification in Satellite Images," *Electronics*, vol. 10, no. 13, p. 1592, Jan. 2021, doi: 10.3390/electronics10131592.
- [23] M. Wurm, A. Droin, T. Stark, C. Geiß, W. Sulzer, and H. Taubenböck, "Deep Learning-Based Generation of Building Stock Data from Remote Sensing for Urban Heat Demand Modeling," *ISPRS International Journal of Geo-Information*, vol. 10, no. 1, p. 23, Jan. 2021, doi: 10.3390/ijgi10010023.
- [24] Gesetz zur Einsparung von Energie und zur Nutzung erneuerbarer Energien zur Wärme- und Kälteerzeugung in Gebäuden (Gebäudeenergiegesetz - GEG).
- [25] R. Mahmoud, E. Himpe, M. Delghust, and J. Laverge, "A Modelling Approach to Reduce the Simulation Time of Building Stock Models," presented at the Building Simulation, Rome, Italy, 2019, pp. 1491–1497. doi: 10.26868/25222708.2019.210860.
- [26] A. Eseye and M. Lehtonen, "Short-Term Forecasting of Heat Demand of Buildings for Efficient and Optimal Energy Management Based on Integrated Machine Learning Models," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. PP, pp. 1–1, Feb. 2020, doi: 10.1109/TII.2020.2970165.
- [27] J. Willard, X. Jia, S. Xu, M. Steinbach, and V. Kumar, "Integrating Physics-Based Modeling with Machine Learning: A Survey," *ArXiv*, Mar. 2020, Accessed: Oct. 10, 2025. [Online]. Available: <https://www.semanticscholar.org/paper/Integrating-Physics-Based-Modeling-with-Machine-A-Willard-Jia/6965bc6d26fc910a6387cd6d423b35fd9e1d358b>

# Simulationsgestützte Decision Workshops zur Umsetzung der Kommunalen Wärmeplanung

Sascha HOLZHAUER <sup>1,2\*</sup>, Friedrich KREBS <sup>1,2</sup>, Ivan DIGEL <sup>1</sup>, Alwina KAISER <sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Universität Kassel, Wilhelmshöher Allee 71-73, 34121 Kassel, Deutschland

<sup>2</sup> Fraunhofer Institut für Energiewirtschaft und Energiesystemtechnik, Joseph-Beuys-Straße 8, 34117 Kassel, Deutschland

\* sascha.holzhauer@uni-kassel.de

---

## Kurzfassung

Die Dekarbonisierung des Gebäudesektors stellt Kommunen vor die Herausforderung, technische, wirtschaftliche und soziale Aspekte zu berücksichtigen, um nachhaltige und akzeptierte Versorgungslösungen zu entwickeln. Als ein interaktives, simulationsgestütztes Beteiligungsformat unterstützen Decision Workshops sachliche Diskussionen relevanter Stakeholder, erhöhen ihre Wirksamkeit und fördern die Umsetzung gemeinsam entwickelter Lösungen. Multikriterielle Entscheidungsanalyse auf Basis eines geeigneten Kriterienkatalogs, agentenbasierte Simulation und interaktive Visualisierung ermöglichen es, wissenschaftlich fundierte Versorgungsvarianten mit den Präferenzen der Stakeholder transparent zu integrieren und weiterzuentwickeln.

## Schlagworte

Agentenbasierte Simulation; Bürgerbeteiligung; Interaktive Entscheidungsunterstützung; Multikriterielle Analyse; Quartierskonzepte; Stakeholderinteraktion

---

## 1. Einleitung

Die Dekarbonisierung des Gebäudesektors stellt Kommunen vor die Herausforderung, technische, wirtschaftliche und soziale Aspekte in der kommunalen Wärmeplanung zu integrieren, um nachhaltige und akzeptierte Lösungen für zukünftige Wärmenetze und Versorgungssysteme zu entwickeln. Insbesondere auf Quartiersebene führen Heterogenität der Gebäudestrukturen, Interessen der Eigentümer\*innen und Unsicherheiten hinsichtlich Investitionsentscheidungen dazu, dass klassische Planungsansätze häufig an ihre Grenzen stoßen. Vor diesem Hintergrund gewinnen interaktive, simulationsgestützte Beteiligungsformate wie Decision Workshops zunehmend an Bedeutung. Durch die Kombination von multikriterieller Entscheidungsanalyse, agentenbasierter Simulation und interaktiver Visualisierung ermöglichen sie es, wissenschaftlich fundierte Szenarien mit den Präferenzen und den Werturteilen lokaler Stakeholder systematisch in einen transparenten Diskurs- und Entscheidungsprozess zu integrieren.

Das im Rahmen des Projekts Waermewende im urbanen Gebäudebestand mit Hilfe interaktiver Entscheidungsraumanalyse (WAERMER) erprobte „Simulationsgestützte Decision Workshop“-Konzept zielt darauf ab, die Komplexität der Wärmeplanung durch strukturierte Moderation, datenbasierte Visualisierungen und dynamische Beteiligung der Akteur\*innen beherrschbar zu machen. Die Methode erlaubt nicht nur eine evidenzbasierte und nachvollziehbare Bewertung verschiedener Versorgungsvarianten, sondern deckt auch Zielkonflikte und individuelle Handlungsbarrieren im Investitionsverhalten

auf. Damit leistet sie einen Beitrag zur Überwindung der Lücke zwischen planerischer Zielformulierung und tatsächlicher Umsetzung in kommunalen Wärmewenden.

Im weiteren Verlauf dieses Papers erfolgt zunächst eine detaillierte Darstellung der Konzeption und des methodischen Vorgehens bei der Durchführung simulationsgestützter Decision Workshops zur Umsetzung der kommunalen Wärmeplanung auf Quartiersebene. Es wird aufgezeigt, wie multikriterielle Entscheidungsanalysen durch partizipative Entwicklung von Bewertungskriterien und technische Energiesystemmodellierung mit agentenbasierten Simulationen verzahnt werden, um komplexe Investitionsentscheidungen abzubilden und in dialogorientierte Beteiligungsprozesse einzubetten. Der Ablauf des Workshops, die Ergebnisse der partizipativen Bewertung von Versorgungsvarianten sowie die Wirkungen flankierender Maßnahmen werden im Kontext praxisnaher Erfahrungen mit dem Decision Workshop-Format analysiert. Abschließend diskutiert das Paper die Potentiale, Herausforderungen und Grenzen des Ansatzes und gibt Empfehlungen für die Übertragbarkeit und Weiterentwicklung in anderen kommunalen Kontexten.

## 2. Material und Methoden

Im Rahmen des Forschungsprojekts WAERMER wurde ein Stakeholderbeteiligungsprozess für die Wärmeplanung im Quartier Kiel-Oppendorf konzipiert und erprobt. Als relevante Akteure nahmen Gebäudeeigentümer\*innen (4), ein Installateur, ein Energieberater, ein Vertreter der Finanzbranche, Infrastrukturbetreiber\*innen (3) sowie Vertreter\*innen der kommunalen Verwaltung (2) teil. Der als Decision Workshop bezeichnete Prozess ist

konsensorientiert und umfasst mehrere Methoden und Werkzeuge, die eine informierte und ausgewogene Entscheidung unterstützen sollen. Diese Bausteine sollen im Folgenden erläutert und ihre Orchestrierung zum Decision Workshop dargestellt werden.

Das Studiengebiet umfasste ein städtisches Wohnquartier mit etwa 500 Wohngebäuden und ca. 1.300 Einwohner\*innen bei einem jährlichen Wärmebedarf von ungefähr 15.000 MWh. Aufgrund seiner infrastrukturellen Charakteristika ist das Quartier nicht an das zentrale Fernwärmenetz angeschlossen und wird gegenwärtig überwiegend durch dezentrale Gasheizungen versorgt. Herausforderungen sind ein hohes Durchschnittsalter der Eigentümer\*innen, hoher Sanierungsbedarf der Gebäude und diverse Eigentümerstrukturen [1].

**Multikriterielle Entscheidungsanalyse**

Das methodische Gerüst des Decision Workshop bildet die Multikriterielle Entscheidungsanalyse (MCDA), auf der ein interaktives, datenbasiertes Dialogwerkzeug entwickelt wurde, welches die Stakeholder während des Prozesses begleitet [2]. Das Dialogwerkzeug ermöglicht es, die individuellen Präferenzen unterschiedlicher Stakeholder auf Quartiersebene systematisch in die Bewertung von Versorgungsszenarien einzubeziehen und unmittelbar zu diskutieren. Die Auswahl der Visualisierungen kann dynamisch an den Verlauf der Diskussion angepasst werden.

Grundlage der MCDA ist die Definition relevanter Evaluationskriterien. Dazu identifizierten die Stakeholder in moderierten Diskussionen während eines vorgelagerten Workshops relevante Aspekte der Wärmeversorgung, die vom interdisziplinären Forschungsteam in neun Evaluationskriterien zusammengefasst wurden. Zur Orientierung unterteilt in vier Kategorien (siehe Abb. 2) umfasst die Liste der Kriterien sowohl quantitative als auch qualitative Dimensionen. Das Kriterium „Zielerreichung Gebäude“ quantifiziert beispielsweise den „erwarteten Anteil der Gebäudeeigentümer, die sich bis zu einem definierten Zeitpunkt für eines der für die jeweilige Versorgungsvariante vorgesehenen Heizsysteme entscheiden (im Falle der dezentralen Versorgung sind dies Wärmepumpen oder Biomasseheizungen, nicht jedoch Heizsysteme auf Basis fossiler Energieträger). Die „Zukunftssicherheit für Gebäudebesitzer“ umfasst die Vorhersehbarkeit und Planbarkeit der zu erwartenden Kosten bei Strom, Investitionskosten, Anschlusskosten und Wärmelieferkosten

zusammen mit der Bewertung der Ausfallrisiken der wärmeerzeugenden Anlagentechnik.



Abb. 2: Zielkriterien in den Kategorien Umweltwirkungen, Technologie, Soziales und Wirtschaftlichkeit. Kursiv gesetzte Kriterien sind quantitativ, regulär gesetzte kategorisch

Eine weitere vorgelagerte Aufgabe umfasst die Energie-systemauslegung und Szenarioentwicklung. Auf Grundlage einer Bestandsanalyse inklusive verfügbarer Energiequellen, der Wärmebedarfsermittlung, regionaler Klimaziele und Stakeholderanforderungen entwickelte das Forschungsteam vier technisch und wirtschaftlich umsetzbare Versorgungsvarianten. Diese umfassten sowohl dezentrale Lösungen als auch netzgebundene, bei denen die angestrebte Anschlussquote definiert wurde (Abb. 3).

Anschließend folgte die Bewertung der Versorgungsvarianten anhand der Kriterien auf einer Skala von 0 bis 5, wobei der Wert 5 die bestmögliche Bewertung repräsentiert (Schritt 1: Bewertung in Abb. 1). Gibt es wie im Beispiel der Jahreswärmekosten kein globales Maximum oder Minimum, wurde die Bewertung anhand der Breite der betrachteten Versorgungsvarianten skaliert. Während die Bewertung der Versorgungsvarianten nach qualitativen, kategorischen Kriterien durch Expert\*innen

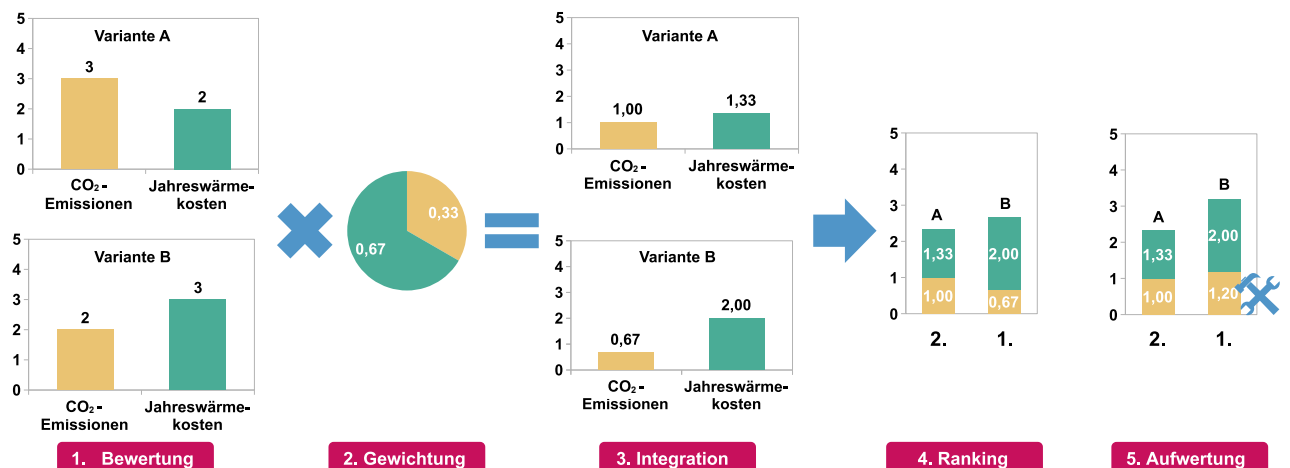


Abb. 1: Ablauf des Decision Workshop

erfolgte, wurden für die quantitativen Kriterien weitere Werkzeuge herangezogen.

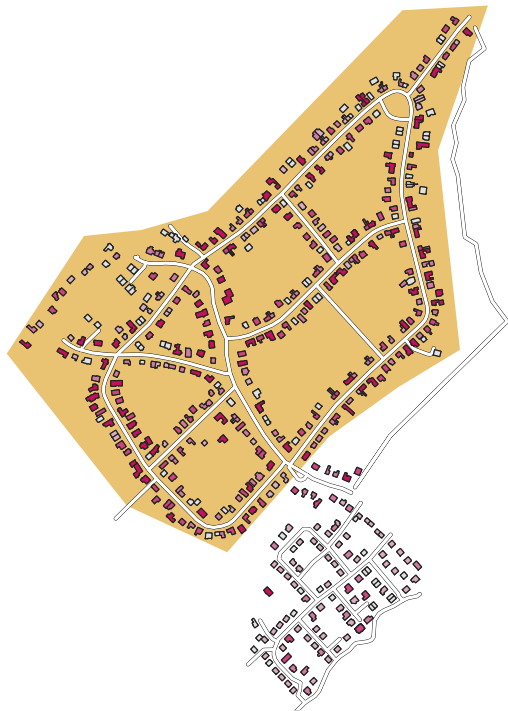


Abb. 3: Wärmeversorgungsvariante mit Nahwärmenetz-abdeckung (ocker). Die Gebäude-Farbgebung von hell nach dunkelrot gibt den Wärmebedarf an

### Planungswerkzeug EQ-City

Die Annuitäten der Infrastruktur und die Jahreswärmekosten der Gebäude wurden mit dem Planungswerkzeug EQ-City [3] ermittelt, welches auch die technische Energiesystemauslegung auf Quartiersebene unterstützte. EQ-City ist eine am Fraunhofer IEE entwickelte Software zur Vorplanung von Wärmeversorgungssystemen und ermöglicht die Bedarfs- und Potentialermittlung, Dimensionierung von Wärmeversorgungssystemen, Berechnung und Auswertung von energetischen und wirtschaftlichen Bewertungskriterien. Die Integration verschiedener Wärmequellen wie Geothermie und Solarthermie sowie die Dimensionierung der erforderlichen Infrastruktur erfolgte gebäudescharf und unter Berücksichtigung der lokalen Gegebenheiten nach etablierten Planungsrichtlinien (z. B. Betrachtung von Energieeffizienzsteigerung sowie möglichen Ankerkunden [4]). Die Datenerfassung erfolgte auf Grundlage der deutschen Wohngebäudetypologie des Instituts für Wohnen und Umwelt [5] sowie kommunaler Bestandsdaten. Hierzu zählten georeferenzierte Angaben zu Adresse, Gebäudefunktion (z. B. Wohnhaus, Garage, Nebengebäude), Anzahl der Einwohner und Haushalte, den Flächen der Hausumringe sowie der Quartiersabgrenzung, die bereitgestellt wurden. Der spezifische Wärmebedarf wurde mittels Gebäudetypologie bestimmt, während der Endenergiebedarf basierend auf den angenommenen gebäudeinternen Heizsystemen und entsprechenden Systemwirkungsgraden errechnet wurde.

### Agentenbasierte Simulation der Investitionen

Die Bewertung der CO<sub>2</sub>-Emissionen und die „Zielerreichung Gebäude“ wurde über das an der Universität Kassel entwickelte agentenbasierte [6] Modell (ABM) AHOIS (Agent-based House Owner Investments in Stages) ermittelt, welches individuelle Gebäudeeigentümerent-

scheidungen simuliert [7]. Basierend auf zwei psychologischen Theorien (Bamberg's Stufenmodell selbstregulierten Verhaltenswandels [8] und der Theorie des geplanten Verhaltens [9]) untersucht das Modell mehrstufige Entscheidungsprozesse mit wöchentlicher Auflösung und einer gebäudescharfen Abbildung.

Veranlasst durch externe Auslöser wie Preisschocks oder Nachbar\*innen, die neue Heizsysteme adoptieren, bewerten Gebäudeeigentümer\*innen, ob ihr aktuelles Heizsystem noch ihren individuellen Akzeptanzkriterien entspricht. Während ihrer Informationssuche erlangen die Agenten potentiell unsicheres Wissen zu möglichen Heizsystemen, nehmen Energieberatungen wahr und konsultieren ggf. Installateure. Die Machbarkeit der gewünschten Installation hängt vom Zustand der Gebäudehülle ab und Erfahrungen mit installierten Heizsystemen werden mit anderen Agenten geteilt. In jedem Schritt kann die Entscheidung z. B. durch kognitive Erschöpfung oder fehlende Finanzierung abgebrochen werden. Das Modell berücksichtigt wesentliche Einflussfaktoren wie die Verbreitung des Wissens um Heizsysteme mit Unsicherheiten, Energieberatungen, Installateure und ihre Verfügbarkeiten, die Förderkulisse sowie soziale Beeinflussung.

Die empirische Grundlage für die Parametrisierung des Modells bilden individuelle Gebäudecharakteristika sowie Daten zu Lebensstilen der Gebäudeeigentümer\*innen, anhand derer im Quartier erhobene psychologische Variablen zum Entscheidungsverhalten zugewiesen werden können [10].

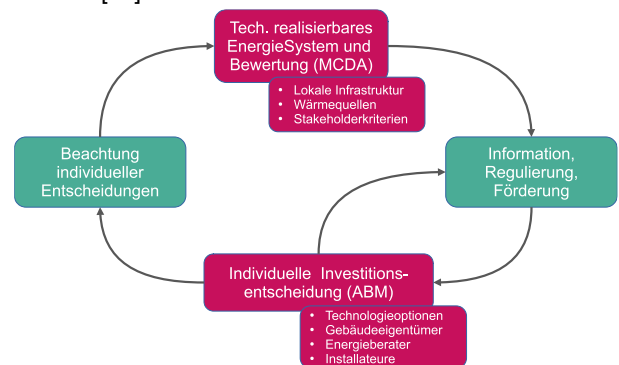


Abb. 4: Integration von technischer Energiesystemauslegung und agentenbasierter Simulation privater Investitionsentscheidungen

Die Kopplung zwischen technischer Energiesystemauslegung und agentenbasierter Simulation privater Investitionsentscheidungen ermöglicht so eine realitätsnahe Abschätzung der erwarteten Zielerreichung unter Berücksichtigung definierter Regulierungs- und Förderkulissen (Abb. 4), das heißt den Anteil der Gebäudeeigentümer\*innen, die sich bis zu einem definierten Zeitpunkt für eines der für die jeweilige Versorgungsvariante vorgesehenen Heizsysteme entscheiden. Diskrepanzen zwischen Planung und Umsetzung können auf diese Weise untersucht werden.

### Interaktives Dialogwerkzeug

Der Interaktionsprozess mit den Stakeholdern im Rahmen des Decision Workshops ist mehrstufig und wurde auf mehrere Termine aufgeteilt. Zunächst wurden die zentralen Bewertungskriterien von den Teilnehmenden individuell gemäß ihren persönlichen Präferenzen gewichtet (Schritt 2: Gewichtung in Abb. 1). Die Eingabe erfolgte anonymisiert auf einem Webinterface über Mobilgeräte (Smartphones, Tablets) und wurde in Echtzeit in

die Datenbasis des Visualisierungssystems übertragen. Nach einer Vorstellung der Versorgungsvarianten mit den im Vorfeld ermittelten Bewertungen wurde deren integrierte Bewertung präsentiert: Das Dialogwerkzeug [2] generierte dynamische Diagramme, gestapelte Balkendiagramme, Boxplots und interaktive Variantenvergleiche, in denen die Bewertung der Varianten mit den Gewichtungen der Stakeholder multipliziert werden. Die obere Grafik in Abb. 5 zeigt die gewichteten Gesamtbewertungen der Varianten in Form gestapelter Balkendiagramme. Über die Legende können einzelne Kriterien ein- oder ausgeblendet werden, um Unterschiede zwischen den Varianten gezielt sichtbar zu machen. Die untere Grafik in Abb. 5 stellt die gewichtete Bewertung nach Einzelkriterien dar. Sie zeigt, welche Kriterien maßgeblich zu den Bewertungsunterschieden beitragen und welche Kriterien zwischen den Varianten kaum differenzieren. Dadurch ermöglicht die Abbildung sowohl einen Überblick auf Gesamtebene als auch eine detaillierte Analyse der einzelnen Bewertungskomponenten.

Aggregierte Bewertungen, Zielkonflikte und auch Unterschiede zwischen den Akteursgruppen werden für alle Teilnehmenden sichtbar und transparent dargestellt (Schritt 3: Integration in Abb. 1). Eine Aggregation über Stakeholdergruppen hinweg erfolgte ausdrücklich nicht, da diese eine implizite Gewichtung der Stakeholder mit sich bringt. Die Moderation lenkte die Diskussion gezielt anhand der Visualisierungen, z. B. zur Klärung divergierender Erwartungen.



Abb. 5: Ausschnitt aus dem Bewertungstool mit Darstellung der gewichteten Gesamt- (oben) und Einzelkriterienbewertungen (unten) der vier Versorgungsvarianten zur Fokussierung der Stakeholderdiskussionen im Rahmen des Decision Workshops

Als Zwischenergebnis wurde eine Einschränkung auf die im Ranking führenden Varianten vorgenommen (Schritt 4: Ranking in Abb. 1). Für den nachfolgenden Workshoptermin konnten diese Varianten in der Zwischenzeit detaillierter untersucht und die Bewertungen aktualisiert werden. Auch die Gewichtung der Stakeholder wurden erneut abgefragt, um Änderungen infolge der gemeinsamen Diskussion während des ersten Termins bzw. durch zwischenzeitliche Entwicklungen zu berücksichtigen. Die visualisierten Ergebnisse wurden diskutiert und erläutert.

### Aufwertung durch geeignete Maßnahmen

Für den letzten Teil (Schritt 5: Aufwertung in Abb. 1) wurden Potentiale bei den favorisierten Versorgungsvarianten identifiziert, um diese aufzuwerten. Im Wesentlichen betreffen diese solche Kriterien, die hoch gewichtet, jedoch bisweilen schwach bewertet sind. Hier wurden nun

Maßnahmen gesucht, welche zu einer höheren Bewertung führen. Beispielsweise kann die Nutzung einer Wärmequelle mit geringeren CO<sub>2</sub>-Emissionen in Erwägung gezogen werden, wenn CO<sub>2</sub>-Emissionen hoch gewichtet sind. Das Ziel in diesem Abschnitt ist die Priorisierung von Maßnahmen zur Stärkung der Akzeptanz einer Versorgungsvariante unter den Stakeholdern.

Das agentenbasierte Modell wurde im Vorfeld des Workshoptermins eingesetzt, um solche Möglichkeiten einer höheren Zielerreichung zu untersuchen und die Wirksamkeit von Maßnahmen auf die Entscheidung der Gebäudeeigentümer\*innen sowie die Zielerreichung abzuschätzen [11]. Dabei bot das Modell einen detaillierten Blick auf das Entscheidungsverhalten und half, relevante Hürden zu identifizieren. In Abb. 6 wird bzgl. der Entscheidung für Luft-Wasser-Wärmepumpen dargestellt, in welchen Phasen des Entscheidungsprozesses (von links nach rechts) Agenten an der Installation gehindert werden. Alle „unzufriedenen“ Agenten starten einen Entscheidungsprozess („entscheidend“), ein hoher Anteil dieser erlangt während der Informationsphase Kenntnis über Wärmepumpen („wissend“) und wäre auch in der Lage, diese zu finanzieren („finanzierbar“). Einige wenige Agenten halten diese Heiztechnologie für zu riskant (nicht „akzeptiert“). Sichtbar ist weiterhin, dass in der Phase, in der sie die Eigenschaften von Wärmepumpen mit alternativen Heizsystemen bzgl. ihrer Präferenzen vergleichen („favorisiert“), im Baseline-Szenario fast die Hälfte der Entscheider sich für eine Alternative entscheidet. Vermehrte Energieberatung durch entsprechende Anreize führt jedoch zu präziserem Wissen über die Eigenschaften der Wärmepumpe und infolgedessen dazu, dass sich nur noch ein Viertel für ein alternatives Heizsystem entscheidet.

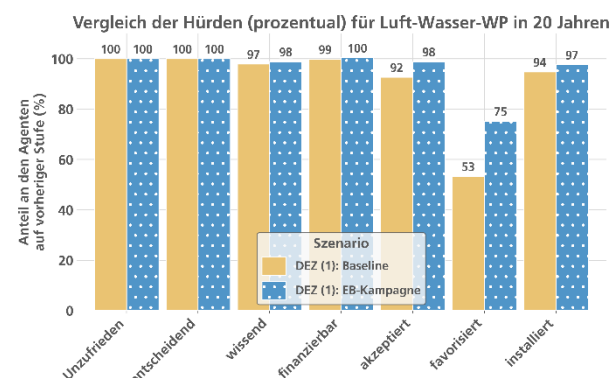


Abb. 6: Hürden der Investitionsentscheidung für Luft-Wasser-Wärmepumpen im Vergleich zwischen Baseline und Maßnahmenzenario Energieberatung für die dezentrale Versorgungsvariante (DEZ). Erläuterung im Text

### 3. Ergebnisse

Die mit den beschriebenen Methoden erzielten Ergebnisse sind vielfältig und reichen von den konkreten Beiträgen zum Partizipationsprozess der Wärmeplanung vor Ort in Kiel über Erfahrungen mit dem Konzept des Decision Workshops bis zu Erkenntnissen zu den einzelnen methodischen Bausteinen. Hier möchten wir die erzielten Ergebnisse als Erfahrungsbericht darstellen und als ausgewählte, gelernte Lektionen formulieren.

#### Lektion 1: Decision Workshop und Kriterien

Der Decision Workshop bildet die Klammer um den multimethodischen Ansatz zur faktenbasierten, transparenten, interaktiven und konsensorientierten Entscheidungsfindung. Erforderlich ist eine vorgelagerte Definition der

Bewertungskriterien, die sich als kritische Grundlage des Prozesses herausstellte und einen erheblichen Teil der Entwicklungsarbeit in Anspruch nahm. Hier ist eine gute Balance zwischen Übersichtlichkeit und Vollständigkeit geboten. Die Zahl der Kriterien sollte klein sein, um den Aufwand der Gewichtung gering zu halten und überschaubare Visualisierungen der Bewertungen zu ermöglichen. Andererseits sollen sie möglichst viele Aspekte abdecken und im Sinne einer aussagekräftigen Gewichtung gut voneinander abgrenzbar sein.

Während der Diskussion der integrierten Bewertungsergebnisse kommt es zu Nachfragen der Stakeholder, wenn bestimmte Ergebnisse den persönlichen Erwartungen widersprechen. Zentral war hier der Ansatz, die Zusammensetzung einer durchschnittlichen Stakeholdergruppenbewertung durch die Bandbreite der individuellen Gewichtungen erklären zu können. Auch treten in dieser Phase Anfragen an die zuvor geleistete Bewertung der Versorgungsvarianten auf, die die anwesenden Expert\*innen beantwortet haben.

## Lektion 2: Dialogwerkzeug

Das interaktive Visualisierungswerkzeug wurde im Rahmen eines Decision Workshops unter realen Bedingungen getestet. Vier Schlüsselgruppen – Stadtverwaltung, Wärmelieferanten, Installationsunternehmen und Bürger\*innen – nahmen teil. Das Dashboard wurde zentral präsentiert, während die Teilnehmenden auf ihren Smartphones einen Fragebogen ausfüllten. Im Vordergrund stand die Visualisierung von Gruppenunterschieden bei Gewichtungen und deren Auswirkungen auf die aggregierte Bewertung verschiedener Versorgungsoptionen.

Das Werkzeug diente als Ausgangsbasis für transparente Diskussionen zu Zielkonflikten, wie z. B. zwischen ökologischen Zielen und wirtschaftlichen Aufwänden. Missverständnisse hinsichtlich Bewertungsgrundlagen oder Systemgrenzen konnten gemeinsam geklärt werden, in manchen Fällen änderten Teilnehmende nach der Visualisierung sogar ihre ursprüngliche Präferenz. Das Format wurde insgesamt positiv bewertet: Die Möglichkeit zur gemeinsamen und interaktiven Erkundung komplexer Zusammenhänge wurde als spannend, hilfreich und erkenntnisreich beschrieben. Einzelne Teilnehmende fühlten sich jedoch von der Datenfülle überfordert oder empfanden einige Visualisierungen als schwer verständlich. Als Weiterentwicklung des Werkzeugs wird empfohlen, die Detailtiefe der im Prozess bereitgestellten Informationen erst auf Nachfrage zu erhöhen. Einzelheiten hierzu sind an andere Stelle zu finden [2].

## Lektion 3: Agentenbasierte Modellierung

Der Einsatz eines agentenbasierten Modells zur Dekomposition des Entscheidungsprozesses der Gebäudebesitzer eröffnete die Möglichkeit, potenziell wirksame Maßnahmen zu identifizieren. Insbesondere erwiesen sich Maßnahmen, die auf eine Verbesserung der Einstellung gegenüber Wärmepumpen abzielen, als effektiv. Diese Einstellung kann sowohl durch eine Erhöhung der Qualität und Verfügbarkeit von Informationen (wie die Konsultationen von Energieberater\*innen gezeigt haben) als auch durch die Verbesserung der relativen Wettbewerbsvorteile von Wärmepumpen gegenüber anderen Optionen (z. B. Senkung der Kosten oder Verkürzung der Installationszeit) gefördert werden.

Am Ende des Prozesses haben die Verantwortlichen, in der Regel zunächst die Vertreter\*innen der Kommune,

ein Bild zu präferierten Versorgungsvarianten und wirkungsvollen, flankierenden Maßnahmen und können dieses in den Umsetzungsprozess der Kommunalen Wärmeplanung einfließen lassen.

Eine mögliche Verbesserung im Hinblick auf den Einsatz agentenbasierter Modelle besteht in der Erprobung von Entwicklungsvarianten in Echtzeit, direkt während der Veranstaltung. Dies würde ermöglichen, neue Informationen zu berücksichtigen und potenziell neue, zum jeweiligen Zeitpunkt relevante Szenarien unmittelbar zu testen. Zudem würde dadurch der Bedarf an einer detaillierten und umfassenden Vorbereitung der Szenarien sowie an einem Modelllauf vor der Veranstaltung verringert.

## 4. Diskussion

Der interaktive Entscheidungsprozess unter Einbezug der Stakeholder im Rahmen des Decision Workshops führt zunächst zur Identifikation der unter den gewählten Kriterien besten Versorgungsvarianten. Der simulationsgestützte Ansatz erlaubt dabei explizit, Diskrepanzen zwischen Planung und erwarteter Umsetzung durch Gebäudeeigentümer\*innen aufzudecken. Durch die differenzierte Bewertung nach Kriterien kann die Diskussion auf einer informellen, faktenbasierten Ebene geführt werden. Stakeholder sind in der Lage, ihre Perspektiven auszutauschen und gegenseitiges Verständnis zu erzeugen.

Für die kommunalen Entscheidungsträger\*innen bietet der Prozess Einblicke in Sichtweisen und Präferenzen der verschiedenen Stakeholdergruppen. Es werden nicht nur geeignete Maßnahmen zur Verbesserung von Wärmeversorgungsvarianten erarbeitet, sondern diese auch differenziert bewertet.

Ein wichtiger Vorteil des Decision Workshop ist zudem die Selbstwirksamkeit der einbezogenen Akteur\*innen, indem sie Bedenken und Präferenzen einbringen und Maßnahmen vorschlagen können. Dadurch steigt die Bereitschaft, die resultierende Versorgungsvariante mitzutragen und damit der zur erwartenden Umsetzungsgrad.

Den aufgezeigten Vorteilen gegenüber steht ein teilweise hoher Aufwand für die Vorbereitung und Durchführung der Decision Workshops. Benötigte Datengrundlagen müssen geschaffen oder erschlossen werden, Versorgungsvarianten erarbeitet, Planungs- und Simulationswerkzeuge angepasst und kalibriert werden. Organisation, Moderation, wissenschaftliche Begleitung und Auswertung erfordern nicht zu unterschätzenden personellen Einsatz.

Der zeitliche Aufwand für die Stakeholder stellt eine Hürde für eine breitere Beteiligung dar und wirft Fragen in Hinblick auf die Repräsentativität der Teilnehmenden auf. Bereits die Notwendigkeit, einen gemeinsamen Termin mit professionellen Stakeholdern während ihrer Arbeitszeit und privaten Gebäudeeigentümer\*innen während ihrer Freizeit zu finden, stellt eine Herausforderung dar. Es besteht aufgrund der genannten Hürden das Risiko, dass sich teilnehmende Gebäudeeigentümer\*innen auf ohnehin sehr interessierte Bürger\*innen beschränken. Zusätzliche Anreize wie monetäre Kompensation für die aufgewendete Zeit sollten in Zukunft in Erwägung gezogen und deren Wirkung untersucht werden.

Weiterhin ist anzumerken, dass die Ergebnisse im Decision Workshop bisweilen keinerlei bindende Wirkung für die kommunalen Entscheidungsträger haben. Im weiteren Prozess können Zwänge entstehen, z. B. durch

gestiegenen Kostendruck, die einer Umsetzung der bevorzugten Lösung im Weg stehen.

Im Zentrum weiterführender Arbeiten steht die Übertragbarkeit des entwickelten Decision Workshop-Konzeptes auf andere Quartiere. Maßgeblich sind hier die vereinfachte Erhebung der benötigten Daten und die entsprechende Kalibrierung der Werkzeuge. Hinsichtlich der Bewertungskriterien wird erwartet, dass diese lediglich an lokale Gegebenheiten und beteiligte Stakeholder angepasst werden müssen, ein vollständiger Zielkriterienworkshop jedoch nicht notwendig ist. In diesem Zusammenhang bleibt auch zu eruieren, in welchen Quartieren der Einsatz eines Decision Workshops angebracht ist. Eine Rolle spielen hier die Anzahl und die Charakteristika der in Frage kommenden Versorgungsvarianten und die Heterogenität der Gebäudeeigentümer\*innen.

Ein weiteres Forschungsfeld ist die Weiterentwicklung geeigneter Darstellungen zu den Bewertungen der Versorgungsvarianten im Spannungsfeld zwischen Übersichtlichkeit und Erfassung einerseits sowie Vollständigkeit und Detailreichtum andererseits.

## 5. Zusammenfassung

Im Forschungsprojekt WAERMER wurde ein interaktiver Stakeholderbeteiligungsprozess zur Entscheidungsunterstützung für die Wärmeversorgung von Quartieren konzipiert und erprobt. Ein sorgfältig entwickelter Kriterienkatalog ermöglicht eine sachliche Bewertung und Diskussion von Versorgungsvarianten und ergänzenden Maßnahmen auf der Grundlage von Stakeholderpräferenzen. Ein interaktives Dialogwerkzeug visualisiert die Bewertungen, differenziert nach Kriterien sowie Stakeholdergruppen. Die Quantifizierung bestimmter Bewertungskriterien erfolgt durch das technische Planungstool EQ-City sowie das agentenbasierte Modell AHOIS, welches individuelle Investitionsentscheidungen der Gebäudeeigentümer\*innen detailliert simuliert. Dadurch können Ansatzpunkte für Zusatzmaßnahmen identifiziert sowie deren Wirksamkeit evaluiert werden.

Durch den informierten moderierten Diskurs im Decision Workshop wächst gegenseitiges Verständnis und die Stakeholder erfahren Wirksamkeit, welche letztlich die Akzeptanz dort entwickelter Lösungen unterstützt und ihre Umsetzung fördert. Dies rechtfertigt den Aufwand zur Durchführung des Prozesses, der in der Organisation, Datenaufbereitung, Anpassung der Werkzeuge und Durchführung der Decision Workshops liegt.

Ausstehende Forschungsarbeiten umfassen eine vereinfachte Übertragbarkeit auf weitere Quartiere, die Charakterisierung von Quartieren, in denen ein umfassender Stakeholderdialog angezeigt ist sowie die Weiterentwicklung des Dialogwerkzeuges.

## Danksagung

Die dargestellten Arbeiten wurden vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWE) im Projekt Waermewende im urbanen Gebäudebestand mit Hilfe interaktiver Entscheidungsraumanalyse (WAERMER) unter dem Förderkennzeichen 03EI5235A gefördert.

## Literatur

- [1] A. Kaiser, A. M. Cadenbach, und F. Krebs, „Stakeholder-informed multi-criteria decision-making for sustainable heat supply,“ *International Journal of Sustainable Energy Planning and Management* (Accepted for publication), 2025.
- [2] A. Kaiser, L. Voigtländer, und A. M. Cadenbach, „Real-time visualization to optimize stakeholder decision-making in heat supply planning on a district level (Conference presentation),“ *CISBAT 2025. International Conference on Built Environment Systems*, Lausanne, Switzerland, 2025.
- [3] A. M. Cadenbach, N. Abdurahmanovic, T. Anwarzai, A. Jahn, und A. Kaiser, „EQ-City - Pre-planning approach for an efficient and environmentally friendly heat supply of quarters and cities: The 18th International Symposium on District Heating and Cooling (DHC2023), Beijing, China,“ *Conference Proceedings (DHC2023)*, pp. 278–285, 2023.
- [4] AGFW und DVGW, „Praxisleitfaden Kommunale Wärmeplanung,“ Frankfurt am Main und Bonn, 2025. Zugriff am: 15. Oktober 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.agfw.de/kwp>
- [5] Institut Wohnen und Umwelt, *Deutsche Wohng Gebäudetypologie: Beispielhafte Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von typischen Wohngebäuden*; erarbeitet im Rahmen der EU-Projekte TABULA - „Typology approach for building stock energy assessment,“ EPISCOPE - „Energy performance indicator tracking schemes for the continuous optimisation of refurbishment processes in European housing stocks,“ 2nd ed. Darmstadt: IWU, 2015. [Online]. Verfügbar unter: [http://www.buildingtypology.eu/downloads/public/docs/brochure/DE\\_TABULA\\_TypologyBrochure\\_IWU.pdf](http://www.buildingtypology.eu/downloads/public/docs/brochure/DE_TABULA_TypologyBrochure_IWU.pdf)
- [6] E. Bonabeau, „Agent-based modeling: methods and techniques for simulating human systems,“ *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 99 Suppl 3, Suppl 3, pp. 7280–7287, 2002, doi: 10.1073/pnas.082080899.
- [7] I. Digel, S. Holzhauer, und F. Krebs, Eds., *Exploring Investment Decisions in Home Heating System Replacement with a Multi-stage Algorithm: An Agent-Based Model*: Springer, 2024.
- [8] S. Bamberg, „Changing environmentally harmful behaviors: A stage model of self-regulated behavioral change,“ *Journal of Environmental Psychology*, vol. 34, pp. 151–159, 2013, doi: 10.1016/j.jenvp.2013.01.002.
- [9] I. Ajzen, „The theory of planned behavior,“ *Organizational Behavior and Human Decision Processes*, vol. 50, no. 2, pp. 179–211, 1991, doi: 10.1016/0749-5978(91)90020-T.
- [10] J. Holzberg und A. Ernst, „Examining the willingness to adopt new heating systems of German homeowners,“ 2025.
- [11] I. Digel, S. Holzhauer, und F. Krebs, „Bridging the Planning-Implementation Gap in Residential Heating Transitions: A Combined Agent-Based and Participatory Modelling Approach,“ in *Social Simulation Conference 2025* (akzeptiert).

# Automatisierte Abgrenzung kleinräumiger Wärmeversorgungsgebiete unter Berücksichtigung der Klimaschutzstrategien von Wohnungsbaugesellschaften

Mareike FINCKEN <sup>1\*</sup>, Moritz ELBESHAUSEN <sup>1</sup>, Sascha KOCH <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institut für Angewandte Photogrammetrie und Geoinformatik (IAPG)

\* mareike.fincken@jade-hs.de

## Kurzfassung

Die Bedeutung der strategischen Energieplanung in Kommunen nimmt aufgrund der aktuellen Herausforderungen weiter zu und ist daher derzeit ein wichtiges Thema. Der zentrale Punkt der Wärmeplanung ist die Ausweisung von Wärmeversorgungsgebieten. Daher ist die Aufteilung von Kommunen z. B. für die Wärmeplanung relevant, damit Gebiete für Wärmenetze definiert werden können. Dieser Beitrag stellt zwei Ansätze zur automatisierten Aufteilung von Kommunen vor. Der erste Ansatz basiert auf Max-P-Clustering, der zweite auf Equal-Size-Spectral-Clustering. Beide Ansätze liefern nützliche Ergebnisse mit Vor- und Nachteilen für die Anwendung. Equal-Size-Spectral-Clustering definiert grundsätzlich kleinere Gebiete, während Max-P-Clustering räumlich stärker begrenzte Gebiete definiert. Wohnungsbaugesellschaften profitieren von den Ergebnissen für ihre Vorabplanung von Machbarkeitsstudien.

## Schlagworte

Clustering; Kommunale Wärmeplanung; Parametrisierbarkeit; Urban Heat Planning Units

## 1. Einleitung

Für die Transformation der Wärmeversorgung in Deutschland müssen zur Erreichung des gesetzten Ziels der Treibhausgasneutralität bis 2045 Bereiche für mögliche Technologiewechsel definiert werden [1]. Mögliche Technologien für die Transformation sind beispielsweise Wärmepumpen und Wärmenetze [2]. Gemäß dem Gesetz für die Wärmeplanung und zur Dekarbonisierung der Wärmenetze (WPG) müssen bis 2026 Wärmepläne für deutsche Städte und bis 2028 für kleinere Gemeinden erstellt werden. Damit wird ein Instrument zur strategischen Planung der Wärmewende auf lokaler Ebene unter Einbeziehung von Akteuren wie Wohnungsbaugesellschaften, die wichtige Akteure bei der Umsetzung der Wärmewende sind, eingeführt. Ein Wärmeplan für eine Gemeinde beschreibt insbesondere Wärmeversorgungsgebiete, um aufzuzeigen, welche Art der Wärmeversorgung für Gebiete einer Gemeinde geeignet ist.

Dieser Artikel beschreibt zwei Möglichkeiten, wie diese Wärmeversorgungsgebiete bestimmt werden können, wobei die Besonderheit darin besteht, dass eine kleinteilige Verteilung angestrebt wird. Zunächst werden die theoretischen Grundlagen zweier Clustering-Algorithmen beschrieben. Anschließend folgt eine Erläuterung des Clustering-Prozesses, unterteilt in die verwendeten Daten, die Datenvorverarbeitung und die beiden Clustering-Methoden. In diesem Kapitel wird der aktuelle Arbeitsstand des Algorithmus mit dem vorherigen Arbeitsstand verglichen und die Neuerungen aufgezeigt. Die Ergebnisse werden in Abschnitt 3 vorgestellt und bewertet.

Zusätzlich erfolgt in Abschnitt 3 eine Einführung in die Visualisierung der Ergebnisse und eine Darstellung des aktuellen Standes der Visualisierung. Darauf folgt eine Diskussion mit einem inkludierten Ausblick. Der Artikel schließt mit einer Zusammenfassung aller zuvor genannten Punkte ab. Ein ähnlicher Ansatz wie der hier vorgestellte ist die Klassifizierung von städtischen Energieeinheiten unter Verwendung geografischer Informationssysteme [3].

## 2. Material und Methoden

Im Rahmen des Projektes werden zwei Algorithmen verglichen. Beide Algorithmen werden zunächst vorgestellt, daraufhin werden die Anforderungen beschrieben, die Datengrundlage genannt und der Ablauf des Clusterings erläutert. Die Idee des Clusterings basiert auf der Trennung von Gebieten unabhängig von Straßenbegrenzungen. Ein Beispiel für eine Abgrenzung von Gebieten anhand von Straßen befindet sich in Abb. 1.

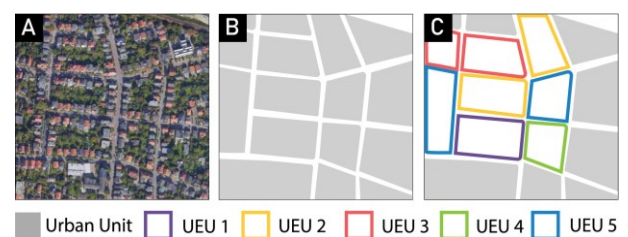


Abb. 1: Aufteilung eines Gebietes in Urban Energy Units [3]

## 2.1 Equal-Size Spectral Clustering

Trotz der Vielzahl verfügbarer Clustering-Methoden erzeugen viele Ansätze Cluster mit stark variierenden Größen. Für die Planung und Umsetzung eines Wärmeleitungsdesigns sind jedoch Cluster von möglichst einheitlicher Größe erforderlich. Das gleichgroße spektrale Clustering stellt sicher, dass die resultierenden Partitionen eine ähnliche Anzahl an Datenpunkten enthalten. Ein weiterer Vorteil dieser Methode besteht darin, dass sie keine separaten Ausreißerklassen bildet. Stattdessen werden Ausreißer demjenigen Cluster zugeordnet, mit dem sie über die Graphmatrix verbunden sind [4].

Eine Herausforderung des gleichgroßen spektralen Clusterings liegt allerdings in seiner NP-Schwere, was bedeutet, dass der Algorithmus unter Umständen mit längeren Laufzeiten verbunden ist [5]. Der Ablauf der Methode lässt sich in drei Hauptschritte gliedern: Initialisierung, Berechnung der Nachbarn und Ausgleich der Clustergrößen.

### Initialisierung

Zu Beginn werden die Cluster mithilfe des spektralen Clustering-Algorithmus gebildet. Dieser basiert auf der spektralen Graphentheorie und stellt einen modernen Ansatz für das Clustering dar – insbesondere für die Aggregation räumlicher Daten. Die Eingabedaten liegen idealerweise als symmetrische Distanzmatrix vor, die den Koordinaten der Datenpunkte entspricht [6]. Obwohl der Algorithmus keine direkte Optimierung hinsichtlich spezifischer Dateneigenschaften (z. B. Wärmebedarf) vorsieht, können solche Informationen als Gewichtung in die Distanzmatrix integriert werden.

Der Algorithmus erstellt zunächst einen Affinitätsgraphen, in dem jeder Datenpunkt als Knoten dargestellt wird. Aus diesem Graphen wird eine Adjazenzmatrix abgeleitet, die wiederum zur Berechnung der Laplace-Matrix und der Eigenvektoren benötigt wird. Zwei Parameter sind für die Cluster-Initialisierung von zentraler Bedeutung:

- *nclusters* – bestimmt die gewünschte Anzahl der Cluster,
- *nneighbors* – legt fest, wie viele Nachbarn pro Punkt berücksichtigt werden.

Zur Optimierung der Clusterzuordnung wird anschließend der K-Means-Algorithmus eingesetzt, der iterativ so lange ausgeführt wird, bis jeder Punkt einem endgültigen Cluster zugeordnet ist [7].

### Berechnung der Nachbarn

Nachdem die anfänglichen Cluster gebildet wurden, erfolgt im zweiten Schritt die Bestimmung der Nachbarn jedes Clusters. Dieser Schritt ist notwendig, um in der anschließenden Phase Datenpunkte zwischen benachbarten Clustern austauschen zu können [6].

### Ausgleich der Punkte in den Clustern

Im letzten Schritt werden die Datenpunkte zwischen den Clustern ausgeglichen, sodass größere Cluster Punkte an kleinere benachbarte Cluster abgeben. Ziel ist es, alle Cluster möglichst gleich groß zu gestalten. Die angestrebte Clustergröße ergibt sich aus der Division der Gesamtzahl der Datenpunkte durch die Anzahl der Cluster.

Der Parameter *Equity Fraction* steuert dabei, wie stark die Gleichverteilung berücksichtigt wird: Ein Wert von **0** belässt die ursprüngliche Clusterstruktur unverändert,

während ein Wert von **1** sicherstellt, dass alle Cluster nahezu identische Punktzahlen aufweisen [6].

## 2.2 Max-P Clustering

Wie im vorherigen Abschnitt erläutert, sind die Definition der Nachbarschaft und die Bestimmung der gewünschten Clusterregionen für das gleichmäßige Spektral-Clustering von zentraler Bedeutung. Eine der größten Herausforderungen besteht darin, die optimale Anzahl der Nachbarn und Cluster festzulegen. Verfahren, die Nachbarschaften ohne spezifische Parameter abgrenzen, zeigen häufig mangelnde räumliche Kohärenz oder führen zu voneinander getrennten bzw. überlappenden Regionen [8].

Eine vielversprechende Alternative stellt die Max-P-Regionalisierung dar. Dabei wird der geografische Raum unter Berücksichtigung bestimmter Benutzerbeschränkungen in homogene und räumlich zusammenhängende Nachbarschaften unterteilt. Die Regionen werden dabei so lange erweitert, bis die festgelegten Bedingungen erfüllt sind, wodurch eine maximale Anzahl an Regionen entsteht. Somit ist es nicht erforderlich, die Anzahl der Cluster oder Nachbarn im Voraus festzulegen.

Ein weiterer Vorteil der Max-P-Regionalisierung liegt darin, dass sie die Ungleichheit zwischen den Regionen minimiert: Mit steigendem p-Wert verringert sich die Anzahl der Gebiete pro Region, was dem Anwender mehr Flexibilität und Kontrolle ermöglicht [9]. Allerdings leidet diese Methode unter Skalierbarkeitsproblemen, da selbst mittelgroße Datensätze nur eingeschränkt effizient verarbeitet werden können. Aufgrund der NP-Schwere des Algorithmus ist es schwierig, in polynomieller Zeit eine optimale Lösung zu finden [8].

Trotz dieser Einschränkungen findet die Max-P-Regionalisierung in zahlreichen Bereichen praktische Anwendung – etwa in der Epidemianalyse, der Klassifizierung von Wetterdaten oder im räumlichen Crowdsourcing [9]. Ihr herausragendes Merkmal ist die endogene Bestimmung der endgültigen Anzahl von Regionen, die Minimierung interregionaler Heterogenität sowie die Sicherung räumlicher Kohärenz innerhalb jeder Region.

Der Algorithmus der Max-P-Regionalisierung gliedert sich in drei Hauptphasen: Wachstumsphase, Enklavenzuweisung und Optimierungsphase [10].

### Wachstumsphase

Zu Beginn werden alle Eingabedaten – im vorliegenden Fall die Flurstücke – als *nicht zugewiesen* markiert. Der Algorithmus wählt anschließend zufällig ein Flurstück aus, das als Keimgebiet für eine neue Wachstumsregion dient. Benachbarte, noch nicht zugewiesene Flurstücke werden nach und nach hinzugefügt, bis ein vorab definierter Schwellenwert überschritten wird. Die Auswahl benachbarter Gebiete erfolgt nach bestimmten Kriterien, beispielsweise der räumlichen Distanz oder Ähnlichkeit im Datensatz. Dieser Prozess wird mehrfach wiederholt, wobei die Region mit den besten Ergebnissen in Bezug auf die definierten Kriterien oder die maximale Flurstückanzahl beibehalten wird [10].

### Enklavenzuweisung

Flurstücke, die vollständig von einer Region umschlossen sind, ihr jedoch nicht zugeordnet werden können, werden als Enklaven bezeichnet. Um räumliche Lücken zu vermeiden, werden diese Gebiete in dieser Phase

bestehenden Regionen zugewiesen. Die Zuordnung erfolgt anhand einer Ähnlichkeitsmessung auf Basis definierter Kriterien, mit dem Ziel, die Heterogenität innerhalb der Regionen zu minimieren [10].

### Optimierungsphase

In der abschließenden Phase wird die Homogenität der Regionen mithilfe eines lokalen Suchalgorithmus verbessert. Dabei werden Flurstücke zwischen benachbarten Regionen verschoben, ausgetauscht oder Regionen zusammengeführt, sofern dadurch das Bewertungskriterium optimiert wird. Die vom Benutzer vorgegebenen Randbedingungen dürfen dabei nicht verletzt werden. Eine Änderung wird nur dann akzeptiert, wenn sie zu einer Verbesserung der aktuellen Lösung führt [9].

Nach jeder Optimierungsrunde werden neue Regionen gebildet, die erneut alle drei beschriebenen Phasen durchlaufen. Dieser Prozess wiederholt sich, bis allen Flurstücken eine Region eindeutig zugeordnet wurde [10].

### 2.3 Anforderungen an den Algorithmus

Ein Ziel ist, die Clusteringverfahren für die Planung und Umsetzung von Klimaschutzstrategien von Wohnungsbauengesellschaften anzuwenden. Somit wurden die speziellen Anforderungen beim Anwendungspartner GSG OLDENBURG, einer Wohnungsbauengesellschaft, erhoben. Die Anforderungen umfassen:

- Separate Eingabe von Daten des Anwendungspartners, zum Beispiel Gasverbräuche,
- Parametrisierbarkeit der Gewichtungen des Clustering,
- Auswahl des Verfahrens,
- Wahl des Ausgabeformats und
- automatisierte Berechnung von Qualitätsparametern – hierzu zählen: Wärmelinienichte, räumliche Nähe, summierter Wärmebedarf/verbrauch, mittlerer Wärmebedarf, Anzahl Gebäude pro Cluster.

### 2.4 Datengrundlage

Die verwendeten Daten für das Clustering umfassen:

- Flurstücksinformationen des Landesamtes für Geoinformation und Landesvermessung Niedersachsen (LGLN),
- Gebäudeinformationen des LGLN,
- tatsächliche Nutzung des LGLN,
- Gemeindegeometrie des LGLN,
- berechnete Wärmebedarfe der DBI Gas- und Umwelttechnik GmbH und
- tatsächliche Verbräuche von Nutzern des Algorithmus

### 2.5 Ablauf

Der Prozess des Clustering beginnt mit der Datenvorverarbeitung. Hier werden alle Straßenflurstücke aus dem Datensatz der Flurstücke entfernt. Danach werden Flurstücke ohne Wohnbauflächen entfernt. Das Gemeindegebiet wird an Strukturen wie Flüssen, Bahnstrecken o. ä. getrennt, da eine Zusammenlegung der Flächen über diese Trennungen nicht zweckdienlich wäre. Zum Beispiel werden keine Nahwärmenetze auf zwei Seiten eines Flusses verlegt. Um Siedlungsgebiete von dünn besiedelten Gebieten zu unterscheiden, werden diese durch die Anwendung des DBSCAN-Algorithmus ermittelt. Für alle Gebäude in einem DBSCAN-Gebiet werden die euklidische und die Netzwerkdistanzen von jedem zu jedem

Gebäude berechnet. Ein Beispiel für eine solche Distanzmatrix befindet sich in Tab. 1. Zusätzlich zu den Distanzmatrizen werden Differenzmatrizen für die Straßenabschnittszugehörigkeit und die Wärmebedarfe berechnet. Eine 1 bedeutet Gleichheit und eine 0 Ungleichheit. Im letzten Schritt wird die Gewichtungsmatrix aus den vorherigen Matrizen und den vorgegebenen Gewichten berechnet, Sie ist der Hauptteil für die Auswahl der Flurstücke im Clustering. Im Folgenden werden die Flurstücke gemäß des zuvor beschriebenen Ablaufes für die einzelnen Algorithmen den Gebieten zugeordnet. Abschließend erhält man eine Übersicht über die Cluster, die zugehörigen Gebäude und die Qualitätsparameter [11].

Tab. 1: Beispielhafte Distanzmatrix

Punkt	1	2	3
1	0 m	1.3 m	2.4 m
2	1.3 m	0 m	0.65 m
3	2.4 m	0.65 m	0 m

Der grundsätzliche Ablauf der vorherigen Version des Clustering [11], bleibt auch in der aktuellen Version erhalten. Einige Funktionen innerhalb des Algorithmus wurden verändert oder neu hinzugefügt. So können mittlerweile eigene Verbrauchsdaten von Nutzern eingegeben werden. In der vorherigen Version war dies nur mit den Wärmebedarfen möglich. Die Zuordnung der Straßen erfolgt mittlerweile auf einem anderen Weg. In der vorherigen Version wurde die Straßenzugehörigkeit über den Straßennamen ermittelt. In der aktuellen Version wird es durch Straßenabschnitte abgebildet. Hierzu werden zunächst die Straßenabschnitte gebildet, indem die Straßen an Kreuzungen getrennt werden. Der Abschnitt zwischen zwei Kreuzungen ist ein Straßenabschnitt. Daraufhin wird jedes Gebäude dem nächstgelegenen Straßenabschnitt zugeordnet.

### 3. Ergebnisse

In Abb. 2 sind die Ergebnisse des Max-P Clustering visualisiert, in Abb. 3 die des Equal-Size Spektral Clustering. Anhand der beiden Abbildungen kann man die Unterschiede in der räumlichen Verteilung der Cluster erkennen. Die Cluster des Equal-Size Clustering sind kleiner und haben nicht die räumliche Kompaktheit der Max-P-Cluster. Dafür besitzen sie eine ähnliche Anzahl an Flurstücken innerhalb eines Clusters. Im südlichen Bereich von Abb. 2 sieht man deutlich, wie die Anzahl der Flurstücke im Cluster beim Max-P Clustering variieren kann. Ausreißer in der flächenhaften Größe entstehen bei beiden Clusteringverfahren durch große Flurstücke.

Die Ergebnisse des aktuellen Algorithmus unterscheiden sich von den älteren Ergebnissen. Durch die Änderung der Straßenzugehörigkeit neigt der Algorithmus nicht mehr dazu sehr langgezogene Cluster anhand einer Straße zu bilden. Dies geschah oft an langen Hauptstraßen. Durch das Einfügen eigener Daten werden die Ergebnisse des Clustering genauer. Die berechneten Wärmebedarfe sind nur eine Annäherung. Durch die Verbrauchsdaten sind Metriken wie die Wärmelinienichte und die summierten Wärmebedarfe genauer.

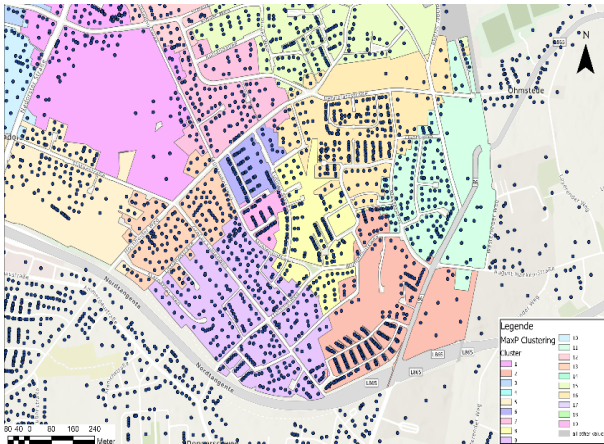


Abb. 2: Ergebnisse des Max-P Clusterings

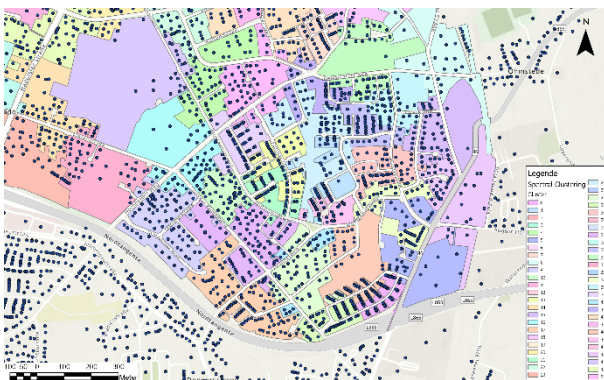


Abb. 3: Ergebnisse des Equal-Size Spectral Clusterings

In Tab. 2 sind die durchschnittlichen Qualitätsparameter der Clusteringalgorithmen dargestellt. Auffällig ist die geringe Wärmeliniedichte, diese entsteht durch die oben bereits angesprochenen Ausreißer der Clustergrößen durch große Flurstücke. Nicht jedes Cluster eignet sich für ein Wärmenetz und hat eine hohe Wärmeliniedichte. Als Qualitätsmetrik für einzelne Cluster ist die Wärmeliniedichte jedoch sehr gut geeignet. Die räumliche Dichte ergibt sich aus den mittleren Distanzen zwischen den Gebäuden in einem Cluster. Sie ist mit 123 m und 112 m recht ähnlich. Cluster mit einer geringeren räumlichen Dichte sind eher dezentral, eine höhere Dichte weist auf Zentralität hin. Die durchschnittliche Differenz im Wärmebedarf zeigt, wie ähnlich die Gebäude zueinander sind. Der Wert ist beim Equal-Size Spektral Clustering deutlich geringer, da die Cluster oftmals kleiner sind und weniger Ausreißer Gebäude beinhalten. Bei der Dauer des Clusterings zeigt sich der deutliche Vorteil des Equal-Size Spektral Clusterings, da der Max-P-Algorithmus die neunfache Zeit benötigt und somit für die Anwender schwierig in der Handhabung ist. Die Weiterentwicklung des Algorithmus hat bisher keine Auswirkungen auf die Laufzeit. Dies wird im folgenden Projektverlauf weiter untersucht.

Tab. 2: Qualitätsmetriken des Clusterings als Durchschnitt über alle Cluster

Metrik	Equal-Size	Max-P	Einheit
Durchschnittliche Wärmeliniedichte	1254,67	1569,48	kwh/m
Räumliche Dichte	123	112	m
Durchschnittliche Wärmebedarfsdifferenz	98459	132604	kwh
Dauer des Clusterings	10	90	min

Damit die Ergebnisse des Clusterings direkt betrachtet und analysiert werden können, werden sie in der Business Intelligence (BI)- Software Tableau dargestellt. Gemäß dem Konzept der GeoVisual Analytics [12] können die Ergebnisse so interaktiv dargestellt werden. Die Darstellung erfolgt über eine Kartendarstellung und daneben Übersichten zum Beispiel in Form von Diagrammen. In der Anwendung können die Cluster anhand der Qualitätsmetriken eingefärbt werden, es können Gesamtübersichten über alle Cluster oder nähere Informationen zu den einzelnen Clustern angezeigt werden. Der erste Prototyp der Darstellungsanwendung wurde dem Anwendungspartner vorgestellt und positiv bewertet. Die verschiedenen Darstellungsarten wurden als sehr gut für die direkte Übersichtlichkeit genannt. So kann ein Planer direkt auf den ersten Blick sehen, welches Cluster sich für eine zentrale Wärmeversorgung eignet. Ein Beispiel der Darstellung in der Karte sehen sie in Abb. 4. Dargestellt ist ein Beispielgebiet, eingefärbt gemäß der Anzahl der Gebäude pro Cluster. In blau sieht man die Cluster mit einer Gebäudeanzahl kleiner 16 Gebäuden. Die orangenen Cluster haben eine größere Anzahl. Die Zahl ist für den Anwendungspartner relevant, da dies ein Kriterium der Bundesförderung für effiziente Wärmenetze (BEW) ist und dies für Förderanträge relevant ist. Im oberen Bereich der Abbildung kann zwischen den verschiedenen Darstellungsebenen gewechselt werden. Zu jedem Cluster werden beim Hovern über das Cluster zusätzliche Informationen angezeigt. Wohnungsbaugesellschaften werden die sich in ihrem Eigentum befindlichen Gebäude angezeigt. Zusätzliche Informationen hierzu, wie der reale Gas-Verbrauch, können ebenfalls angezeigt werden, wenn sie übermittelt werden.

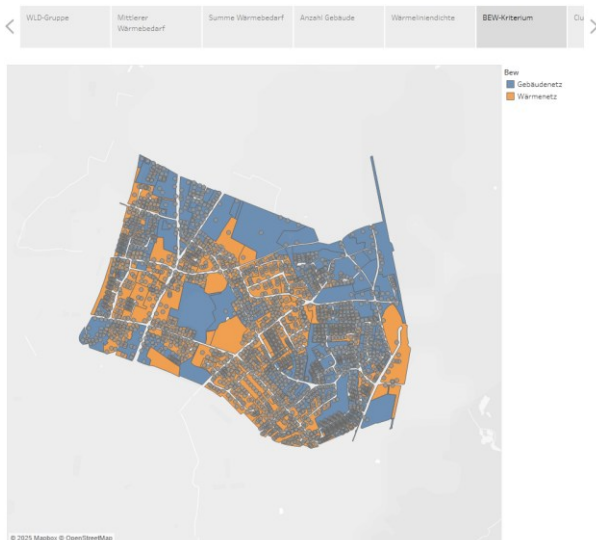


Abb. 4: Darstellung der Clusteringergebnisse der Anzahl der Gebäude pro Cluster

#### 4. Diskussion

Das Feedback des Anwendungspartners und weiterer Beteiligten sind für die Weiterentwicklung der Algorithmen von großer Bedeutung. Auf Grundlage dieses Feedbacks kann die Reduzierung der Clustergröße mit dem Max-P-Algorithmus aufgenommen werden. Dies kann durch Anpassung der Eingabeparameter erfolgen. Dazu müsste evaluiert werden, welcher Parameterwert zu einem zufriedenstellenden Ergebnis führt. Die Kritik an der räumlichen Kompaktheit der Cluster des Equal-Size Spektral Clusterings kann ebenfalls durch Anpassung der Parameter erreicht werden. Auch hier müsste ein optimaler Wert evaluiert werden. Um große Flurstücke auszuschließen, könnte ein weiterer Schritt in der Datenvorverarbeitung beim Filtern der Flurstücke vorgenommen werden. Der Ausschluss von tatsächlichen Nutzungsflächen, die nicht der Wohnbaufläche entsprechen, hat die Ergebnisse im Vergleich zur vorherigen Version deutlich verbessert. Die Flurstücke könnten anhand der Distanzwerte in der Distanzmatrix gefiltert werden. Darüber hinaus sollte eine Laufzeitverbesserung des Max-P-Clusterings untersucht werden. Die Laufzeit ist zu lang für eine On-the-fly-Berechnung zur Analyse verschiedener Gebiete.

Zusätzlich sollen Informationen wie das Gebäudealter verwendet werden, diese sind jedoch nicht vorhanden. Bei der Verwendung des tatsächlichen Gasverbrauchs muss in der Darstellung auf den Datenschutz geachtet werden. Dies ist im Rahmen der Visualisierung in Tableau relevant. Die geforderten Ausgabeformate lassen sich gut für die Übertragung in eigene Systeme des Anwendungspartners nutzen. Die berechneten Qualitätsparameter geben dem Anwendungspartner direkt Aufschluss darauf, wo sich gewisse Technologien eignen würden und in welchen Gebieten sich die weitere Planung eines Wärmenetzes lohnt. Dies erleichtert den Prozess der Auswahl von möglichen Gebieten für genauere Planungen enorm. Weitere Personengruppen können von der Visualisierungsanwendung profitieren. Im Rahmen der kommunalen Wärmeplanung können Planer dort ebenfalls direkt Gebiete für die Wärmeversorgung definieren oder für weitere Planungen auswählen.

Die Visualisierung der Ergebnisse erfolgt bisher nicht automatisiert. In Zukunft sollen die Ergebnisse automatisch

in ein Data Warehouse übernommen werden, damit eine Aktualisierung der Visualisierung automatisiert erfolgen kann. Die Interaktivität des Dashboards soll erweitert werden, die Nutzer sollen die Möglichkeit bekommen weitere Analysen mit den gebildeten Clustern durchzuführen. Zum Beispiel könnten Nutzer eigene Daten hochladen und diese basierend auf den Clustern auswerten lassen.

#### 5. Zusammenfassung

Zusätzlich zu den bestehenden räumlichen Referenzebenen, wie den Baublöcken und Rastern [13], stehen nun neue Referenzebenen für die Planung zur Verfügung. Eine Wohnungsbaugesellschaft oder ein beauftragtes Ingenieurbüro kann die erstellten Cluster nutzen, um beispielsweise weitere Gebäude an seine bestehenden Wärmenetze anzuschließen und die CO<sub>2</sub>-Bilanz zu verbessern. Der Algorithmus kann auch für andere Bereiche eingesetzt werden, beispielsweise um die kommunale Wärmeplanung für lokale Behörden durch Teilautomatisierungen zu vereinfachen.

Die Anforderungen an den in Abschnitt 2 vorgestellten Algorithmus sind noch nicht vollständig erfüllt. Eine der noch nicht erfüllten Anforderungen ist die Parametrisierbarkeit. Der Algorithmus muss derzeit noch manuell durch Anpassung des Quellcodes parametrisiert werden. Dies soll später über eine Schnittstelle oder eine Eingabe implementiert werden. Zusätzlich muss die Laufzeit des Algorithmus weiter verringert werden.

Die Visualisierung der Ergebnisse erfolgt aktuell nicht automatisiert, soll aber in Zukunft erweitert werden. Abschließend lässt sich das Clustering als gute Möglichkeit der Planungserweiterung zusammenfassen.

#### Danksagung

Das Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Forschung, Technologie und Raumfahrt im Rahmen der Förderrichtlinie „DATIpilot“ unter dem Förderkennzeichen 03DPS1196A gefördert.

#### Literatur

- [1] Bundesregierung, Gesetz für die Wärmeplanung und zur Dekarbonisierung der Wärmenetze (Wärmeplanungsgesetz - WPG): WPG, 2023.
- [2] Agora Energiewende, Die Energiewende in Deutschland: Stand der Dinge 2024 Rückblick auf die wesentlichen Entwicklungen sowie Ausblick auf 2025.
- [3] L. Blanco, A. Alhamwi, B. Schiricke und B. Hoffschmidt, „Data-driven classification of Urban Energy Units for district-level heating and electricity demand analysis,“ *Sustainable Cities and Society*, Jg. 101, S. 105075, 2024, doi: 10.1016/j.scs.2023.105075.
- [4] U. von Luxburg, „A tutorial on spectral clustering,“ *Stat Comput*, Jg. 17, Nr. 4, S. 395–416, 2007, doi: 10.1007/S11222-007-9033-Z.
- [5] K. Frederix und M. van Barel, „Sparse spectral clustering method based on the incomplete Cholesky decomposition,“ *Journal of Computational and Applied Mathematics*, Jg. 237, Nr. 1, S. 145–161, 2013, doi: 10.1016/j.cam.2012.07.019.
- [6] C. Barbosa. „Equal-size spectral clustering: A modification of this popular algorithm that builds clusters balanced in the number of points.“ Zugriff am: 1.

Oktober 2025. [Online.] Verfügbar unter: <https://medium.com/data-science/equal-size-spectral-clustering-cce65c6f9ba3>

- [7] R. Nayak und K. Luong, Multi-aspect Learning (242). Cham: Springer International Publishing, 2023.
- [8] R. Wei, S. Rey und E. Knaap, „Efficient regionalization for spatially explicit neighborhood delineation,“ *International Journal of Geographical Information Science*, Jg. 35, Nr. 1, S. 135–151, 2021, doi: 10.1080/13658816.2020.1759806.
- [9] H. Alrashid, Y. Liu und A. Magdy, „PAGE: Parallel Scalable Regionalization Framework,“ *ACM Trans. Spatial Algorithms Syst.*, Jg. 9, Nr. 3, S. 1–26, 2023, doi: 10.1145/3611011.
- [10] J. C. Duque, L. Anselin und S. J. Rey, „THE MAX-P-REGIONS PROBLEM\*,“ *Journal of Regional Science*, Jg. 52, Nr. 3, S. 397–419, 2012, doi: 10.1111/j.1467-9787.2011.00743.x.
- [11] M. Fincken, M. Elbeshausen und S. Koch, „An approach to partition municipalities through clustering in the context of heat planning,“ in *Geoinformatics and Data Analysis: Selected Proceedings of ICGDA 2025*, Nice, S. Bourennane, Hg., 2025.
- [12] M. Elbeshausen, M. Schnabel und S. Koch, „GeoVisual Analytics zur intuitiven Szenarioplanung im Kontext der geodatenbasierten Wärmeleitplanung,“ *AGIT Journal*, 2023, doi: 10.14627/537742008.
- [13] M. Schnabel, T. Gravenhorst, T. Belkot, F. Friebe, S. Erdmann und S. Koch, „Visual Data Discovery im Kontext der geodatenbasierten Wärmeleitplanung,“ *gis.Science*, Nr. 2, S. 63–74, 2022.

# Instrumente für die „Graue Zone“: die Entwicklung erneuerbarer Nahwärme im urbanen Bestand lokal fördern.

## Ein Screening des Forschungsstandes zur Governance der Wärmewende.

Winfried OSTHORST<sup>1\*</sup>, Christian RINNER<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Hochschule Bremen, Neustadtwall 30, 28199 Bremen

\* winfried.osthorst@hs-bremen.de

---

### Kurzfassung

Der Beitrag ist Teil des von der DBU geförderten Projekts „Urbane Anergienetze als Instrument der Wärmewende in Bremen“. Untersucht wird, welchen Beitrag kalte Nahwärme auf Basis flacher Geothermie in dicht bebauten Quartieren zu einer klimaneutralen und sozial gerechten Wärmeversorgung leisten kann. Auf Basis von Literatur- und Dokumentenanalyse sowie qualitativen Interviews werden Governance- und Förderinstrumente identifiziert. Zentrale Ergebnisse sind der Bedarf an langfristiger Investitionsabsicherung, koordinierter Projektentwicklung und rechtssicheren Ausschreibungen mit hohen Anforderungen an Gemeinwohl und den Einsatz erneuerbarer Energieträger, kooperative Betreibermodelle mit kommunaler Beteiligung sowie die aktive Mitwirkung kommunaler Gesellschaften an gemeinwohlorientierten Nahwärmenetzen.

### Schlagworte

Kalte Nahwärme; Klima-Governance; klimaneutrale Wärmeversorgung; Kommunalpolitik; Politikinstrumente; Umsetzung der Wärmeplanung; Wärmenetze

---

### 1. Einleitung

Den Ausgangspunkt für die Arbeit des Projektes bildet die Feststellung, dass ein Teil der dichter bebauten innerstädtischen Quartiere weder für konventionelle Fernwärmenetze noch für gebäudebezogene Wärmepumpen geeignet sein könnten und damit für diese Teile der Stadt die beiden entscheidenden Handlungsansätze der Wärmewende im Bereich der Wärmeversorgung nicht in Frage kommen würden. Diese räumlichen Konstellationen, in denen weder Fernwärme noch individuelle Wärmepumpen naheliegen, werden im Beitrag als „graue Zone“ bezeichnet. Der Bedarf an geeigneten Lösungsansätzen für diesen besonders kritischen Teil des Stadtgebietes wird ausdrücklich auch in dem zur Vorbereitung der Wärmeplanung von Bremen beauftragten Fachgutachten festgehalten [1]. Die aus bürgerschaftlichen Initiativen 2024 hervorgegangene Genossenschaft „ErdwärmeDich e.G.“ betreibt die Errichtung eines auf Erdwärme aus Bohrungen im öffentlichen Raum beruhenden „kalten“ Nahwärmenetzes im innerstädtischen Bereich (urbane Anergienetze). Dieser Ansatz kann für genau diese kritischen Teile des Gebäudebestandes einen wichtigen Beitrag zur Verwirklichung einer gesellschaftlich akzeptierten, sozial gerechten und an ambitionierten Klimaziele orientierten Wärmeversorgung leisten. Der Beitrag verknüpft ein allgemeines Governance-Screening mit der konkreten Situation in Bremen, insbesondere mit

dem bürgerschaftlich getragenen Projekt „ErdwärmeDich e.G.“.

Grundsätzlich benennen auch die grundlegende Forschung zur Wärmewende (exemplarisch: [2], [3]) und die Versorgungswirtschaft [4] „kalte Nahwärme“ ausdrücklich als ein potenziell bedeutsames Instrument zur erneuerbaren Wärmeversorgung im urbanen Raum. Auch die Rolle von Bürgerenergiegemeinschaften wird betont.

Mit Blick auf bürgerschaftlich betriebene Wärmenetze und die Umsetzung urbaner Anergienetze lassen sich aus dem Forschungsstand und der Situation in Bremen Herausforderungen benennen, die entsprechende Projekte zu bewältigen haben und für die geeignete Förderinstrumente zu entwickeln sind. Als ein wesentliches Element des Projektes wurde deshalb ein Screening des wissenschaftlichen und praktischen Diskussionsstandes zur Förderung bürgerschaftlicher Wärmeversorgung und „kalter Nahwärme“ vorgenommen.

Die Auslegung von kalten Nahwärmenetzen erfordert eine detaillierte Planung z. B. hinsichtlich der Dimensionierung des Netzes. Insbesondere in Bestandsquartieren ist die Umsetzung auf begrenztem Raum für den Leitungsbau und mit komplexer Abstimmung mit der bestehenden Infrastruktur herausfordernd. Entsprechende Genehmigungsverfahren (etwa zur Nutzung des öffentlichen Raumes, zur Gestaltung des Netzes sowie durch Vorgaben zur Nutzung von Geothermie-Sonden) verzögern den Ausbau. Obwohl kalte Nahwärme über den Lebenszyklus

betrachtet ökonomisch konkurrenzfähig sein kann [5], sind die Anfangsinvestitionen hoch und Förderzugänge (insbesondere BEW) anspruchsvoll. Gleichzeitig ist die Umsetzung der Projekte stark von der frühzeitigen Einbeziehung lokaler Akteure und Immobilieneigentümer\*innen zur Bildung von „Verantwortungsgemeinschaften“ abhängig. Der entscheidende Beitrag von Bürgerenergiegemeinschaften kann hier in der Entwicklung eines lokal angepassten und akzeptierten Projektzuschusses liegen. Allerdings müssen gemeinschaftliche Ansätze wie Genossenschaften gleichzeitig ehrenamtliches Engagement und das notwendige professionelle Management großer Infrastrukturprojekte gewährleisten. Gemeinschaftliche Projekte stehen und fallen mit dem Engagement Einzelner und der Fähigkeit, Begeisterung über die Planungsphase hinaus zu stützen. Die dauerhafte Bindung der Mitglieder zur Bewältigung der erheblichen Investitionen und der Umsetzung der Projekte ist herausfordernd. Zudem müssen Finanzierungsrisiken begrenzt und die Gemeinwohlorientierung gewahrt bleiben. Gemeinwohlorientierte Nahwärmenetze sind solche, die nicht primär auf kurzfristige Renditemaximierung einzelner privater Akteure zielen, sondern ökologische Zielsetzungen, langfristige Kostentransparenz und Bezahlbarkeit, eine faire Verteilung von Risiken und Nutzen sowie Möglichkeiten lokaler Mitbestimmung verbinden (vgl. [17]–[20], [23]).

Die erfolgreiche Integration von Bürgerprojekten in die kommunale Infrastrukturplanung wird dabei oft durch fehlende rechtliche und planerische Schnittstellen erschwert, während gleichzeitig der Erfolg von Bürgerenergiegemeinschaften stark vom Zugang zu Förderung und der Zusammenarbeit mit der lokalen Verwaltung abhängt. Hier wird besonders die kohärente Einbindung der bürgerschaftlich entwickelten Projekte in die kommunale Wärmeplanung betont.

Für kommunale Handlungsansätze in der „grauen Zone“ ergibt sich daraus die Notwendigkeit, sowohl technische, organisatorische als auch soziale und rechtliche Hemmnisse für kalte Nahwärmenetze und Bürgerenergiegemeinschaften systematisch zu adressieren. Instrumente müssen Beteiligungsstrukturen schaffen, regulatorische Hürden abbauen und innovative Geschäftsmodelle fördern.

Hier ist entscheidend, dass die Wärmewende als gesamtgesellschaftliche Transformation in das deutsche politische Mehrebenensystem eingebettet ist, in dem Bund, Länder und Kommunen mit unterschiedlichen Instrumenten und Kompetenzen mitwirken. Während der Bund den regulatorischen Rahmen gewährleistet und den maßgeblichen Teil der Fördermittel bereitstellt, sind die Länder und insbesondere die Kommunen einerseits für die Umsetzung und Planung entscheidend, bleiben andererseits aber auf übergeordnete Regelungen angewiesen. Mit Blick auf die Angewiesenheit der Kommunen – und der weiteren an der Umsetzung der Wärmewende beteiligten Akteure – auf langfristig stabile, rechtliche und finanzielle Rahmenbedingungen stellt die anhaltende Kontroverse in der politischen Gestaltung dieses Handlungsbereichs eine erhebliche Unsicherheit dar. Das aktuelle finanzpolitische Umfeld – insbesondere durch das Bundesverfassungsgerichtsurteil zur Schuldenbremse – verschärft die Herausforderungen auf Landes- und Kommunalebene zusätzlich.

Für den Bereich der Wärmeversorgung müssen der Umbau bestehender Wärmenetze z. B. hinsichtlich des Temperaturniveaus, die gesteuerte Verringerung der Erdgasversorgung sowie die Integration erneuerbarer Wärme-

quellen gewährleistet werden. Zu beachten ist, dass das Feld der klimaneutralen Wärmeversorgung innerhalb der Wärmewende zusätzlich an strategischer Relevanz gewonnen hat, da auf dem Feld der Gebäudeeffizienz ein grundlegender Konflikt zwischen ambitionierten Sanierungszielen zur Reduktion des Wärmeenergiebedarfs einerseits und ökonomischen, sozialen sowie wohnungspolitischen Anforderungen andererseits besteht. Für die Umgestaltung der Wärmeversorgung sind hohe Investitionen, angepasste Regulierungen und neue Betreiber- und Geschäftsmodelle erforderlich, während zugleich regulatorischer Handlungsbedarf für eine faire Kostenverteilung und den Verbraucherschutz besteht.

Auch die Entwicklung von Förderinstrumenten für die Wärmeversorgung in der „grauen Zone“ ist in diese Dynamik der Mehrebenenregulierung und in die skizzierten strukturellen und inhaltlichen Herausforderungen eingebettet. Die entscheidenden kommunalen Handlungsspielräume bestehen damit in den Bereichen der Unterstützung und Vernetzung, in der Nutzung planerischer Instrumente sowie der Entwicklung eigener Versorgungsstrukturen. In den Bereichen der finanziellen Förderung und der Entwicklung regulatorischer Rahmenbedingungen bleiben Kommunen weitgehend auf den Bund angewiesen; verzögerte und inkonsistente Regelungen können nur bedingt durch kommunale Aktivitäten ersetzt werden.

## 2. Material und Methoden

Methodisch basiert die Studie auf einer Literatur- und Dokumentenanalyse sowie auf der Durchführung leitfadengestützter qualitativer Interviews mit Schlüsselakteuren der Wärmeversorgung in Bremen sowie mit Expert\*innen der Gestaltung der Wärmewende in Deutschland und in Bremen.

Die Literatur- und Dokumentenanalyse umfasst wissenschaftliche Beiträge, Studien, Positionspapiere, Stellungnahmen, Praxisleitfäden und Fachgutachten zu den rechtlichen und förderpolitischen Rahmenbedingungen der Wärmewende (z. B. [9], [10], [16]–[20], [22], [23], [26], [26]). Die rechtlichen Instrumente (etwa Wärmeplanungsgesetz, BEW sowie Konzessions- und Vergaberecht) werden dabei nicht im Sinne einer umfassenden rechtsdogmatischen Kommentierung der Primärnormen untersucht, sondern aus einer Governance-Perspektive rekonstruiert, wie sie in Forschung, Politikpapieren und Praxisleitfäden diskutiert werden (vgl. u. a. [9], [10], [16]–[20]).

Die Interviews befassten sich mit den Handlungsorientierungen der Akteure des Wärmesektors in Bremen, den Entwicklungsbedingungen für „kalte Nahwärme“ in Bremen sowie den notwendigen kommunalen Rahmenseetzungen und der Unterstützung von Nahwärmeprojekten (zu den Grundlagen der angegebenen qualitativen Methoden: [6], zu Experteninterviews: [7], zur qualitativen Inhaltsanalyse: [8]).

## 3. Ergebnisse

### 3.1 Handlungsansätze im kommunalen Regulierungsrahmen

Kommunen und Länder stehen vor der Aufgabe, ihre planungs- und genehmigungsrechtlichen Kompetenzen gezielt einzusetzen, um den Ausbau innovativer und klimaneutraler Wärmenetze zu fördern. Diese Handlungsmöglichkeiten sind in die komplexe Regulierung auf Bundes- und EU-Ebene eingebettet, die sich im Zuge der klimapolitischen Zielsetzungen fortlaufend weiterentwickelt und

die kommunalen Gestaltungsspielräume beeinflusst [9], [10].

Wärmenetze unterliegen derzeit weder einem Konzessionswettbewerb noch einem regulierten Drittzugang. Die zentralen Instrumente der Bundesregierung zur Transformation der Wärmeversorgung sind das Wärmeplanungsgesetz (WPG) und die Bundesförderung für effiziente Wärmenetze (BEW) [10]. In der aktuellen Diskussion stehen Forderungen nach einer Öffnung der Wärmenetze für die Einspeisung und Durchleitung erneuerbarer Wärme sowie nach einer möglichen Ausschreibungspflicht [11], [8]. Zudem beeinflusst die Umsetzung der Konzessionsvergaberichtlinie RL2014/23/EU die rechtlichen Rahmenbedingungen. Kommunen regeln den Netzbetrieb in der Regel über Gestattungsverträge, die privaten Anbietern die Nutzung kommunaler Flächen ermöglichen [12]. Für Bremen ergibt sich hier die Möglichkeit, Gemeinwohl- und Nachhaltigkeitskriterien, etwa zu Preisgestaltung, Klimaschutz und Transparenz, in Gestattungsverträgen zu verankern und im Rahmen der kommunalen Wärmeplanung geeignete Quartiere für erneuerbare Nahwärme zu identifizieren.

Eine zentrale Herausforderung stellt die Vielzahl der Genehmigungsverfahren dar, insbesondere für kleinere Akteure wie bürgerschaftliche Wärmeinitiativen. Um Planungs- und Genehmigungsprozesse zu beschleunigen, bietet sich die Einführung eines zentralen Verfahrensmanagements nach dem Prinzip einer „One-Stop-Agency“ an. Solche Modelle sind aus der Wirtschaftsförderung bekannt und beinhalten zentrale Ansprechpartner\*innen, die alle relevanten Behörden koordinieren [13], [14], [15]. In Städten wie München und Mannheim werden vergleichbare Steuerungsgruppen bereits für den Wärmenetz ausbau eingesetzt. Die Interviews mit Bremer Verwaltungs- und Praxisakteuren unterstreichen, dass für Bremen die Einrichtung einer zentralen Projektlotusstelle sinnvoll wäre, die als „Single Point of Contact“ die Abstimmung zwischen Fachressorts und Förderstellen koordiniert und eng in die kommunale Wärmeplanung eingebunden ist.

Darüber hinaus sollten Kommunen ihre planungs- und baurechtlichen Instrumente, insbesondere die Bauleitplanung nach BauGB mit Flächennutzungs- und Bebauungsplänen, aktiv nutzen, um Flächen für Wärmenetzinfrastruktur zu sichern und fossile Energieträger in Neubaugebieten auszuschließen (vgl. [16]). Der Anschluss- und Benutzungszwang kann in geeigneten Gebieten wirtschaftliche Stabilität schaffen, muss jedoch sorgfältig abgewogen werden, um Akzeptanzprobleme zu vermeiden [17]. Für Bremen empfiehlt sich, ergänzend zur Steuerung über das Gebäudeenergiegesetz (GEG) kommunale Regelungen zu erlassen, die Gasanschlüsse in Neubauten untersagen, sowie eine verpflichtende Beratung durch die Klimaschutzagentur energiekonsens in frühen Planungsphasen einzuführen.

### 3.2 Handlungsansätze zur Finanzierungsförderung

Die Finanzierung von Wärmenetzen ist durch hohe Anfangsinvestitionen, lange Amortisationszeiten und strenge Kreditbedingungen geprägt. Besonders genossenschaftliche Projekte stoßen aufgrund ihrer begrenzten Kapitalbasis auf Schwierigkeiten bei der Kreditaufnahme [18], [19]. Mit der im September 2022 in Kraft getretenen Bundesförderung Effiziente Wärmenetze (BEW) steht ein zentrales Förderinstrument zur Verfügung, das Transformationspläne bzw. Machbarkeitsstudien sowie Investitionen in die Dekarbonisierung und Effizienzsteigerung von

Wärmenetzen mit Zuschüssen von bis zu 40 % der förderfähigen Kosten sowie ergänzenden Betriebskostenzuschüssen unterstützt. In der Literatur wird zugleich auf die befristete Ausgestaltung der BEW-Richtlinie, die begrenzte Haushaltsmittelausstattung und den hohen administrativen Aufwand der Antragsverfahren hingewiesen [20], [21], [22]. Eine Kombination von Investitionszuschüssen, Bürgschaften und zinsgünstigen KfW-Krediten gilt als besonders wirkungsvoll, um Projekte langfristig abzusichern [19], [21].

Für die oberflächennahe Geothermie sind spezifische Risikoinstrumente erforderlich, um technische und wirtschaftliche Risiken zu begrenzen [20]. Das Bürgschaftsprogramm Wärmenetze Schleswig-Holstein gilt hier als Vorbild und zeigt, dass Landesbürgschaften grundsätzlich als Instrument zur Verbesserung der Kreditkonditionen eingesetzt werden könnten [19], in der Praxis wurde es bisher jedoch nicht in Anspruch genommen. Kommunale Bürgschaften und Beteiligungen können ebenfalls zur Finanzierung beitragen, insbesondere im Rahmen genossenschaftlicher Organisationsformen [19]. Der Wegfall des KfW-Programms 432 zur Quartiersentwicklung hat eine Lücke bei der Konzeptförderung hinterlassen [23]; das Programm wurde inzwischen jedoch wieder aufgelegt.

Bremen hat 2024 eine eigene Förderrichtlinie zur Unterstützung von Voruntersuchungen für Anergienetz-Pilotprojekte eingeführt. Diese ermöglicht eine Vollfinanzierung bis zu 100.000 € und wurde bereits für das Projekt der Genossenschaft ErdwärmeDich e.G. bewilligt. In den Interviews wird deutlich, dass in der Umsetzung ein hoher Abstimmungsbedarf zwischen Verwaltung und Projektträger besteht. Für die Zukunft besteht in Bremen ein klarer Bedarf an Landesbürgschaften, beispielsweise über die Bremer Aufbau-Bank (BAB), sowie an Instrumenten zur Absicherung des Fündigkeitsrisikos.

### 3.3 Handlungspotenziale durch kommunale Beteiligung

Kommunen können durch die Wahl geeigneter Rechts- und Beteiligungsformen aktiv Einfluss auf die Entwicklung und Steuerung von Wärmenetzen nehmen. Öffentliche, private und gemischte Modelle bieten dabei unterschiedliche Steuerungs- und Risikoprofile [20], [16]. Öffentlich-rechtliche Organisationsformen wie Eigenbetriebe sichern hohe Transparenz, erfordern jedoch erhebliche personelle und finanzielle Ressourcen. Privatrechtliche Modelle – etwa GmbHs oder Public-Private Partnerships – bieten größere Flexibilität, Zugang zu Fachpersonal und Finanzierungsvorteile, gehen jedoch mit geringerer demokratischer Kontrolle einher.

Genossenschaften zeichnen sich durch hohe Akzeptanz und Kostentransparenz aus, sind aber in ihrer Entscheidungsfähigkeit und Bonität eingeschränkt [20]. Für Bremen ist angesichts der Haushaltslage eine Mischform sinnvoll, die kommunale Beteiligung mit bürgerschaftlichem Engagement verbindet. Das Memorandum of Understanding zwischen EWE und swb (Juni 2025) kann als Grundlage für eine gemeinsame Wärme-gesellschaft in der Vorderen Neustadt dienen [23], [19]. Zudem sollte die Stadt eine Beteiligung an der Genossenschaft ErdwärmeDich e.G. prüfen und Kooperationen mit GEWOBA, BREBAU und IMMOBILIEN BREMEN zur Flächenbereitstellung und Projektentwicklung in „grauen Zonen“ fördern.

### 3.4 Handlungspotenziale durch „Keimzellen“-Ansätze

Der sogenannte Keimzellen-Ansatz identifiziert öffentliche Gebäude mit hohem Wärmebedarf als Ausgangspunkte für quartiersbezogene Wärmelösungen auf Basis erneuerbarer Energien [20], [25]. Solche Projekte können wirtschaftlich tragfähig sein und Synergien zwischen Klimaschutz und Quartiersentwicklung schaffen. Herausforderungen bestehen insbesondere in der Datenverfügbarkeit und im Vergaberecht. Empfohlen werden daher landesrechtliche Prüfpflichten für öffentliche Gebäude sowie die Schaffung klarer rechtlicher Rahmenbedingungen für Kooperationen zwischen kommunalen und privaten Akteuren [25], [23].

Öffentliche Grundstücke können zusätzlich für technische Anlagen oder die Verlegung von Leitungen genutzt werden, um Flächenkonflikte zu reduzieren [16]-[19]. Für Bremen bietet sich an, kommunale Gebäude und Grundstücke in „grauen Zonen“ gezielt für Partnerschaften mit bürgerschaftlichen Projekten wie ErdwärmeDich einzusetzen. Die Beendigung des KfW-Programms 432 hinterlässt dabei eine deutliche Förderlücke.

### 3.5 Kostensenkungspotenziale durch Koordination

Kalte Nahwärmenetze auf Basis oberflächennaher Geothermie sind durch hohe Anfangsinvestitionen und niedrige Betriebskosten gekennzeichnet. Während Neubaugebiete aufgrund einheitlicher Eigentümerstrukturen und günstiger Tiefbaukosten besonders geeignet sind [20], [26], [27], gestaltet sich die Umsetzung im Bestand deutlich komplexer. Dort erhöhen bestehende Infrastrukturen, Altlasten und unterschiedliche Anschlusszeiten die Kosten erheblich [16].

Ein zentrales Kostensenkungspotenzial besteht in der Bündelung von Tiefbaumaßnahmen, etwa bei Straßen-, Glasfaser- oder Abwasserarbeiten. Durch koordinierte Planung lassen sich Baukosten reduzieren und Belastungen für Anwohner\*innen minimieren [16], [19]. Für Bremen wird empfohlen, systematische Abgleiche mit dem Amt für Straßen und Verkehr sowie Infrastrukturbetreibern wie HanseWasser zu etablieren. Das Beispiel der Oberhofer Straße zeigt, dass eine frühzeitige Abstimmung zwischen Projekten der kalten Nahwärme und anderen Infrastrukturmaßnahmen entscheidend ist, um Kosten zu senken und Förderbedingungen, etwa im Rahmen der BEW, zu erfüllen.

## 4. Fazit

Kalte Nahwärme auf Basis oberflächennaher Geothermie ist im Kontext der Wärmewende in Bestandsquartieren weniger als flächendeckende Standardlösung zu verstehen, sondern als gezielte Ergänzung zu dekarbonisierter Fernwärme und gebäudebezogenen Wärmepumpen. In vielen Quartieren werden Fernwärme und insbesondere Luft-Wasser-Wärmepumpen den Großteil der zukünftigen Wärmeversorgung tragen, während kalte Nahwärmenetze dort ansetzen können, wo diese Pfade an technische, räumliche oder wirtschaftliche Grenzen stoßen, wie etwa in dicht bebauten Bestandsstrukturen mit eingeschränkten Aufstellflächen, Schallschutzanforderungen oder guten geothermischen Potenzialen. Die Analyse des Forschungsstandes und des Bremer Fallbeispiels zeigt, dass die Umsetzung solcher Netze weniger an den technischen Möglichkeiten scheitert als an institutionellen, organisatorischen und finanziellen Rahmenbedingungen.

Als zentrale Handlungsfelder kristallisieren sich die Langfristigkeit und Verlässlichkeit von Förderinstrumenten, die aktive Nutzung kommunaler Planungs-, Steuerungs- und Eigentumsinstrumente sowie die Stärkung gemeinwohlorientierter Betreibermodelle heraus. Gleichzeitig bleiben hohe Investitionskosten für kleinere Initiativen, begrenzte personelle und fachliche Ressourcen in Kommunalverwaltungen sowie Unsicherheiten der bundespolitischen Rahmensetzung wesentliche Hemmnisse. Soll kalte Nahwärme ihre Rolle als komplementärer Baustein neben Fernwärme und gebäudebezogenen Wärmepumpen tatsächlich entfalten, bedarf es daher vor allem verlässlicher Governance-Strukturen, passender Förderarchitekturen und einer gezielten Unterstützung lokaler Akteurskonstellationen.

## Danksagung

Der Beitrag ist im Rahmen des Projekts „Urbane Energienetze als Instrument der Wärmewende in Bremen“ entstanden, das von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) gefördert wird. Wir danken der DBU für die finanzielle Unterstützung sowie den Interviewpartner\*innen und Praxisakteur\*innen in Bremen für ihre Zeit und die wertvollen Einblicke.

## Literatur

- [1] Qoncept, Fachgutachten zur kommunalen Wärmeplanung für die Freie Hansestadt Bremen. Abschlussbericht, Bremen/Kassel, 2024.
- [2] Öko-Institut and Fraunhofer ISE, Durchbruch für die Wärmepumpe. Praxisoptionen für eine effiziente Wärmewende im Gebäudebestand. Berlin, 2022.
- [3] Senatorin für Umwelt, Klima und Wissenschaft (SUKW) et al., Kooperation für die Energiewende. Bremen und EWE vereinbaren vertiefte Zusammenarbeit bei der swb AG. Pressemitteilung, Bremen, Jul. 01, 2025.
- [4] Roundtable Wärmewende, Empfehlungen des Roundtable Wärmewende, Berlin, 2023.
- [5] H. Averfalk et al., Low-Temperature District Heating Implementation Guidebook. IEA DHC Report. Fraunhofer Verlag, Stuttgart, 2021.
- [6] H. P. Ohly und K. Weber, „Informationsquellen und Informationsaustausch,“ in Handbuch Methoden der empirischen Sozialforschung, N. Baur and J. Blasius, Eds. Wiesbaden: Springer VS, 2014, pp. 103–116.
- [7] C. Helfferich, „Leitfaden- und Experteninterviews,“ in Handbuch Methoden der empirischen Sozialforschung, N. Baur and J. Blasius, Eds. Wiesbaden: Springer VS, 2014, pp. 559–574.
- [8] P. Mayring, Qualitative Inhaltsanalyse: Grundlagen und Techniken, 13th ed. Weinheim: Beltz, 2022.
- [9] V. Bürger und C. Maiworm, Regulierungsanforderungen an einen Drittnetzzugang für Wärmenetze: Kurzgutachten. BfEE/BAFA & BMWK, Freiburg/Berlin/Stuttgart, 2022.
- [10] Dena, Öko-Institut, and Hamburg Institut, Regulatorische Modelle für eine klimaneutrale Fernwärme in Deutschland. Studie im Auftrag der European Climate Foundation, Berlin, 2023.

- [11] AGFW – DER ENERGIEVERBAND, „Investitions- und Planungssicherheit herstellen,“ 2024. Zugriff am: 08. August 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.agfw.de/energiewirtschaft-recht-politik/energiewende-politik/wahl-2021/investitions-und-planungssicherheit-herstellen>.
- [12] FNR, „Klimaneutrale Quartiersentwicklung und Vergaberecht: Was wann wie ausschreiben?“ 2024. Zugriff am: 08. August 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.fnr.de/presse/pressemitteilungen/>.
- [13] DIHK, Investorenfreundliche Genehmigungsverfahren: Handlungsempfehlungen für Kommunen. Berlin: Deutscher Industrie- und Handelskammertag, 2020.
- [14] Bertelsmann Stiftung, Investorenfreundliche Verwaltung: One-Stop-Agency-Modelle in Kommunen. Gütersloh, 2018.
- [15] DStGB, Standortfaktor Genehmigungsmanagement: Praxisbeispiele aus Mittelstädten, Berlin, 2022.
- [16] Deutsche Energie-Agentur (Dena), Vernetzte Wärmeversorgung in Bestandsquartieren. Handlungsstrategien und Anwendungsfälle, Berlin, 2023.
- [17] Verbraucherzentrale Bundesverband (vzbv), Wärmeplanung verbrauchergerecht ausgestalten. Stellungnahme zum Referentenentwurf zum Wärmeplanungsgesetz (WPG), Berlin, 2023.
- [18] DGRV, Genossenschaftliche Wärmenetze als Chance für die Wärmewende. Positionspapier. Berlin: Bundesgeschäftsstelle Energiegenossenschaften beim DGRV (Deutscher Genossenschafts- und Raiffeisenverband), 2024.
- [19] Deutsche Energie-Agentur (Dena), Wärmenetze im Bestand errichten: Betreibermodelle und Finanzierung, Berlin, 2024.
- [20] J. Bergmann, J. Weiß und S. Salecki, Geschäftsmodelle für die Wärmewende im Quartier. Handlungsfelder, Betreibermodelle, Finanzierungskonzepte. IÖW, Berlin, 2025.
- [21] DGRV, Genossenschaftliche Wärmenetze als Chance für die Wärmewende. Positionspapier, Berlin, 2024.
- [22] I. Hoffmann, J. Eschweiler, C. Buchmüller und S. Wilms, QUARREE100 – Erkenntnisse und regulatorische Handlungsoptionen für die strombasierte Wärmeversorgung von Bestandsquartieren. IKEM/FH Westküste, 2023.
- [23] E. Dunkelberg und J. Weiß, Die Rolle von Kommunen in der Entwicklung und Umsetzung von Quartiersprojekten. Working Paper, IÖW, Berlin, 2023.
- [24] Freie Hansestadt Bremen – Senatorin für Umwelt, Klima und Wissenschaft; Senatorin für Wirtschaft, Häfen und Transformation; Senatskanzlei, „Kooperation für die Energiewende,“ Pressemitteilung, Jul. 1, 2025. Zugriff am: 24. November 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.senatspressestelle.bremen.de/pressemitteilungen/kooperation-fuer-die-energiewende-471222>.
- [25] E. Dunkelberg et al., Öffentliche Gebäude als Keimzellen für klimaschonende Quartierswärme. Urbane Wärmewende, Arbeitspapier 3, Berlin, 2022.
- [26] Energieagentur Rheinland-Pfalz, Praxisleitfaden Nahwärme. Erfahrungen aus der Praxis für die Praxis. Mainz, 2025.
- [27] C. Rinner und W. Osthorst, (Kalte) Nahwärme in der Wärmewende. Analyse technischer Konzepte, Betreibermodelle und Kostenstrukturen. Hochschule Bremen, GLOKAL Arbeitspapier 20, 2025.

# Rethinking Acceptance through Energy Democracy: Public Expectations and the Democratic Legitimacy of the Energy Transition in Germany

Neneh BRAUM<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Universität Vechta, Driverstraße 22, 49377 Vechta

\* neneh.braum@uni-vechta.de

---

## Abstract

This paper examines how the democratic legitimacy of Germany's heat transition is conceived and contested through citizens' expectations of democratic governance. It argues that the transition is not merely a matter of policy acceptance but an arena in which the democratic conditions of transformative governance are negotiated. Drawing on energy democracy and democratic legitimacy theory, the study distinguishes procedural from substantive and diffuse from specific orientations to map expectations onto core normative criteria. Using secondary survey data from the Social Sustainability Barometer, the analysis shows a layered pattern: diffuse expectations display broad normative consensus, while specific evaluations reveal sharper trade-offs once democratic ideals are translated into concrete instruments and implementation choices. Across both levels, equality, autonomy, and responsiveness emerge as central benchmarks alongside performance-related concerns.

## Keywords

Socio-technical transition; Citizens' expectations; Energy democracy; Democratic legitimacy

---

## 1. Introduction

Germany's energy and heat transition can be understood as a "socio-technical transition" [1], in which technological, institutional, and social change jointly reconfigure core societal systems. These far-reaching shifts create opportunities for environmental sustainability and democratic innovation, yet they also generate uncertainty and competing public objectives that shape the pace, direction, and character of the transition [2]. Conflicts over policy measures, local opposition to renewable-energy infrastructure, and polarisation in public discourse point to a growing risk of implementation bottlenecks. Although public support for renewables remains high, survey evidence indicates a declining salience of climate and environmental concerns [3]. For the next steps of the transition – most notably the heat transition – greater attention is therefore needed to understand why attitudes are dynamic and shift as the transition unfolds.

Research on energy transition recognises that its success depends crucially on public acceptance, often pursued through (financial) participation schemes intended to foster behavioural change [4]. Evidence from local projects suggests, however, that such arrangements frequently operate as acceptance-building compromises designed to ease tensions between equality claims and persistent market inequalities [5]. They may mitigate resistance, but they do not necessarily resolve the underlying conflicts. At the same time, decentralisation and the pluralisation of the stakeholder landscape bring more autonomous actors

with distinct interests into the field, redistributing responsibilities and recalibrating power relations. In parallel, municipal-level governance has increasingly shifted towards cooperative arrangements, particularly in municipal heat planning and neighbourhood redevelopment. Against this backdrop, the transition has become an arena of societal and political contestation [6], in which fundamental questions about the relationship between citizens and the democratic state come to the fore.

The tensions observed in the energy transition may indicate a potential "democratic deficit" [7], [8], pointing to a deeper misalignment between citizens' expectations and their evaluations of political practice. If such discrepancies persist, they may foster disillusionment, alienation, and even outright rejection of the transition. This would jeopardise not only progress towards decarbonisation but also social cohesion at the local level and, ultimately, the stability of democracy itself.

In this context, the present study shifts the analytical focus from acceptance to citizens' expectations of democratic legitimacy in the energy transition. While acceptance research has long centred on attitudes towards local projects and technologies, and the conditions under which acceptance emerges, it captures only part of the broader democratic challenges [9]. Crucially, legitimacy and acceptance are not synonymous [10]. Policies can be accepted yet illegitimate – for instance, if produced under conditions of inequality – or legitimate yet unpopular when outcomes are contested. Democratic legitimacy depends less on acceptance per se than on the alignment

between public expectations and adherence to normative criteria. Understanding legitimacy through the (dis)fulfillment of citizens' expectations situates it within the broader concept of political responsiveness [11].

This perspective implies that legitimacy is not merely a systemic property of institutions or the social order – as discussed, for instance, by Alsheimer [10] in contrasts to acceptance, which reflects an “individual order” shaped by personal characteristics, experiences, and situational contexts – but rather emerges from the dynamic interplay between citizens' expectations and perceived political responsiveness. It depends on the extent to which political institutions take (or can take) citizens' expectations into account, and on how citizens evaluate political performance in light of these standards. Expectations thus link institutional responsiveness to the subjective construction of legitimacy. They also coordinate different actor communities, mediate across scales, and serve as normative reference points for procedures and outcomes [12]. By linking democratic principle with assumptions about trust and feasibility, expectations form a cognitive core of political support that is necessary for systemic stability [13]. In this sense, expectations articulate what is considered democratically justified and thereby illuminate the legitimation of the energy transition.

Addressing expectations matters not only in light of a presumed democratic deficit, but also for clarifying competing demands and specifying which interests qualify as legitimate public interests [2]. System-level biases further complicate this picture: institutions and policy feedbacks appear to privilege certain interests [14], shaping legitimacy perceptions. Investigating citizens' expectations also helps uncover false-consensus beliefs [15], whereby individuals infer majority opinion from their own assessment.

To understand how governance under conditions of transition remains legitimate, we must examine what citizens expect democracy to provide – and which normative criteria they draw upon the concept of “energy democracy” [16], [17] offers a framework for specifying defensible normative criteria of democratic legitimacy that can be reflected in citizens' expectations. Building on this framework, the present study derives six core criteria and uses secondary survey data to assess how these align with or diverge from citizens' expectations in the context of energy transition. While survey research on political support and legitimacy is well established, the operationalisation of normative legitimacy criteria for studying expectations toward democratic energy governance remains limited. This study addresses this gap by reconstructing citizens' legitimacy expectations, thereby linking normative democratic theory with empirical energy transition research.

## 2. Theory

### 2.1. Normative foundation: legitimacy criteria

The theoretical framework links “energy democracy” [17] with classical approaches to democratic legitimacy. Its purpose is twofold: first, to specify normative legitimacy criteria that capture democratic standards for transformative governance; and second, to provide an analytical structure for examining citizens' expectations empirically.

In this study, citizens' expectations are oriented towards normative legitimacy criteria – standards that articulate what citizens consider appropriate democratic governance of the energy transition. Drawing on van Veelen and

van der Horst's systematic review of the core energy democracy contributions [17], and integrating insights from broader strands of democratic theory, six central criteria guide the analytical approach: autonomy, responsiveness, transformative capacity, rationality, transparency, and equality.

One starting point is the idea – associated with Hirst [18] – that legitimacy may increase when public tasks are organised not only through the state but also through democratically self-governing associations (e.g. energy cooperatives). Such forms of “participatory governance” [16] respond to the limits of nation-state steering, the dominance of incumbent energy systems [19], and the technocratic alienation that accompany the energy transition. By enabling voluntary responsibility-taking and shared control, they can realise individual and collective autonomy as an expression of popular sovereignty [20], strengthening responsiveness to context-specific needs, and support transformative capacity through locally embedded problem-solving. The principle of subsidiarity – allocating tasks as locally and as close to citizens as possible – reinforces these effects by keeping decision-making units comparatively small and accountable.

Deliberative accounts add a distinct procedural dimension centred on how decisions are publicly justified [21]. Following Habermas [22], democratic legitimacy rests on public reason-giving and justificatory practices rather than mere interest aggregation. Rationality and transparency therefore become key procedural standards: transparency enables accountability and access to relevant information; rationality ties decisions to evidence, proportionality, and publicly defensible reasons, thereby enhancing procedural quality and supporting transformative capacity through comprehensible, well-grounded decisions.

Because the energy transition entails far-reaching distributional consequences, equality is integral to democratic legitimacy. Political equality presupposes forms of social and material enablement [23]: a fair distribution of benefits and burdens, and access to infrastructures that allow citizens to exercise democratic rights in practice – translating formal equality into equality of agency. While equality before the law is widely accepted, the extent to which political equality requires social and economic equality remains contested [11]. This study therefore treats material enablement as a relevant condition of legitimacy and connects it to “civic ownership” [16], which may reduce structural inequalities and strengthen both autonomy and responsiveness by making marginalised needs politically addressable.

Energy democracy thus does not simply signify “more participation”; it demands procedural standards and observable outcomes. A predominantly electoral or output-oriented model of governance may be regarded as legitimate when substantive standards are visibly met, yet it comes under strain when procedural minima are absent. Analytically, it is therefore essential to distinguish between procedural and substantive requirements. This distinction links the normative discussion to the analytical framework below, which operationalises these theoretical considerations for empirical analysis.

### 2.2 Analytical framework

To analyse how democratic legitimacy criteria are reflected in citizens' expectations, this study adopts a theory-guided, two-dimensional analytical framework that distinguishes between procedural and substantive

orientations of legitimacy, each at diffuse and specific levels of political support. This yields four constellations of expectation categories.

- (1) Procedural vs. substantive orientations of legitimacy [24] (aligned with the debate on “input-”, “output”- and “throughput-legitimacy” [25], [26]): Substantive legitimacy focuses on the content and quality of policy outcomes (including the protection of fundamental rights, distributive justice, and equality of opportunity). Procedural legitimacy evaluates the quality of (institutionalised) preference-formation, will formation, and decision-making processes.
- (2) Diffuse vs. specific levels of political support [27]: Specific support refers to evaluations of concrete policies, performances, or actors and is therefore context-dependent and time-sensitive. Diffuse support (legitimacy and trust [13]) targets more general and less specific objects and denotes a more fundamental and stable attachment to democratic principles and institutions.

Expectations may thus combine both perspectives: how democracy should work (procedural vs. substantive) and what citizens’ support is focused on (diffuse vs. specific). The intersection of these dimensions forms the analytical core of this study. It allows differentiation between short- and long-term attachments to democratic principles, prevents conflating policy crises with system crises, and permits a more precise identification of legitimacy dynamics in the energy transition.

### 3. Methods

The analysis draws on the Social Sustainability Barometer for the Energy Transition, an annual household survey in Germany developed by the Institute for Advanced Sustainability Studies (IASS) [28], [29]. The Barometer uses a household panel design with repeat respondents and refreshment samples; the pooled dataset therefore combines repeated and newly recruited households rather than constituting three fully independent cross-sections. In the pooled file, the unweighted number of interviews is  $N = 7,843$  (2017);  $N = 6,593$  (2018); and  $N = 6,549$  (2019).

From the full questionnaire, 24 items aligned with the theoretical framework were retained, ensuring that each normative legitimacy criterion is represented by at least one indicator. Item mapping to legitimacy criteria and to the analytical dimensions (procedural vs. substantive; diffuse vs. specific) was guided by a concept-indicator matrix following Mayring [30]. The coding matrix (restricted to the items analysed here), item documentation (labels, coding decisions, missing-value definitions), SPSS syntax (re-coding, weighting, table generation), and the output tables underlying the reported results are publicly archived on Zenodo (DOI: 10.5281/zenodo.18107825).

Data preparation in SPSS (v29) involved defining missing values, specifying measurement levels, and harmonising scale directions where applicable. For descriptive population estimates, analyses apply the survey weight provided in the dataset; unweighted case numbers are reported as the actual number of interviews. Empirically, the analysis focuses on weighted descriptive response distributions by year (including percent-of-cases reporting for multi-response items), which are interpreted as wave-specific snapshots rather than individual-level change trajectories.

The empirical analyses proceeded in two stages. First, descriptive distributions were used to capture the prevalence and intensity of expectations across the six legitimacy criteria. Second, associations among items and indices were examined using correlations without advancing directional or causal claims.

### 4. Results

Before turning to expectations, the analysis begins with a diagnostic view of perceived shortcomings in the federal government’s implementation of the energy transition. Asked what bothers them most about current implementation (multiple responses; up to three selections), respondents do not primarily express principled rejection. Instead, grievances concentrate on a small set of concrete implementation tensions.

Across both survey years (pooled), the most frequently cited concern is insufficient pace: 59.2 % state that the transition proceeds too slowly to protect the climate effectively. Almost as many identify a distributive deficit, arguing that social justice is being neglected (54.1 %). Cost concerns are also salient (35.8 %), and a substantial share points to insufficient consideration of landscape and nature protection (30.3 %). Concerns about fair competitive conditions for renewables are mentioned by about one third (32.6 %). By contrast, fundamental opposition to the energy transition is rare (3.1 %). Overall, this profile suggests that legitimacy challenges arise less from categorical rejection than from perceived trade-offs between speed, distributive fairness, affordability, and local ecological impacts.

These implementation grievances provide a useful lens for interpreting citizens’ legitimacy expectations: criticisms of pace speak to demands for transformative capacity and effective problem-solving; grievances about social justice and costs point to distributive fairness and state responsibility; and concerns about landscape and nature protection foreground the need for responsive, locally sensitive governance. Against this background, the analysis turns to how citizens specify procedural and substantive legitimacy expectations across diffuse and specific levels.

The survey results reveal a layered pattern of citizens’ legitimacy expectations across the analytical framework. Diffuse orientations are characterised by broad normative consensus, whereas specific evaluations are more differentiated and make the trade-offs of democratic governance under transformation particularly visible once democratic ideals are translated into concrete governance instruments and implementation choices.

#### Procedural × Diffuse

Diffuse procedural orientations show particularly strong agreement. A large majority consider early citizen participation in wind planning processes indispensable (u6: 88.8 % “important”), whereas only 11.2 % regard it as unimportant. This indicates widely shared expectations of voice and inclusion that extend beyond individual projects.

Moreover, perceived elitism of the energy transition is positively associated with support for granting affected residents the final say through local referenda (e6\_3; u6a). The association is substantively meaningful (Spearman’s  $\rho = .159$ ,  $p < .001$ ). In a logistic model, higher perceived elitism predicts higher odds of endorsing the “final say” option (OR = 1.26 per scale point, 95 % CI

[1.23, 1.29],  $p < .001$ ). This pattern suggests that perceptions of top-down implementation translate into stronger demands for direct democratic control in concrete siting decisions.

### Procedural × Specific

When asked to weigh participatory rights against implementation speed in a routed subsample (u6b), respondents prioritise democratic voice: 86.7 % favour citizen referenda even if this slows down expansion, while 13.3 % prioritise speed. This pattern suggests that, in contested local contexts, procedural legitimacy is valued more strongly than performance-oriented efficiency.

When applied to a concrete decision right (and governance instrument), support remains high but becomes more contested. Among respondents providing a substantive answer, 59.6 % support granting citizens the final say through local referenda, 40.4 % oppose it (u6a, 2018; valid %). An additional 8.6 % answered “don’t know”.

Expectations of distributive reciprocity at the community level are pronounced, linking equality and responsiveness in specific project contexts. Support for local benefit-sharing instruments is consistently high: a fixed community levy from wind farms (u6c\_3) is supported by a majority (54.3 % in the two approval categories), and support is even stronger for a turnover-dependent levy (u6c\_4: 68.2 %) and citizen co-investment in wind parks (u6c\_5: 70.0 %). Strict rejection remains limited across these items. Taken together, procedural-specific expectations centre on institutionalising both voice and material reciprocity, linking local autonomy with distributive fairness.

### Substantive × Diffuse

Diffuse substantive expectations show strong support for the overarching goals of transformation. A large majority favour the general promotion of renewable energy (e1 in 2019: 90.6 % “yes”).

At the same time, respondents express clear expectations regarding affordability and public responsibility. A majority favour state intervention to keep energy prices low (u1: 58.1 %), while 28.2 % prefer targeted financial support; only small minorities endorse a minimal state role (10.0 %) or full withdrawal (3.6 %). Distributional fairness is also salient: 50.0 % favour a consumption-based principle for allocating transition costs, 26.8 % support income-based contributions, and 23.2 % prefer equal shares (u7). And, households taking an active prosumer role in energy production is widely approved (e9: 86.7 %).

As contextual evaluations, perceptions of the energy transition are mixed: most respondents place it in 2019 on the “expensive” side of the scale (e6\_1: 80.6 % in categories 1-3), many view it as rather “unfair” (e6\_2: 57.2 % in categories 1-3), and a substantial share perceive it as rather “elitist” (e6\_3: 53.7 % in categories 1-3). The coexistence of transformative support with critical evaluations underscores why procedural and distributive safeguards may be particularly salient in legitimacy judgements.

Taken together, these findings suggest that diffuse-substantive expectations combine strong support for systemic transformation with robust distributive concerns. Respondents expect the state to safeguard affordability and equality while also enabling active citizen engagement. In this sense, legitimacy is not tied to endorsing change per se, but to embedding transition in arrangements perceived as fair, state-supported, and enabling.

### Substantive × Specific

Expectations become more contested when they concern concrete societal trade-offs. In the item contrasting climate goals and employment protection (u10), respondents largely support maintaining climate targets but differ regarding pace and flexibility: 47.1 % favour keeping targets while stretching implementation over time, 37.6 % endorse additional efforts to meet targets as quickly as possible even if industries or regions are burdened, and 15.4 % prioritise jobs over strict target adherence (with a small undecided share). These patterns underline that citizens support ambitious transformation but temper it with distributive and social feasibility concerns.

### Cross-Cutting Patterns

Taken together, the results show a clear division between diffuse and specific orientations: consensus tends to prevail at the level of general democratic principles, while ambivalences and trade-offs emerge once these ideals are translated into concrete governance instruments and implementation choices. Importantly, the resulting pattern maps closely onto the normative legitimacy criteria derived from the energy democracy framework, providing a theoretically grounded structure for organising the empirical results.

- Procedural expectations foreground autonomy and responsiveness – most clearly in demands for participation, referenda, and citizen-oriented governance – while distributive instruments are strongly endorsed as means to institutionalise reciprocity at the community level (e.g. levies and co-investment).
- Substantive expectations combine strong support for renewables with robust claims regarding affordability and state responsibility, and item-level trade-offs point to a preference for maintaining climate ambition while allowing temporal flexibility.

Autonomy, equality, and responsiveness emerge as dominant lenses of legitimacy. Transformative capacity is broadly endorsed, yet repeatedly moderated by concerns over fairness and social feasibility.

## 5. Discussion

The findings highlight the value of distinguishing between procedural and substantive dimensions of legitimacy expectations, as well as between diffuse principles and specific policy evaluations. Citizens broadly endorse democratic principles of autonomy, equality, and transformative capacity at a general level, while their evaluations of specific policies are marked by ambivalence and trade-offs.

Diffuse expectations mirror the core normative legitimacy criteria discussed in energy democracy, suggesting that citizens anchor legitimacy judgments in broadly shared democratic principles that extend beyond immediate, short-term policy outcomes. These insights closely coincide with broader findings that liberal democracies are normatively expected to deliver at least three promises: autonomy, equality, and rationality [11]. The ambivalence found in specific expectations indicates that legitimacy under conditions of the sustainability transition is a dynamic equilibrium, continuously renegotiated between competing procedural, distributive, and temporal concerns.

Not all normative criteria of energy democracy are equally represented in public expectations. While autonomy and equality emerge as the most consistently affirmed criteria,

transformative capacity, though strongly supported in principle (e1), becomes more conditional once distributive conflicts or socio-economic trade-offs become salient (u10, climate-jobs dilemma). Distributive fairness consistently dominates legitimacy expectation: whether revenues stem from mandatory levies on energy companies (u6c\_3; u6c\_4) or from direct citizen investment opportunities (u6c\_5), both designs receive strong support. What matters is not the precise institutional arrangement but the principle of fair sharing, underscoring equality as a central criterion of legitimacy in the energy transition.

Autonomy is articulated most clearly in localised contexts such as referenda, community benefit schemes, or prosumer roles, whereas transparency and rationality remain more implicit, often inferred from performance evaluations or perceptions of order rather than directly expressed. At the same time, the implementation grievance profile makes visible that criteria not explicitly foregrounded in the energy democracy framework – above all speed, affordability pressures, and socio-economic security – feature prominently in citizens' responses. This suggests that societal legitimacy expectations extend and modify the theoretical framework of energy democracy, adding performance-related and temporal criteria that matter for citizens' democratic judgments.

Taken together, the findings underline both the promise and the challenge of embedding energy transition policies within a democratically legitimate framework. Citizens clearly articulate principles of autonomy and equality, yet support for concrete measures is conditional and context-dependent. Legitimacy in the energy transition is not a one-dimensional resource that governments can secure through participatory procedures or effective outputs alone. Rather, legitimacy rests on a layered constellation of expectations: diffuse orientations establish the boundaries of what is considered fair and democratic, while specific evaluations of policies determine whether governments are perceived as responsive.

For policy-making, this implies that democratic legitimacy must be strengthened through credible climate-effective progress and distributive justice, while institutionalising citizen autonomy via associative and deliberative infrastructures that enable meaningful voice and co-responsibility beyond one-off consultations. This is particularly consequential for the heat transition, where municipal heat planning, building retrofits, and choices over district heating or individual systems directly affect households, making affordability, fairness, and perceived control immediate tests of democratic responsiveness. Ultimately, democratic legitimacy evolves through continuous responsiveness to shifting public expectations – a process that both advances the energy transition and anchors societal change within a democratic framework.

## 6. Limitations and further research

Several limitations should be acknowledged. First, the analysis relies exclusively on closed-ended survey items. While the concept-indicator matrix provides a systematic link between normative theory and empirical indicators, the questionnaire necessarily constrains which legitimacy criteria can be observed. Some dimensions central to energy democracy – most notably rationality and aspects of transparency – are only indirectly captured, if at all, and thus likely under-represented.

Second, item wording and instrument design may have foregrounded certain criteria. Distributive fairness and

participation are explicitly encoded, whereas other dimensions are captured more indirectly and require theory-guided interpretation. Accordingly, the salience of particular criteria may partly reflect measurement availability and framing rather than citizens' expectations alone. Conversely, criteria less directly addressed remain harder to assess despite their prominence in theoretical debates.

Third, the cross-sectional nature of the data limits causal inference. Associations between diffuse orientations, contextual evaluations, and specific policy preferences cannot establish causal direction. Moreover, the analysis does not systematically model socio-demographic or contextual covariates, which may shape how legitimacy expectations are formed and expressed.

Fourth, the mapping of survey items onto normative criteria involves an element of theory-guided interpretation. While several items explicitly capture expectations, others capture closely related judgements about policies or implementation that can be meaningfully interpreted as expectation-relevant proxies within the concept-indicator matrix. Accordingly, the results are best understood as robust patterns in how citizens' legitimacy expectations are structured and prioritised, rather than as direct, one-to-one measurements of every normative criterion.

Finally, the findings are context- and time-bound. They reflect public attitudes in Germany during a specific survey period (2017-2019) and are not automatically transferable to other settings. Nevertheless, they provide a diagnostic lens for understanding where legitimacy-relevant tensions in past implementation may have arisen.

Future research should use richer survey instruments (ideally combined with panel data) to capture a broader range of legitimacy expectations. Qualitatively, discourse- and deliberation-focused studies – examining how citizens and policymakers articulate and contest legitimacy claims in practice – could complement survey-based evidence.

## Acknowledgement

I would like to thank the editor and the two anonymous reviewers for their thoughtful comments, which have been of great help in improving this manuscript. I also thank Prof.in Dr.in Paula Maria Bögel for her valuable feedback on an earlier draft of the paper.

## References

- [1] B. K. Sovacool et al., "Sociotechnical agendas: Reviewing future directions for energy and climate research," *Energy Research & Social Science*, vol. 70, p. 101617, 2020. doi: 10.1016/j.erss.2020.101617.
- [2] T. Krüger, "Energiekonflikte und Demokratiekrise: Eine radikaldemokratische Perspektive auf das Ringen um Gemeinwohlziele der Energiewende," *Zeitschrift für Politikwissenschaft*, vol. 31, no. 4, pp. 539-563, 2021. doi:10.1007/s41358-021-00289-w.
- [3] V. Frick and T. Grothmann, *Umweltbewusstsein in Deutschland 2024 - Kurzbericht zur Bevölkerungsumfrage*, Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt, 2025.
- [4] L. Geßner and M. Zeccola, "Akzeptanzfaktoren in der Energiewende und ihre Übertragbarkeit in das Recht," in *Akzeptanz und politische Partizipation in der Energietransformation: Gesellschaftliche Herausforderungen jenseits von Technik und*

- Ressourcenausstattung, C. Fraune, M. Knodt, S. Gölz, and K. Langer, Eds., Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2019, pp. 133-158. doi:10.1007/978-3-658-24760-7.
- [5] K. Zimmermann, "Regulierung oder Verantwortlichmachung? - Zur Neuauflage von Klassen- und Kulturkompromiss in der Klimakrise," *Sozialer Fortschritt*, vol. 73, no. 6-7, pp. 523-549, 2024. doi:10.3790/sfo.2024.1442006.
- [6] S. Teune, "Zwischen Unzufriedenheit und Gegnerschaft: Einstellungen und Engagement in der Energiewende," in *Soziale Bewegung und Protest*, J. Zilles, E. Drewing, and J. Janik, Eds., Bielefeld: transcript Verlag, 2022, pp. 167-182. doi:10.14361/9783839463000-009.
- [7] P. Norris, *Democratic Deficit: Critical Citizens Revisited*, Cambridge: Cambridge University Press, 2011. doi:10.1017/CBO9780511973383.
- [8] E. Eichenauer, "Energiekonflikte - Proteste gegen Windkraftanlagen als Spiegel demokratischer Defizite," in *Energiewende: Politikwissenschaftliche Perspektiven*, J. Radtke and N. Kersting, Eds., Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2018. doi:10.1007/978-3-658-21561-3.
- [9] C. Fraune, M. Knodt, S. Gölz, and K. Langer, Eds., *Akzeptanz und politische Partizipation in der Energietransformation: Gesellschaftliche Herausforderungen jenseits von Technik und Ressourcenausstattung*, Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2019. doi:10.1007/978-3-658-24760-7.
- [10] S. Alsheimer, T. Schnell, C. Chlebna, and S. Rohe, "Competing terms for complementary concepts? Acceptance and legitimacy," *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, vol. 207, p. 114960, 2025. doi: 10.1016/j.rser.2024.114960.
- [11] C. Landwehr and A. Schäfer, "The Promise of Representative Democracy: Deliberative Responsiveness," *Res Publica*, 2023. doi:10.1007/s11158-023-09640-0.
- [12] M. Borup, N. Brown, K. Konrad, and H. Van Lente, "The sociology of expectations in science and technology," *Technology Analysis & Strategic Management*, vol. 18, no. 3-4, pp. 285-298, 2006. doi:10.1080/09537320600777002.
- [13] S. Pickel and G. Pickel, Eds., *Politische Kultur- und Demokratieforschung: Grundbegriffe, Theorien, Methoden. Eine Einführung*, Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften, 2006. doi:10.1007/978-3-531-90021-6.
- [14] R. Mathisen, W. Schakel, S. Hense, L. Elsässer, M. Persson, and J. Pontusson, "Unequal responsiveness and government partisanship in Northwest Europe," in *Unequal Democracies*, N. Lupu and J. Pontusson, Eds., Cambridge: Cambridge University Press, 2023, pp. 29-53. doi:10.1017/9781009428682.003.
- [15] N. D. Steiner, C. Landwehr, and P. Harms, "False consensus beliefs and populist attitudes," *Political Psychology*, 2025. doi: 10.1111/pops.70026.
- [16] K. Szulecki, "Conceptualizing energy democracy," *Environmental Politics*, vol. 27, no. 1, pp. 21-41, 2018. doi:10.1080/09644016.2017.1387294.
- [17] B. Van Veelen and D. Van der Horst, "What is energy democracy? Connecting social science energy research and political theory," *Energy Research & Social Science*, vol. 46, pp. 19-28, 2018. doi: 10.1016/j.erss.2018.06.010.
- [18] P. Q. Hirst, *Associative Democracy: New Forms of Economic and Social Governance*, Cambridge: Polity Press, 2003.
- [19] M. J. Burke and J. C. Stephens, "Energy democracy: Goals and policy instruments for sociotechnical transitions," *Energy Research & Social Science*, vol. 33, pp. 35-48, 2017. doi: 10.1016/j.erss.2017.09.024.
- [20] K. Szulecki and I. Overland, "Energy democracy as a process, an outcome and a goal: A conceptual review," *Energy Research & Social Science*, vol. 69, p. 101768, 2020. doi:10.1016/j.erss.2020.101768.
- [21] R. Schmalz-Bruns, "The normative desirability of participatory governance," in *Participatory Governance in Multi-Level Context*, H. Heinelt, P. Getimis, G. Kafkalas, R. Smith, and E. Swyngedouw, Eds., Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften, 2002. doi:10.1007/978-3-663-11005-7.
- [22] J. Habermas, *Theorie des kommunikativen Handelns*, 11th ed., Frankfurt am Main: Suhrkamp, 2019.
- [23] N. Fraser, "Social justice in the age of identity politics: Redistribution, recognition, participation," *WZB Discussion Paper No. FS I 98-108*, Berlin: Wissenschaftszentrum Berlin für Sozialforschung (WZB), 1998.
- [24] J. Cohen, "Procedure and substance in deliberative democracy," in *Deliberative Democracy: Essays on Reason and Politics*, J. Bohman and W. Rehg, Eds., Cambridge, MA: MIT Press, 1997, pp. 407-438. doi:10.7551/mitpress/2324.003.0017.
- [25] F. W. Scharpf, *Demokratiethorie zwischen Utopie und Anpassung*, 2nd ed., Konstanz: Universitätsverlag Konstanz, 1972.
- [26] B. Geißel, "Wozu Demokratisierung der Demokratie? - Kriterien zur Bewertung partizipativer Arrangements," in A. Vetter (Ed.), *Erfolgsbedingungen lokaler Bürgerbeteiligung*, Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften, 2008, pp. 29-48. doi: 10.1007/978-3-531-09026-9\_2.
- [27] D. Easton, *A Systems Analysis of Political Life*, New York, NY: Wiley, 1965.
- [28] O. Renn, I. Wolf, and D. Setton, "Soziales Nachhaltigkeitsbarometer der Energiewende," *GESIS Data Archive*, 2020. doi:10.7802/2120.
- [29] D. Setton, *Soziale Nachhaltigkeit Wagen - Die Energiewende aus Sicht der Bevölkerung*, Potsdam: Institute for Advanced Sustainability Studies (IASS), 2020. doi:10.2312/IASS.2020.007.
- [30] P. Mayring, *Qualitative Inhaltsanalyse: Grundlagen und Techniken*, 13th rev. ed., Weinheim and Basel: Beltz Verlag, 2022.

# Who Drives the Heat Transition? How Intermediaries Shape Building Owners' Willingness to Install Heat Pumps

Adelheid BÖCKMANN <sup>1\*</sup>, Emily DREWING <sup>2</sup>, Ann-Kathrin DREIER <sup>3</sup>, Franziska BOCKELMANN <sup>3</sup>, Fabian HÜSING <sup>4</sup>, Andreas SCHULTE <sup>5</sup>

<sup>1</sup> Universität Vechta, Driverstraße 22, 49377 Vechta

<sup>2</sup> Carl von Ossietzky Universität Oldenburg, Ammerländer Heerstraße 114-118, 26129 Oldenburg

<sup>3</sup> siz energieplus, Hamburger Straße 277, 38114 Braunschweig

<sup>4</sup> Institut für Solarenergieforschung Hameln (ISFH), Am Ohrberg 1, 31860 Emmerthal

<sup>5</sup> Institut für Thermodynamik, Hans-Sommer-Straße 5, 38106 Braunschweig

\* adelheid.boeckmann@uni-vechta.de

---

## Abstract

In the building sector, the German heat transition partly depends on private building owners' willingness to install heat pumps. Next to state support, this willingness is influenced by actors who mediate between complex requirements, individual life situations, and technical solutions. Such intermediaries operate at the interfaces of consulting, planning, and implementation. They decisively shape these processes through fostering understanding and trust between different actors, as well as providing structure and support. This paper explores how different intermediation activities can influence building owners' willingness to install small-scale heat pumps and suggests an initial literature-based framework. The findings enhance the understanding of intermediaries' influence on decision-making processes and of how their roles may be strategically strengthened in the heat transition.

## Keywords

Energy transition; intermediaries; heat transition; heat pump; installation willingness

---

## 1. Introduction

For a long time, the German energy transition largely focused on renewable electricity generation. In contrast, the heat sector received comparatively little attention, albeit being essential for achieving national climate targets (cf. §§1 [1]). Almost 40 % of Germany's total CO<sub>2</sub> emissions are caused by the heating sector (total heat production). Also, the heat sector accounts for 57 % of German final energy consumption, with private households responsible for almost half of total heat consumption [2]. Regarding private households, the provision of space heating and domestic hot water accounts for 90 % of final energy consumption [3].

In recent years, the heat transition's critical role is increasingly recognized. Important policy measures have been introduced through the Heat Planning Act (WPG) [4] and the Buildings Energy Act (GEG) [5]. Specifically, the WPG obliges municipalities to systematically assess (potential) heat provision strategies based on district heating networks, and compile municipal target scenarios for heating. Also, the share of renewably generated heat transmitted in these networks is to be increased significantly. Since installing renewable heat generation plants and distribution grids is costly, network-based heat supply solutions are particularly apt for densely populated, high-demand areas. In large and medium-sized towns, heat can be distributed to a high number of buildings over short

distances, and existing infrastructures can be expanded [6].

While the roll-out of district heating is a central objective of the WPG, many buildings cannot be connected to such grids. In rural areas, the feasibility of heat networks strongly depends on actor constellations and the overall context. For new housing development areas, the GEG requires newly installed heating systems to provide heat with a share of at least 65 % stemming from renewable generation or unavoidable waste heat. In the future, these standards will become mandatory for new heat system installations in the entire building stock. In short, recent legislation, while emphasising district heating, also establishes targets which can hardly be met without decentralised heat pumps. Scenarios on future German energy supply hence paint heat pumps as a central heat transition technology [7].

In line with this, we focus on decentralised heat pumps in this contribution. They can be installed in various types of buildings, such as new constructions, old buildings in need of energy-efficient retrofitting as well as tenements, which may be more challenging to renovate, e.g. due to tenancy law requirements [8]. While building owners do not constitute a homogeneous group that can easily be addressed – private family home owners profoundly differ from landlords letting multiple apartments – heat pump installation poses a challenge to many.

Before a decision on heat pump installation is made, most building owners require a multitude of information. To this end, they usually seek advice from professionals (e.g. architects, energy consultants, craftsmen) – also regarding additional measures (such as energy storage and photovoltaic systems). In 2023, a right-wing campaign opposing a leaked draft of the GEG [9] and the resulting polarised public debate caused great insecurities among German citizens [10], as well as reluctance among installers [11]. Thus, the transition to heat pump technology requires a high degree of individual initiative. How can we grasp this conceptually?

In social science on energy transitions, two salient concepts regarding individuals' relations towards (renewable) energy projects are *acceptance* and *participation*. Acceptance commonly refers to a favourable attitude toward top-down decisions or measures [12, 13]. Participation, often regarded as decisive for acceptance, alludes to voluntariness, freedom of choice, and co-creation. Construing building owners' heat pump installation as participation appears incongruous due to legislative requirements (e.g. municipal heat planning, efficiency standards) as well as technical and infrastructural constraints [14, 15].

Thus, neither acceptance nor participation adequately grasp what we are looking to understand. Instead, we use the term *willingness* to refer to an active but contingent disposition to act, which includes the perception of personal responsibility, the weighing of opportunities and risks as well as the subjective assessment of whether one's own actions are effective and meaningful [16, 17]. Willingness is not merely a preliminary stage of the actual installation, but constitutes an analytical field in its own right. The concept is well-established in more general research on retrofitting decisions (which may include the installation of a heat pump) (e.g. [18, 19]).

Barriers and drivers of energy-efficient retrofitting measures have been studied across different spatial and social contexts [20, 21]. Next to rational cost benefit calculations, homeowners' actions [22, 23] are influenced by trust, social comparison, prior experiences, and perceived support. [24, 25] found psychological and social factors – such as perceived control, risk aversion, or feelings of overwhelm – to be key determinants of individuals' willingness to install a heat pump. Moreover, recent literature points to the role of socio-spatial contextual factors: willingness varies significantly between urban and rural areas [13], and depending on existing infrastructure and the energetic condition of the building [26]. Direct neighbourhood effects – such as perceived disturbances caused by outdoor units – also significantly influence installation willingness [27].

Another central finding is that *intermediaries* play a key role for decisions regarding energy-efficient retrofitting [18, 28]. Among the wide range of definitions offered in the literature, we adopt the definition introduced by [28] for their analysis of intermediaries' roles regarding homeowner decisions to invest in heat pump technology, grasping intermediaries as actors who can influence homeowners' decisions and “enable exchange of knowledge, skills development, and perform connecting and mediating functions” [29, p. 138]). Architects and installers are examples of heat sector intermediaries [18].

In light of recent policy developments, future scenarios underlining the relevance of heat pumps, and the contingency of building owners' installation willingness, we provide a literature-based initial assessment of inter-

mediaries already studied, others that may be relevant, and further research desiderata. Our approach is guided by two questions:

- Which actors (potentially) act as intermediaries regarding building owners' willingness to install heat pumps?
- Through which activities or functions can intermediaries (potentially) contribute to the successful activation of building owners?

## 2. Methods and Methodology

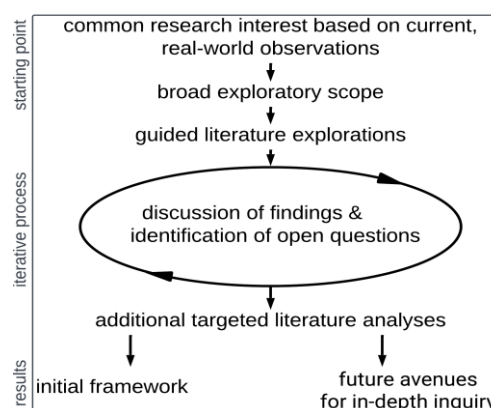


Fig. 1: The interdisciplinary exploration process

Many factors influencing the roll-out of heat pumps are subject to dynamic and recent changes (such as intermediaries and their activities) – and likely not fully represented in the literature as of yet. With our research interest being so timely, the author team comprising researchers from different disciplines and professionals working more practice-oriented proved a strength.

Interdisciplinary work typically begins with a broad exploratory scope and attains depth through sustained, long-term engagement that reveals the most consequential areas for further inquiry. Accordingly, we realised a stage-gate process (Fig. 1). We mapped out which actors (could) play a role during the different phases of the installation process, strongly relying on experiences reported by the practitioners in the author team. Then, we searched the relevant literature for information on intermediaries and their activities related to heat pump installation and renewable energy adoption. After discussing our findings within the author team, we conducted additional, targeted literature analyses.

Our approach was led by two goals: to identify promising, yet scientifically still underexplored intermediaries (and their activities), and to suggest an initial framework that both practitioners and researchers can use (and develop further). To this end, we organized our findings using the Quadruple Helix framework [30], which offers a structured way to capture the broad variety of (potential) intermediaries and their activities. The framework distinguishes four dimensions – academia, economy, government/public administration, and civil society.

## 3. Results

In the following, we introduce intermediaries relevant to building owners' willingness to adopt heat pumps, delineate their (potential) contributions, and identify areas where their potential may be further leveraged.

The exploratory systematisation indicates that heat transition intermediaries span all dimensions of the Quadruple Helix. Regarding the *government/public administration* domain, municipalities act as crucial intermediaries, as the Heat Planning Act imposes far-reaching assignments on them. Heating plans, approval procedures, and funding instruments indirectly influence building owners' decisions. Intermediaries working in *academia*, too, influence building owners indirectly, e.g. through developing new technologies, finding ways to render existing solutions more affordable and feasible, and engaging in practice transfer activities. Also, education always bears

potential to spread relevant knowledge, both among potential technology adopters as well as through offering tailored qualification programmes to professionals. Thus, intermediaries from both the *academia* and *government/public administration* realms undoubtedly shape the heat transition profoundly.

Due to our rigorous orientation towards micro-level implementation, we focus on results relating to intermediary actors from two of the abovementioned domains: *civil society* and *economy* (see Tab. 1). Furthermore, with regard to limited space, we agreed to highlight a selection of findings through inter- and transdisciplinary discussions.

Tab. 1: Key (economy and civil society) intermediaries shaping the willingness to install heat pumps

classification based on the quadruple helix	intermediary	type of (potential) intermediation	literature (selection)
economy (various sectors)	Architects	planning, consulting	[18, 28, 31–35]
	Energy advisors		
	Craftspeople	consulting, installation, “supply-side spill over effects”	
	Manufacturers	phase-out of old technologies, production and marketing of new technologies	
	Salespeople	recommendations, consulting, “supply-side spill over effects”	
	Tenants	expression of a wish, increased demand for homes with heat pumps; influence potentially limited by tenant-landlord dilemma	
civil society (various sectors)	Press/media/social media influencers	contribute in various ways; in the literature often simply referred to as “the Internet”; “greenfluencing”	[20, 32, 41]
	Peers (e.g. friends, relatives, neighbours)	“peer effects” (e.g. through experience and knowledge exchange, pioneering); “spillover effects within close proximity” – so far mainly documented for rooftop PV, promising initial findings also for heat pumps	[42] (exemplary study of peer effects on rooftop PV installation); [35]
	Non-governmental organisations (e.g. climate protection agencies/specialist networks)	information on available solutions and implementations without business intent; assessment of the effects of local decisions in global contexts	[28]

Regarding (1) *economy* actors, we differentiate between (1.1) installation intermediaries and (1.2) intermediaries within the residential sector. Among (1.1) intermediaries influencing installation (decisions), architects, energy advisors, and craftsmen have been studied most extensively. These actors function as “gatekeepers” [18], structuring knowledge, recommending or excluding specific technical options, and thereby affect building owners' decision-making. [18] further analyse the factors that shape the knowledge and portfolios of such intermediaries, identifying key influences such as professional training and networks, trade journals and fairs, information provided by manufacturers, personal interests, legal regulations, liability considerations, market conditions, and lived experience with the relevant technology. Evidently, salespeople and manufacturers, too, act as intermediaries, albeit rather indirectly (e.g. through pricing and providing information on products). Similar to craftspeople, chimney sweeps have a unique kind of access to building owners

(e.g. through regular inspections, mandatory advisory duties), and are widely seen as trusted advisors. However, while expected to support the heat transition (e.g. through information on renewable heating), chimney sweeps' traditional fields of work – maintaining fossil-based heating systems – depend on the very technologies that are set to be phased out. Thus, some intermediaries' roles entail opportunities, but also goal conflicts – an aspect that has so far received little attention in the literature.

Within the (1.2) residential sector, the role of tenants as intermediaries is complex. Literature on the “landlord/tenant dilemma” – building owners' reluctance to invest in retrofitting measures which benefit tenants through lower energy cost – presents multiple approaches for addressing this issue [36–39]. In some cases, tenants can act as potent intermediaries, especially when they are willing and able to pay more for renewable heating [40, 43]. Such

agency enables certain, rather well-off tenant groups to influence either the demand in the housing market or their immediate living situation through negotiations with the landlord.

With regard to (2) *civil society* intermediaries, there is considerable research potential on at least four promising intermediary groups: (2.1) the press, (2.2) peers, (2.3) social media and (2.4) non-governmental organisations.

Unsurprisingly, (2.1) the press can conduct powerful intermediation, e.g. through framing and amplifying politicians' positions. Evidenced by the high presence of political spokespersons in news coverage and frame-setting on tabloids' front pages, press actors decisively shape public perception, (technology) acceptance, and ultimately the individual willingness to act [44].

(2.2) Peers, e.g. neighbours or friends, too, contribute to the diffusion of new technologies. Passive observation of peers seems to exert a crucial influence on individuals' energy behaviours (even more than direct communication)[45]. To date, peer effects have been studied more extensively for rooftop PV [42] and renewable energy in general [45, 46] than for heat pumps.

(2.3) Different actors using social media aggregate information flows and, with enough followers, shape public opinions on renewable energy, acting as so-called "greenfluencers" [41, 47, 48]. Their potential influence is comparable to traditional news media (large audience) and peers (perceived trustworthiness), albeit their reach could be much larger and less predictable. There are still no studies that have specifically examined this phenomenon for heat pumps.

(2.4) Non-governmental and/or non-profit organisations can influence homeowners' decisions, as well-founded advice from an entity without business intent can be regarded more trustworthy. Climate protection agencies and specialist networks can contribute to home owners' awareness and knowledge, supporting educated decisions. To date, these actors remain understudied.

#### 4. Discussion

The literature has strongly focused on *implementation* or *supply-side* intermediaries, who are directly involved in the realisation of heat pump installations and therefore maintain direct contact with building owners [18, 28]. Recent findings suggest that peer effects could be highly relevant for heat pump installation [35, 49]. In the same vein, district-level approaches to encourage collective retrofitting measures appear promising [50]. With incumbent firms increasingly recognised for their "potential to support sustainability transitions" [51], large energy companies providing all-in-one packages (covering consulting, installation and maintenance) might contribute to heat pump roll-out in the future.

Regarding intermediaries from *academia* and *government/public administration*, we found few indications of direct influence on building owners. As recent findings suggest, municipal politicians may actually seek to collaborate with different intermediaries [52]. It could be worthwhile to examine whether and how (future) municipal heat planning affects the advisory activities of implementation intermediaries or even building owners' willingness to install heat pumps directly. Generally, interactions between intermediaries (of both different and the same type) deserve more attention [53]: Do they support and depend on each other – or compete for attention, resources, and authority over interpretation? Finally, a central research desideratum concerns potential conflicts of interest some

intermediaries may face, and their implications for energy transitions [54].

#### 5. Conclusion

Heat pumps are expected to play a central role in future decentralized heat supply – particularly in areas where heat networks are not feasible. Actors from all domains of the Quadruple Helix can influence building owners' willingness to install heat pumps. Some of these actors are mentioned in the literature on intermediaries, while others have received less attention. Our findings provide a starting point for researching promising intermediaries (e.g. peers) more systematically, which also helps to more thoroughly account for interactions and potential conflicts between (different) intermediaries. While our findings are explorative and preliminary at this point, they suggest that a variety of actors may crucially contribute to building owners' heat pump adoption – if recognised and adequately supported in their intermediary function.

#### Acknowledgements

We thank two anonymous reviewers for their insightful, constructive comments on our first draft. The TEN.efzn research project is funded by zukunft.niedersachsen, the joint science funding program of the Lower Saxony Ministry of Science and Culture and the Volkswagen Foundation. ISFH work in Wärmepumpen-Initiative Niedersachsen (WIN) is funded through a project (ZW-6 80163024) by Lower Saxony's Ministry of Environment, Energy and Climate Protection. The authors thank the ministries and project partners for funding and support. Carlotta Steimke and Thea Jansen supported our work as student researchers.

#### References

- [1] Federal Climate Action Act (Bundes-Klimaschutzgesetz – KSG). Accessed: Oct. 14, 2025. [Online]. Available: [https://www.gesetze-im-internet.de/englisch\\_ksg/englisch\\_ksg.html](https://www.gesetze-im-internet.de/englisch_ksg/englisch_ksg.html)
- [2] Statista, Wärmemarkt in Deutschland - Statistiken & Fakten. Accessed: Dec. 9, 2025. [Online]. Available: <https://de.statista.com/themen/1251/waermemarkt/>
- [3] Umweltbundesamt, Energieverbrauch für fossile und erneuerbare Wärme. Accessed: Dec. 3, 2025 [Online]. Available: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/energieverbrauch-fuer-fossile-erneuerbare-waerme>
- [4] Gesetz für die Wärmeplanung und zur Dekarbonisierung der Wärmenetze (Wärmeplanungsgesetz - WPG). Accessed: Oct. 14, 2025. [Online]. Available: <https://www.gesetze-im-internet.de/wpg/BJNR18A0B0023.html>
- [5] Gesetz zur Einsparung von Energie und zur Nutzung erneuerbarer Energien zur Wärme- und Kälteerzeugung in Gebäuden (GEG). Accessed: Oct. 15, 2025. [Online]. Available: <https://www.gesetze-im-internet.de/geg/> .)
- [6] Prognos AG, Perspektive der Fernwärme: Aktualisierung des Gutachtens "Perspektive der Fernwärme - Aus- und Umbau städtischer Fernwärme als Beitrag einer sozial-ökologischen Wärmepolitik" aus dem Jahr 2020.
- [7] G. Luderer, F. Bartels, and T. Brown, Eds., "Die Energiewende kosteneffizient gestalten: Szenarien

- zur Klimaneutralität 2045,” Potsdam-Institut für Klimafolgen-Forschung (PIK), Potsdam, Ariadne-Report, 2025. Accessed: Oct. 14, 2025. [Online]. Available: [https://ariadneprojekt.de/media/2025/03/Ariadne-Report\\_Szenarien2025\\_Maerz2025\\_highres\\_corrJuli2025.pdf](https://ariadneprojekt.de/media/2025/03/Ariadne-Report_Szenarien2025_Maerz2025_highres_corrJuli2025.pdf)
- [8] F. Keimeyer et al., “Erneuerbare Wärmeversorgung im vermieteten Gebäudebestand,” 2025.
- [9] T. Haas, H. Sander, A. Fünfgeld, and F. Mey, “Climate obstruction at work: Right-wing populism and the German heating law,” *Energy Research & Social Science*, vol. 123, p. 104034, 2025, doi: 10.1016/j.erss.2025.104034.
- [10] J. Epp, N. Kögel, D. Steidle, and K. Treichel-Grass, Bürgerperspektiven auf politische Maßnahmen der Wärmewende: Ergebnisse der Ariadne-Bürgerkonferenz 1./2.Juni 2024: Potsdam Institute for Climate Impact Research, 2025. Accessed: Dec. 8, 2025. [Online]. Available: [https://publications.pik-potsdam.de/pubman/faces/ViewItemOverviewPage.jsp?itemId=item\\_32228](https://publications.pik-potsdam.de/pubman/faces/ViewItemOverviewPage.jsp?itemId=item_32228)
- [11] G. Knetsch, “Montage von Wärmepumpen: Läuft da was schief?,” BR24, 05 Aug., 2025. Accessed: Dec. 8, 2025. [Online]. Available: <https://www.br.de/nachrichten/wirtschaft/waermepumpen-montage-laeuft-da-was-schief,Usw6dAQ>
- [12] J. Bender, L. Fait, and H. Wetzel, “Acceptance of demand-side flexibility in the residential heating sector — Evidence from a stated choice experiment in Germany,” *Energy Policy*, vol. 191, p. 114145, 2024, doi: 10.1016/j.enpol.2024.114145.
- [13] J. Liu et al., “Rural residents' acceptance of clean heating: An extended technology acceptance model considering rural residents' livelihood capital and perception of clean heating,” *Energy and Buildings*, vol. 267, p. 112154, 2022, doi: 10.1016/j.enbuild.2022.112154.
- [14] T. E. de Wildt, A. R. Boijmans, E. J. Chappin, and P. M. Herder, “An ex ante assessment of value conflicts and social acceptance of sustainable heating systems,” *Energy Policy*, vol. 153, p. 112265, 2021, doi: 10.1016/j.enpol.2021.112265.
- [15] J. R. Snape, P. J. Boait, and R. M. Rylatt, “Will domestic consumers take up the renewable heat incentive? An analysis of the barriers to heat pump adoption using agent-based modelling,” *Energy Policy*, vol. 85, pp. 32–38, 2015, doi: 10.1016/j.enpol.2015.05.008.
- [16] E. Strazzera, D. Meleddu, D. Contu, and F. Fornara, “Willingness to pay for innovative heating/cooling systems: A comprehensive appraisal of drivers and barriers to adoption in Ireland and Italy,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 192, p. 114192, 2024, doi: 10.1016/j.rser.2023.114192.
- [17] V. Palomba, G. E. Dino, and A. Frazzica, “Analysis of the Potential of Solar-Assisted Heat Pumps: Technical, Market, and Social Acceptance Aspects,” *Solar RRL*, vol. 6, no. 8, 2022, doi: 10.1002/solr.202200037.
- [18] B. S. Zaunbrecher, K. Arning, J. Halbey, and M. Ziefle, “Intermediaries as gatekeepers and their role in retrofit decisions of house owners,” *Energy Research & Social Science*, vol. 74, p. 101939, 2021, doi: 10.1016/j.erss.2021.101939.
- [19] M. Achtnicht and R. Madlener, “Factors influencing German house owners' preferences on energy retrofits,” *Energy Policy*, vol. 68, pp. 254–263, 2014, doi: 10.1016/j.enpol.2014.01.006.
- [20] S. Hyysalo, J. K. Juntunen, and S. Freeman, “User innovation in sustainable home energy technologies,” *Energy Policy*, vol. 55, pp. 490–500, 2013, doi: 10.1016/j.enpol.2012.12.038.
- [21] K. Gram-Hanssen, “Retrofitting owner-occupied housing: remember the people,” *Building Research & Information*, vol. 42, no. 4, pp. 393–397, 2014, doi: 10.1080/09613218.2014.911572.
- [22] C. C. Michelsen and R. Madlener, “Switching from fossil fuel to renewables in residential heating systems: An empirical study of homeowners' decisions in Germany,” *Energy Policy*, vol. 89, pp. 95–105, 2016, doi: 10.1016/j.enpol.2015.11.018.
- [23] D. Peñaloza et al., “Social and market acceptance of photovoltaic panels and heat pumps in Europe: A literature review and survey,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 155, p. 111867, 2022, doi: 10.1016/j.rser.2021.111867.
- [24] A. S. Gaur, D. Z. Fitiwi, and J. Curtis, “Heat pumps and our low-carbon future: A comprehensive review,” *Energy Research & Social Science*, vol. 71, p. 101764, 2021, doi: 10.1016/j.erss.2020.101764.
- [25] S. Karytsas and H. Theodoropoulou, “Public awareness and willingness to adopt ground source heat pumps for domestic heating and cooling,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 34, pp. 49–57, 2014, doi: 10.1016/j.rser.2014.02.008.
- [26] Y. Wang, J. Wang, and W. He, “Development of efficient, flexible and affordable heat pumps for supporting heat and power decarbonisation in the UK and beyond: Review and perspectives,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 154, p. 111747, 2022, doi: 10.1016/j.rser.2021.111747.
- [27] I. Psarra, E. Turhan, and F. Ghassemialabadi, “Zero carbon, some nuisance: Exploring the viewpoints of heat pump owners and their neighbors in Groningen, Netherlands,” *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy*, vol. 19, no. 1, 2024, doi: 10.1080/15567249.2024.2421924.
- [28] R. Decuypere, B. Robaeyst, L. Hudders, B. Baccarne, and D. van de Sompel, “Transitioning to energy efficient housing: Drivers and barriers of intermediaries in heat pump technology,” *Energy Policy*, vol. 161, p. 112709, 2022, doi: 10.1016/j.enpol.2021.112709.
- [29] R. E. Bush, C. S. Bale, M. Powell, A. Gouldson, P. G. Taylor, and W. F. Gale, “The role of intermediaries in low carbon transitions – Empowering innovations to unlock district heating in the UK,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 148, pp. 137–147, 2017, doi: 10.1016/j.jclepro.2017.01.129.
- [30] E. G. Carayannis and D. F. Campbell, “‘Mode 3’ and ‘Quadruple Helix’: toward a 21st century fractal innovation ecosystem,” *IJTM*, vol. 46, 3/4, p. 201, 2009, doi: 10.1504/IJTM.2009.023374.

- [31] I. Mignon and L. Winberg, "The role of public energy advising in sustainability transitions – empirical evidence from Sweden," *Energy Policy*, vol. 177, p. 113525, 2023, doi: 10.1016/j.enpol.2023.113525.
- [32] G. Killip and A. Owen, "The construction industry as agents of energy demand configuration in the existing housing stock," *Energy Policy*, vol. 147, p. 111816, 2020, doi: 10.1016/j.enpol.2020.111816.
- [33] B. Risholt and T. Berker, "Success for energy efficient renovation of dwellings—Learning from private homeowners," *Energy Policy*, vol. 61, pp. 1022–1030, 2013, doi: 10.1016/j.enpol.2013.06.011.
- [34] J. Fischer and S. Guy, "Re-interpreting Regulations: Architects as Intermediaries for Low-carbon Buildings," *Urban Studies*, vol. 46, no. 12, pp. 2577–2594, 2009, doi: 10.1177/0042098009344228.
- [35] T. Arvanitopoulos, C. Wilson, and C. Morton, "Decarbonising residential heating: local conditions and spatial spillovers driving heat pump uptake," *Energy Policy*, vol. 206, p. 114787, 2025, doi: 10.1016/j.enpol.2025.114787.
- [36] B. Ástmarrsson, P. A. Jensen, and E. Maslesa, "Sustainable renovation of residential buildings and the landlord/tenant dilemma," *Energy Policy*, vol. 63, pp. 355–362, 2013, doi: 10.1016/j.enpol.2013.08.046.
- [37] I. Petrov and L. Ryan, "The landlord-tenant problem and energy efficiency in the residential rental market," *Energy Policy*, vol. 157, p. 112458, 2021, doi: 10.1016/j.enpol.2021.112458.
- [38] S. März, I. Stelk, and F. Stelzer, "Are tenants willing to pay for energy efficiency? Evidence from a small-scale spatial analysis in Germany," *Energy Policy*, vol. 161, p. 112753, 2022, doi: 10.1016/j.enpol.2021.112753.
- [39] C. Domenig et al., "Overcoming the landlord–tenant dilemma: A techno-economic assessment of collective self-consumption for European multi-family buildings," *Energy Policy*, vol. 189, p. 114120, 2024, doi: 10.1016/j.enpol.2024.114120.
- [40] K. Reidl and R. Wüstenhagen, "Decarbonising the rental housing market: An experimental analysis of tenants' preferences for clean energy features of residential buildings," *Energy Policy*, vol. 198, p. 114472, 2025, doi: 10.1016/j.enpol.2024.114472.
- [41] J. Jekel, "Between Advocacy and Consumerism: Exploring the Representation of Sustainability by Greenfluencers on Instagram," 2024. [Online]. Available: <https://uu.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A1862748&dswid=6181>
- [42] T. van Casteren, I. V. Ossokina, and T. A. Arentze, "Do you listen to your neighbour? The role of block leaders in community-led energy retrofits," *Energy Research & Social Science*, vol. 111, p. 103472, 2024, doi: 10.1016/j.erss.2024.103472.
- [43] E. Stolyarova, H. Le Cadre, D. Osso, and B. Allibe, "Stated Preferences for Space Heating Investment." Accessed: Oct. 15, 2025. [Online]. Available: <https://minesparis-psl.hal.science/hal-01160059/document>
- [44] P. Jost, M. Mack, and J. Hillje, "Aufgeheizte Debatte?: Eine Analyse der Berichterstattung über das Heizungsgesetz - und was wir politisch daraus lernen können." Accessed: Oct. 15, 2025. [Online]. Available: [https://www.progressives-zentrum.org/wp-content/uploads/2024/04/240418\\_DPZ\\_Studie\\_Aufgeheizte-Debatte.pdf](https://www.progressives-zentrum.org/wp-content/uploads/2024/04/240418_DPZ_Studie_Aufgeheizte-Debatte.pdf)
- [45] K. S. Wolske, K. T. Gillingham, and P. W. Schultz, "Peer influence on household energy behaviours," (in En;en), *Nat Energy*, vol. 5, no. 3, pp. 202–212, 2020, doi: 10.1038/s41560-019-0541-9.
- [46] L. H. Broska, "It's all about community: On the interplay of social capital, social needs, and environmental concern in sustainable community action," *Energy Research & Social Science*, vol. 79, p. 102165, 2021, doi: 10.1016/j.erss.2021.102165.
- [47] G. Reichert, S. Ehrenbrandtner, R. Fina, F. Theuretzbacher, C. Birklbauer, and C. Schmidl, "Different Types of Heat Pump Owners in Austria—Purchase Arguments, User Satisfaction, Operating Habits, and Expectations Regarding Control and Regulation Strategies," *Businesses*, vol. 5, no. 2, p. 18, 2025, doi: 10.3390/businesses5020018.
- [48] T. Zobeidi, N. Komendantova, and M. Yazdanpanah, "Social media as a driver of the use of renewable energy: The perceptions of instagram users in Iran," *Energy Policy*, vol. 161, p. 112721, 2022, doi: 10.1016/j.enpol.2021.112721.
- [49] N. Komendantova, T. Zobeidi, and M. Yazdanpanah, "How Do Instagram Messages Affect the Use of Renewable Energy? -- Application of an Extended Information Adoption Model," *J ENV INFORM*, 2024, doi: 10.3808/jei.202400515.
- [50] hamburg.de, "Ab September 2025: Finkenwerder startet durch." Accessed: Dec. 8, 2025. [Online]. Available: <https://www.hamburg.de/politik-und-verwaltung/behoerden/behoerde-fuer-stadtentwicklung-und-wohnen/projekte-und-kampagnen/energetisch-sanieren/ab-september-2025-finkenwerder-startet-durch-1045096>
- [51] G. Kungl, "Challenges of the current discourse on incumbent firms in sustainability transitions," *Energy Research & Social Science*, vol. 108, p. 103367, 2024, doi: 10.1016/j.erss.2023.103367.
- [52] M. Halbwachs, S. Gustafsson, and E. Perez Vico, "'We can't do everything ourselves.' - Why Swedish municipalities deliberately promote intermediation in governing the mobility transition," *Environmental Innovation and Societal Transitions*, vol. 56, p. 100998, 2025, doi: 10.1016/j.eist.2025.100998.
- [53] W. Kanda, T. Magnusson, and O. Hjelm, "Intermediaries and Intermediation in Sustainability Transitions," 2024.
- [54] P. Upham et al., "Applying a conflict typology to ecologies of intermediation: the case of a transitions intermediary in Spain," *Environmental Innovation and Societal Transitions*, vol. 58, p. 101072, 2026, doi: 10.1016/j.eist.2025.101072

# Zielgruppenspezifische Hemmnisse von Verbraucher\*innen in der Wärmewende – Ergebnisse einer Fallstudie in Bremen

Charlotte SCHMID <sup>1\*</sup>, Judith MASCHKE <sup>1</sup>, Katharina RENOUT <sup>1</sup>, Stefanie BAASCH <sup>1</sup>

<sup>1</sup> artec Forschungszentrum Nachhaltigkeit der Universität Bremen, Enrique-Schmidt-Straße 7, 28359 Bremen

\* chschmid@uni-bremen.de

## Kurzfassung

Für das Gelingen der Wärmewende ist deren Umsetzung auf Ebene der Verbraucher\*innen erforderlich. Bisherige Forschungen zeigen erhebliche Umsetzungsbarrieren, wie steigende Energiekosten, einen fehlenden Zugang zu Ressourcen oder das „Vermietende-Mietende-Dilemma“. Erkenntnisse einer zielgruppenspezifisch gerechten Ausgestaltung der Wärmewende gibt es bislang kaum. Diese Fallstudie stellt hierzu Ergebnisse vor, deren Basis qualitative Stakeholder- und Konsument\*innen-Interviews auf Quartiersebene sind. Dabei zeigt sich, dass die Sorge vor hohen Kosten durch strukturelle und kommunikative Barrieren sowie subjektive Gerechtigkeitsbewertungen verstärkt wird und so die Umsetzung der Wärmetransformation bremst. Insbesondere eine Beteiligung vulnerabler Gruppen erfordert nicht nur finanzielle Unterstützung, sondern auch spezifische und bedarfsorientierte Beratungsangebote auf Quartiersebene.

## Schlagworte

Wärmewende; Energiegerechtigkeit; Partizipation; Kommunikation; gruppenspezifische Beratung

## 1. Einleitung

Das Land Bremen hat sich zum Ziel gesetzt, bis 2038 die Kohlendioxidemissionen um 95 % gegenüber dem Niveau von 1990 zu senken [1]. Zur Erreichung dieses Ziels trägt auch die Emissionsminderung im Gebäudesektor bei, insbesondere durch klimaneutrale Wärmeversorgung, energetische Gebäudesanierungen und Veränderungen im Heizverhalten [2]. In Bremen machen Privathaushalte mit ca. 71 % einen Großteil des Wohnungsbestands aus, weshalb ihnen eine wichtige Bedeutung bei der Emissionsminderung zukommt [3]. Individuelle Faktoren wie z. B. Einstellungen, Werte, die eigene finanzielle Situation oder die aktuelle Lebenssituation haben einen starken Einfluss auf Sanierungsentscheidungen und können diese fördern, aber auch hemmen [4].

Dieser Beitrag stellt zentrale Ergebnisse aus den laufenden Verbundforschungsvorhaben „Q4Q – Quartier für Quartier: Alternativen zum Erdgas und die Zukunft der Gasverteilernetze im Rahmen der kommunalen Wärmewende“ und „hyBit – Hydrogen for Bremen’s industrial transformation“ vor. Der Fokus der vorliegenden Studie liegt auf zielgruppenspezifischen Hemmnissen sowie Beteiligungs- und Handlungsoptionen von Verbraucher\*innen. Dazu wurden qualitative Einzel- und Gruppeninterviews mit Stakeholdern der kommunalen Wärmewende und Verbraucher\*innen in Bremen durchgeführt und ausgewertet.

Auch wenn in der kommunalen Wärmewende private Verbraucher\*innen häufig als eine Gruppe angesprochen werden, gibt es doch erhebliche Unterschiede, beispielsweise hinsichtlich der finanziellen Belastbarkeit oder der Möglichkeiten politischer Einflussnahme [5], [6]. Hierbei

zeigen sich sowohl distributive als auch prozedurale Gerechtigkeitsaspekte in ungleicher Ressourcenverteilung und Teilhabemöglichkeiten, welche sich auch auf die Akzeptanz der Wärmewende auswirken [7]. Eine sozial gerechtere Wärmewende benötigt daher die Umsetzung einer stärker bedarfsgerechten Entlastung und Förderung insbesondere vulnerabler Gruppen [5], [8]. Zudem ist eine breite gesellschaftliche Unterstützung sowie eine aktive Beteiligung erforderlich, um Handlungsoptionen zu erweitern und dadurch potenzielle Gerechtigkeitskonflikte adressieren zu können [9], [10].

Die zentrale Fragestellung dieses Beitrags ist, wie unterschiedliche Zielgruppen auf Quartiersebene an der Wärmewende gerechter beteiligt werden können und welche Hemmnisse diesem Anspruch entgegenstehen.

## 2. Aktueller Forschungsstand

Sozialwissenschaftliche Forschung zur Wärmewende hat bislang verschiedene Faktoren zur Teilhabe von Verbraucher\*innen an der Wärmewende identifiziert. Der Entscheidung zur Modernisierung geht häufig ein spezifischer Sanierungsanlass voraus (z. B. Umzug, Reparatur oder gesetzliche Verpflichtungen). Anschließend wirken multiple Faktoren, wie z. B. Wertorientierungen, Lebensphase, gesetzliche Regelungen, wirtschaftliche Aspekte, baulich-technische Aspekte, aber auch Multiplikator\*innen, fördernd oder hemmend auf die energetische Sanierungsbereitschaft [4].

Als *zielgruppenspezifische Hemmnisse* für selbstnutzende Eigentümer\*innen (Personen, die in ihrer eigenen Immobilie wohnen) im mittleren bis unteren Einkommensbereich, sind vor allem die Investitionskosten herausfordernd [5]. Zusätzlich stellen steigende Energiekosten und

CO<sub>2</sub>-Bepreisungen für diese Gruppe eine besondere Belastung dar [6]. Eine weitere relevante Zielgruppe sind Mieter\*innen. Für sie bleibt das *Vermietende-Mietende-Dilemma*, das die stark umstrittene Frage nach der Höhe der Umlage von Sanierungs- und Modernisierungskosten aufwirft, weiterhin zentral. Mieter\*innen im mittleren bis unteren Einkommenssegment sind häufig bereits durch hohe Mietkosten belastet, die durch die Umlage von Modernisierungskosten weiter erhöht würden [5]. Für private Kleinvermieter\*innen fehlt dagegen oftmals ein Anreiz zur Sanierung, da sie nur eingeschränkt profitieren, beispielsweise durch eine Wertsteigerung der Immobilie [11].

Auch strukturelle Rahmenbedingungen führen häufig zu einer stärkeren Belastung einzelner Bevölkerungsgruppen. So lässt sich nachweisen, dass Frauen, sowohl alleinlebend als auch in Sorgearbeit, häufiger aufgrund geringerer finanzieller Ressourcen in energetisch unsanierten Gebäuden wohnen [12]. Ähnliches gilt für ältere Personen, denen oftmals eine geringere Investitionsbereitschaft zugesagt wird [13]. Steigende Energiepreise belasten diese Gruppe in der Regel besonders stark, da unter anderem aufgrund einer durchschnittlich größeren Wohnfläche ein höherer Wärmebedarf besteht [14].

Auf politischer Ebene gibt es bereits Ansätze, zielgruppenspezifische Hemmnisse zu adressieren, wie z. B. die stärkere Kopplung von Förderung an Einkommen oder die Rückverteilung der CO<sub>2</sub>-Emissionen als Pro-Kopf-Pauschale. Diese Ansätze zielen darauf ab, betroffene Gruppen stärker zu beteiligen und so die Wärmewende gerechter zu gestalten [5], [8]. Um dem Vermietenden-Mietenden-Dilemma entgegenzuwirken, wird von Sozialverbänden auf Bundesebene eine Begrenzung der Modernisierungsumlage für den Schutz von Mietenden gefordert. Auch die Handhabung von Härtefällen soll laut aktuellen Studien reformiert werden, um z. B. Frauen in Sorgearbeit zu schützen [12], [13]. Darüber hinaus braucht es für Vermietende zusätzliche Anreize, um die Förderung für Sanierungsmaßnahmen in Anspruch zu nehmen [5], [11].

Zahlreiche in der Literatur diskutierte Maßnahmen setzen auf finanzielle Anreize oder Ausgleichszahlungen, um eine ausgewogene Kostenverteilung zu ermöglichen und so zusätzliche Handlungsspielräume zu schaffen [8]. Sozialwissenschaftliche Analysen und Praxisakteure fordern jedoch weitere Instrumente, etwa Programme zur effizienteren Wohnraumnutzung [14] oder umfassendere Informations- und Beratungsangebote [12]. Zudem wird eine stärkere Teilhabe in Planungsprozessen, insbesondere von vulnerablen Zielgruppen, als zentral erachtet [9], [10].

Bisherige Lösungsansätze zur Überwindung zielgruppenspezifischer Hemmnisse legen den Fokus vor allem auf finanzielle Aspekte. Darüber hinaus wirken sich aber auch die strukturellen Rahmenbedingungen vor Ort auf Entscheidungen aus, wie beispielsweise das soziale Umfeld, Energieversorgungsunternehmen (EVUs) oder die Kommunalverwaltung. Diesen spezifischen Aspekten widmet sich die vorliegende Fallstudie am Beispiel der Stadt Bremen.

### 3. Methodik

In Bremen sollte die Kommunale Wärmeplanung (KWP) nach Empfehlungen der Enquete-Kommission bereits Ende 2025 abgeschlossen sein. Der Zeitplan wurde jedoch nicht eingehalten. Aktuell werden die Stellungnahmen der Öffentlichkeit zum Entwurf des

Wärmeplans eingearbeitet und der Plan finalisiert. Anschließend wird er den politischen Gremien zur abschließenden Befassung vorgelegt [15]. Stand 2022 wurden noch 67,5 % der Gebäude in Bremen mit Erdgas, 12 % mit Erdöl und 19 % mit Fernwärme versorgt. Der Anteil erneuerbarer Energien betrug dabei weniger als 2 % [3]. Aufgrund der dichten Bebauung ist das Potenzial für dezentrale Wärmepumpen eher begrenzt. Das Potenzial für wirtschaftlich erschließbare Nah- und Fernwärmenetze beläuft sich auf ca. 34 % des Gesamtwärmebedarfs. Für Gebäude, die weder in potenziellen Wärmenetzgebieten liegen noch über geeignete Voraussetzungen für den Einsatz dezentraler Wärmepumpen verfügen, werden daher weiterhin alternative Lösungsansätze benötigt [16]. In mehreren Bremer Quartieren haben sich vor diesem Hintergrund bürgerschaftliche Initiativen formiert, die nachbarschaftliche Wärmeversorgungslösungen auf Basis von Anergienetzen anstreben [17].

Im Rahmen der hier vorgestellten Fallstudie wurden in den Jahren 2023 und 2024 in der Stadt Bremen insgesamt 27 leitfadengestützte Einzelinterviews mit kommunalen Stakeholdern der Wärmewende sowie drei Fokusgruppen mit 34 Verbraucher\*innen durchgeführt. Eine Übersicht der Befragungsgruppen ist in Tab. 1 dargestellt.

Tab. 1: Liste der Befragungsgruppen

Befragungsgruppen	Anzahl und Akronyme
Beratungsstelle	4 (B1-B4)
Energieversorgungsunternehmen	7 (E1-E7)
Gewerkschaft (teilweise Vorstände)	2 (G1-G2)
Handwerk	1 (H)
Lobbyverein	1 (L)
Senatorische Behörde (Abteilung Klimaschutz)	4 (SBK1-SBK4)
Senatorische Behörde (Abteilung Wirtschaft)	1 (SBW)
Umwelt- und Klimaschutzorganisation	2 (UK1-UK2)
Wirtschaftsförderung	4 (W1-W4)
Wohnungswirtschaft	1 (WW)

In den Stakeholder-Interviews standen vor allem folgende Fragen im Fokus: Welche Hemmnisse liegen für verschiedene Gruppen von Verbraucher\*innen vor? Wie kann die Wärmewende gerechter gestaltet werden? Wie kann die Beteiligung von Verbraucher\*innen an der Wärmewende gestärkt werden? Die Stakeholder wurden repräsentativ für die in der kommunalen Wärmewende beteiligten Akteursgruppen ausgewählt.

In den Fokusgruppen berichteten Verbraucher\*innen über ihre Erfahrungen, Probleme und Wünsche in Hinblick auf Heizen, Wärmeversorgung und einen möglichen Heizungswechsel. Die Diskussionen wurden von den Forschenden moderiert und sofern möglich aufgezeichnet, andernfalls erfolgte eine schriftliche Protokollierung. Als unterstützende Methode der Datenerhebung wurden Punktabfragen und ein Kurzfragebogen zu personenbezogenen und Gebäude-Daten genutzt. Insgesamt wurden

drei Fokusgruppen durchgeführt: Zwei Gruppen fanden im innerstädtischen Bremen-Findorff (**BF**) statt, das durch die für Bremen charakteristische dichte Reihenhausbebauung geprägt ist. Die dritte Gruppe wurde in Bremen-Hemelingen (**BH**) durchgeführt, einem städtischen Wohnquartier mit einer Mischung aus Reihenhäusern und Mehrfamilienhäusern. Die Fokusgruppen wurden durch Wurfsendungen in Briefkästen beworben und es nahmen laut Kurzfragebogen größtenteils Personen im Alter von 50 – 70 Jahren im mittleren Einkommensbereich teil. Die Teilnehmer\*innen waren alle selbstnutzende Eigentümer\*innen und überwiegend umweltbewusst eingestellt. Fast alle Gebäude wurden vor 1950 gebaut und weisen laut Einschätzung der Eigentümer\*innen einen mittleren Sanierungsbedarf auf. Die erhobenen Daten (Transkripte & Protokolle) wurden mittels qualitativer Inhaltsanalyse nach Mayring ausgewertet [18].

#### 4. Ergebnisse

In der folgenden Ergebnisdarstellung werden zunächst Hemmnisse vorgestellt, die für alle Verbraucher\*innengruppen als relevant identifiziert wurden. Im Anschluss beleuchtet die Analyse zielgruppenspezifische Hemmnisse und mögliche Handlungsoptionen der Verbraucher\*innen ausführlicher.

##### Übergreifende Hemmnisse für Verbraucher\*innen

Eine überwiegende Mehrheit der befragten Stakeholder und der Verbraucher\*innen stellte den **Aufwand und die hohe Komplexität** von Modernisierungsmaßnahmen als zentrales Hemmnis heraus. Die Stakeholder bewerteten formale Hürden, insbesondere bei der Beantragung von Fördermitteln, und die Planung von Maßnahmen als zu aufwendig. In den Fokusgruppen spielten Fragen der Flächennutzung, Sorgen um Schallemissionen sowie Unklarheiten zu technischen oder baulichen Voraussetzungen eine wichtige Rolle.

Ein zweites zentrales Hemmnis, das in allen Befragungsgruppen beschrieben wurde, war die **Verunsicherung** durch dynamische Rahmenbedingungen und mediale Berichterstattungen. Die Reform des GEG bewirkte bei vielen Menschen Zurückhaltung in Bezug auf Investitionsentscheidungen. Eine Beraterin formulierte es wie folgt:

*„Dann kochten die Themen aber immer weiter hoch Richtung Heizung und dann haben die Verbraucher\*innen auch relativ schnell ihre ganzen Finanzausgaben wieder gestoppt und gesagt: ‚Wir warten wieder ab‘.“ (B1)*

Schließlich zeigten auch Erfahrungen der Verbraucher\*innen, dass widersprüchliche Aussagen verschiedener Berater\*innen zusätzliche Verunsicherung erzeugten.

Alle Stakeholder betrachteten **hohe Investitionskosten und steigende Energiekosten** als weiteres und somit drittes Hemmnis. Auffällig war hier die Aussage von Beratungsstellen und Wohnungswirtschaft, dass durch finanzielle Förderungen die Preise für neue Heizungsanlagen zusätzlich in die Höhe getrieben werden. Verbraucher\*innen erwähnten Kostenaspekte vor allem als finanzielle Risiken bei der Entscheidung für unterschiedliche Heizsysteme.

Der vierte übergreifende Aspekt bezog sich auf wahrgenommene **Ungerechtigkeiten** in der Umsetzung der Wärmewende. Hier zeigte sich eine deutliche Diskrepanz in der Zuschreibung von Verantwortung. Auf Seiten der EVUs und senatorischen Behörden wurde die

Verantwortung für klimaschonende Investitionsentscheidungen vor allem auf Seiten der privaten Akteure und somit auch der Gebäudeeigentümer\*innen gesehen. Die Bürger\*innen in den Fokusgruppen sahen dagegen vor allem die Kommunen in der Pflicht, eine angemessene und bezahlbare Wärmeversorgung bereitzustellen.

Der Zugang zu Fernwärme wurde von einem kleineren Teil der Verbraucher\*innen als ungerecht bewertet, da dieser nicht allen gleichermaßen zur Verfügung stehe und mit deutlich weniger Investitionskosten verbunden sei.

In Abb. 1 werden die genannten Hemmnisse dargestellt. Insgesamt zeigt sich, dass nicht nur Kostenaspekte allein, sondern insbesondere im Zusammenspiel mit unsicheren Rahmenbedingungen, hohem Aufwand und Gerechtigkeitskonflikten als erhebliches Investitionshemmnis wirken. Im Folgenden werden Hemmnisse vorgestellt, für die ein zielgruppenspezifischer Einfluss mithilfe der Stakeholder-Interviews identifiziert werden konnte.



Abb. 1: Darstellung der übergreifenden Hemmnisse für Verbraucher\*innen

##### Zielgruppenspezifische Hemmnisse

Als vulnerabel gelten aus Sicht der Stakeholder vor allem Personen mit geringen Finanzmitteln. Steigende Energie- und energetische Sanierungskosten stellen vor allem für **selbstnutzende Eigentümer\*innen mit niedrigem Einkommen** eine Hürde dar. Die Stakeholder stimmten darin überein, dass Fördermittel kaum von dieser Gruppe in Anspruch genommen würden, da diese den verbleibenden Eigenanteil nicht aufbringen könne. Teilweise scheiterte der Zugang zu Fördermitteln auch an fehlender Kreditwürdigkeit der Personen. Eine interessante Einzelaussage aus den Beratungsstellen war außerdem, dass diese Zielgruppe sich durch bisherige Werbeformate (vor allem für Wärmepumpen) nicht angesprochen fühle.

Eine besonders starke Belastung bestehe laut Stakeholdern ebenfalls für **Mieter\*innen mit niedrigem Einkommen**, die einer Kombination aus steigenden Miet- und Energiekosten bei gleichzeitig fehlenden Einflussmöglichkeiten ausgesetzt sind.

Auffällig war in einem Großteil der Stakeholder-Interviews die häufige Nennung von **älteren Personen**. Aufgrund einer geringeren Bereitschaft, große Veränderungen im Wohnbereich hinzunehmen, stellten der hohe Aufwand und die Komplexität der Maßnahmen eine besonders große Belastung dar. Von einzelnen Berater\*innen wurden eine geringere Bereitschaft, langfristig in die eigene Immobilie zu investieren, und eine altersbedingte fehlende Kreditwürdigkeit als besondere Hürde genannt.

Bei der Gruppe der **privaten Kleinvermieter\*innen** benannten Stakeholder aus Beratungsstellen, Handwerk und Klimaschutzorganisationen fehlende finanzielle Anreize und die Sorge vor ausbleibenden Mietzahlungen als zentrale Hemmnisse. Außerdem wurde die Sorge vor potenzieller Verdrängung von Mieter\*innen infolge steigender Mieten durch Sanierungsmaßnahmen thematisiert.

Besondere Hemmnisse wurden außerdem für zwei weitere Zielgruppen dargestellt. Mehr als die Hälfte der Stakeholder nannten für **Wohnungseigentümergeinschaften (WEGs)** komplexe Hemmnisse: Unterschiedliche Lebenslagen und Intentionen der Eigentümer\*innen führen häufig zu langen Entscheidungsprozessen. Die Umstellung der zum Teil unterschiedlichen Heizsysteme erhöhe zusätzlich die Kosten. Außerdem würden auch Kredite von Privatbanken kaum an WEGs vergeben.

Weiterhin seien **Eigentümer\*innen mit insgesamt geringeren Ressourcen** (z. B. Zeit, Geld, Bildung und Sprachbarrieren) laut den Beratungsstellen sowie Klima- und Umweltschutzorganisationen besonders betroffen. Sie würden sich aufgrund des hohen Aufwands weniger mit dem Thema auseinandersetzen. Auch kulturelle Barrieren, wie das Vertrauen in Organisationen und das Befolgen von Regeln, wurden als weitere Hemmnisse für diese Zielgruppe benannt.

Abb. 2 gibt eine Übersicht über die beschriebenen Gruppen mit beispielhaften Zitaten zu Hemmnissen, die bei der jeweiligen Gruppe im Vordergrund stehen. Ansätze der Stakeholder, aber auch der Verbraucher\*innen, Handlungsmöglichkeiten zu erweitern, werden im folgenden Abschnitt beschrieben.

**Beteiligung und Handlungsspielräume**

Der Großteil der Stakeholder nannte Informationsveranstaltungen und Beratungsangebote als bisherige Ansätze, um Beteiligung von Verbraucher\*innen zu stärken. Vereinzelt berichteten Beratungsstellen auch von proaktiveren Methoden, um auf Verbraucher\*innen zuzugehen.

*„Also, das heißt, da suchen wir zentral gelegene Orte, wo die Verbraucher\*innen sind, also in Quartierszentren, in Stadtbibliotheken und Ähnlichem.“ (B1)*

Um eine Teilhabe an der Wärmewende zielgruppenspezifischer zu gestalten, sollten Angebote laut Beratungsstellen und Lobbyverein auf Quartiersebene stattfinden und an den dortigen Bedarfen ausgerichtet werden. Ein Ansatz könnten quartiersspezifische Musterlösungen für

Gebäude sein, an denen sich auch vulnerablere Zielgruppen orientieren könnten. Dieser Ansatz wurde auch von der Mehrheit der Fokusgruppenteilnehmer\*innen befürwortet.

Vereinzelt machten Stakeholder aus Wohnungswirtschaft und Beratungsstellen weitere Vorschläge zur zielgruppenspezifischen Beteiligung: Besonders für ältere Personen müsse die Beratung ganzheitlicher gedacht werden. Themen wie Barrierefreiheit oder Sicherheit sollten bei Modernisierungsmaßnahmen integrativ mitgedacht werden. Erweiterte Mitbestimmungs- und Kontrollmöglichkeiten für Mieter\*innen sind gefordert. Private Kleinvermietende könne man vor allem durch finanzielle Anreize erreichen.

Von Seiten der Verbraucher\*innen wurde deutlich, dass es einen großen Bedarf nach individueller, gebäudespezifischer, ganzheitlicher und quartiersbezogener Beratung gibt. Außerdem wurden auch hier quartiersbezogene Wärmelösungen inklusive Machbarkeitsstudien als Orientierung gefordert. Als bisherige Möglichkeiten zur Informationsbeschaffung wurden in den drei Fokusgruppen vor allem die Angebote der Energieberatung und die Beratung durch Handwerker\*innen benannt. Eine wichtige Rolle spiele auch das soziale Umfeld, da die unmittelbare Nachbarschaft Informationen und persönliche Erfahrungen zum Thema Heizen und Wärmeversorgung biete. Manche Verbraucher\*innen zogen auch informelle Beteiligungsmöglichkeiten (wie z. B. Stadtteildiskussionen) in Erwägung, stellten aber die Wirkung solcher Verfahren in Frage.

*„Ich würde mich nur beteiligen, wenn es eine Chance auf Erfolg gibt und keine luftleeren Diskussionen mit Leuten.“ (BF-08)*

Eine stärkere informelle Beteiligung der Bevölkerung wurde von den Stakeholdern insgesamt als sinnvoll erachtet. Behördenvertreter\*innen gaben jedoch an, dass die Kapazitäten begrenzt seien und es auch an Erfahrung mit Formaten für die breite Öffentlichkeit fehle. Von den Beratungsstellen wurde die unzureichende Einbindung von Interessenvertretungen kritisiert, ein zentrales Sprachrohr der Bevölkerung würde nicht genutzt.

**5. Diskussion**

Die Ergebnisse aus Bremen zeigen in weiten Teilen eine Übereinstimmung mit den in der Fachliteratur beschriebenen Hemmnissen der Wärmewende [5], [6]. Finanzielle Barrieren, hohe Komplexität und Aufwand bei einem



Abb. 2: Betroffene Zielgruppen und beispielhafte Zitate für deren spezifische Hemmnisse

Heizungswechsel werden in den Interviews als zentrale Barrieren bestätigt. Darüber hinaus konnten in der Fallstudie weitere Hemmnisse identifiziert werden, die in bestehender Literatur bislang kaum berücksichtigt wurden. Dazu zählen insbesondere eine weit verbreitete Verunsicherung durch Medien und Politik, aber auch uneinheitliche oder unzureichende Beratung. Außerdem wurde das Fehlen zielgruppenspezifischer Angebote thematisiert, wie die Kreditvergabe für Gruppen, die gängige Voraussetzungen nicht erfüllen (z. B. ältere und geringverdienende Immobilienbesitzer\*innen oder WEGs).

Die bekannte Bedeutung von unterschiedlichen Gerechtigkeitswahrnehmungen [7], [9] ist auch in den Fokusgruppen zum Ausdruck gekommen. Dabei zeigte sich vor allem, dass die Bereitstellung einer bezahlbaren Wärmeversorgung irrtümlich als Teil der kommunalen Pflichtaufgaben wahrgenommen wird. Besonders im Zusammenhang mit dem Anschluss an leitungsgebundene Wärme wurden wiederholt Fragen nach Fairness, Versorgungssicherheit und Preistransparenz aufgeworfen. Im Hinblick auf den Ausstieg aus der Erdgasversorgung wurde insgesamt mehr Unterstützung bei der Ermöglichung alternativer Heizoptionen gefordert. In den Fokusgruppen wurden diese unterschiedlichen Formen der Wärmeversorgung diskutiert, darunter auch genossenschaftliche Ansätze. Der voraussichtlich erforderliche Zeitaufwand wurde kritisch bewertet. Eine Beteiligung an gemeinschaftlichen Lösungen im Quartier, die dagegen von E-VUs oder der Kommune angeboten werden, ist für viele vorstellbar. Modelle der Wärmeversorgung, die gemeinwohlorientiert sind und zugleich Preisstabilität sowie soziale Absicherung gewährleisten, werden bevorzugt. Außerdem wird sich mehr Verbindlichkeit durch die KWP erhofft, die Auskunft über die Verfügbarkeit von Fernwärme, Priorisierungen von Heizoptionen, quartiersbezogene Lösungen und einen Zeitrahmen bieten sollte.

Auch in unseren Untersuchungen bestätigen sich größtenteils die verschiedenen Faktoren von Modernisierungsentscheidungen bei Verbraucher\*innen [4]. Insgesamt lassen sich vor allem die finanziellen Hemmnisse der einzelnen Zielgruppen bekräftigen [5], [6], [11], [14]. Darüber hinaus machen die Ergebnisse deutlich, dass WEGs komplexen Herausforderungen gegenüberstehen, wie langen Entscheidungsprozessen, fehlender Kreditwürdigkeit oder höheren Kosten. Diese haben in der bisherigen Wärmewende noch kaum Beachtung gefunden, obwohl in Bremen ca. 24 % der Wohnungen im Besitz von WEGs sind und sie damit die zweitgrößte Gruppe von Eigentümer\*innen darstellen [3].

Zusätzlich lässt sich beobachten, dass bestimmte strukturelle Benachteiligungen – insbesondere die Belastung von Frauen, Alleinlebenden und Alleinerziehenden – ausschließlich in der Literatur erwähnt werden [12]. Diese Gruppen werden in den Interviews nicht benannt, wenngleich andere vulnerable Zielgruppen wie z. B. ältere Menschen durchaus als besonders betroffen wahrgenommen werden. Dies lässt auf ein unzureichendes Bewusstsein für die Herausforderungen bestimmter Gruppen schließen, die sich auch durch deren fehlende Beteiligung an öffentlichen Angeboten und auch wissenschaftlichen Untersuchungen erklären lässt.

Fördermittel werden sowohl in der wissenschaftlichen Diskussion als auch in Fachkreisen als zentrale Unterstützungsmaßnahme betrachtet [5], [8]. Derzeit profitieren jedoch überwiegend finanziell besser gestellte Gruppen davon. Daher ist eine stärkere Differenzierung in

Ansprache und Ausrichtung der Maßnahmen erforderlich, um einen gerechteren Zugang zu gewährleisten.

In Bezug auf weitere Instrumente zur gerechten Gestaltung der Wärmewende liegt der Fokus stark auf Information, individueller Beratung und technischer Aufklärung. Die anerkannte Forderung einer ganzheitlichen Herangehensweise, etwa durch das gezielte Anhören von Bedarfen oder die Veränderung sozialer Rahmenbedingungen [14], ist in der praktischen Umsetzung bislang kaum angekommen. Kontaktmöglichkeiten und Lösungsoptionen auf Quartiersebene werden als zentrale Hebel für die Wärmewende angesehen. Ihrem Potenzial steht jedoch ein hoher Zeitaufwand gegenüber, der für die gezielte Ansprache bestimmter Gruppen nötig ist, jedoch oft nicht geleistet werden kann. Hinzu kommt, dass der Erfolg solcher Maßnahmen schwer abschätzbar ist. Ein Ansatz aus den Stakeholder-Interviews ist, zumindest Interessensvertretungen als Sprachrohr der verschiedenen Gruppen stärker in Entscheidungsprozesse mit einzubeziehen, um deren Anerkennung sicherzustellen.

## 6. Implikationen für die Praxis und Ausblick

Die Fallstudie gibt einen Einblick in die Herausforderungen und Bedarfe unterschiedlicher Zielgruppen in der Wärmewende in Bremen. Eine zentrale Forderung der Stakeholder und Verbraucher\*innen ist eine klare und verlässliche Rahmensetzung durch die Kommune sowie die Förderung quartiersspezifischer und sozial verträglicher Lösungen, die Verbraucher\*innen einen sicheren Handlungsrahmen bieten.

Aus den Ergebnissen lassen sich Implikationen für die zukünftige Beteiligung verschiedener Zielgruppen ableiten. Es braucht erstens zielgruppenspezifische Beratungsangebote, die z. B. für ältere Menschen auch Fragen zu altersgerechtem Wohnen oder zu Sicherheit mit einbeziehen. So könnte diese Gruppe motiviert werden, Sanierungsmaßnahmen in Angriff zu nehmen. Zweitens könnten private Kleinvermieter\*innen, die meist auch selbstnutzende Eigentümer\*innen sind, gezielter durch differenziertere Musterlösungen angesprochen werden, die ihrem eigenen Gebäude stärker ähneln (z. B. älter und weniger saniert). Drittens besteht die Forderung nach mehr Repräsentation von Mieter\*innen in politischen Entscheidungsprozessen und mehr Einflussmöglichkeiten im Transformationsprozess. Die bisherigen Möglichkeiten stehen nicht im Verhältnis zur tatsächlichen Belastung. Besonderer Handlungsbedarf besteht außerdem für WEGs, die multiplen Herausforderungen, aber einem eingeschränkten Handlungsspielraum gegenüberstehen. Ebenso müssen die Bedarfe von Frauen, Alleinlebenden und Alleinerziehenden stärker in den Planungen der Wärmewende Beachtung finden und adressiert werden. Zuletzt braucht es eine Reformierung der Vergabe von Fördermitteln, um bestehende Gerechtigkeitskonflikte um die Verteilung von Fördergeldern nicht weiter zu verschärfen.

Die Frage, wie eine zielgruppenspezifische Beteiligung und die Stärkung von Handlungsspielräumen gelingen können, bleibt eine der größten Herausforderungen. Es wird deutlich, dass konkretere Lösungsvorschläge für zielgruppenspezifische Teilhabe bislang kaum in der Praxis angewendet werden, da oftmals die erforderlichen Kapazitäten fehlen und der Erfolg schwierig einzuschätzen ist. Hier lässt sich weiterer Forschungsbedarf ausmachen: Es wird methodisches Wissen benötigt, um mit den verfügbaren Ressourcen vulnerable Zielgruppen zu erreichen und so eine stärkere Teilhabe zu ermöglichen. Die

Evaluation von Lösungsansätzen auf Quartiersebene scheint hier vielversprechend.

## Danksagung

Dieser Text bezieht sich auf Forschungsergebnisse aus den Verbundforschungsvorhaben „Q4Q – Quartier für Quartier“ (BMWE, FKZ: 03E11077C) und „hyBit - Hydrogen for Bremen's industrial Transformation“ (BMFTR, FKZ: 03SF0687A).

## Literatur

- [1] Freie Hansestadt Bremen, „Bremisches Klimaschutz- und Energiegesetz (BremKEG),“ 2025. Zugriff am: 11. Oktober 2025. [https://www.transparenz.bremen.de/metainformationen/bremisches-klimaschutz-und-energiegesetz-bremkeg-vom-24-maerz-2015-296458?asl=bremen203\\_tpge-setz.c.55340.de&template=20\\_gp\\_ifg\\_meta\\_detail\\_d](https://www.transparenz.bremen.de/metainformationen/bremisches-klimaschutz-und-energiegesetz-bremkeg-vom-24-maerz-2015-296458?asl=bremen203_tpge-setz.c.55340.de&template=20_gp_ifg_meta_detail_d)
- [2] Deutsche Energie-Agentur (Hrsg.), „Soziale Aspekte der Gebäude-Energiewende – Herausforderungen und Möglichkeiten,“ Berlin, Juni 2024. Zugriff am: 11. Oktober 2025. [https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2024/GEFO\\_Bericht\\_Soziale\\_Aspunkte\\_final.pdf](https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2024/GEFO_Bericht_Soziale_Aspunkte_final.pdf)
- [3] Statistische Ämter des Bundes und der Länder, „Zensus Datenbank,“ 2025. Zugriff am: 18. August 2025. <https://ergebnisse.zensus2022.de/datenbank/online/>
- [4] J. Weiß, A. Bierwirth, J. Knoefel, S. März, J. Kasefolsky, und J. Friege, „Entscheidungskontexte bei der energetischen Sanierung. Ergebnisse aus dem Projekt Perspektiven der Bürgerbeteiligung an der Energiewende unter Berücksichtigung von Verteilungsfragen,“ Berlin, Wuppertal, 2018. Zugriff am: 11. Oktober 2025. [https://www.ioew.de/fileadmin/user\\_upload/BILDER\\_und\\_Downloaddateien/Publikationen/2018/Wei%C3%9F\\_et\\_al\\_2018\\_Entscheidungskontexte\\_bei\\_der\\_energetischen\\_Sanierung.pdf](https://www.ioew.de/fileadmin/user_upload/BILDER_und_Downloaddateien/Publikationen/2018/Wei%C3%9F_et_al_2018_Entscheidungskontexte_bei_der_energetischen_Sanierung.pdf)
- [5] S. Braungardt, M. Bei der Wieden, T. Hesse, T. Kenkmann, M. Koch, und S. Krieger, „Großbaustelle Gebäudesektor. Lokal und sozial die Wärmewende entfachen,“ 2023. Zugriff am: 11. Oktober 2025 <https://www.wwf.de/fileadmin/fm-wwf/Publikationen-PDF/Klima/WWF-Studie-Waermewende.pdf>
- [6] M. Kellner u. a., „Systematische Verteilungsanalyse zur Wärmewende: Welche Haushalte tragen die Kosten und wie kann die Entlastung aussehen?,“ Mercator Research Institute on Global Commons and Climate Change (MCC) gGmbH, Berlin, Juni 2023. Zugriff am: 11. Oktober 2025. [https://www.pik-potsdam.de/de/institut/abteilungen/klimaoekonomie-und-politik/mcc-dokumente-archiv/2023\\_mcc\\_systematische\\_verteilungsanalyse\\_zur\\_waermewende-pdf.pdf](https://www.pik-potsdam.de/de/institut/abteilungen/klimaoekonomie-und-politik/mcc-dokumente-archiv/2023_mcc_systematische_verteilungsanalyse_zur_waermewende-pdf.pdf)
- [7] S. Baasch, „Towards an integrative understanding of multiple energy justices,“ Geogr. Helvetica, Bd. 78, Nr. 4, S. 547–558, 2023, <https://doi.org/10.5194/gh-78-547-2023>
- [8] Agora Think Tanks, „Klimaneutrales Deutschland. Von der Zielsetzung zur Umsetzung,“ 2024. Zugriff am 11. Oktober 2025. [https://www.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2023/2023-30\\_DE\\_KNDE\\_Update/A-EW\\_344\\_Klimaneutrales\\_Deutschland\\_WEB.pdf](https://www.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2023/2023-30_DE_KNDE_Update/A-EW_344_Klimaneutrales_Deutschland_WEB.pdf)
- [9] S. Baasch, „Multipel, komplex und oft übersehen: Gerechtigkeit(en) in Beteiligungsverfahren,“ in Umweltgerechtigkeit und sozialökologische Transformation. Konflikte um Nachhaltigkeit im deutschsprachigen Raum, J. Hein, Hrsg., transcript, 2023, S. 45–64. <https://doi.org/10.14361/9783839463253-002>
- [10] J. Bosse, E. Häublein, und L. Kadel, „So gelingt die kommunale Wärmeplanung: nachhaltig, sozial und partizipativ,“ 2023. Zugriff am: 11. Oktober 2025. [https://klima-und-demokratie.de/wp-content/uploads/2023/05/Leitfaden\\_kommunaleWaermepaltung\\_Online.pdf](https://klima-und-demokratie.de/wp-content/uploads/2023/05/Leitfaden_kommunaleWaermepaltung_Online.pdf)
- [11] S. März, „Einzel- und Kleineigentümer aktivieren: Private Kleinvermieter – ein schlafender Riese auf dem Weg zur Wärmewende,“ in Handbuch Energieeffizienz im Quartier, C. Reicher und A. Schmidt, Hrsg., Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2020, S. 1–16. [https://doi.org/10.1007/978-3-658-21922-2\\_13-1](https://doi.org/10.1007/978-3-658-21922-2_13-1)
- [12] K. Groneweg und K. Habersbrunner, „Energiewende = Gerechtigkeitswende – ein Blick über den Quotenrand hin zur feministischen Vision,“ Friedrich-Ebert-Stiftung (Hrsg.), 2024. Zugriff am: 11. Oktober 2025. <https://library.fes.de/pdf-files/a-pb/21139.pdf>
- [13] K. Fromholz, J. Deffner, J. Rubers, I. Stieß, H. Wahlers, und J. Weiß, „Ältere Hauseigentümer\*innen zielgruppengerecht ansprechen: energieeffizient, komfortabel und sicher wohnen im Alter,“ ISOE - Institut für sozial-ökologische Forschung, Frankfurt, 2019. Zugriff am: 11. Oktober 2025. [https://www.isoe.de/fileadmin/Edit/PDF/Pr/Sanieren\\_60plus/Sanieren-60plus\\_06.pdf](https://www.isoe.de/fileadmin/Edit/PDF/Pr/Sanieren_60plus/Sanieren-60plus_06.pdf)
- [14] K. Schumacher, J. Cludius, V. Liste, T. Kenkmann, C. Nissen, und V. Noka, „Mehrfamilienhäuser: Der blinde Fleck der sozialen Wärmewende,“ Öko-Institut e.V., Berlin, 2023. Zugriff am: 11. Oktober 2025. <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Soziale-Aspekte-Waermewende-Mehrfamilienhaeuser.pdf>
- [15] Die Senatorin für Umwelt, Klima und Wissenschaft, „Wärmeplanung,“ Zugriff am: 10. Dezember 2025 [Online]. Verfügbar unter: <https://waermepaltung.bremen.de/beteiligung-1471>
- [16] Qoncept Energy GmbH, „Fachgutachten zur kommunalen Wärmeplanung für die Freie Hansestadt Bremen. Abschlussbericht,“ Kassel, 2024. Zugriff am: 11. Oktober 2025. [https://umwelt.bremen.de/sixcms/media.php/13/240930\\_Abschlussbericht\\_Bremen\\_Fachgutachten\\_W%C3%A4rmeplanung.pdf](https://umwelt.bremen.de/sixcms/media.php/13/240930_Abschlussbericht_Bremen_Fachgutachten_W%C3%A4rmeplanung.pdf)
- [17] ErdwärmeDich e.V., „Start | ErdwärmeDich e.V.,“ Zugriff am: 11. Oktober 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://erdwaermedich.de/>
- [18] P. Mayring und T. Fenzl, „Qualitative Inhaltsanalyse,“ in Handbuch Methoden der empirischen Sozialforschung, N. Baur und J. Blasius, Hrsg., Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2019, S. 633–648. [https://doi.org/10.1007/978-3-658-21308-4\\_42](https://doi.org/10.1007/978-3-658-21308-4_42)

4. Konferenz der Norddeutschen  
Wärmeforschung:  
17./18. September 2026  
in Flensburg

