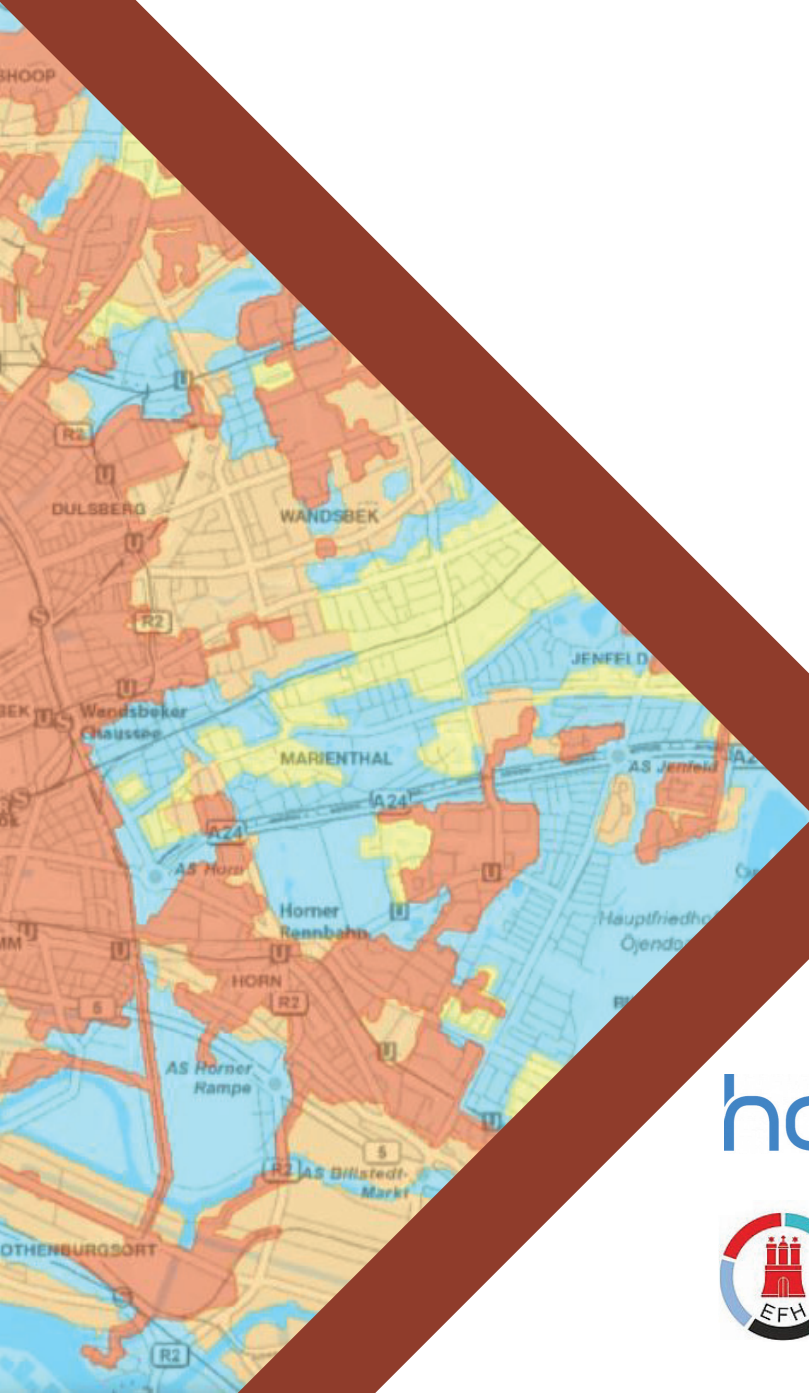


Tagungsband (2. Version)

2. Konferenz der Norddeutschen Wärmeforschung

19.-20. September 2024

HafenCity Universität



hcu HafenCity
Universität
Hamburg

HAW
HAMBURG | CC4E



Energieforschungs
verbund Hamburg



Erneuerbare Energien
Hamburg

Tagungsband (2. Version)
2. Konferenz der Norddeutschen Wärmeforschung

Gemeinsam die Wärmewende voranbringen.

IMPRESSUM

Herausgeber:

Prof. Dr.-Ing. Ingo Weidlich

HafenCity Universität Hamburg
Henning-Voscherau-Platz 1
20457 Hamburg

Petrit Vuthi

Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Competence Center für Erneuerbare Energien und EnergieEffizienz (CC4E)
Steindamm 96-98
20099 Hamburg

Constantin Lange

Erneuerbare Energien Hamburg Clusteragentur GmbH
Wexstrasse 7
20355 Hamburg

Layout:

Samira Shokouhi

DOI: 10.34712/142.68

Jahr: 2025

Fachgebiet: Technisches Infrastrukturmanagement, HafenCity Universität Hamburg

Verlag: HafenCity Universität

Dieses Dokument ist urheberrechtlich geschützt. Es darf, auch auszugsweise, ohne vorherige Genehmigung des Autors/der Autoren nicht vervielfältigt oder veröffentlicht werden. Alle Angaben in diesem Tagungsband sind nach bestem Gewissen unter Anwendung aller gebotenen Sorgfalt erstellt worden. Trotzdem kann von dem Autor/den Autoren keine Haftung für etwaige Fehler übernommen werden.

Vorwort

Wärmstens empfohlen! Aus fünf norddeutschen Bundesländern teilten bei der 2. Konferenz zur Norddeutschen Wärmeforschung vom 19. bis 20. September 2024 Expertinnen und Experten ihr Wissen zur Wärmewende. Nachdem die Konferenz an der HafenCity Universität in Hamburg mit motivierenden Grußworten und spannenden Impulsen von Dr. Eva Gümbel (Behörde für Wissenschaft, Forschung, Gleichstellung und Bezirke) und Kirsten Fust (GF Hamburger Energiewerke) startete, wurden die gesetzten Schwingungen zur Wärmewende von den anwesenden 90 Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern aufgenommen und in den darauf folgenden Fachvorträgen verstärkt. Es entstand ein stimmiges Abbild der drängenden Forschungsfragen zur Umsetzung und Stützung der Herausforderungen in der Wärmewende. Neue Erkenntnisse in den Bereichen der Energiesysteme für erneuerbare Wärme, der Wärmeverteilung und der kundenseitigen Herausforderungen für die Deckung der Wärmebedarfe sowie der Wärmeleitplanung wurden vorgestellt und fachlich diskutiert.

Die 2. Konferenz zur Norddeutschen Wärmeforschung setzt die in 2023 in Göttingen initiierte Konferenzreihe fort und hat erneut ein Forum für den fachlichen Austausch, den Diskurs und die Bereitstellung von Wissen in Norddeutschland geboten. Die Konferenzen der Norddeutschen Wärmeforschung gliedert sich in verschiedene Aktivitäten der norddeutsche Fachgruppe Wärme ein. Im Rahmen der norddeutschen Energiefachtagung 2019 in Hannover, organisiert durch die fünf Energieforschungsverbünde der norddeutschen Länder, sind fünf norddeutsche Fachgruppen zu den Energiethemen Wärme, Windenergie, Wasserstoff, Mobilität und intelligente, integrierte Netze ins Leben gerufen worden. Ziel ist es, die Wissenschaft in den Themenbereichen stärker auf norddeutscher Ebene zu bündeln, um so einen wichtigen Beitrag aus Norddeutschland für die Energiewende zu leisten. Die norddeutsche Fachgruppe Wärme strebt eine etablierte Plattform der norddeutschen Wärmeforschung an. Diese soll als eine wichtige Maßnahme zur beschleunigten Wärmewende in Norddeutschland beitragen und zum anderen soll die Vernetzung zwischen Wissenschaft, Wirtschaft und Politik gestärkt werden.

Um die wissenschaftliche Qualität der Veranstaltung zu gewährleisten, wurden alle Vortragende gebeten ihr Thema durch einen Abstract bekannt zu geben. Die Abstracts wurden vom wissenschaftlichen Beirat vor der Konferenz gesichtet, kommentiert und für die Programmgestaltung ausgewählt. Die vorgestellten Beiträge der Konferenz wurden in einem Book of Abstracts zur Konferenz veröffentlicht. Im Anschluss an die Konferenz wird nun mit diesem Tagungsband jungen aber auch etablierten Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern optional die Möglichkeit geben ihre Ergebnisse auch in Form einer Publikation bereitzustellen und sichtbar zu machen. Der vorliegende Tagungsband zeigt daher nur einen Ausschnitt der Konferenz in ausführlichen Beiträgen. Dieser Ausschnitt zeigt allerdings bereits die Vielfalt der Forschungsthemen der Wärmewende und macht Lust auf mehr.

Für die Erarbeitung der hier gezeigten Veröffentlichungen möchten wir uns herzlich bei den Autorinnen und Autoren bedanken. Ihre Beiträge zeugen von besonderem Engagement und dem Willen die Wärmewende nachvollziehbar voran zu bringen. Wir bedanken uns auch beim wissenschaftlichen Beirat, der erneut die Aufgabe übernommen hat die Beträge gegenzulesen und die wissenschaftliche Qualität hierdurch zu sichern.

Wir wünschen Ihnen eine spannende, informative und erfolgreiche Lektüre dieses Tagungsbands und hoffen, dass wir uns zur 3. Konferenz der Norddeutschen Bundesländer 2025 in Bremen wiedersehen.

An dieser Stelle wollen wir uns auch nochmal beim Cluster Erneuerbare Energien Hamburg, dem Competence Center für Erneuerbare Energien und Energieeffizienz der HAW Hamburg und den Kollegen und Kolleginnen an unserer HafenCity Universität bedanken, die maßgeblich in der Organisation der Konferenz beteiligt waren.

Herzlichst,

Prof. Dr.-Ing. Ingo Weidlich (Vorsitz FG Wärme, HCU Hamburg)

Petrit Vuthi (FG Wärme, EFH Hamburg, HAW Hamburg/CC4E)

Constantin Lange (FG Wärme, EEHH Hamburg)

Book of Abstracts - 2. Konferenz der Norddeutschen Wärmeforschung DOI: 10.34712/142.56

Tagungsband - 1. Konferenz der Norddeutschen Wärmeforschung DOI:10.48547/202505-000

Book of Abstracts - 1. Konferenz der Norddeutschen Wärmeforschung DOI: 10.48547/202311-000

Wissenschaftlicher Beirat



Prof. Dr.-Ing. STEFAN HOLLER ist 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
Webadresse: www-hawk.de
E-Mail: stefan.holler@hawk.de



Prof. Dr. JÜRGEN KNIES vertritt in der Fakultät Architektur, Bau und Umwelt der Hochschule Bremen das Lehrgebiet „Infrastrukturplanung umwelt- und energietechnischer Anlagen“. Aktuell werden von ihm folgende Projekte durchgeführt: KoWaP-Pro, WärmewendeNordwest sowie hyBit – Hydrogen for Bremen's Industrial Transformation.

HSB Hochschule Bremen
Webadresse: www.hs-bremen.de
E-Mail: juergen.knies@hs-bremen.de



Prof. Dr. mont. MICHAEL NELLES leitet den Lehrstuhl Abfall- und Stoffstromwirtschaft an der Universität Rostock und ist wissenschaftlicher Geschäftsführer des Deutschen Biomasseforschungszentrums (DBFZ) in Leipzig. Im Rahmen der Wärmewende werden insbesondere F&E-Projekte zur energetischen Verwertung von biogenen Abfällen und Reststoffen bearbeitet.

Rostock Universität
Webadressen: www.auf.uni-rostock.de/aw & www.dbfz.de
E-Mail: michael.nelles@uni-rostock.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, Trinkwarmwasserbereitung und Gebäudeeffizienz sowie Wasserstoff- Infrastruktur und Energiespeicherung.

FH Westküste
Webadresse: www.fh-westkueste.de
E-Mail: opel@fh-westkueste.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)
Webadresse: www.hcu-hamburg.de
E-Mail: ingo.weidlich@hcu-hamburg.de



Dr. SÖNKE BOHM ist Projektmanager am Kompetenzzentrum Geo-Energie an der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel. Als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Europa-Universität Flensburg und beim Sachverständigenrat für Umweltfragen hat er sich mit Fragestellungen insbesondere zu nachhaltigen Energiesystemen beschäftigt.

Kompetenzzentrum Geo-Energie an der Christian-Albrechts-Universität

Webadresse: www.kge.uni-kiel.de/de

E-Mail: soenke.bohm@ifgh.uni-kiel.de



Dr.-Ing. FEDERICO GIOVANNETTI ist seit 2002 am Institut für Solarenergieforschung in Hameln (ISFH) als Wissenschaftler und Projektleiter tätig. Wurde 2010 Leiter der Arbeitsgruppe „Thermische Kollektoren“ und ist seit 2020 Leiter der Abteilung Solare Systeme. Sein F&E-Fokus liegt auf Solar- und wärmepumpenbasierte Energieversorgungssysteme für Gebäude und Quartiere.

Institut für Solarenergieforschung in Hameln (ISFH)

Webadressen: Solare Systeme | isfh.de & Kollektoren | isfh.de

E-Mail: giovannetti@isfh.de



Dr.-Ing. JOHANNES PELDA ist wissenschaftlicher Mitarbeiter im Fachgebiet Nachhaltige Energie- und Umwelttechnik (NEUTec). Sein Themengebiet ist die Transformation von Fernwärmesystemen in die 4. Generation. Neben der Modellierung und Simulation beschäftigt er sich mit Energieeffizienz in Unternehmen.

Nachhaltige-Energie- und Umwelttechnik (NEUTec)

Webadresse: <https://www.hawk.de/de/hochschule/organisation-und-personen/personenverzeichnis/johannes-pelda>

E-Mail: 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, die Energieversorgung im Bereiche Gebäude und Quartier und der Elektromobilität.

HAW-Hamburg: Competence Center für Erneuerbare Energien und Energieeffizienz

Webadresse: www.haw-hamburg.de

E-Mail: petrit.vuthi@haw-hamburg



MARLIES WIEGAND, M.Sc. ist wissenschaftliche Mitarbeiterin und Teamleiterin der Gruppe Gebäudetechnik am Institut für die Transformation des Energiesystems (ITE) der Fachhochschule Westküste. Sie betreut mehrere laufende Forschungsprojekte im Bereich erneuerbare Wärmeversorgung und Quartiersenergiemanagement, u.a. das Kalte-Nahwärme-Projekt „ErdEisIII“ und ist überdies in der Mittelakquise und der Herausgabe der ITE-Schriftenreihe tätig. Darüber hinaus wirkte sie an einem Praxisleitfaden des BTGA mit und engagiert sich im Forschungsnetzwerk EnergiewendeBauen.

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

Webadressen: www.energieforschung.sh/de/forscher-in/marlies-wiegand-df51c3 ;

www.fh-westkueste.de/hochschulprofil/ansprechpartner/mitarbeitende-technik/marlies-wiegand

E-Mail: wiegand@fh-westkueste.de

Inhaltsverzeichnis

Technologien zur experimentellen Untersuchung der Wandlung der urbanen leitungsgebundenen Wärmeversorgung	9
Potenzialanalyse für den Einsatz von Recyclingbaustoffen als nachhaltige Lösung im Fernwärmleitungsbaue	16
Open-Source Web Dashboard zur Simulation, Analyse und Bewertung von Wärmepumpen	24
Entwicklung einer Dampfstrahlwärmepumpe zur Trinkwarmwasserbereitung und dezentralen Rücklaufabkühlung in Wärmenetzen	34
Gebäudebetrieboptimierung mit einer BIM-basierten Heizlastberechnung für Bestandsgebäude	44
Effizienzsteigerung von Photovoltaik-Modulen durch Kombination mit Solarthermie-Modulen	51
Praxisbericht Bürgerhaus in Meiendorf - Effizienzsteigerung in einem öffentlichen Gebäude mit Wärmepumpe und Innendämmung	57
Definition typischer sanierter niedersächsischer Wohngebäude als Basis für die dynamische Gebäudesimulation, Teil I: Gebäudehülle und Randbedingungen für ein repräsentatives Niedersächsisches Einfamilienhaus (Archetyp EFH) Version 14.08.2024	64
Definition typischer sanierter niedersächsischer Wohngebäude als Basis für die dynamische Gebäudesimulation, Teil II: Heizkörper und Warmwasserprofile für ein repräsentatives Niedersächsisches Einfamilienhaus (Archetyp EFH) Version 14.08.2024	71
Combining Temperature and Mass Flow as Variables in Linear Optimisation Models	80
Der Rechtsrahmen für den direkten Wasserstoffeinsatz in der Gebäudebeheizung	87
Initiale Eignungsbereichsermittlung für Wärmeversorgungsoptionen mittels GIS-Analyse – von 100 m x 100 m Gitterzellen zur Baublockebene	92
Strategische Entscheidungsunterstützung in der Regionalen Wärmeplanung.....	97

Technologien zur experimentellen Untersuchung der Wandlung der urbanen leitungsgebundenen Wärmeversorgung

Anna Cadenbach^{1*}, Dennis Lottis¹, Matthias Wecker¹, Fabian Thalemann¹, Stefan Hay², Daniel Heiler², Stefan Dollhopf³, Roland Ziegler⁴, Julius von Neuhoff⁵, Miha bobic⁶, Andre Kunigk⁶

¹ Fraunhofer-Institut für Energiewirtschaft und Energiesystemtechnik IEE, Joseph-Beuys-Straße 8, 34117 Kassel

² AGFW Projekt GmbH, Stresemannallee 30, 60596 Frankfurt/Main

³ HafenCity Universität Hamburg (HCU), Überseeallee 16, 20457 Hamburg

⁴ GEF Ingenieur AG, Ferdinand-Porsche-Straße 4a, 69181 Leimen

⁵ BRUGG Rohrsysteme GmbH, Adolf-Oesterheld-Straße 31, 31515 Wunstorf

⁶ Danfoss GmbH, Carl-Legien-Straße 8, 63073 Offenbach

*Korrespondierender Erstautor: anna.cadenbach@iee.fraunhofer.de

Kurzfassung

Fernwärme ist ein Schlüssel zur Umsetzung der Wärmewende. Vor diesem Hintergrund widmet sich das Projekt "EnEff:Wärme: UrbanTurn" (FKZ: 03EN3029) der Entwicklung innovativer Ansätze zur Transformation der Fernwärmeversorgung. Übergeordnetes Ziel ist es, technische Lösungen für die Transformation der leitungsgebundenen Wärmeversorgung zu identifizieren, neue Auslegungskriterien für Fernwärmesysteme vorzuschlagen und innovative Ansätze für die Betriebsführung und Regelung zu entwickeln. Um den damit verbundenen Herausforderungen und Zielen gerecht zu werden, sind Simulationen und experimentelle Untersuchungen in der Versuchsanlage District LAB geplant. Für die Durchführung der experimentellen Untersuchungen ist es notwendig, die Herausforderungen der Fernwärmetransformation zu identifizieren, die technischen Anforderungen und Hemmnisse sowie die Potenziale der Fernwärmetransformation zu analysieren. Zur Beantwortung der sich daraus ergebenden Forschungsfragen wurden sogenannte Technologiesets abgeleitet. Im Rahmen des Beitrags wird ein Überblick über die Versuchsmöglichkeiten, die Anlagentechnik und eine Kurzzusammenfassung der Technologiesets gegeben. Die Technologiesets stellen im weiteren Projektverlauf des Projektes UrbanTurn eine wichtige Grundlage für die weiteren Forschungsarbeiten dar. Im Beitrag werden die Ergebnisse der simulationsbasierten Untersuchungen des Technologiesets "Dezentrale Einspeisung und Prosumer" vorgestellt, das durch geeignete Regelung eine dezentrale Wärmeeinspeisung ermöglicht. Als nächster Schritt ist die simulationsbasierte Untersuchung aller Technologiesets geplant. Anschließend sollen experimentelle Untersuchungen zur Validierung der Ergebnisse durchgeführt werden. Die Ergebnisse der Untersuchungen werden einen wesentlichen Beitrag zum notwendigen Umbau der leitungsgebundenen Wärmeversorgung, zu neuen Auslegungskriterien und innovativen Betriebsführungs- und Regelungsansätzen leisten.

Schlagworte

Transformation Fernwärme; Experimentelle Untersuchung; Technologieoptionen; Optimierung der Fernwärme

1 Einleitung

Die Novellierung des Klimaschutzgesetzes verpflichtet die Bundesregierung zur Klimaneutralität bis 2045 [1]. Der Gebäudewärmesektor spielt eine zentrale Rolle beim Endenergieverbrauch. Die Dekarbonisierung erfordert Effizienzmaßnahmen, die Integration erneuerbarer Energien und den Umbau der Wärmenetzsysteme. Digitale Mess- und Regelungskonzepte, Anpassungen im Wärmenetz und die Erschließung dezentraler Quellen sind dabei entscheidend.

Das Projekt "EnEff:Wärme: UrbanTurn" (FKZ: 03EN3029) widmet sich der Transformation, Dekarbonisierung und Digitalisierung der Fernwärmeversorgung. Das Projektkonsortium besteht aus dem AGFW, BRUGG Rohrsysteme, Danfoss, Fraunhofer IEE, GEF Ingenieur AG und der HafenCity Universität Hamburg (HCU). Ziel ist es, technische Lösungen für den Umbau der Wärmeversorgung unter Berücksichtigung volatiler

Drücke und Temperaturen zu identifizieren, neue Auslegungskriterien für Fernwärmesysteme vorzuschlagen und innovative Ansätze für Betriebsführung und Regelung zu entwickeln.

Zur Erreichung der Zielstellung sollen im Verlauf des Projektes "EnEff:Wärme: UrbanTurn" simulative und experimentelle Untersuchungen durchgeführt werden. Die Kombination der Untersuchungsmethoden ermöglicht zumeist ein umfassenderes Verständnis der Ergebnisse aber vor allem die Möglichkeit zu deren Validierung. Simulationen ermöglichen die erste Überprüfung von Hypothesen oder Annahmen, während experimentellen Untersuchungen diese Ergebnisse weiter verifizieren und die Genauigkeit der Modelle überprüfen können. Durch Simulationen können Kosten und Ressourcen für zeit- und kostenaufwändige Experimente eingespart werden und verschiedene Szenarien schnell und kostengünstig getestet werden.

Sowohl experimentelle als auch simulative Untersuchungen bieten Flexibilität bei der Durchführung von Tests und Experimenten.

In diesem Beitrag werden die zur Erreichung der Projektziele abgeleiteten Technologiesets vorgestellt. Diese Technologiesets ermöglichen die Durchführung von Simulationen, die wiederum die Grundlage für die Erstellung von Messkonzepten und schließlich für die Durchführung von experimentellen Untersuchungen bilden. Durch den Einsatz dieser Technologiesets kön-

dellen [4]. Die Versuchseinrichtung für Fernwärmeanwendungen befindet sich aktuell in der Umsetzung. Das District LAB verfügt über zwei Versuchsfelder. Das erste Feld besteht aus einem flexiblen Testnetz im Quartiersmaßstab, welches die Einspeisung verschiedener volatiler Energiequellen (z.B. erneuerbare Energien oder Abwärme) bei unterschiedlichen Gebäudeenergiebedarfen ermöglicht. Das zweite Feld umfasst eine Rohrteststrecke, mit der die Beanspruchung von Fernwärmeleitungen und Komponenten unter verschiedenen

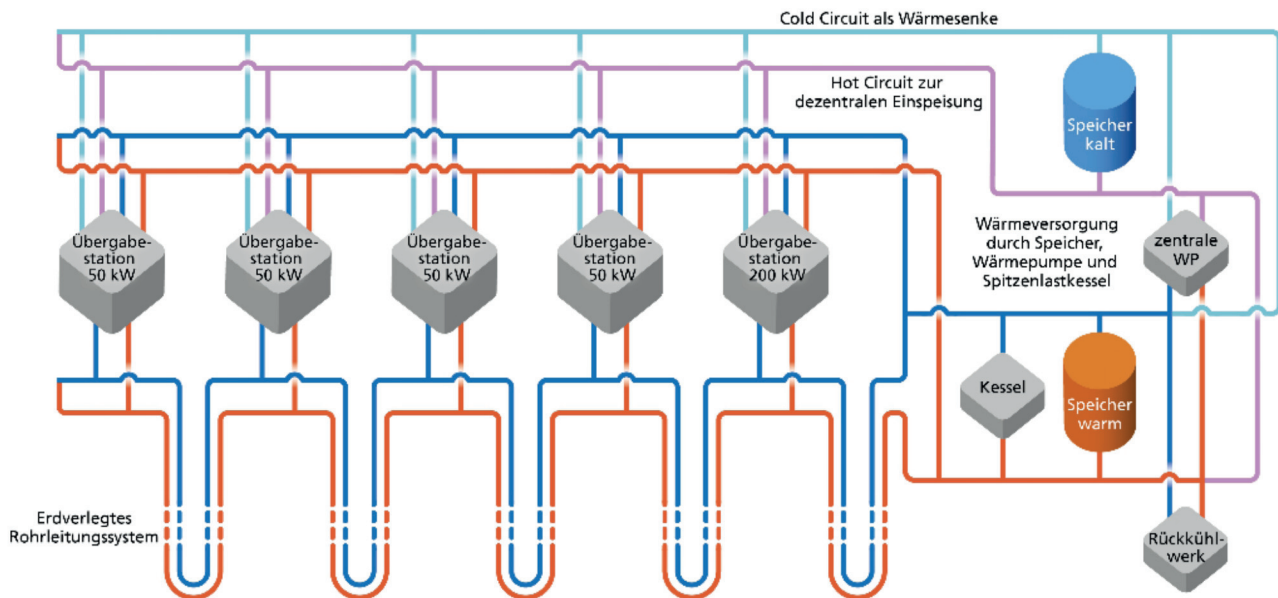


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Anlagenkonfiguration des Fleiblen Testnetz (FTN)

nen spezifische Forschungsfragen im Zusammenhang mit den Projektzielen beantwortet werden. Es werden die Ergebnisse der simulationsbasierten Untersuchungen des Technologiesets "Prosumer" vorgestellt, das durch geeignete Regelung eine dezentrale Wärmeeinspeisung ermöglicht.

2 Technologiesets für die Wandlung der urbanen leitungsgebundenen Wärmeversorgung

Vor dem Hintergrund der Zielsetzung und zum Zweck der simulationsbasierten und experimentellen Untersuchungen wurden zunächst die technischen Eigenschaften bestehender Fernwärmenetze und Potenziale für deren Ausbau und Transformation in Deutschland analysiert und dokumentiert. [2], [3] Aus diesen Analysen wurden "Technologiesets" abgeleitet und ein passendes Messkonzept für die späteren experimentellen Untersuchungen erstellt. Jedes Set enthält eine Forschungsfrage, geplante Untersuchungen und Randbedingungen. Im Folgenden gibt es einen Überblick über die experimentellen Möglichkeiten, Anlagentechnik und Messtechnik sowie eine kurze Zusammenfassung zu jedem Set.

Die Versuchseinrichtung District LAB in Kassel ermöglicht die experimentelle Erprobung und Optimierung von innovativen Versorgungslösungen und Betriebsmo-

Bedingungen getestet werden kann.

Flexibles Testnetz (FTN)

Das FTN besteht aus fünf Rohrleitungsschleifen in DN80 und DN65, die mit Übergabestationen, Wärme- und Kälteerzeugungseinheiten sowie Speichern verbunden sind. Dadurch können verschiedene Temperaturkonfigurationen im Bereich von 10 bis 120 °C realisiert werden. Das Netz ermöglicht auch die Einspeisung unterschiedlicher Energiequellen wie Solarthermie oder Abwärme. Im ersten Bauabschnitt werden drei Übergabestationen implementiert, während im zweiten Bauabschnitt zwei weitere hinzukommen. Die Versuchsdurchführung wird durch ein modulares Automatisierungssystem unterstützt. An über 400 Messstellen werden Temperaturen bis 120 °C, Drücke bis 16 bar und Durchflüsse bis 111 m³/h erfasst. Zur Steuerung von Pumpen und Ventilen werden ca. 100 Aktoren eingesetzt. Eine schematische Darstellung zur Verdeutlichung der Anlagenkonfiguration ist in Abbildung 1 gegeben.

Für das FTN wurden 3 Technologiesets abgeleitet

- **Transformation Hausübergabestationen:** Es wird untersucht, ob bereits für das Zielnetz ausgelegte Hausübergabestationen (HAST) in

einem bestehenden Netz mit konventionellen Betriebsparametern betrieben werden können, bevor das Fernwärmenetz transformiert wurde.

- **Dezentrale Einspeisung und Prosumer:** Es werden Regelungskonzepte entwickelt, um die Auswirkungen der Integration von regenerativen dezentralen Erzeugern wie Solarthermieanlagen und Prosumern in bestehende Wärmenetze auf die Netzhydraulik zu bewältigen. Dadurch soll die klimafreundliche Erzeugung von Wärme erhöht und das Wandern des Netzschlechtpunktes kontrolliert werden.
- **Digitalisierung Durchflussventile:** Die Untersuchungen konzentrieren sich auf die Quantifizierung der Potentiale digitalisierter Fernwärme-Hausstationen und deren Regelsysteme auf die Effizienz von Fernwärmenetzen in Bezug auf die Reduktion morgendlicher Lastspitzen, zu deren Deckung überwiegend fossile Brennstoffe zum Einsatz kommen.

und die Bestimmung der Scherfestigkeit des Verbundrohrsystems.

Für die RTS wurden 3 Technologiesets abgeleitet:

- **Inbetriebnahme Rohrleitungen:** Die erstmalige Inbetriebnahme der Rohrteststrecke RTS ist ein einzigartiges Ereignis und von großer Bedeutung für die Untersuchungen. Es werden praxisnahe Ansätze angewendet und Vergleiche mit bisherigen Forschungs-Messstrecken gezogen, um konkrete Empfehlungen für die Inbetriebnahme neuer Rohrleitungstrassen oder Abschnitte zu geben.
- **Untersuchung der mechanischen Beanspruchung:** Die Untersuchungen zielen darauf ab, Erkenntnisse über die Interaktion zwischen Rohr und Boden und die Alterung der Rohrleitungen unter neuen Bedingungen zu gewinnen. Der Schwerpunkt liegt auf der Senkung der Vorlauftemperaturen in Wärmenetzen und der Analyse von Spannung und Dehnung bei Kunststoffmantelrohren.

Übersicht Rohrteststrecke

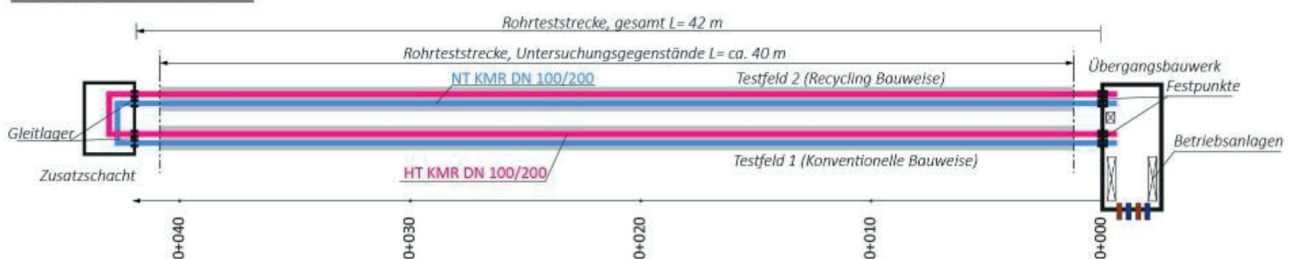


Abbildung 2: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus der Rohrteststrecke

Rohrteststrecke (RTS)

Die Versuchsinfrastruktur der RTS besteht aus zwei Schachtbauwerken, einem Übergangsbauwerk und einem Zusatzschacht, sowie Rohrleitungen zwischen diesen Bauwerken (siehe Abbildung 2). Es werden handelsübliche Kunststoffmantelrohre DN100/200 als Einzelrohrsysteme verlegt und mit Schrumpfmuffen verbunden. Im Übergangsbauwerk befinden sich Betriebsanlagen wie Wärmeübertrager, Pumpen und Ventile. Es gibt eine Hochtemperatur- und eine Niedrigtemperatur-Rohrschleife. Beide werden in zwei Testfeldern unter Verwendung von unterschiedlichen Bettungsmaterialien ausgeführt und haben ihre Festpunkte am Übergangsbauwerk. Sie werden zudem am Zusatzschacht über Gleitlager geführt. Zahlreiche Sensoren werden zur Erfassung von mechanischer Belastung und thermischer Wechselwirkung an den Rohrleitungen bzw. im umgebenden Erdreich installiert. Ein geotechnisches Begleitprogramm wird durchgeführt, um Bettungsbedingungen und Bodenparameter zu erfassen. Darüber hinaus werden an den Prüflingen Materialprüfungen gemäß EN 253 [5] durchgeführt. Die Materialprüfungen umfassen Untersuchungen der Wärmedämmung aus Polyurethan

- **Untersuchung der Wärmeübertragung Rohr-Boden:** Die Untersuchung der Wärmeübertragung befasst sich mit der Energieeffizienz und dem Einsatz umweltgerechter Recycling-Baustoffe im Fernwärmeleitungsbau. Es werden potenzielle Synergieeffekte hinsichtlich ökologischer Vorteile und positiver Effekte auf die Wärmeübertragung im Baugrund untersucht. Die Konfiguration der RTS mit Hoch- und Niedrigtemperatur-Kreisläufen bildet eine reale Fernwärmeleitungstrasse ab. Durch den Abgleich mit FEM-Simulationen und den im Baulabor der HCU gemessenen Wärmeleitfähigkeiten von Bettungsmaterialien können fundierte Empfehlungen und Erweiterungen bestehender Auslegungskriterien in den Regelwerken entwickelt werden.

3 Technologieset „Dezentrale Einspeisung und Prosumer“

Die gegenwärtige Struktur von Wärmenetzen in Deutschland ist zentralisiert und basiert überwiegend auf Verbrennungsprozessen [2], [3]. Zukünftig wird

jedoch eine Dezentralisierung erwartet, wobei die Temperaturniveaus sinken und regenerative Erzeuger wie Solarthermie an Bedeutung gewinnen werden [3]. Diese Veränderungen werden voraussichtlich zu einer erhöhten Volatilität der thermo-hydraulischen Zustandsgrößen führen, was neue Herausforderungen für die Regelung und Betriebsführung mit sich bringt. Ein Beispiel hierfür ist die in der Praxis häufig verwendete Pumpenregelung auf Basis von Differenzdruckmessungen am Netzschlechtepunkt. Dieser Punkt weist die geringste Druckdifferenz zwischen Vor- und Rücklauf aller Anschlusspunkte im Netz auf, wodurch der dort maximal entnehmbare Volumenstrom begrenzt ist. In Wärmenetzen mit zentraler Erzeugerstruktur ergeben sich eine geringe Anzahl an möglichen Positionen, an denen sich der Netzschlechtepunkt befinden kann. Im Regelfall handelt es sich hierbei um den am weitesten vom Erzeuger entfernten Verbraucher [6]. Wird nun einer der Verbraucher im Netz zu einem Prosumer, kann dies maßgebliche Einflüsse auf die Druckverläufe haben und damit zu einem Wandern des Netzschlechtepunktes führen. Ohne Maßnahmen an der zentralen Pumpenregelung kann dies zu Versorgungsengpässen führen. Abbildung 3 zeigt die Veränderung der Druckverläufe in einem Strangnetz bei zentraler und dezentraler Einspeisung. Die zentrale Einspeisung befindet sich ganz links, an der Position 0. Abnehmende Prosumer sind analog zu passiven Verbrauchern durch konzentrische Kreise dargestellt. Einspeisende Prosumer werden vergleichbar zu einer Pumpe durch ein kleines Dreieck im kreisförmigen Symbol gekennzeichnet. Die an den Abnehmern wirksame Druckdifferenz ergibt sich aus dem Unterschied an deren Anschluss an Vorlauf (rot) und Rücklauf (blau). Der sich ergebende Netzschlechtepunkt ist mit einer roten Umrandung markiert. Seine jeweilige Lage hängt von den Volumenströmen und der Geometrie des Netzes ab.

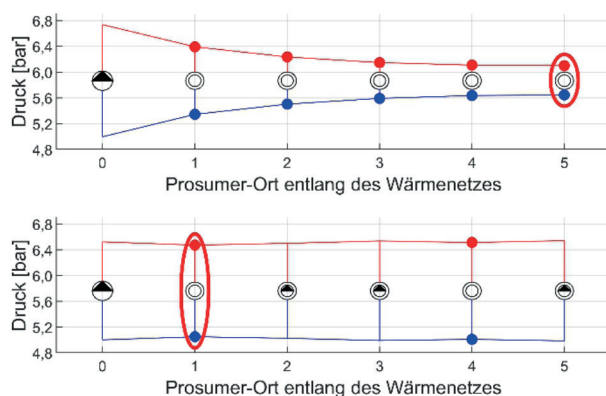


Abbildung 3: Vergleich der Druckverläufe in einem Strangnetz mit zentraler Einspeisung (oben) und dezentraler Einspeisung (unten)

Im Rahmen der Technologiesets „Dezentrale Einspeisung und Prosumer“ wird untersucht, wie durch geeignete technische Maßnahmen Prosumer aus erneuerbaren Energien erfolgreich in bestehende Wärmenetze integriert werden können, um den Anteil an regenerativ

erzeugter Wärme zu erhöhen. Anhand simulativer und experimenteller Methoden sollen verschiedene Szenarien analysiert werden, um die Auswirkungen dezentraler Erzeuger und Prosumern auf die Netzhydraulik zu bewerten und Handlungs- sowie Technologieempfehlungen für die Implementierung in bestehenden Netzen zu entwickeln.

Im Folgenden werden simulative Untersuchungen, die im Rahmen der Masterarbeit von Atif Ilyas [7] durchgeführt wurden, vorgestellt. Das Ziel der Untersuchungen ist die Entwicklung von Regelungskonzepten, für zentrale und dezentrale Pumpen, welche unabhängig von der Position des Netzschlechtepunktes eine dezentrale Einspeisung von Wärme bei Gewährleistung der Versorgungssicherheit an allen Entnahmepunkten erlauben.

Für die simulative Untersuchung wird das FTN in Simscape einer Erweiterung von MATLAB Simulink [8] abgebildet. Dafür werden die Komponenten durch Modelle aus der Simscape-Bibliothek aber auch durch Eigenentwicklungen repräsentiert. Letztere umfassen Pumpen (zentral und dezentral) sowie die Kombiventile, während aus der Simscape-Bibliothek vor allem Rohrleitungen und Wärmeübertrager zu nennen sind. Auch die Stoffdaten des Wärmeträgermediums, Wasser, stammen aus der Simscape-Bibliothek. Es handelt sich bei den Komponentenmodellen um physikalische gleichungsbasierte Modelle, in denen 1-D Näherungen für die transiente Formulierungen der Massen-, Impuls- und Energiebilanzen in Form von gewöhnlichen Differentialgleichungen aufgebaut und unter Berücksichtigung der im System definierten Rand- und Anfangsbedingungen gelöst werden. Diese Methode kann am Beispiel des Rohr-Modells in der Simscape Dokumentation [9] gut nachvollzogen werden. Die Parametrierung der Komponentenmodelle erfolgt anhand von Herstellerdatenblättern sowie Auslegungsdokumenten.

$$\dot{m} = \dot{Q} / c_p (T_{VL} - T_{RL})$$

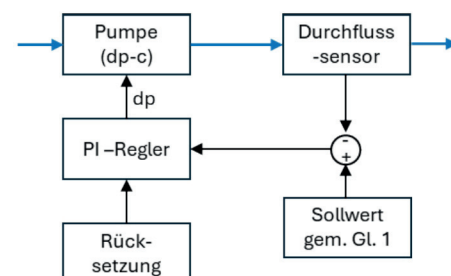


Abbildung 4: Blockschaltbild der dezentralen Pumpenregelung

Zusätzlich zu den thermo-hydraulischen Komponenten bilden die zentralen und dezentralen Regelungsstrukturen wichtige Bestandteile des Systems. Für die dezentrale Pumpen- und Ventilregelung wird eine kaskadierte Regelungsstruktur mit den Regelgrößen Temperatur

und Wärmeleistung modelliert. Die Basis hierfür bildet die bei den meisten Pumpen herstellerseitig implementierte Konstantdifferenzdruckregelung (dp-c) in Kombination mit Sensorik für Durchfluss und Temperatur im Rücklauf. Mithilfe von Gl. 1 wird aus den Sollwerten der Netzvorlauftemperatur T_{VL} in °C und der einzuspeisenden Wärmeleistung $\dot{Q}$ in W, dem Messwert der Temperatur im Rücklauf T_{RL} in °C und der spezifischen Wärmekapazität von Wasser c_p in J/kgK der Sollwert des Massenstroms $\dot{m}$ in kg/s berechnet. Dieser wird dann in einer Regelungsschleife unter Verwendung eines PI-Reglers mit externer Rücksetzung und oberen und unteren Ausgabewertbegrenzungen genutzt, um einen Differenzdruck Sollwert zu ermitteln. Dieser wiederum wird von der dp-c Regelung der Pumpe realisiert. Dieser Aufbau ist in Abbildung 4 ersichtlich.

Die Regelung der zentralen Pumpe sollte ursprünglich ebenfalls auf Basis einer herstellerseitig implementierten Pumpenregelung erfolgen: Der variablen Differenzdruckregelung (dp-v). Hier hat sich im Zuge der Arbeiten gezeigt, dass anstelle einer linearen Sollwertkennlinie, wie sie in der Regel von den Herstellern ausgeliefert wird, eine logarithmisch variable Sollwertkennlinie zielführend ist. Hintergrund dafür ist, dass die Differenzdrucksollwerte der zentralen Pumpe bei geringen Volumenströmen reduziert und die dezentrale Einspeisung somit erleichtert wird. Dies führt zu einer Einsparung des Pumpstrombedarfs und reduziert gleichzeitig die Anforderungen an die Auslegungsförderhöhe der dezentralen Pumpen. Dieser Effekt wird in nachstehender Abbildung 5 deutlich.

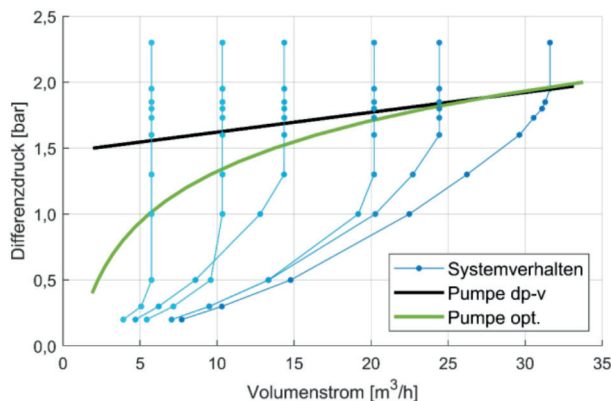


Abbildung 5: Anlagenkennlinie District LAB bei verschiedenen Abnahmekonfigurationen und Vergleich herkömmlicher sowie logarithmischer Pumpenkennlinien bei dp-v Regelung

Das Systemverhalten wird durch die blauen Kurven repräsentiert, welche jeweils für eine Abnahmesituation stehen. Der Übergang in den senkrechten Teil entspricht gerade dem Differenzdruck, welcher zur Versorgung mit dem erforderlichen Volumenstrom notwendig ist. Die Abnehmer lassen darüber hinaus keine weitere Zunahme des Volumenstroms zu. Indem sie ihre Ventile schließen, steigt dann der Druck steil an. Bei großen Volumenströmen wird prinzipiell ein höherer Differenzdruck benötigt, da die damit einhergehenden Strö-

mungsverluste entsprechend ansteigen. Umgekehrt ist für geringe Volumenströme ein geringer Differenzdruck ausreichend.

Die Regelung der Pumpen für einen Wechsel zwischen rein zentraler und dezentraler Einspeisung des Wärmenetzes werden mit der Sequenz gemäß Abbildung 6 untersucht. Zu Beginn entnehmen alle 5 Prosumer Wärme aus dem Netz. Nach einer Zeit von 2000 s wechselt Prosumer 1 in den neutralen Zustand, um nach einer Pause von 1000 s Wärme einzuspeisen. Die Rückkehr zur Entnahme von Wärme erfolgt direkt im Anschluss an die Einspeisung. Zur Zeit von 9000 s geht Prosumer 1 wieder in den neutralen Zustand. Mit einem zeitlichen Versatz wechseln auch die Prosumer 2 bis 5 zwischen der anfänglichen Entnahme von Wärme, neutralem Zustand, dezentraler Einspeisung und zurück.

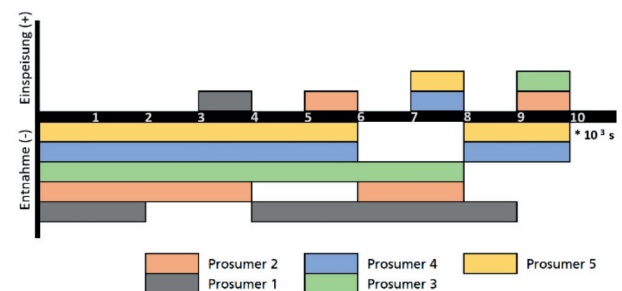


Abbildung 6: Betrachtete Sequenz mit Wechseln von Entnahme, neutralem Zustand und dezentraler Einspeisung

4 Ergebnisse

Als Reaktion auf die betrachtete Sequenz, welche den jeweiligen Betriebsmodus der Prosumer vorgibt, stellen sich die in Abbildung 7 gezeigten Volumenströme ein. Wenn zu Beginn alle 5 Prosumer Wärme aus dem Netz entnehmen, muss die Pumpe der Heizzentrale den entsprechenden Volumenstrom in das Netz einspeisen. Da die nominale Leistung des Prosumers 1 mit 200 kW den vierfachen Wert der Prosumer 2 bis 5 hat, ist dessen der Volumenstrom entsprechend größer.

Beim Wechsel von Prosumer 1 in den neutralen Zustand geht dessen Volumenstrom auf 0 m³/h zurück. Die Heizzentrale reduziert ihren Volumenstrom entsprechend, da sie dann nur noch die Prosumer 2 bis 5 versorgen muss. Ihr Volumenstrom nimmt noch weiter ab, sobald Prosumer 1 mit der Einspeisung beginnt. Auch wenn Prosumer 1 rein rechnerisch die 4 entnehmenden Prosumer versorgen könnte, wird noch Wärme zur Deckung der Netzverluste benötigt. Die Heizzentrale bleibt somit mit einem geringen Volumenstrom aktiv.

Die Wechsel zwischen Entnahme und Einspeisung der Prosumer 2 bis 5 führt zu vergleichbaren Anpassungen der Volumenströme der Heizzentrale. Diese ermöglicht in jedem Fall die dezentrale Einspeisung in das Wärmenetz.

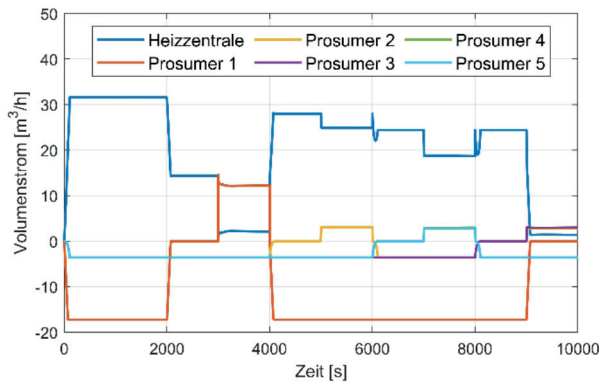


Abbildung 7: Volumenströme als Ergebnis der betrachteten Sequenz mit Wechseln zwischen Entnahme und Einspeisung

Die Betrachtung der Wärmeleistungen in Abbildung 8 zeigt, dass sich diese ähnlich zu den Volumenströmen verhalten. Zu Beginn der Simulation ist ein deutlicher Einschwingvorgang sichtbar. Dieser resultiert aus dem langsamen thermischen Verhalten des Wärmenetzes. Es dauert im Vergleich zu den Volumenströmen sichtbar länger, bis sich ein neues stationäres Temperaturniveau einstellt.

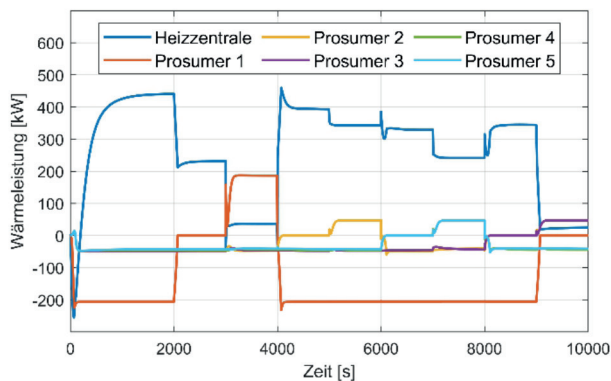


Abbildung 8: Wärmeleistungen als Ergebnis der betrachteten Sequenz mit Wechseln zwischen Entnahme und Einspeisung

Als Abschluss der Auswertung wird der elektrische Energieverbrauch der Pumpen betrachtet, wenn die Einspeisung rein zentral oder zusätzlich mit jeweils einem Prosumer erfolgt. In der Abbildung 9 sind die Ergebnisse für 2 Szenarien dargestellt.

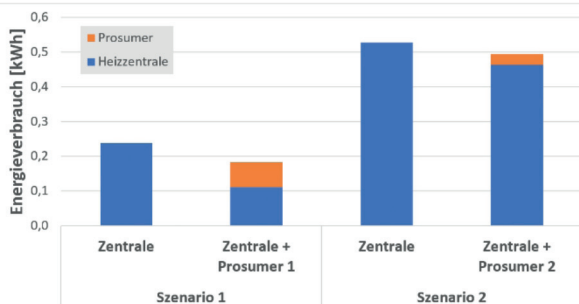


Abbildung 9: Energieverbrauch der Pumpen bei zentraler und dezentraler Einspeisung

Die beiden Säulen in der linken Hälfte basieren auf einer Entnahme durch die Prosumer 2 bis 5. Bei einer Einspeisung von Prosumer 1 geht der Verbrauch bei der

Zentrale deutlich zurück. Allerdings wird ein Teil der elektrischen Energie für die Pumpe im Prosumer 1 benötigt. Insgesamt ergibt sich dabei eine Einsparung von 23 Prozent. Zum Vergleich dazu entsprechen die beiden Säulen auf der rechten Seite einer Entnahme durch die Prosumer 1 sowie 3 bis 5. Auf Grund der in Relation geringeren Leistung von Prosumer 2 kann dieser die Zentrale nicht so stark unterstützen. Insgesamt lässt sich trotzdem eine Einsparung der elektrischen Energie von 7 Prozent erreichen.

Die vorgestellte Regelung der Pumpen ermöglicht die dezentrale Einspeisung von Wärme, ohne auf eine Datenübertragung zwischen den einzelnen Stationen angewiesen zu sein. Durch die optimierte Pumpenkennlinie gemäß Abbildung 5 wird der Differenzdruck bei geringen Volumenströmen abgesenkt, wodurch andere Pumpen bei der Einspeisung nur einen geringen Gegenstand überwinden müssen. Ein weiterer Vorteil ist die Einsparung von elektrischer Energie, wenn eine dezentrale Einspeisung erfolgt.

5 Zusammenfassung und nächste Schritte

Das Projekt "EnEff: Wärme: Urban-Turn" (FKZ: 03EN3029) fokussiert sich auf die Transformation der Fernwärmeversorgung als Teil der Wärmewende. Ziel ist die Entwicklung technischer Lösungen, neuer Auslegungskriterien und innovativer Betriebsführungsansätze. Geplant sind Simulationen und experimentelle Untersuchungen zur Identifikation von Herausforderungen, technischen Anforderungen und Potenzialen der Fernwärmetransformation. Technologiesets wurden abgeleitet, um Forschungsfragen zu beantworten.

Der Beitrag gibt einen Überblick über Versuchsmöglichkeiten an der Versuchsanlage District LAB und der abgeleitete Technologiesets. Des Weiteren erfolgt die Präsentation der Ergebnisse der simulationsbasierten Untersuchungen des Technologiesets "Dezentrale Einspeisung und Prosumer". Das Technologieset "Prosumer im Netz" befasst sich mit der Regelung von Pumpen für zentrale und dezentrale Wärmeinspeisung. Die Simulationen zeigen Veränderungen von Volumenströmen und Wärmeleistungen beim Wechsel zwischen Wärmeentnahme und -einspeisung durch Prosumer. In zwei analysierten Szenarien wurde eine Einsparung von bis zu 23 Prozent beim elektrischen Energieverbrauch der Pumpen bei zentraler Einspeisung festgestellt. Die Pumpenregelung ermöglicht dezentrale Einspeisung ohne Datenübertragung und reduziert den Differenzdruck, was zusätzliche Energieeinsparungen zur Folge hat.

Im Zuge künftiger Arbeiten werden alle weiteren hier vorgestellten Technologiesets simulativ untersucht und basierend auf den Ergebnissen die experimentellen Untersuchungen vorbereitet. Die Untersuchungen werden sich darauf konzentrieren, inwieweit bestehende Hausübergabestationen (HAST) in einem konventionel-

len Netz vor der eigentlichen Transformation betrieben werden können. Darüber hinaus wird die Analyse der Potenziale digitalisierter Systeme zur Reduktion von morgendlichen Lastspitzen im Fokus stehen. Es werden Empfehlungen für die Inbetriebnahme neuer Rohrleitungen erarbeitet, und es wird untersucht, wie die Interaktion zwischen Rohr und Boden die Alterung der Rohrleitungen beeinflusst. Schließlich werden die Effekte der Wärmeübertragung auf die Energieeffizienz und den Einsatz von Recycling-Materialien im Fernwärmeleitungsbau eingehend betrachtet. Die Ergebnisse der Analysen werden dazu beitragen, neue Auslegungskriterien und innovative Betriebsführungskonzepte zu formulieren, um die Effizienz und Nachhaltigkeit der Fernwärmeversorgung zu steigern.

Die Ergebnisse leisten einen signifikanten Beitrag zur Transformation der Fernwärme, indem sie neue Auslegungskriterien und innovative Ansätze für die Betriebsführung und Regelung entwickeln. Durch die Analyse digitaler Systeme zur Lastspitzenreduktion und die Untersuchung der Wechselwirkungen zwischen Rohr und Boden wird die Effizienz und Nachhaltigkeit der Wärmeversorgung erhöht. Zudem fördert die Nutzung von Recycling-Materialien eine ressourcenschonende Wärmeversorgung.

6 Danksagung

Das Projekt „EnEff: Wärme UrbanTurn: Wandlung der urbanen leitungsgebundenen Wärmeversorgung“ (FKZ 03EN3029 A- F) wird mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) im Rahmen des 7. Energieforschungs-programms der Bundesregierung gefördert und vom Projektträger Jülich (PTJ) betreut. Die Autoren danken dem BMWK für die Förderung und dem PTJ für die Betreuung des Forschungsvorhabens.

7 Literaturverzeichnis

- [1] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz, „Bundes-Klimaschutzgesetz,“ 18. 08. 2021. [Online]. Available: <https://www.bmuv.de/GE838>. [Zugriff am 21. 10. 2024].
- [2] A. M. D. Cadenbach, S. Weismann, H. Gebhardt, A. Oliva, B. Schiebler und D. Schüwer, „Neubau und Transformation hocheffizienter Wärmenetze im Kontext der Dekarbonisierung und Flexibilisierung unserer Energiesysteme,“ *ForschungsVerbund Erneuerbare Energien (FVEE Jahrestagung) 2022*, pp. 90-95, <https://doi.org/10.24406/publica-2187>, 2023.
- [3] S. Hay, D. Heiler, A. M. Kallert, D. Lottis, R. Ziegler, I. Weidlich und S. Dollhopf, „Fernwärmenetze im Kontext nationaler Klimaziele: Potentiale für "UrbanTurn",“ Mai 2022, [Online]. Available: <https://www.agfw.de/forschung/urbanturn> [Zugriff: 13. Sep. 2022].
- [4] A. Kallert, D. Lottis, M. Shan und D. Schmidt, „New experimental facility for innovative district heating systems—District LAB,“ *Energy Reports, Volume 7, Supplement 4*, pp. 62-69, ISSN 2352-4847, <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.09.039>, 2021.
- [5] „DIN EN 253:2020-03, Fernwärmerohre - Einzelrohr-Verbundsysteme für direkt erdverlegte Fernwärmenetze - Werkmäßig gefertigte Verbundrohrsysteme, bestehend aus Stahl-Mediumrohr, einer Wärmedämmung aus Polyurethan und einer Ummantelung aus Polyethylen,“ <https://dx.doi.org/10.31030/3072082>, 2020.
- [6] S. Frederiksen und S. Werner, *District heating and cooling*, Lund: Studentlitteratur, 2013.
- [7] A. Ilyas, „Algorithm for variable critical differential pressure points in decentralized district heating system: A thermohydraulic simulation approach for prosumer centric operations,“ unveröffentlichte Masterarbeit, Studiengang Renewable Energy Engineering and Management, Fakultät für Umwelt und Natürliche Ressourcen, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 2024.
- [8] MATLAB and Simulink, Version R2023b, The MathWorks Inc., Natick, Massachusetts, 2023.
- [9] „Simscape Documentation for Pipe (TL),“ The MathWorks, Inc., [Online]. Available: <https://www.mathworks.com/help/hydro/ref/pipetl.html>. [Zugriff am 22. 10. 2024].

Potenzialanalyse für den Einsatz von Recyclingbaustoffen als nachhaltige Lösung im Fernwärmelitungsbau

Stefan Dollhopf¹⁾, Ingo Weidlich¹⁾,

¹⁾ HafenCity Universität Hamburg, Henning-Voscherau-Platz 1, 20457 Hamburg

stefan.dollhopf@hcu-hamburg.de

ingo.weidlich@hcu-hamburg.de

Kurzfassung

Diese Studie untersucht das Potenzial von Recyclingbaustoffen (RC-Baustoffen) im Fernwärmelitungsbau als ressourcenschonende Alternative zu konventionellen Bettungsmaterialien aus natürlichen Ressourcen. Vor dem Hintergrund des geplanten Ausbaus von Fernwärmenetzen in Deutschland wird der Einsatz von RC-Baustoffen im Hinblick auf deren mögliche Auswirkungen und die konkrete Anwendung in der Verteilungsstruktur von Wärmenetzen beleuchtet. Die Potenzialanalyse zeigt, dass insbesondere Warmwassernetze mit niedrigeren Betriebstemperaturen und nachgeordnete Verteilungsstrukturen wie Hausanschluss- und Verteilleitungen ein hohes Potenzial für den Einsatz von RC-Baustoffen bieten.

Schlagworte

Leitungsbau, Recyclingbaustoffe, Nachhaltigkeit, Kreislaufwirtschaft, Transformation

1 Einleitung

Der Ausbau von Fernwärmesystemen ist ein zentrales Element der Wärmewende und designierter Teil der nationalen Strategie zur Erreichung der Klimaziele [1], [2]. Prognosen zufolge soll die Trassenlänge der Fernwärmelösungen von derzeit etwa 25.000 Kilometern auf über 60.000 Kilometer anwachsen [3]. Neben dem Ausbau der Infrastruktur steht auch die Wärmeerzeugung und der Betrieb der Systeme vor einer grundlegenden Transformation. Ein Kernelement dieser Transformation ist die Reduktion der Betriebstemperaturen der Wärmenetze [4]. Diese ermöglicht eine bessere Nutzung von erneuerbaren Energien in der Wärmeerzeugung aufgrund der Einbindeoptionen niedercalorischer Wärmequellen und trägt dazu bei, die Energieeffizienz der Systeme zu erhöhen, indem Wärmeverluste bei der Verteilung minimiert werden [5].

Der Ausbau und die Transformation der Fernwärmesysteme sind mit einem hohen Verbrauch an primären Ressourcen verbunden. Es müssen deshalb, ökologisch optimierte Lösungen für den Fernwärmelitungsbau identifiziert werden, um eine nachhaltige Entwicklung sicherzustellen. Fernwärmelösungen werden üblicherweise als erdverlegte Kunststoffmantelrohre ausgeführt, die aus einem Mediumrohr zum Transport des heißen Fernwärmewassers, einer Wärmedämmung aus Polyurethan und einem Mantel aus Polyethylen bestehen. Je nach Ausführung lassen sich diese Rohre in flexible oder starre Rohrsysteme sowie Einzel- und Doppelrohrsysteme unterteilen. Der Betrieb der Fernwärmesysteme führt aufgrund hoher Betriebstemperaturen zu einer hohen mechanischen Belastung der erdverlegten Rohre. Demzufolge

werden auch hohe Anforderungen an Bettungsmaterialien gestellt. In der konventionellen Bauweise werden Sande aus natürlichen Vorkommen als Bettungsmaterial verwendet, um eine definierte Rohr-Boden-Interaktion zu gewährleisten und die Funktionsfähigkeit des Systems langfristig sicherzustellen.

Der Einsatz von Recyclingbaustoffen (RC-Baustoffen) bietet hier eine ressourcenschonende Alternative [6], beeinflusst jedoch verschiedene Eigenschaften des Verlegesystems. Hierbei müssen sowohl gegenwärtige als auch zukünftige Betriebsbedingungen sowie die besonderen Charakteristiken der Verteilungsstruktur und der Rohrsysteme berücksichtigt werden.

Das Ziel dieser Untersuchung ist es, die Auswirkungen des Einsatzes von RC-Baustoffen in Fernwärmesystemen zu bewerten und deren Potenzial für die Transformation der Wärmenetze zu analysieren. Im Rahmen der Potenzialanalyse wird ein mehrstufiger Ansatz angewendet. Zunächst werden typische Bauweisen von Fernwärmesystemen sowie die Anforderungen an die eingesetzten Rohrsysteme und Bettungsmaterialien untersucht. Anschließend werden Bewertungshypothesen entwickelt, um das Potenzial von RC-Baustoffen differenziert zu bewerten.

2 Material und Methoden

Folgend werden Rohrleitungskonfigurationen für Fernwärmenetze definiert, Anforderungen an Bettungs- und Verfüllmaterialien beschrieben, eine Perspektive zum Einsatz von Recyclingbaustoffen gegeben und daraus Hypothesen für die Potenzialanalyse abgeleitet.

2.1 Leitungskonfigurationen für Fernwärmenetze

Fernwärmeleitungen werden grundsätzlich nach ihrer Funktion im Netz als Rohrleitungsarten gegliedert und in Transport-, Verteil- und Hausanschlussleitungen unterteilt [7]. Dabei nimmt der Durchmesser der Leitungen entlang dieser Hierarchie vom Erzeuger bis zum Endverbraucher in der Regel kontinuierlich ab und die Temperaturlastwechsel zu. Die Transportleitungen spielen eine zentrale Rolle, da diese die Versorgungssicherheit der nachfolgenden Netzstruktur gewährleisten. Zwar haben Transportleitungen lange Rohrabschnitte, jedoch entfällt der größte Teil der Netzlänge in deutschen Fernwärmesystemen auf Leitungen mit kleineren Rohrdurchmessern von weniger als DN 125 [8], also auf Verteil- und Hausanschlussleitungen. Demnach erscheint es sinnvoll, dass Leitungen mit kleineren Durchmesser auch den größten Anteil an den gesamten Wärmeverlusten haben, dies hängt jedoch auch damit zusammen dass in kleinen Rohrdurchmessern nur geringe Wärmemengen transportiert werden und die spezifischen Wärmeverluste je laufenden Meter in Relation dazu hoch sind [9].

Die wesentlichen Parameter für die Dimensionierung und Auslegung von Fernwärmerohren sind die Auslegungstemperatur, das Druckniveau sowie der Volumenstrom. Ein Großteil der deutschen Fernwärmenetze wird derzeit mit Spitzentemperaturen von über 100 °C betrieben [10], was diese Netze gemäß der Kategorisierung von Lund [11] der zweiten (2GDH) und dritten Generation (3GDH) zuordnet. Am häufigsten werden deshalb sogenannte Kunststoffmantelrohre nach DIN EN 13941-1 [7] verwendet. Diese Verbundrohre bestehen aus einem Stahlmediumrohr, einer Wärmedämmung aus Polyurethan-Schaum (PUR) und einem Mantel aus Polyethylen (PE). Diese Rohrsysteme eignen sich für Dauerbetriebstemperaturen bis 120 °C sowie Spitzentemperaturen bis 140 °C und Betriebsdrücke bis PN 25, wodurch sie die Anforderungen für Heißwasser-Fernwärmenetze abdecken.

Bei Einzelrohrsystemen sind Vor- und Rücklauf in separaten Leitungen verlegt, während Doppelrohrsysteme beide Leitungen in einem Rohr bündeln. Starre Rohrsysteme sind in Dimensionen von DN 65 bis über DN 800 verfügbar, was ihren Einsatz in allen Bereichen der Netzstruktur ermöglicht. Die Rohre sind hohen mechanischen Belastungen ausgesetzt, welche durch wechselnde Spannungs- und Dehnungszustände aufgrund thermischer Wechsellasten und die Rohr-Boden Interaktion entstehen [12]. Doppelrohrsysteme sind in der Regel bis zu einem Durchmesser von DN 200 erhältlich. Die Bedeutung der

Rohr-Boden Interaktion ist geringer, da Vor- und Rücklaufleitungen durch Metallstege verbunden sind und dadurch Dehnungen teilweise kompensiert werden. Ein weiterer Vorteil von Doppelrohrsystemen besteht in den geringeren spezifischen Wärmeverlusten [W/m] im Vergleich zu Einzelrohrsystemen [13]. Flexible Rohrsysteme, die in der Regel bis zu einem Durchmesser von DN 100 verfügbar sind, sind aufgrund ihrer flexiblen Bauweise häufig selbstkompensierend., dies bedeutet, dass keine Dehnung des Rohres auftritt, da die Dehnungen innerhalb des Querschnitts kompensiert werden. Die mechanische Rohr-Boden Interaktion hat demnach eine geringere Bedeutung.

Die Wahl des Rohrsystems sowie des Rohrdurchmessers hat direkte Auswirkungen auf die Größe des Leitungsgrabens. Starre Einzelrohrsysteme erfordern in der Regel große Gräben, während durch den Einsatz flexibler Rohrsysteme oft kleinere Leitungsgräben ausreichen, da nur ein geringer Arbeitsraum erforderlich ist [14]. Auch mit Doppelrohrsystemen können die Dimensionen der Leitungsgräben reduziert werden [13].

Verbundrohre mit polymeren Mediumrohren sind ebenfalls eine Option und können je nach Material für Temperaturen bis zu 80°C im Dauerbetrieb und 95°C bei Spitzentemperaturen sowie für Betriebsdrücke bis PN 10 eingesetzt werden. Diese Rohrtypen sind sowohl als Einzel- als auch als Doppelrohrsysteme sowie in starrer und flexibler Ausführung erhältlich, wobei sie tendenziell in kleineren Durchmessern produziert werden. Diese Limitation beeinflusst die maximalen Volumenströme, die durch solche Systeme transportiert werden können. Der Einsatz von polymeren Rohrsystemen bietet sich insbesondere für kleinere Nahwärmenetze mit niedrigen Betriebstemperaturen an, die typischerweise den Fernwärmenetzen der dritten (3GDH) und vierten Generation (4GDH) zuzuordnen sind.

2.2 Anforderung an Bettungs- und Verfüllmaterialien

Aufgrund der zuvor genannten mechanischen Beanspruchung und der hohen Bedeutung der Rohr-Boden Interaktion von erdverlegten Fernwärmeleitungen werden hohe Anforderungen an Bettungsmaterialien gestellt. Die DIN EN 13941-2 [15] definiert hierfür einen Korngrößenbereich und weitere Anforderungen. Dementsprechend sind in der Regel nur Sande mit runden Körnern aus natürlichen Ressourcen zur Bettung von Fernwärmerohren zugelassen. Von besonderer Bedeutung ist die Übereinstimmung von bodenmechanischen Parametern der statischen Auslegung mit der Wahl des Bettungsmaterials bei der Bauausführung.

Gemäß der DIN EN 13941-2 [15] sind für die Verfüllung der Leitungsgräben steinfreie, nicht bindige, gut verdichtbare Baustoffe, Baustoffgemische oder Aushub-Böden zu verwenden. Weitere bautechnische Anforderungen, welche z.B. aus dem Oberbau resultieren, müssen eingehalten werden. Diese Anforderungen sind für

Deutschland in den Regelwerken ZTV E-StB [16], ZTV A-StB [17] und den zugehörigen TL SoB-StB [18], TL Gestein-StB [19] und TL BuB E-StB [20] definiert.

Ergänzende fernwärme-spezifische Anforderungen an Bettungs- und Verfüllmaterialien werden auch durch das Regelwerk AGFW 401 Teil 12 und Vorgaben der Hersteller von Kunststoffmantelrohren definiert. In der Baupraxis erfolgt in der Leistungsbeschreibung für Fernwärmeleitungsbaumaßnahmen deswegen meist ein Verweis auf die Konformität des Materials mit den genannten technischen Regelwerken.

2.3 Zur Anwendung von Recyclingbaustoffen

Die Ersatzbaustoffverordnung (ErsatzbaustoffV) definiert Recyclingbaustoffe (RC-Baustoffe) als aufbereitete und güteüberwachte Baustoffe, die aus mineralischen Bauabfällen gewonnen werden und verschiedenen Ursprüngen, wie beispielsweise Beton- oder Ziegelaufbruch, entstammen können. Neben der Klassifizierung definiert die ErsatzbaustoffV auch Einbaumöglichkeiten von Ersatzbaustoffen. Der Einsatz wird hinsichtlich wasserwirtschaftlicher Kriterien und der bautechnischen Eignung definiert. Gemäß der ErsatzbaustoffV sind RC-Baustoffe der Klassen RC-1 und RC-2 grundsätzlich für die Verfüllung von Leitungsgräben unter geschlossener Deckschicht geeignet. Leitungsgräben ohne Bindemittel in der Deckschicht dürfen hingegen in der Regel nur mit RC-Baustoffen der Klasse RC-1 verfüllt werden.

Die Verwendung von RC-Baustoffen in technischen Bauwerken stellt im Sinne des §6 des Kreislaufwirtschaftsgesetzes (KrWG) Recycling dar und trägt somit zum kreislaufwirtschafts-gerechtem Umgang von Bauabbruch Abfällen bei. Dies schafft eine Entlastung für die voll ausgelasteten Deponiekapazitäten und es schont natürliche Ressourcen. Da der Erd- und Oberbau einen maßgeblichen Teil der ökologischen Auswirkungen des Leitungsbaus darstellt [21] kann durch Substitution natürlicher Gesteinskörnungen durch RC-Baustoffe ein Beitrag zur Optimierung der ökologischen Qualität geleistet werden. Zudem bieten RC-Baustoffe wirtschaftliche Vorteile, da diese oft günstiger sind als Baustoffe aus natürlichen Ressourcen [22].

Trotzdem hat die ErsatzbaustoffV bisher nicht flächendeckend zu der erhofften Steigerung der Recycling-Quote geführt. Dies wird damit begründet, dass teils noch Vorurteile gegenüber RC-Baustoffen herrschen und diese keinen Produktstatus aufweisen, die Marktakzeptanz muss deshalb dringend gefördert werden und die Anwendung von RC-Baustoffen in den Regelwerken berücksichtigt werden. [23]

2.4 Eigenschaften und mögliche Auswirkungen von RC-Baustoffen als Verfüllmaterial in Wärmenetzen

Neben ökologischen und ökonomischen Vorteilen unterscheiden sich RC-Baustoffe unter anderem hinsichtlich der bodenmechanischen und thermischen Eigenschaften

von Baustoffen aus natürlichen Gesteinskörnungen. Dies hat vielfältige Effekte z.B. auf die spezifischen Wärmeverluste und die mechanische Beanspruchung der Fernwärmeleitungen.

Die spezifischen Wärmeverluste, bilden den gesamten thermischen Widerstand des Systems ab und sind demnach abhängig von zahlreichen Parametern wie z.B. den Vor- und Rücklauftemperaturen, der Dimension und Dämmstärke der Rohrleitung, der Überdeckungshöhe und der Bodentemperatur. Die Wärmeleitfähigkeit des Bettungsmaterials stellt im thermischen Widerstand des Bodens die maßgebliche Eigenschaft dar [24]. Geringere Wärmeleitfähigkeiten der Verfüllbaustoffe führen folglich zur Reduktion der Wärmeverluste [13], [25].

RC-Baustoffe weisen oft poröse Körner auf, dies wiederum resultiert in einer geringeren Wärmeleitfähigkeit. Positive Effekte auf das thermische Verhalten konnten bereits sowohl in der Fernwärme als auch in anderen Bereichen nachgewiesen werden. So zeigen die Untersuchungen von Henoegl et al. [26] geringere Wärmeleitfähigkeiten von Ersatzbaustoffen als Bettungsmaterial und in [27] wird Beton aus RC-Baustoffen ebenfalls eine geringere Wärmeleitfähigkeit ausgewiesen.

Neben der Porosität unterscheiden sich die Körner von RC-Baustoffe in der Regel auch durch die Kornform zu natürlichen Sanden, da durch die Aufbereitung, das Brechen von Beton oder Ziegeln, scharfkantige Körner entstehen. Die unterschiedliche Kornform ist in Abbildung 1 erkennbar, welche eine Makro Aufnahme eines natürlichen Sands und eines Recyclingbetonsands zeigt.

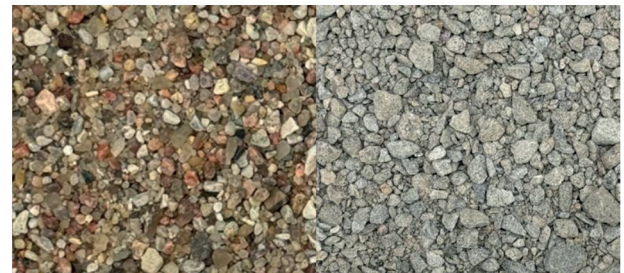


Abbildung 1: Makroaufnahme von Natürlichem Sand (links) und Recyclingbetonsand (rechts)

Die gebrochene Kornform von RC-Baustoffen aus Betonaufbruch führt zu einer höheren Steifigkeit und Scherfestigkeit des Materials und folglich zu einem hohen inneren Reibungswinkel der eingebauten Schicht [28]. Je nach Zusammensetzung des RC-Baustoffs sind im Gegensatz zu feinkörnigem Sand, mit einem Reibungswinkel von $\varphi = 32,5^\circ$, höhere innere Reibungswinkel von $\varphi = 40^\circ$ oder mehr zu erwarten. Dies wiederum erhöht den Kontakt-Reibungswinkel δ zwischen dem Rohrmantel und der umgebenden Bettung, und die Reibkraft und beeinflusst damit die Rohr-Boden Interaktion und die mechanische Beanspruchung der Fernwärmeleitungen aus. Durch eine höhere Reibkraft werden Dehnungen reduziert und axiale Spannungen im Querschnitt erhöht. Dies wiederum wirkt sich auf die Scherfestigkeit des

Verbundrohr und die Dauerhaftigkeit der Fernwärmeleitung aus. Eine Vergleichsrechnung für einen 40 m langen, geraden Rohrabschnitt DN 100 mit einer Überdeckung von 1,2 Metern und einer Temperaturdifferenz von 120 K zeigt, dass eine Zunahme des inneren Reibungswinkels ϕ um 10° zu einer Erhöhung der axialen Spannung im geraden Rohrquerschnitt um etwa 25% führt.

Bei RC-Baustoffen aus Betonaufbruch können auch Effekte durch sekundäre Verfestigungsprozesse infolge hydraulischer Bindung auftreten [28] und folglich auch die Berücksichtigung von Kohäsion beim Reibungswiderstand erforderlich werden. Auch dies führt voraussichtlich zu einer Zunahme der axialen Spannungen. Folglich ist festzustellen, dass der Einsatz von RC-Baustoffen als Bettungsmaterial einen wesentlichen Einfluss auf die Rohr-Boden Interaktion hat und die mechanische Belastung voraussichtlich erhöht.

2.5 Bewertungshypothesen für die Potenzialanalyse

Aus der Analyse verschiedener Rohrtypen, deren Anwendung und Charakteristika werden zunächst typische Rohrleitungskonfigurationen von Rohrleitungsart und Rohrtypen für Wärmenetze gebildet. Dafür wird grundsätzlich zwischen Heißwasser-Wärmenetzen mit Spitzentemperaturen von bis zu 140°C und Warmwasser-Wärmenetzen mit Spitzentemperaturen von 95°C unterschieden. Die Rohrleitungskonfigurationen werden dann auf das Potenzial der Anwendung von RC-Baustoffen und deren Auswirkungen auf Ökologie und Wirtschaftlichkeit (1), den thermischen Wechselwirkungen (2) und der mechanischen Beanspruchung (3) qualitativ bewertet, um eine umfängliche Potenzialanalyse zu geben. Dazu werden Bewertungskriterien entwickelt, welche sich aus der vorangegangenen Analyse ableiten:

(1) Ökologie und Wirtschaftlichkeit

Das Bewertungskriterium ist die Menge des eingebauten Materials in den Leitungsgraben je laufendem Meter Fernwärme Trasse. Je größer die Rohre und die Anzahl der Rohre im Graben, desto größer ist der Graben und Menge des Bettungs- und Verfüllmaterials.

Je mehr Bettungs- und Verfüllmaterial desto höher ist das ökologische und wirtschaftliche Potenzial für den Einsatz von RC-Baustoffen.

(2) Thermische Wechselwirkung

Das Kriterium ist das Verhältnis von transportierter Wärmemenge zu den spezifischen Wärmeverlusten.

Je kleiner das Rohr und je geringer die Betriebstemperaturen sind, desto geringer ist die Wärmemenge und desto höher die Bedeutung von potenziellen Einsparungen von Wärmeverlusten durch die Verwendung von RC-Baustoffen.

(3) Mechanische Beanspruchung

Das Kriterium ist die mechanische Beanspruchung, in Bezug auf die Rohr-Boden Interaktion. Je wichtiger die Funktion im Netz, die Größe des Rohres und je höher die

Betriebstemperatur, desto höher ist die mechanische Beanspruchung. Je größer die mechanische Beanspruchung ist, desto geringer ist das Potenzial für den Einsatz von RC-Baustoffen da sich eine höhere mechanische Beanspruchung negativ auf die Trassierung und die Langlebigkeit des Verlegesystems auswirkt.

Die Bewertung für den Einsatz von Recyclingbaustoffen erfolgt in Anbetracht der möglichen Auswirkungen qualitativ in 5 Stufen nach sehr hohem (++), hohem (+), mittleren (o), geringem (-) und sehr geringem Potenzial (--).

3 Ergebnisse

Das Ergebnis der Potenzialanalyse ist in Abbildung 2 dargestellt. Dem Einsatz von Recyclingbaustoffen (RC-Baustoffen) wird insgesamt ein hohes Potenzial für die Anwendung im Fernwärmelitungsbau ausgewiesen und die unterschiedlichen Charakteristika der möglichen Rohrleitungskonfigurationen und Auslegungsparameter führen zu einer differenzierten Bewertung.

Die möglichen ökologischen und wirtschaftlichen Vorteile werden sowohl für Heißwasser- als auch Warmwassernetze gleich bewertet, da sich die Bewertung auf den laufenden Meter Fernwärme-Trasse bezieht. Transportleitungen haben in der Regel große Rohrdimensionen und Verlegtiefen und deshalb große Leitungsgräben. Die Vorteile durch eine Substitution natürlicher Gesteinskörnungen wirkt sich dementsprechend stark aus. Verteil- und Hausanschlussleitungen werden in der Regel in kleineren Leitungsgräben und geringeren Verlegetiefen eingebaut. Durch den Einsatz von Doppel- oder flexiblen Rohrsystemen können die notwendigen Leitungsgräben Abmessungen weiter reduziert werden. Dadurch ist wesentlich weniger Verfüllmaterial nötig und der ökologische und wirtschaftliche Vorteil durch die Substitution mit Recyclingbaustoffen je laufendem Meter geringer.

Hinsichtlich der möglichen technischen Auswirkungen wird der Einsatz von RC-Baustoffen in Heißwassernetzen mit Auslegungstemperaturen von 120°C / 140°C mit mittel bewertet, da hohe Temperaturen eine hohe mechanische Beanspruchung induzieren. Dies wiederum verschärft den Effekt der höheren mechanischen Beanspruchung, welcher aus dem Einsatz von RC-Baustoffen resultiert. Auch werden bei hohen Temperaturen in der Regel auch höhere Temperaturspreizungen möglich und damit große Wärmemengen transportiert, der Effekt durch geringere spezifische Wärmeverluste fällt dann in Relation geringer aus, der Effekt durch geringere spezifische Wärmeverluste fällt dadurch in Relation geringer aus. Dennoch haben RC-Baustoffe ein gutes Potenzial für den Einsatz bei flexiblen Einzelrohrsystemen mit Stahlmediumrohr, da hier keine wesentlich höheren mechanischen Beanspruchungen hinsichtlich der Rohr-Boden Interaktion durch den RC-Baustoff zu erwarten sind.

Für den Einsatz von RC-Baustoffen in Warmwassernetzen mit Auslegungstemperaturen von 80 °C / 95 °C wird in der Bewertungsmatrix ein hohes bis sehr hohes Potenzial ausgewiesen. Dies ist damit zu begründen, dass der nachteilige Effekt der höheren Belastung durch die geringeren Auslegungstemperaturen abgemildert wird und gleichzeitig der positive Effekt durch eine mögliche Einsparung von Wärmeverlusten hinsichtlich einer geringeren transportierten Wärmemenge einen höheren Effekt im Sinne der Energieeffizienz aufweist.

4 Diskussion

Die Potenzialanalyse weist Recyclingbaustoffen (RC-Baustoffen) im Fernwärmeleitungsbau insgesamt ein hohes Potenzial aus. Dieses Potenzial hängt stark von der Rohrleitungsart, dem Rohrtyp, dem Durchmesser und den Betriebstemperaturen ab. Zudem ist festzustellen, dass eine Reduzierung der Betriebstemperaturen auch zu einer Diversifizierung der Rohrleitungskonfigurationen in Fernwärmenetzen führen kann. Das am häufigsten verwendete Rohrsystem, das Kunststoffmantelrohr als starres

Einzelrohrsystem, kann für alle Teile der Verteilungsstruktur, von der Transportleitung bis zum Hausanschluss, verwendet werden. Vor allem für kleinere Leitungen sind jedoch mehr Optionen verfügbar. Im Hinblick auf die Transformation und den außerordentlichen Netzausbau sollten die Vorteile unterschiedlicher Rohrsysteme genutzt werden, um eine optimale Lösung für die Wärmenetze zu entwickeln und Ressourcen effektiv zu nutzen.

Bei Transportleitungen hat der Einsatz von RC-Baustoffen ein geringes Potenzial, was angesichts ihrer zentralen Bedeutung für die Versorgungssicherheit, im Hinblick auf eine mögliche höhere mechanische Beanspruchung und folglich eine mögliche geringere Nutzungsdauer, berücksichtigt werden muss. Dieser negative Effekt wird dadurch verstärkt, dass Transportleitungen oft in langen, geraden Rohrabsehnitten verlegt werden und dadurch gegebenenfalls mehr Kompensationselemente erforderlich werden. Verteil- und Hausanschlussleitungen, insbesondere in Warmwassernetzen, weisen aufgrund der kleineren Durchmesser und Rohrtypen ein höheres Potenzial

Leitungskonfigurationen						
Mediumrohr	Stahl-/Metall (z.B. Stahl P235GH)				Polymer (z.B. Pe-X)	
Leitungskategorie	Transport	Verteil- und Hausanschluss			Verteil- und Hausanschluss	
Durchmesser	> DN 250	≤ DN 250	≤ DN 200	≤ DN 100	≤ DN 150	≤ DN 65
						
Rohrtyp	Starres ERS	Starres ERS	Starres DRS	Flexibles ERS	Flexibles ERS	Flexibles DRS
Heißwasser Wärmenetze mit Auslegungstemperatur 120°C/140°C						
Ökologie und Wirtschaftlichkeit	++	+	o	o	Nicht zugelassen	
Thermische Wechselwirkung	--	o	o	+	Nicht zugelassen	
Mechanische Beanspruchung	--	--	o	++	Nicht zugelassen	
Potenzial	-	o	o	+	Nicht zugelassen	
Warmwasser-Wärmenetze mit Auslegungstemperaturen von 80°C/95°C						
Ökologie und Wirtschaftlichkeit	++	+	o	o	o	--
Thermische Wechselwirkung	-	+	+	++	++	++
Mechanische Beanspruchung	o	o	+	++	++	++
Potenzial	o	+	+	++	++	+

Abbildung 2: Potenzialanalyse für den Einsatz von RC-Baustoffen in Fernwärmenetzen

++ = sehr hoch; + = hoch; o = mittel; - = gering; -- sehr gering; ERS = Einzelrohrsystem; DRS = Doppelrohrsystem

auf. Dies ist besonders relevant, da der Großteil des geplanten Netzausbaus auf diese Leitungen entfällt und die Reduzierung der Betriebstemperaturen ein zentrales Ziel zur Verbesserung der Energieeffizienz ist. Zwar ist der ökologische und wirtschaftliche Vorteil bei kleineren Durchmessern und geringere Verlegetiefen pro laufenden Meter geringer, aber durch den hohen Anteil an Verteil- und Hausanschlussleitungen in Wärmenetzen addiert sich dieser Vorteil auf. Der kumulierte Effekt des Einsatzes von Recyclingmaterialien kann dadurch erheblich sein. Hinzu kommt, dass Hausanschlussleitungen oft nur kurze Leitungslängen haben und dadurch statische Lastreserven aufweisen können, welches dem potenziellen Einsatz von RC-Baustoffen zugutekommt.

Weiter muss verdeutlicht werden, dass die Studie eine Übersicht auf strategischer Ebene darstellt. In der Praxis müssen differenzierte und projektbezogene Lösungen entwickelt werden. Der Einsatz von RC-Baustoffen muss deshalb unter Berücksichtigung aller planungsrelevanten Aspekte geprüft werden. In bestimmten Regionen können natürliche Materialien wie Sand oder Kies aufgrund ihrer Verfügbarkeit und kurzer Transportwege aus wirtschaftlicher Sicht vorteilhafter sein. Daher sollten die ökologischen und ökonomischen Vorteile von RC-Baustoffen stets im regionalen Kontext bewertet werden. Darüber hinaus dürfen die potenziellen Vorteile des Einsatzes von RC-Baustoffen nicht zulasten der Langlebigkeit der Fernwärmesysteme gehen. Eine verkürzte Lebensdauer der Leitungen durch RC-Baustoffe würde kurzfristige ökologische Vorteile relativieren. Perspektivisch ist es daher auch empfehlenswert ein Trassenkataster und ein Trassenmanagement zu etablieren, um die Verwendung verschiedener Bettungsmaterialien den jeweiligen Abschnitten zuzuordnen und den Bestand zielgenau zu erfassen.

Bezüglich der Baupraxis ist auch festzustellen, dass die derzeitigen Regelwerke den Einbau von RC-Baustoffen als Bettungsmaterial nicht vollständig berücksichtigen. Obwohl die Ersatzbaustoffverordnung (ErsatzbaustoffV) erste Richtlinien vorgibt und diese auch in den FGSV-Regelwerken berücksichtigt werden, fehlen teils Vorgaben oder Verweise in den fernwärme-spezifischen Regelwerken. Um die generelle Marktakzeptanz von RC-Baustoffen zu erhöhen, müssen Regelwerke entsprechend den aktuellen Vorgaben zur Förderung der Kreislaufwirtschaft harmonisiert werden.

5 Zusammenfassung

Die Untersuchung zeigt, dass der Einsatz von RC-Baustoffen, vorrangig bei Warmwassernetzen mit niedrigeren Betriebstemperaturen sowie in der nachgeordneten Verteilungsstruktur, Vorteile bieten können. Die geringere Wärmeleitfähigkeit der RC-Baustoffe kann die Netzverluste reduzieren, was besonders in kleineren Verteil- und Hausanschlussleitungen zur Energieeffizienz beiträgt. Für Heißwassernetze mit höheren Betriebstemperaturen bleibt das Potenzial des Einsatzes von RC-

Baustoffen hingegen begrenzt. Die höhere mechanischen Beanspruchung kann sich negativ auf die Trassierung und die Langlebigkeit der Systeme auswirken, was den ökologischen Vorteil des Einsatzes von Recyclingmaterialien relativiert. Dennoch bietet auch der Einsatz von flexiblen Rohrsystemen bei hohen Temperaturen eine Möglichkeit für den Einsatz von RC-Baustoffen, da sich die mechanische Beanspruchung dadurch nicht signifikant erhöht.

Insgesamt veranschaulicht die Analyse, dass der Einsatz von RC-Baustoffen projektspezifisch bewertet werden muss. Abhängig von den geologischen Gegebenheiten, der Netzstruktur und den regional verfügbaren Ressourcen sind differenzierte Lösungen erforderlich. Besonders für den Ausbau von Verteil- und Hausanschlussleitungen, die den Großteil der neuen Fernwärmetrassen ausmachen, kann der kumulierte Effekt des Einsatzes von RC-Baustoffen zu einer nachhaltigen Optimierung der Transformation von Wärmenetzen beitragen.

Abschließend lässt sich feststellen, dass RC-Baustoffe eine vielversprechende Alternative zu natürlichen Materialien darstellen, jedoch weitere Untersuchungen mit Fokus auf die mechanische Beanspruchung und Normanpassungen notwendig sind, um deren großflächigen Einsatz zu fördern. Die langfristige Sicherstellung der Systemstabilität und Langlebigkeit muss dabei stets im Fokus stehen, um zu gewährleisten, dass ökologische Vorteile nicht durch häufigere Wartung oder kürzere Lebenszyklen der Systeme aufgehoben werden.

DANKSAGUNG

Das dieser Untersuchung zugrundeliegende Vorhaben „EnEff: Wärme: UrbanTurn: Wandlung der urbanen leitungsgebundenen Wärmeversorgung“ wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages unter dem Förderkennzeichen 03EN3029F gefördert.

6 Literatur

- [1] Prognos AG, Öko-Institut und Wuppertal-Institut, *Klimaneutrales Deutschland 2045. Wie Deutschland seine Klimaziele schon vor 2050 erreichen kann. Studie im Auftrag von Stiftung Klimaneutralität, Agora Energiewende und Agora Verkehrswende*. Berlin, 2021.
- [2] BMWI, *Grüne Wärme. Neues Förderprogramm für nachhaltige Fernwärme*. Berlin, 2022. Zugriff am: 13. April 2022. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Schlaglichter-der-Wirtschaftspolitik/2022/02/04-im-fokus-gruene-waerme.html>
- [3] AGFW, Prognos AG und Hamburg Institut, *Perspektive der Fernwärme. Maßnahmenprogramm 2030. Aus- und Umbau städtischer Fernwärme als Beitrag einer sozial-ökologischen Wärmepolitik*. Frankfurt am Main, 2020.
- [4] S. Hay et al., *Fernwärmenetze im Kontext nationaler Klimaziele: Potenziale für „UrbanTurn“*. Frankfurt am Main: AGFW, 2022.
- [5] Angelika Paar et al., *Transformationsstrategien von fossiler zentraler Fernwärmeversorgung zu Netzen mit höheren Anteilen erneuerbarer Energien: Gefördert vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Heidelberg 2013*. Heidelberg, 2013.
- [6] I. Weidlich und M. Grajcar, "Expected potential of bound and recycled backfill material in low temperature district heating networks," *Energy Procedia*, Jg. 128, S. 150–156, 2017, doi: 10.1016/j.egypro.2017.09.035.
- [7] DIN, *DIN EN 13941-1:2022 - Fernwärmerohre - Auslegung und Installation von gedämmten Einzel- und Doppelrohr-Verbundsystemen für direkt erdverlegte Fernwärmenetze - Teil 1: Auslegung; Deutsche Fassung EN 13941-1:2019+A1:2021*. Berlin: Beuth.
- [8] AGFW, *EnEff:Wärme - FW-Liner: Möglichkeiten und Grenzen der Fernwärme-Leistungssanierung durch Systeme aus vor Ort erhärtenden Schlauch-Linern: Abschlussbericht FW Liner : Wärme/Kälte/KWK : Laufzeit des Vorhabens: 01.06.2017-28.02.2022 (Forschung und Entwicklung / AGFW, Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK Heft 62)*. Frankfurt am Main: AGFW, Projektgesellschaft für Rationalisierung, Information und Standardisierung mbH, 2022.
- [9] F. Schmitt, H.-W. Hoffmann und T. Göhler, *Strategies to Manage Heat Losses - Technique and Economy*. Mannheim, 2005.
- [10] AGFW, *Hauptbericht 2022*. Frankfurt am Main: AGFW, Projektgesellschaft für Rationalisierung, Information und Standardisierung mbH, 2023.
- [11] H. Lund et al., "4th Generation District Heating (4GDH)," *Energy*, Jg. 68, S. 1–11, 2014, doi: 10.1016/j.energy.2014.02.089.
- [12] I. Weidlich, "Wärmetechnische Auslegung von Fernwärme- und Heißwasserleitungen," in *Rohrleitungen 2*, H.-B. Horlacher und U. Helbig, Hg., Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2023, S. 933–939.
- [13] J. Tödter und M. Narten, *Entwicklung empirischer Berechnungsverfahren zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit und der Wärmeverluste von werkmäßig gedämmten Doppelrohrsystemen auf Grundlage messtechnischer Verfahren (Schlussbericht zu IGF-Vorhaben Nr. 1 EWN)*. Hannover, 2019.
- [14] S. F. Nilsson, "New developments in pipes and related network components for district heating," in *Advanced District Heating and Cooling (DHC) Systems* (Woodhead Publishing Series in Energy Ser), R. Wiltshire, Hg., Burlington: Elsevier Science, 2015, S. 191–214.
- [15] DIN, *DIN EN 13941-2:2022 - Fernwärmerohre - Auslegung und Installation von gedämmten Einzel- und Doppelrohr-Verbundsystemen für direkt erdverlegte Fernwärmenetze - Teil 2: Installation; Deutsche Fassung EN 13941-2:2019+A1:2021*. Berlin: Beuth.
- [16] FGSV, "Zusätzliche technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Erdarbeiten im Straßenbau: ZTV E-StB 17," Köln, 2017.
- [17] FGSV, "Zusätzliche technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Aufgrabungen in Verkehrsflächen: ZTV A-StB 12," Köln, Rep. FGSV 976, 2012.
- [18] FGSV, *Technische Lieferbedingungen für Baustoffgemische zur Herstellung von Schichten ohne Bindemittel im Straßenbau: TL SoB-StB 20*. Köln, 2020.
- [19] FGSV, *Technische Lieferbedingungen für Gesteinskörnungen im Straßenbau: TL Gestein-StB 04/23*. Köln, 2023.
- [20] FGSV, *Technische Lieferbedingungen für Bodenmaterialien und Baustoffe für den Erdbau im Straßenbau: TL BuB E-StB 20/23*. Köln, 2023.
- [21] S. Dollhopf, "Vergleichende Bilanzierung des Treibhauspotenzials und des Primärenergiebedarfs verschiedener Rohrwerkstoffe bei dem Bau von Abwasserkanälen," in *Technisches Infrastrukturmanagement Einblicke*, I. Weidlich, Hg., HafenCity Universität Hamburg, 2022.
- [22] Baustoff Recycling Bayern. "Recyclingbaustoffe sparen Kosten und schonen die Umwelt." Zugriff am: 17. Oktober 2024. [Online.] Verfügbar: <https://www.baustoffrecycling-bayern.de/newsarchiv/recyclingbaustoffe-sparen-kosten-und-schonendie-umwelt>
- [23] Deutscher Abbruchverband e.V., Zentralverband des Deutschen Baugewerbes e.V., Hauptverband

der deutschen Bauindustrie e.V. und Bundesgemeinschaft Recycling-Baustoffe e.V., *Monitoring Bericht - EBV: Auswirkungen der Umsetzung der Ersatzbaustoffverordnung auf die betroffenen Unternehmen*. Köln, 2024.

- [24] A. Dalla Rosa, H. Li und S. Svendsen, "Method for optimal design of pipes for low-energy district heating, with focus on heat losses," *Energy*, Jg. 36, Nr. 5, S. 2407–2418, 2011, doi: 10.1016/j.energy.2011.01.024.
- [25] G. K. Schuchardt und I. Weidlich, "Sensitivity analysis of the conception of small scale district heating networks on the thermal conductivity of the surrounding soil," *Energy Procedia*, Jg. 128, S. 136–143, 2017, doi: 10.1016/j.egypro.2017.09.028.
- [26] O. Henoegl, R. Leonhardt, E. Riedler und H. Honarmand, "Thermal propagation around heat supply pipes -Determining thermal conductivity of soil specimens," in *Proceedings of the 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering 5-9 October 2009, Alexandria, Egypt: Proceedings of the 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 5-9 October 2009, Alexandria, Egypt. Volume 4. = Le monde universitaire et la pratique en geotechnique*, M. Hamza, M. Shahien und Y. El-Mossallamy, Hg., Amsterdam: IOS Press, 2009.
- [27] B. Cantero, M. Bravo, J. de Brito, I. F. Del Sáez Bosque und C. Medina, "Thermal Performance of Concrete with Recycled Concrete Powder as Partial Cement Replacement and Recycled CDW Aggregate," *Applied Sciences*, Jg. 10, Nr. 13, S. 4540, 2020, doi: 10.3390/app10134540.
- [28] S. Huber, "Ein Beitrag zur bodenmechanischen und erdbautechnischen Charakterisierung von Recycling-Baustoffen," Dissertation, Ingenieurfacultät Bau Geo Umwelt, Technische Universität München, München, 2020.

Open-Source Web Dashboard zur Simulation, Analyse und Bewertung von Wärmepumpen

Malte Fritz ^{1), 2)}, Jonas Freißmann ^{1), 2)}, Ilja Tuschy ^{1), 2)}

¹⁾ Hochschule Flensburg, Kanzleistr. 91-93, 24943 Flensburg, malte.fritz@hs-flensburg.de, +49 461 805 1772

²⁾ Zentrum für Nachhaltige Energiesysteme (ZNES), Europa-Universität & Hochschule Flensburg, Munketoft 3b, 24937 Flensburg

Kurzfassung

Um die Einstiegshürde für verschiedene Interessengruppen abzusenken, wird ein auf dem Pythonframework *Streamlit* und der Software *TESPy* basierendes Open-Source Web Dashboard zur Simulation, Analyse und Bewertung von Wärmepumpenmodellen vorgestellt. Damit lassen sich eine Vielzahl komplexer thermodynamischer Anlagenmodelle über eine Oberfläche steuern, ohne Fachkenntnisse über Modellbildung und numerische Methoden vorauszusetzen. Die Ergebnisse der Simulationen geben Aufschluss über das prinzipielle und thermodynamische Verhalten, Zustandsgrößen, den COP und Kosten der einzelnen Komponenten sowie Gesamtinvestitionskosten der betrachteten Wärmepumpen. Damit verbessert das Dashboard die Zugänglichkeit zu komplexen Fragestellungen, die regelmäßig in der Konzeption, Forschung und Entwicklung von Wärmepumpen aufkommen. Das Dashboard sowie die zugrundeliegenden Wärmepumpenmodelle werden kontinuierlich erweitert und laden durch den quelloffenen Ansatz zur kollaborativen Weiterentwicklung ein.

Schlagworte

Power-to-Heat; Stationäre Kreisprozesse; Streamlit; Thermal Engineering Systems in Python (TESPy); Wärmeversorgung

1 Einleitung

Die Transformationsprozesse zur Eindämmung des Klimawandels schaffen gesamtgesellschaftliche Spannungen, die unter anderem durch Teilhabe an der Gestaltung der Energiewende und effektive Wissenschaftskommunikation gemildert werden können [1, 2]. Im Kontext der Wärmewende ist die Sektorenkopplung von herausragender Bedeutung, insbesondere in immer häufiger auftretenden Zeiten von Überschuss regenerativ erzeugter Elektrizität. [3, 4]. Für die Kopplung zwischen Wärme- und Elektrizitätssektor werden häufig die als Schlüsseltechnologie identifizierten Wärmepumpen eingesetzt [5, 6]. In der Konzeption, Planung und Auslegung von Wärmepumpen wird spezialisierte Simulationssoftware eingesetzt, um bei der Entscheidungsfindung auf technischer, aber auch ökonomischer und ökologischer Ebene Unterstützung zu leisten [7].

In der Wissenschaft wird aufgrund der Verfügbarkeit mit akademischer Lizenz häufig der *Engineering Equation Solver* [8] verwendet, wenn es um die Simulation von Wärmepumpen geht [9, 10, 11]. Dabei handelt es sich um eine vielseitig einsetzbare Software, die numerisch eine große Menge gekoppelter nichtlinearer algebraischer Gleichungen und Differentialgleichungen lösen kann. Einen komplett quelloffenen Ansatz zur Modellanpassung für die Simulation von Wärmepumpen bietet die Software *Thermal Engineering Systems in Python (TESPy)* [12], welche in verschiedenen Veröffentlichungen genutzt wird [13, 14, 15]. Basierend auf den eingesetzten Komponenten und Parametern erstellt *TESPy* ein System nichtlinearer Gleichungen, das die Topologie der Anlage sowie ihre technischen Eigenschaften beschreibt. Alternative Simulationstools, die sich durch ihre modulare Struktur auszeichnen und ebenfalls für die Auslegung von Wärmepumpen verwendet

werden können, sind in [16] aufgelistet. Für transiente Simulationen wird die proprietäre Software *TRNSYS* [17] eingesetzt. Diese bietet detaillierte Möglichkeiten, dynamische Systeme zu simulieren, insbesondere im Kontext von Wärmepumpen in Gebäudesystemen. Eine weitere kommerzielle Option ist *Dymola* [18], das ebenfalls tiefgreifende Simulationsmöglichkeiten bietet und häufig in der Automobilindustrie, der Luft- und Raumfahrt, der Robotik, der Prozessindustrie oder andere dynamische Analysen Anwendung findet. Auf derselben Modellsprache basiert die quelloffene Alternative *OpenModelica* [19], die sich durch einen modularen Ansatz auszeichnet, aber keine spezielle Bibliothek für Wärmepumpen beinhaltet. Eine weitere proprietäre Softwarelösung bietet *MATLAB/Simulink* [20], das sich besonders für Regelungstechnik, Prozessoptimierung und industrielle Anwendungen eignen, wenngleich auch die Auslegung von Wärmepumpen möglich ist. Wenn die Simulation von Wärmepumpen in Kombination mit anderen gebäudetechnischen Systemen erforderlich ist, stellt *EnergyPlus* [21] eine führende Software zur energetischen Gebäudeanalyse dar.

Neben diesen modularen und zum Teil proprietären Softwaretools gibt es auch quelloffene Varianten, die auf Wärmepumpen- und Kälteanlagen spezialisiert sind. Obwohl *CoolPack* [22] ursprünglich für die Entwicklung von Kälteanlagen konzipiert wurde, unterstützt es aufgrund der Ähnlichkeit der Prozesse auch die Simulation von Wärmepumpen [23, 24, 25]. Diese Software ist jedoch in ihren Fähigkeiten zur Durchführung von Teillastsimulationen und Exergieanalyse eingeschränkt. Zudem können keine Entropieanalysen durchgeführt werden. Das im GitHub-Repository veröffentlichte Paket *VCRC* [26] ist ein Analysetool für Kältemaschinen, mit dem ebenfalls Wärmepumpensimulationen durchgeführt werden können. Auch wenn verschiedene Modelle zur

Verfügung stehen und mit dem Tool Entropieanalysen durchgeführt werden können, fehlt auch hier die Möglichkeit zur Teillastsimulation. Zudem ist die Anzahl der Wärmepumpenmodelle begrenzt und es gibt keine grafische Oberfläche, weshalb auch hier Programmierkenntnisse erforderlich sind.

Um die Simulation von Wärmepumpen auch ohne tiefgehende Fachkenntnisse in Modellbildung und numerischen Methoden zu ermöglichen, wird in dieser Arbeit ein mit dem Pythonframework *Streamlit* entwickeltes Open-Source Web Dashboard zur Simulation, Analyse und Bewertung von Wärmepumpenmodellen vorgestellt. Damit lassen sich eine Vielzahl komplexer thermodynamischer Anlagenmodelle über eine einfache Oberfläche interaktiv simulieren. Mit diesem quelloffenen Tool können neben der Auslegung von Wärmepumpen auch die Simulation ihres stationären Teillastbetriebs und eine Exergieanalyse durchgeführt sowie deren ökonomische Attraktivität bewertet werden. Neben der vorzustellenden Methodik werden anhand von Fallbeispielen der Einfluss eines Topologiewechsels bei gleichem Kältemittel sowie der Wechsel eines Kältemittels bei gleicher Topologie analysiert und die im Tool generierten Ergebnisse miteinander verglichen.

2 Methodik

Die im Open-Source Web Dashboard zur Simulation, Analyse und Bewertung von Wärmepumpen *heatpumps* verwendete Software und Pakete sind in Abb. 2-1 dargestellt.

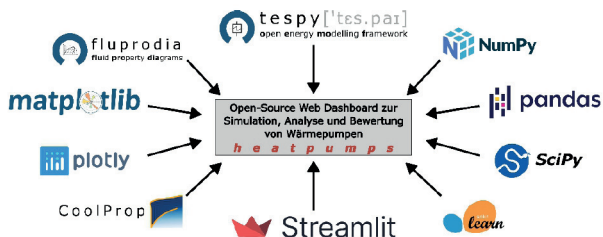


Abb. 2-1: Im Tool verwendete Software und Pythonpakete

Besonders hervorzuheben ist die Open-Source-Software *TESPy*, die zur Modellerstellung und Durchführung der Simulationen verwendet wird [12]. Für die Entwicklung und Anwendung der grafischen Oberfläche (vgl. Abb. 2-2) wird das ebenfalls quelloffene Python-Paket *Streamlit* eingesetzt [27]. Dies erlaubt die Parametrisierung der Wärmepumpenmodelle mithilfe einer Vielzahl von Widgets, wie z.B. Schieberegler, Textfeldern oder Schaltflächen, die interaktiv bedient werden können. Bei der Datenverarbeitung und -aufbereitung finden die Pythonpakete *NumPy*, *Pandas*, *SciPy* und *scikit-learn* Anwendung [28, 29, 30, 31]. Um die aus den Simulationen resultierenden Ergebnisse zu visualisieren, werden die Pythonpakete *Matplotlib* und *Plotly* verwendet [32, 33]. Zusätzlich steht für die Erstellung der Zustandsdiagramme das Python-Paket *FluProDia* zur Verfügung, das wiederum auf *Matplotlib* zurückgreift [34]. Bei der Einbindung der Stoffdaten der Arbeitsmedien wird

CoolProp genutzt [35]. Neben natürlichen Kältemitteln, wie Propan, CO_2 oder Ammoniak, ermöglicht *CoolProp* ebenfalls die Nutzung von synthetischen Kältemitteln aus den Stoffgruppen der Hydrofluorolefine (HFO), Fluorkohlenwasserstoffe (HFC) und chlorierte Kohlen(wasser)stoffverbindungen (CFC/HCFC) in der Wärmepumpensimulation. [36]

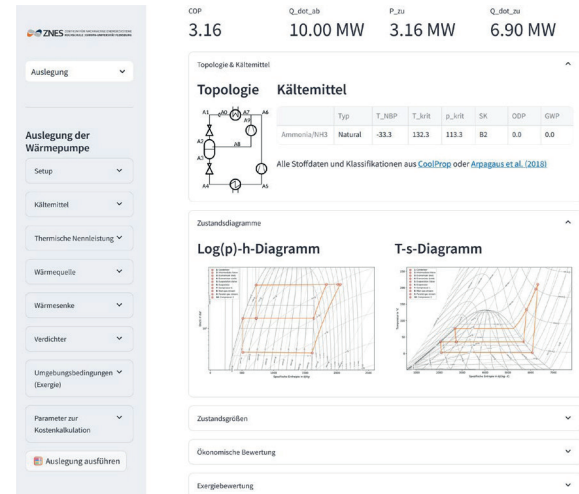


Abb. 2-2: Expl. Auslegungssimulation in heatpumps [36]

2.1 Thermal Engineering Systems in Python

Die Open-Source-Software *TESPy* [12] dient zur komponentenbasierten Simulation der zu untersuchenden stationären Fließprozesse. *TESPy* wurde als Teil des open energy modeling framework (*oemof*) [37, 38] im wissenschaftlichen Bereich entwickelt. Mit einer komponentenbasierten Struktur können mithilfe von Pythonskripten beliebige thermodynamische Prozesse aus einzelnen vordefinierten Komponenten wie Wärmeübertragern, Verdichtern, Ventilen oder Turbinen aufgebaut werden. Neben Wärmepumpen lassen sich somit bspw. auch geothermische, solarthermische sowie konventionelle Kraftwerke, Wärmenetze oder Kältemaschinen abbilden. Die Software greift ebenfalls auf die oben beschriebene Stoffdatenbank *CoolProp* [35] zu.

Das hier vorzustellende Pythonpaket *heatpumps* beinhaltet eine umfangreiche Sammlung verschiedener Wärmepumpenmodelle, die mithilfe von *TESPy* erstellt wurden. Neben dem einfachen Wärmepumpenkreislauf können Schaltungen mit Zwischenkühler, interner Wärmeübertragung, offenem und geschlossenem Economizer, paralleler Kompression, Schaltungen mit einem Flashtank sowie kaskadierte Schaltungen und verschiedene Kombinationen daraus im sub- und transkritischen Prozess modelliert werden. Mit diesen Modellen kann sowohl der stationäre Betrieb simuliert als auch das Teillastverhalten anhand zugrundeliegender Charakteristiken für jede Komponente der Wärmepumpe ermittelt werden. Eine ausführliche Beschreibung der Software sowie aller Komponenten sind in der *TESPy* Dokumentation [39] zu finden. Nachfolgend wird der grundlegende Zusammenhang der in *heatpumps* relevanten Funktionen zusammengefasst dargestellt [12].

Auf der Grundlage der verwendeten Komponenten und deren Verbindungen generiert *TESPy* einen Satz von nichtlinearen Gleichungen, welche die Topologie der Anlage und ihre Parametrisierung darstellen. Das so entstehende Gleichungssystem wird mit der Newton-Raphson-Methode gelöst, um den Massenstrom $\dot{m}$, den Druck p , die Enthalpie h und die Fluidzusammensetzung (definiert durch den Massenanteil x jedes Fluids) für jede Verbindung zu bestimmen.

Im stationären Fließprozess muss die Summe aller in ein Bauteil eintretenden Massenströme gleich der austretenden sein (vgl. Gl. 2-1). Auch die Massenanteile eines jeden Fluids fl innerhalb eines Gemisches müssen erhalten bleiben (vgl. Gl. 2-2). Die Energiebilanz aller Komponenten ergibt sich aus der stationären Leistungsbilanz offener Systeme mit mehreren Ein- und Auslässen, die in Gl. 2-3 dargestellt ist. In wärmetechnischen Anwendungen ist die Änderung der kinetischen und potenziellen Energie aufgrund von Unterschieden der Strömungsgeschwindigkeit c und der Höhe z häufig vernachlässigbar, da diese im Vergleich zur Änderung der Enthalpie relativ klein ausfallen, sodass der Zusammenhang zu Gl. 2-4 vereinfacht wird.

$$0 = \sum_i \dot{m}_{in,i} - \sum_o \dot{m}_{out,o} \quad \text{Gl. 2-1}$$

$$0 = \sum_i \dot{m}_{in,i} \cdot x_{fl,in,i} - \sum_o \dot{m}_{out,o} \cdot x_{fl,out,o} \quad \text{Gl. 2-2}$$

$$0 = \sum_o \dot{m}_{out,o} \cdot \left(h_{out} + g \cdot z_{out} + \frac{c_{out,o}^2}{2} \right) - \sum_i \dot{m}_{in,i} \cdot \left(h_{in} + g \cdot z_{in} + \frac{c_{in,i}^2}{2} \right) - P - \dot{Q} \quad \text{Gl. 2-3}$$

$$0 = \sum_o \dot{m}_{out,o} \cdot h_{out} - \sum_i \dot{m}_{in,i} \cdot h_{in} - P - \dot{Q} \quad \text{Gl. 2-4}$$

Nach der Auslegung eines Wärmepumpenmodells kann das Teillastverhalten simuliert werden. Dazu werden auslegungsspezifische Komponentenparameter berechnet, wie der flächenunabhängige Wärmedurchgangskoeffizient kA von Wärmeübertragern. Der Wärmedurchgang in einem anderen Betriebspunkt wird aus der Funktion der Betriebscharakteristik $f_{kA}(\dot{m}_1, \dot{m}_2)$ und den entsprechenden Temperaturniveaus (vgl. Gl. 2-5) berechnet. Analog kann mit der Gl. 2-6 das Teillastverhalten eines Verdichters mit gegebener isentroper Wirkungsgradkennlinie $f_{\eta_s}(\dot{m}, p_{in}, T_{in})$ errechnet werden.

$$0 = \dot{m}_{in,1} \cdot (h_{out,1} - h_{in,1}) \cdot kA_{design} \cdot f_{kA}(\dot{m}_1, \dot{m}_2) \cdot \frac{T_{out,1} - T_{in,2} - T_{in,1} + T_{out,2}}{\ln \left(\frac{T_{out,1} - T_{in,2}}{T_{in,1} - T_{out,2}} \right)} \quad \text{Gl. 2-5}$$

$$0 = -(h_{out} - h_{in}) \cdot \eta_{design} \cdot f_{\eta_s}(\dot{m}, p_{in}, T_{in}) \cdot (h_{out,s} - h_{in}) \quad \text{Gl. 2-6}$$

Die standardmäßig hinterlegten Teillastcharakteristiken der Komponenten liegen in Form von Lookup-Tabellen vor und können ebenfalls durch eigene Daten ersetzt werden. Dies ist sinnvoll, wenn konkrete Anlagen mit bekannten Eigenschaften modelliert werden sollen oder reale Messdaten zum Teillastverhalten verfügbar sind.

Neben der Auslegungs- und Teillastsimulation kann mit *TESPy* ebenfalls eine Exergieanalyse des Wärmepumpenprozesses vorgenommen werden. Die Grundlagen dafür stammen aus [40] und werden nachfolgend für die in *heatpumps* relevanten Analyse zusammengefasst.

Wie in Gl. 2-7 zu erkennen, ergibt sich die Gesamtexergie $\dot{E}$ aus dem Produkt des Massenstroms $\dot{m}$ und der spezifischen Exergie, welche sich aus der Summe der physikalischen e^{PH} , chemischen e^{CH} , kinetischen e^{KN} und potenziellen Exergie e^{PT} zusammensetzt. Effekte, die mit nuklearen, magnetischen oder elektrischen Prozessen in Verbindung stehen, bleiben hierbei unberücksichtigt [41].

$$\dot{E} = \dot{m} \cdot (e^{PH} + e^{CH} + e^{KN} + e^{PT}) \quad \text{Gl. 2-7}$$

Für die hier betrachtete Exergieanalyse wird aber nur die physikalische Exergie e^{PH} , die wiederum in einen thermischen e^T und den hier vernachlässigten mechanischen Teil e^M aufgespalten wird, berücksichtigt (vgl. Gl. 2-8).

$$e^{PH} = (h - h_0) - T_0 \cdot (s - s_0) = e^T + e^M \quad \text{Gl. 2-8}$$

Mit dem Ansatz der Exergievernichtung können die mit einer jeder Komponente im Wärmepumpenprozess verbundenen thermodynamischen Ineffizienzen bestimmt werden [42]. Für eine einzelne Komponente k innerhalb des betrachteten Systems kann jeder Term in Gl. 2-9 dem exergetischen Nutzen $\dot{E}_p$ oder dem exergetischen Aufwand $\dot{E}_F$ zugeordnet werden [43]. Die Exergievernichtung $\dot{E}_D$ innerhalb der Komponente ist die Differenz der beiden Terme. Zusätzlich wird mit Gl. 2-10 der Exergiewirkungsgrad einer jeder Komponenten ε_k berechnet [44].

$$\dot{E}_{D,k} = \dot{E}_{p,k} - \dot{E}_{F,k} \quad \text{Gl. 2-9}$$

$$\varepsilon_k = \frac{\dot{E}_{p,k}}{\dot{E}_{F,k}} \quad \text{Gl. 2-10}$$

Darauf aufbauend ist die Summe aller Exergievernichtungen der einzelnen Komponenten die Exergievernichtung des Gesamtsystems $\dot{E}_{D,tot}$ unter Berücksichtigung von ungenutzten Strömen über die Systemgrenze, die als Exergieverlust des Gesamtsystems $\dot{E}_{L,tot}$ definiert sind (vgl. Gl. 2-11). Daraufhin ist der Exergie-Wirkungsgrad des Gesamtsystems ε_{tot} mit der Gl. 2-12 definiert [44].

$$\dot{E}_{F,tot} = \dot{E}_{p,tot} + \dot{E}_{D,tot} + \dot{E}_{L,tot} \quad \text{Gl. 2-11}$$

$$\varepsilon_{tot} = \frac{\dot{E}_{p,tot}}{\dot{E}_{F,tot}} = 1 - \frac{\dot{E}_{D,tot} + \dot{E}_{L,tot}}{\dot{E}_{F,tot}} \quad \text{Gl. 2-12}$$

Basierend auf diesen Informationen können die Exergievernichtungsrate y_D bzw. y_D^* einer Komponente in Bezug auf den gesamten exergetischen Aufwand (vgl. Gl. 2-13) und auf die gesamte Exergievernichtung (vgl. Gl. 2-14) bestimmt werden.

$$y_{D,k} = \frac{\dot{E}_{D,k}}{\dot{E}_{F,tot}} \quad \text{Gl. 2-13}$$

$$y_{D,k}^* = \frac{\dot{E}_{D,k}}{\dot{E}_{D,tot}} \quad \text{Gl. 2-14}$$

2.2 Komponentenbasierte Kostenermittlung

Zur Bewertung und Gegenüberstellung der ökonomischen Attraktivität verschiedener Wärmepumpensetups wird für die Ermittlung von Komponenten- sowie Gesamtinvestitionskosten der in [45] vorgestellte und von den Autoren bereits in [46] adaptierte Kostenansatz herangezogen.

Dabei werden die im Wärmepumpenmodell verwendeten Komponenten mit dem größten Einfluss auf die Gesamtkosten mit einer Kostenfunktion berücksichtigt, während alle anderen zu Hilfskomponenten zusammengefasst werden. In Gl. 2-15 werden die jeweiligen Kosten der Komponenten K_{Komp} aus der Multiplikation von den bekannten Basiskosten K_B mit dem Quotienten der Komponentengröße respektive Kapazität der jeweiligen Komponente X_{Komp} zu dem Basiswert des Vergleichskomponente X_B berechnet. Dieser wird außerdem mit einem Kostenfunktionsexponenten α potenziert.

$$K_{Komp} = K_B \cdot \left(\frac{X_{Komp}}{X_B} \right)^\alpha \quad \text{Gl. 2-15}$$

In Tab. 2-1 sind die Parameter der Kostenkorrelation der relevanten Komponenten zu finden. Die Korrelation der Verdichter ist von derjenigen eines realen halbhermetischen Schraubenverdichters abgeleitet und wird in Abhängigkeit des Ansaugvolumenstroms definiert [45]. Demgegenüber wird die Kostenkorrelation der Wärmeübertrager als Funktion seiner Oberfläche angegeben. Aufgrund von unterschiedlichen Wärmedurchgangskoeffizienten ergeben sich in Kombination mit der Referenzoberfläche spezifischen Kosten für jeden individuellen Typ. Im Falle der Mitteldruckflaschen wird die Kostenkorrelation in Bezug auf ihr Volumen herangezogen, wobei für dessen Ermittlung angenommen wird, dass eine Verweilzeit des Kältemittels im Behälter von 10 Sekunden gegeben ist.

Tab. 2-1: Parameter der Kostenkorrelationen der betrachteten Bauteile aus 2013 [45, 9]

Komponente	K_B	X_B	X_{Komp}	α
Verdichter	19.850 €	279,8 $\frac{\text{m}^3}{\text{s}}$	$\dot{V}$	0,73
Wärmeübertrager	15.526 €	42 m^2	A	0,8
Mitteldruckflasche	1.444 €	0,089 m^3	V	0,63

Wie in [41] beschrieben, unterliegen prozesstechnische Anlagen, wie auch alle anderen Wirtschaftsgüter, einer kontinuierlichen Preisentwicklung mit in- und deflationären Perioden. Folglich müssen die für das Referenzjahr ermittelten Kosten aus Gl. 2-15 angepasst werden, um die Kostenentwicklung unterschiedlicher Parameter wie Material, Ausrüstungsgegenständen, Verbrauchsmaterialien und Arbeitskraft für den Zeitpunkt der Schätzung zu korrigieren. Da die in vorliegenden Daten aus dem Jahr 2013 stammen, sind diese für das aktuelle Betrachtungsjahr (*akt.Jahr*) anzupassen. Dafür werden Indexwerte nach dem Chemical Engineering Plant Cost Index (CEPCI) gemäß Gl. 2-16 verwendet [47].

$$K_{akt.Jahr} = K_{2013} \cdot \frac{CEPCI_{akt.Jahr}}{CEPCI_{2013}} \quad \text{Gl. 2-16}$$

Um auch alle anderen anfallenden Kosten zu betrachten, werden die übrigen Komponenten in Rohrleitungen und Tanks $K_{R,Ta}$, elektrisches Zubehör K_{el} sowie Kältemittel K_{KM} gegliedert und in die Gesamtkosten einbezogen (vgl. Gl. 2-17 - Gl. 2-19) [45].

$$K_{R,Ta} = 0,10 \cdot \sum K_{akt.Jahr} \quad \text{Gl. 2-17}$$

$$K_{el} = 0,10 \cdot \sum K_{akt.Jahr} \quad \text{Gl. 2-18}$$

$$K_{KM} = 0,04 \cdot \left(\sum K_{akt.Jahr} + K_{R,Ta} + K_{el} \right) \quad \text{Gl. 2-19}$$

Die gesamten Investitionskosten der Wärmepumpenkomponenten $K_{Komp,Ges}$ errechnen sich aus der Summe aller zuvor beschriebenen Kostenterme, wie in Gl. 2-20 dargestellt [45].

$$K_{Komp,Ges} = \sum K_{akt.Jahr} + K_{R,Ta} + K_{el} + K_{KM} \quad \text{Gl. 2-20}$$

Neben diesen sind zusätzliche Kosten, wie die Arbeitskosten für den Entwurf, die Konstruktion und Produktionsprozesse, zu berücksichtigen. Darüber hinaus sind Projektkosten einzukalkulieren, wie die Installation der Einheit (einschließlich Verrohrung, Instrumentierung, und Anschluss an die bestehende Infrastruktur), Wärmeentnahme aus einer Wärmequelle, Bauarbeiten und Überwachung. Die Summe all dieser Kosten sind die eigentlichen Investitionskosten der Wärmepumpeneinheit und werden, wie in Gl. 2-21 zu sehen, mit einem konstanten Faktor von 6,32 für fabrikneue Wärmepumpen multipliziert. [41]

$$K_{WP} = 6,32 \cdot K_{Komp,Ges} \quad \text{Gl. 2-21}$$

3 Fallstudie

Ziel der folgenden Fallstudien ist es, die Anwendbarkeit von *heatpumps* zu demonstrieren und dessen Eignung zur Gegenüberstellung und Bewertung dreier unterschiedlicher Wärmepumpensetups zu beurteilen. [36]

3.1 Wärmepumpenmodelle und Parametrisierung

Im Rahmen dieser Fallstudie werden drei verschiedene Wärmepumpensetups, die in Abb. 3-1 dargestellt sind, hinsichtlich technischer und ökonomischer Kriterien miteinander verglichen. Setup 1 beschreibt eine einfache Wärmepumpenschaltung, die Ammoniak als Kältemittel verwendet. In Setup 2 kommt ebenfalls Ammoniak zum Einsatz, jedoch wird die Konfiguration durch die Integration eines offenen Economizers mit paralleler Kompression erweitert. Setup 3 nutzt die gleiche erweiterte Schaltungstopologie wie Setup 2, ersetzt jedoch das natürliche Kältemittel Ammoniak durch das Kältemittel R1234ze(Z), welches der synthetischen Kältemittelgruppe der HFO zugeordnet wird.

Im Sinne der Vergleichbarkeit werden für alle Setups die gleichen Rahmenparameter der Wärmepumpen gewählt. So wird ein isentroper Wirkungsgrad der Verdichter η_s von 75 % und eine thermische Nennleistung $\dot{Q}_{th}$ von 10 MW, welche zur Versorgung eines mittelgroßen

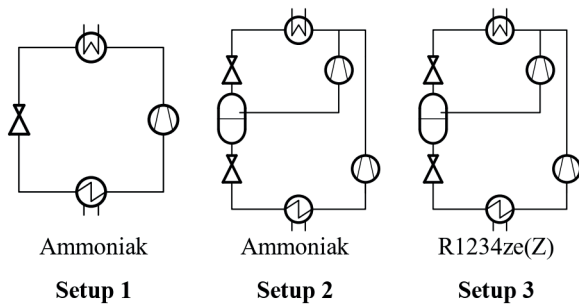


Abb. 3-1: Wärmepumpensetups der Fallstudie

Fernwärmenetzes oder Industrieprozesses geeignet wäre, angenommen. Als Wärmequelle wird Wasser aus einer Umweltquelle modelliert. Entsprechend wird für die Auslegung der Wärmepumpen ad hoc eine Vorlauftemperatur $T_{Q,VL}$ von 10 °C und die des Rücklaufes $T_{Q,RL}$ zu 5 °C angenommen. Als Wärmesenke dienen die Parameter eines Fernwärmenetzes der vierten Generation, welches im Mittel eine Vorlauftemperatur $T_{S,VL}$ von 75 °C und im Rücklauf $T_{S,RL}$ von 40 °C aufweist. Für die Teillastberechnung wird der Kältemittelmassenstrom $\dot{m}_{TL,min}$ schrittweise bis auf 30 % des Nennpunktes herabgesetzt. Darüber hinaus wird die Vorlauftemperatur des Wärmenetzes zwischen 65 °C ($T_{S,VL,min}$) und 85 °C ($T_{S,VL,max}$) variiert. Die Rücklauftemperatur der Senke sowie die Vor- und Rücklauftemperatur der Wärmequelle werden an dieser Stelle für die Teillastberechnung vereinfacht als konstant angenommen. Zusätzlich müssen für die Exergieanalyse die Umgebungsbedingungen definiert werden, wobei eine Umgebungstemperatur T_U von 20 °C mit einem Umgebungsdruck p_U von 1 bar festgelegt wird.

Für die ökonomische Bewertung wird der Ansatz der Kostenermittlung auf Komponentenbasis verwendet. Dabei lassen sich die in den Simulationen eingesetzten Wärmeübertrager entsprechend ihrer Art differenzieren. Ihre Kostenkorrelation wird als Funktion der Oberfläche angegeben. Da $TESPy$ mit einem einzigen Faktor für die dimensionslose Wärmeübertragungsfähigkeit $k \cdot A$ arbeitet, muss die Oberfläche des Wärmeübertragers zunächst unter Berücksichtigung des Wärmedurchgangskoeffizienten k berechnet werden. Dieser Koeffizient hängt sowohl vom Prozess als auch von der Bauart des Wärmeübertragers ab. In Tab. 3-1 sind die für die Kostenberechnung angenommenen k -Werte der verschiedenen Wärmeübertragertypen aufgeführt.

Tab. 3-1: Annahmen zu den Wärmedurchgangskoeffizienten verschiedener Wärmeübertragertypen [48, 9, 10]

WÜT-Typ	Übertragungsbedingung	k-Wert
Kondensator	flüssig - kond. Fluid	3500 $\frac{W}{m^2K}$
Verdampfer, Economizer	flüssig - verd. Fluid	1500 $\frac{W}{m^2K}$

3.2 Ergebnisse

Die auf Energieströme bezogenen Ergebnisse der Auslegung aller Setups sind in Tab. 3-2 dargestellt. Es ist zu

erkennen, dass der COP im Nennpunkt unter Volllast beim einfachen Kreis mit Ammoniak (Setup 1) mit 2,93 am geringsten ausfällt. Durch die Veränderung der Topologie hin zur parallelen Kompression mit offenem Economizer kann unter den oben genannten Bedingungen mit Ammoniak (Setup 2) eine Verbesserung des COP auf 3,16 im Nennpunkt erzielt werden. Bei zusätzlicher Änderung des Kältemittels von Ammoniak zu R1234ze(Z) (Setup 3) ist eine weitere Erhöhung des COP auf 3,25 zu erreichen. Diese fällt jedoch deutlich geringer aus als die Erhöhung aufgrund der topologischen Verbesserung. Ergänzend zu den allgemeinen Ergebnissen können in *heatpumps* alle Zustandsgrößen in jedem Prozessschritt entnommen werden.

Tab. 3-2: Ergebnisse der Auslegungssimulationen aller Setups

	COP	$\dot{Q}_{ab}$	P_{zu}	$\dot{Q}_{zu}$
Setup 1	2,93	10,00 MW	3,42 MW	6,65 MW
Setup 2	3,16	10,00 MW	3,16 MW	6,90 MW
Setup 3	3,25	10,00 MW	3,07 MW	6,99 MW

Mit den in Abb. 3-3 dargestellten log(p)-h-Diagrammen können die Veränderungen der Leistungszahl der Wärmepumpensetups erklärt werden. Mithilfe von Leistungsbilanzen der entsprechenden Komponenten kann der COP auch in Abhängigkeit vom Kältemittelmassenstrom und der jeweiligen Enthalpiedifferenz ausgedrückt werden. Beim einfachen Wärmepumpenprozess kann der COP des einfachen Wärmepumpenprozesses aus dem Quotienten von Enthalpiedifferenz der Kondensation zur Enthalpieerhöhung durch die Kompression berechnet werden.

Beim Topologiewechsel hin zur parallelen Kompression mit offenem Economizer muss im Vergleich zum einfachen Kreis ein geringerer Massenstrom über die vollständige Druckdifferenz komprimiert werden. Dieser reduzierte Kompressionsaufwand übersteigt die etwas geringere spezifische Wärmeabgabe, sodass der COP erhöht werden kann. Außerdem verlaufen die Isentropen von Ammoniak nahe dem Nassdampfgebiet steiler, sodass der Verdichter des Economizerstrangs sogar effizienter komprimiert.

Die Steigerung des COP zwischen Setup 2 und 3 lässt sich hingegen nicht topologisch, sondern anhand der thermodynamischen Eigenschaften der eingesetzten Kältemittel begründen. Erneut ist dabei auf die Steigung der Isentropen, insbesondere in Relation zum Verlauf der Satttdampflinie, hinzuweisen. R1234ze(Z) ist wegen der Neigung des Nassdampfgebietes als feuchtes Kältemittel einzuordnen, dessen Isentropen nahe der Satttdampflinie verlaufen und sich im Gegensatz zu Ammoniak mit steigendem Druck weniger stark von ihr entfernen. Somit verringert sich der Gesamtverdichtungsaufwand in Relation zu Setup 1 und 2 noch einmal, und das ohne überproportionale Minderung der Wärmeabgabe,

wodurch die Leistungszahl insgesamt steigt. Entsprechend eignet sich R1234ze(Z) unter den gewählten Randbedingungen für die parallele Kompression besser als Ammoniak. Es ist jedoch noch darauf hinzuweisen, dass aufgrund der thermophysikalischen Eigenschaften von R1234ze(Z) insgesamt deutlich kleineren Enthalpiedifferenzen vorliegen, weshalb ein höherer Kältemittelmassenstrom für die gleiche Versorgungsaufgabe nötig ist. Neben der Darstellung im $\log(p)$ -h-Diagramm werden in *heatpumps* die unterschiedlichen Prozessschritte auch im T-s-Diagramm visualisiert.

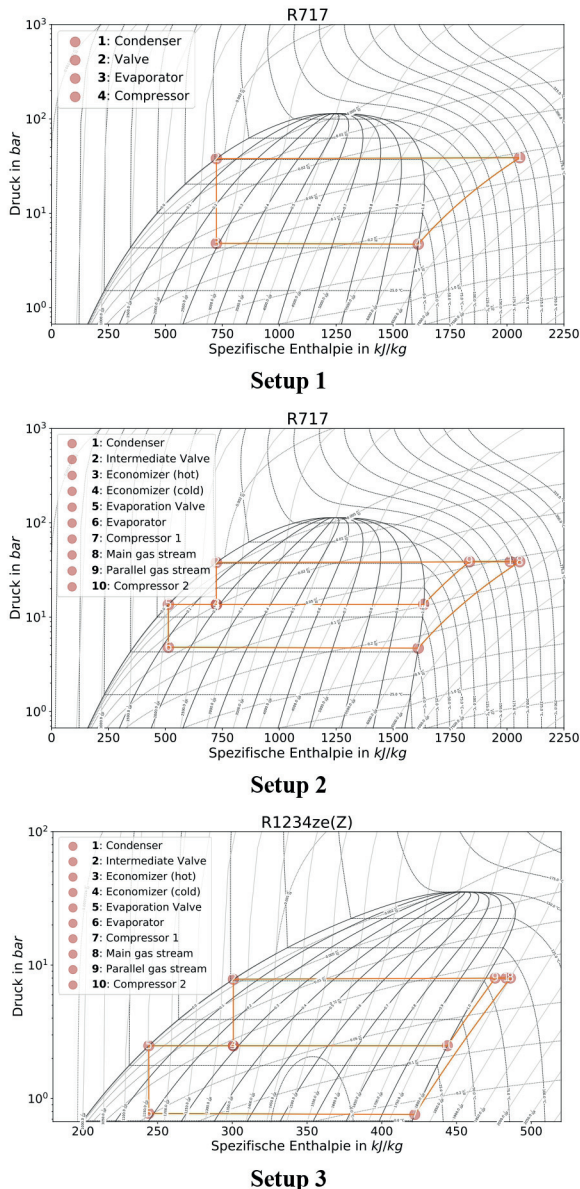


Abb. 3-2: $\log(p)$ -h-Diagramme der verschiedenen Setups

Zusätzlich gibt die Exergieanalyse Aufschluss über die thermodynamische Qualität der Wärmepumpenprozesse. In Tab. 3-3 sind die Ergebnisse dieser Untersuchung aufgelistet. In direkter Relation zum Verlauf der COP steigen die exergetischen Effizienzen der Setups. Da die Wärmeabgabe der Wärmepumpenprozesse im Vorhinein parametrisiert wurde, ist in allen Setups der exergetische Nutzen $\dot{E}_P$ gleich. Unterschiede zeigen sich jedoch beim exergetischen Aufwand $\dot{E}_F$, der von Setup 1 zu Setup 3

abnimmt. Dieser korrespondiert mit dem verminderten Gesamtverdichtungsaufwand. Bei steigender Leistungszahl verschiebt sich der Beitrag zur Wärmeabgabe von der rein exergetischen Verdichterleistung zum anergetischen Quellwärmestrom, sodass dem Prozess insgesamt weniger Exergie zugeführt werden muss. Unterschiede sind auch bei der Exergievernichtung $\dot{E}_D$ zu erkennen, welche in *heatpumps* anhand von Grassmann- und Wasserfalldiagramm im Detail untersucht werden können.

Tab. 3-3: Ergebnisse der Exergieanalyse für alle Setups

	ε	$\dot{E}_F$	$\dot{E}_P$	$\dot{E}_D$
Setup 1	36,08 %	3,12 MW	1,13 MW	2,00 MW
Setup 2	39,42 %	2,86 MW	1,13 MW	1,73 MW
Setup 3	40,76 %	2,76 MW	1,13 MW	1,64 MW

Zusätzlich zur thermodynamischen Analyse sind in Tab. 3-4 die ermittelten Investitionskosten der drei Setups abgebildet. Dabei werden die Investitionskosten der Komponenten mit einer Kostenfunktion (Verdampfer, Kondensator, Verdichter, ggf. Economizer) sowie die sonstigen Komponenten aufsummiert. Eine genaue Aufschlüsselung der Investitionskosten der Komponenten ist in *heatpumps* aber grundsätzlich möglich. Es ist zu erkennen, dass mit Verbesserung des COP höhere Investitionskosten einhergehen. Dabei ist jedoch ersichtlich, dass der Topologiewechsel eine deutlich geringe Kostensteigerung nach sich zieht als der Wechsel des Kältemittels. Dies ist nahezu vollständig auf die gestiegenen Verdichterkosten zurückzuführen, welche sich wegen des Ansatzes der Kostenermittlung (vgl. Gl. 2-17 - Gl. 2-21) auch auf die Gesamtkosten durchschlagen. Die Kostensteigerung ist auf die bereits im Abschnitt der Zustandsdiagramme angemerkte Notwendigkeit höherer Massen- und damit auch Volumenströme bei dem Einsatz von R1234ze(Z) im Vergleich zu Ammoniak zurückzuführen. So steigen die Gesamtverdichterkosten zwischen Setup 2 und 3 um den Faktor 3,9, was zu mehr als doppelt so hohen Gesamtkosten führt. Für eine umfassende Bewertung der Setups sind die Effizienzgewinne also stets mit dem dafür nötigen meist höherem Investitionsaufwand abzuwägen.

Tab. 3-4: Investitionskosten der Komponenten sowie Gesamtinvestitionskosten aller Setups gerundet in €

	Komponenten mit Kostenfunktion	Sonstige Komponenten	Gesamt
Setup 1	515.513	128.878	4.072.551
Setup 2	536.093	134.023	4.235.133
Setup 3	1207.631	308.592	9.582.529

Über die Auslegungssimulation hinaus ist *heatpumps* auch in der Lage, eine Teillastberechnung durchzuführen. Um diese Funktionalität zu demonstrieren, werden an dieser Stelle nur die Ergebnisse der Teillastberechnung von Setup 1 dargestellt. In Abb. 3-3 ist dessen

Betriebscharakteristik im $\dot{Q}$ - P -Diagramm dargestellt. Diese ist in Abb. 3-3a in Abhängigkeit des COP und in Abb. 3-3b in Abhängigkeit der Senktemperatur eingefärbt. In Kombination von beiden Abbildungen ist zu erkennen, dass an der rechten Seite der Charakteristik die maximale Senktemperatur mit dem geringsten COP korrespondiert, was auf den höheren Temperaturhub zwischen der Wärmesenke und der als konstant angenommenen Wärmequelle zurückzuführen ist. Der gegenteilige Fall ist auf der linken Flanke der Charakteristik zu erkennen. Somit weist die einfache Wärmepumpe mit Ammoniak (Setup 1) mit einer Quelltemperatur von 10 °C einen maximalen COP von ca. 3,4 und einen minimalen von ca. 2,2 auf.

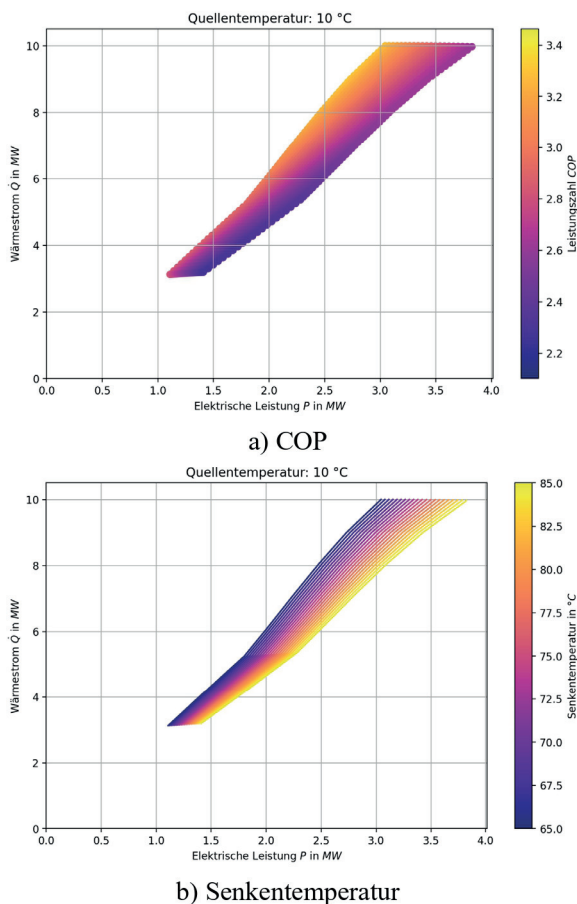


Abb. 3-3: $\dot{Q}$ - P -Teilastdiagramme des Setup 1

4 Diskussion

Die Ergebnisse der Fallstudie zeigen, dass die Wahl der Schaltungstopologie sowie des Kältemittels zu unterschiedlichen thermodynamischen wie auch ökonomischen Ergebnissen führt, was den Bedarf nach einem einfach zu bedienenden Tool zur Bewertung verschiedenster Konzepte unterstreicht. Das vorhandene Spektrum an Funktionen zur Bewertung und Analyse von Wärmepumpen bietet die Möglichkeit, praxisrelevante Fragestellungen der Anlagenkonzeption zu durchleuchten, und befähigen Anwendende, Setups nach ihren spezifischen Prozessparametern anhand von techno-ökonomischen Kriterien zu evaluieren.

Um realitätsnahe und robuste Ergebnisse aus der Untersuchung von Wärmepumpenkonzepten mithilfe des Dashboards zu erhalten, müssen jedoch auch die gewählten Vereinfachungen sowie die Limitationen und Unsicherheiten der Methodik berücksichtigt werden. So ist zwar die Simulation des Teillastbetriebes möglich, aber das zugrundeliegende Simulationstool *TESPy* erlaubt ausschließlich stationäre Fließprozesse, sodass instationäre Lastwechsel nicht abgebildet werden können. Aus Ermangelung an frei verfügbaren Betriebsdaten kann aktuell keine Unterscheidung verschiedener Verdichterbauarten, wie Hubkolben-, Schrauben- oder Turboverdichter, durchgeführt werden, die über Betriebsparameter wie den Isentropenwirkungsgrad im Nennpunkt hinaus gehen. Grundsätzlich erlaubt *TESPy* aber eigene Betriebscharakteristiken, weshalb eine Erweiterung der Methodik bei verfügbaren Daten umsetzbar wäre. Auch der implementierte Ansatz der Kostenkorrelationen auf Komponentenebene weist diese Beschränkung auf, sodass bisher auch in der ökonomischen Bewertung keine Unterscheidung vorgenommen werden kann.

Insgesamt sind die errechneten Investitionskosten nur bedingt auf reale Projekte übertragbar, da es sich insbesondere bei Großwärmepumpen in der Regel um Individuallösungen handelt, deren Komplexität ein hohes Maß an Unsicherheit in der Kostenvorhersage mit sich bringt. Der Kostenansatz wird ebenfalls in anderen Veröffentlichungen angewandt, konnte jedoch bisher nicht gegen einen größeren Datensatz realer Projekte validiert werden, weil auch dieser nicht vorhanden ist. Eine grundsätzliche, wenn auch gängige, Limitation der Kostenkorrelation ist die Beschränkung auf eine einzige Referenzgröße. So werden die Verdichterkosten ausschließlich anhand des Volumenstromes am Saugstutzen berechnet. Dieser ist ein maßgeblicher Kostenfaktor, die technische Effizienz der Anlage wird aber nicht berücksichtigt, obwohl hocheffiziente Verdichter tendenziell höhere Kosten aufweisen. Ein multikriterieller Kostenansatz könnte folglich realistischere Ergebnisse produzieren.

Grundsätzlich ersetzt *heatpumps* keine Detailplanung, kann jedoch einen hinreichenden bis genauen Aufschluss über das prinzipielle Verhalten der einzelnen Komponenten der Wärmepumpe geben und ermöglicht es, schnell verschiedene Setups miteinander zu vergleichen. Auf diesen Ergebnissen aufbauend, könnte mit nachgelagerten Simulationen der Einsatz von Wärmepumpen in multivalenten Wärmeversorgungssystemen simuliert und deren ökonomische und ökologische Attraktivität evaluiert werden.

5 Zusammenfassung

Das vorgestellte Dashboard bietet eine Vielzahl praxisrelevanter Funktionen zur Analyse und Bewertung von Wärmepumpenkonzepten. Diese reichen von der Auslegung der Wärmepumpenmodelle, über die Simulation

ihres stationären Teillastbetriebs bis hin zu einer Exergieanalyse und die Ermittlung der ökonomischen Attraktivität. Anhand der Fallbeispiele wird deutlich, dass ein Topologiewechsel mit demselben Kältemittel (Ammoniak), vom einfachen Wärmepumpenkreis hin zur parallelen Kompression mit offenem Economizer, eine signifikante Verbesserung des COP ermöglicht. Beim Wechsel des Kältemittels von Ammoniak zu R1234ze(Z) wird bei unveränderter Topologie (parallele Kompression mit offenem Economizer) hingegen nur eine geringere Steigerung des COP erzielt. Hinsichtlich der ökonomischen Attraktivität gehen mit einer Verbesserung des COP höhere Investitionskosten einher. Dabei ist jedoch ersichtlich, dass der Topologiewechsel eine wesentlich geringere Kostensteigerung verursacht – bezogen auf den gewählten Kostenansatz – als der Wechsel des Kältemittels. Das Dashboard sowie die zugrundeliegenden Wärmepumpenmodelle werden kontinuierlich erweitert und laden durch den quelloffenen Ansatz zur kollaborativen Entwicklung ein.

6 Literaturverzeichnis

- [1] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Climate Change 2023: Synthesis Report, Summary for Policymakers., 2023, p. 1–34.
- [2] Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, *Integrierter Nationaler Energie- und Klimaplan*, 2020.
- [3] I. Sifnaios, D. M. Sneum, A. R. Jensen, J. Fan und R. Bramstoft, „The impact of large-scale thermal energy storage in the energy system,“ *Applied Energy*, Bd. 349, p. 121663, November 2023.
- [4] R. Jacob, M. Hoffmann, J. M. Weinand, J. Linßen, D. Stolten und M. Müller, „The future role of thermal energy storage in 100% renewable electricity systems,“ *Renewable and Sustainable Energy Transition*, Bd. 4, p. 100059, August 2023.
- [5] D. Connolly, B. V. Mathiesen, P. A. Østergaard und others, „Heat Roadmap Europe 2050 : First Pre-study for the EU27,“ Aalborg University, 2012.
- [6] D. Connolly, B. V. Mathiesen, P. A. Østergaard, B. Möller, S. Nielsen, H. Lund, U. Persson, S. Werner, J. Grözinger, T. Boermans, M. Bosquet und D. Trier, *Heat Roadmap Europe 2: Second Pre-Study for the EU27*, Department of Development and Planning, Aalborg University, 2013.
- [7] A. S. R. Subramanian, T. Gundersen und T. A. Adams, „Modeling and Simulation of Energy Systems: A Review,“ *Processes*, Bd. 6, p. 238, November 2018.
- [8] Klein, Sanford A. and Alvarado, Gregory, *Engineering Equation Solver (EES)*, 2024.
- [9] T. Ommen, J. K. Jensen, W. B. Markussen, L. Reinholdt und B. Elmegaard, „Technical and economic working domains of industrial heat pumps: Part 1 – Single stage vapour compression heat pumps,“ *International Journal of Refrigeration*, Bd. 55, p. 168–182, July 2015.
- [10] J. K. Jensen, T. Ommen, W. B. Markussen, L. Reinholdt und B. Elmegaard, „Technical and economic working domains of industrial heat pumps: Part 2 – Ammonia-water hybrid absorption-compression heat pumps,“ *International Journal of Refrigeration*, Bd. 55, p. 183–200, July 2015.
- [11] C. Arpagaus et al., „High temperature heat pumps: Market overview, state of the art, research status, refrigerants, and application potentials,“ *Energy*, Bd. 152, pp. 985–1010, June 2018.
- [12] F. Witte und I. Tuschy, „TESPy: Thermal Engineering Systems in Python,“ *Journal of Open Source Software*, Bd. 5, p. 2178, May 2020.
- [13] W. Cai, F. Wang, S. Chen, C. Chen, Y. Zhang, O. Kolditz und H. Shao, „Importance of long-term ground-loop temperature variation in performance optimization of Ground Source Heat Pump system,“ *Applied Thermal Engineering*, Bd. 204, p. 117945, March 2022.
- [14] M. Jelić, M. Batić, A. Krstić, M. Bottarelli und E. Mainardi, „Comparative analysis of metaheuristic optimization approaches for multisource heat pump operation,“ *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Bd. 188, p. 113871, December 2023.
- [15] J. V. M. Walden und P. Stathopoulos, „The impact of heat pump load flexibility on its process integration and economics,“ *Journal of Cleaner Production*, Bd. 462, p. 142643, July 2024.
- [16] E. Atam, „Current software barriers to advanced model-based control design for energy-efficient buildings,“ *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Bd. 73, p. 1031–1040, June 2017.

- [17] Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin-Madison, „TRNSYS 18: A Transient System Simulation Program,“ Madison, 2021.
- [18] M. Dempsey, „Dymola for Multi-Engineering Modelling and Simulation,“ *2006 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, pp. 1–6, September 2006.
- [19] Modelica Association, „Modelica: A Unified Object-Oriented Language for Systems Modeling,“ 2024.
- [20] Inc., The MathWorks, *MATLAB version: 9.13.0 (R2022b)*, Natick, Massachusetts, United States: The MathWorks Inc., 2022.
- [21] U.S. Department of Energy, „EnergyPlus: Weatherization and Building Energy Modeling,“ Golden, 2024.
- [22] Technical University of Denmark, „CoolPack: A Collection of Simulation Tools for Refrigeration,“ Kongens, 2017.
- [23] V. Sergeev, I. Anikina und K. Kalmykov, „Using Heat Pumps to Improve the Efficiency of Combined-Cycle Gas Turbines,“ *Energies*, Bd. 14, p. 2685, May 2021.
- [24] E. Afrasiabian, R. Douglas, M. Geron und G. Cunningham, „A numerical evaluation of a novel recovery fresh air heat pump concept for a generic electric bus,“ *Applied Thermal Engineering*, Bd. 209, p. 118181, June 2022.
- [25] A. Uusitalo, A. Jaatinen-Värri, T. Turunen-Saaresti, J. Honkatukia und J. Tiainen, „Centrifugal compressor design and cycle analysis of large-scale high temperature heat pumps using hydrocarbons,“ *Applied Thermal Engineering*, Bd. 247, p. 123035, June 2024.
- [26] V. Contributors, *VCRC: Vapor Compression Refrigeration Cycle Simulation Tool*, 2024.
- [27] A. Treuille, A. Kelly und T. Teixeira, *Streamlit: A framework for creating interactive apps*, 2019.
- [28] C. R. Harris et al., „Array programming with NumPy,“ *Nature*, Bd. 585, p. 357–362, September 2020.
- [29] The pandas development team, „pandas-dev/pandas: Pandas,“ February 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.5281/zenodo.3509134>.
- [30] P. Virtanen et al., „SciPy 1.0: Fundamental Algorithms for Scientific Computing in Python,“ *Nature Methods*, Bd. 17, p. 261–272, 2020.
- [31] F. Pedregosa et al., „Scikit-learn: Machine Learning in Python,“ *Journal of Machine Learning Research*, Bd. 12, p. 2825–2830, 2011.
- [32] J. D. Hunter, „Matplotlib: A 2D graphics environment,“ *Computing in Science & Engineering*, Bd. 9, p. 90–95, 2007.
- [33] Plotly Technologies Inc. , „Collaborative data science,“ 2015. [Online]. Available: <https://plot.ly>.
- [34] F. Witte, „fwitte/fluprodia: fluprodia version 3.2,“ June 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.5281/zenodo.12598491>.
- [35] I. H. Bell, J. Wronski, S. Quoilin und V. Lemort, „Pure and Pseudo-pure Fluid Thermophysical Property Evaluation and the Open-Source Thermophysical Property Library CoolProp,“ *Industrial & Engineering Chemistry Research*, Bd. 53, p. 2498–2508, 2014.
- [36] J. Freißmann und M. Fritz, „heatpumps -- GitHub Repository,“ 26 März 2023. [Online]. Available: <https://github.com/jfreissmann/heatpumps>.
- [37] 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*, Bd. 22, p. 16–25, November 2018.
- [38] 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*, Bd. 6, p. 100028, November 2020.
- [39] F. Witte, „TESPy Documentation,“ 2024. [Online]. Available: <https://tespy.readthedocs.io/en/dev/introduction.html>.
- [40] F. Witte, M. Hofmann, J. Meier, I. Tuschy und G. Tsatsaronis, „Generic and Open-Source Exergy Analysis—Extending the Simulation Framework TESPy,“ *Energies*, Bd. 15, p. 4087, June 2022.

- [41] A. Bejan, G. Tsatsaronis und M. J. Moran, Thermal design and optimization, New York [u.a.]: Wiley, 1996.
- [42] F. Bošnjaković, "Kampf den Nichtumkehrbarkeiten!," *Archiv für Wärmewirtschaft*, vol. 19, p. 1–2, 1938.
- [43] A. Lazzaretto und G. Tsatsaronis, „SPECO: A systematic and general methodology for calculating efficiencies and costs in thermal systems,“ *Energy*, Bd. 31, p. 1257–1289, July 2006.
- [44] G. Tsatsaronis, „Combination of Exergetic and Economic Analysis in Energy Conversion Processes,“ in *Proceedings of the European Congress on Economics and Management of Energy in Industry*, Algarve, 1984.
- [45] G. Kosmadakis, C. Arpagaus, P. Neofytou und 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*, Bd. 226, p. 113488, December 2020.
- [46] J. Freißmann, M. Fritz und I. Tuschy, „Hochtemperaturwärmepumpen in der Nah- und Fernwärmeversorgung - Technologieperspektive für den kurz- und mittelfristigen Einsatz in multivalenten Systemen,“ Abschlussbericht zum Forschungsprojekt der EKSH, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.5281/zenodo.13946407>.
- [47] *Chemical Engineering Plant Cost Index*, Bd. 131, Access Intelligence, LLC, 2024, p. 66–69.
- [48] *VDI-Wärmeatlas*, Springer Berlin Heidelberg, 2013.

Entwicklung einer Dampfstrahlwärmepumpe zur Trinkwarmwasserbereitung und dezentralen Rücklaufauskühlung in Wärmenetzen

Ömer Kacmaz¹⁾, Marlies Wiegand²⁾, Oliver Opel³⁾

¹⁾ FH Westküste, Markt 18 25746 Heide, Kacmaz@fh-westkueste.de, +49 (0) 481 123 769 49.

²⁾ FH Westküste, Markt 18 25746 Heide, Wiegand@fh-westkueste.de, +49 (0) 481 123 769 41.

³⁾ FH Westküste, Fritz-Thiedemann-Ring 20 25746 Heide, Opel@fh-westkueste.de, +49 (0) 481 8555-375.

Kurzfassung

Wärmenetzbetreiber stehen oft vor dem Problem, dass die Absenkung der Netztemperatur durch die begrenzte übertragbare Leistung limitiert ist. Dies führt dazu, dass bei sehr niedrigen Außentemperaturen Vorlauftemperaturen von über 100°C benötigt werden, obwohl niedrigere Temperaturen für die Abnehmer ausreichen würden. Niedrigere Rücklauftemperaturen sind für die Effizienz des Netzes entscheidend, werden aber durch verschiedene Faktoren wie Legionellenprävention und technische Anforderungen erschwert [1]. Eine mögliche Lösung für dieses Problem ist der Einsatz einer thermisch angetriebenen Dampfstrahl-Wärmepumpe anstelle einer Absorptionswärmepumpe[2]. Ähnlich wie die Absorptionskältemaschinen, die mit Wärme kühlen, kann auch dieses System, die Dampfstrahl-Wärmepumpe, diese Kühlaufgabe übernehmen. Diese Technologie ermöglicht es, hohe Temperaturen für Trinkwasser(und Heizung) bereitzustellen, ohne die Rücklauftemperaturen im Netz zu erhöhen. Dabei wird ein natürliches Kältemittel, Isobutan(R600a), verwendet, um möglichen zukünftigen Vorschriften über fluorierte Kohlenwasserstoffe und per- und polyfluorierte Alkylsubstanzen gerecht zu werden. Die Machbarkeit der Installation eines Systems mit einem thermischen Verdichter(STV), der nach dem Wärmepumpenprinzip ohne elektrischen Verdichter arbeitet, wurde untersucht, eine MATLAB-Simulation erstellt und deren Ergebnisse in diesem Artikel präsentiert.

Fernwärmerückkühlung, Energieeffizienz, Warmwasservorbereitung, Natürliche Kältemittel, Thermischer Kompressor

Symbole			
A	Fläche (m ²)	P _t	Treibdruck (bar)
h	Spezifische Enthalpie (J /kg)	P _g	Mischdruck (bar)
μ	Massenstromverhältnis	P _s	Saugdruck (bar)
T _s	Saugstromtemperatur (°C)	η _t	Wirkungsgrad-Treibdüse
T _t	Treibstromtemperatur (°C)	η _m	Wirkungsgrad-Mischdüse
T _{con}	Kondensatortemperatur (°C)	η _d	Wirkungsgrad-Diffusor
ṁ	Massenstrom (kg/s)	STV	Strahlverdichter
Ma	Mach-Zahl	d _t	Durchmesser der Treibdüse (m)
A _{1t}	Flächenverhältnis (d _t /d _i) ² (m ²)	d _i	Durchmesser des Treibdüseausgangs (m)
A _{2t}	Flächenverhältnis (d _m /d _i) ² (m ²)	d _m	Durchmesser der Mischdüse (m)
ṁ _s = ṁ _{Saug}	Saugstrom (kg/s)	ṁ _t = ṁ _{Treib}	Treibstrom (kg/s)
T _{cr (exp)}	Kritische Temperatur (experimentell) (°C)	T _{cr}	Kritische Temperatur (°C)
T _{FW_in}	Vorlauf Fernwärmetemperatur	ṁ _{FW}	Massenstrom Fernwärme
T _{FW_out}	Rücklauf Fernwärmetemperatur	ṁ _{ZW}	Massenstrom Zirkulationswarmwasser
T _{ZW_in}	Vorlauftemperatur Zirkulationswarmwasser	T _{ZW_out}	Rücklauftemperatur Zirkulationswarmwasser
V _T	Treibstromgeschwindigkeit	V _S	Saugstromgeschwindigkeit
V _m	Mixstromgeschwindigkeit	A _t	Engste Stelle in der Treibdüse(Lavaldüse)

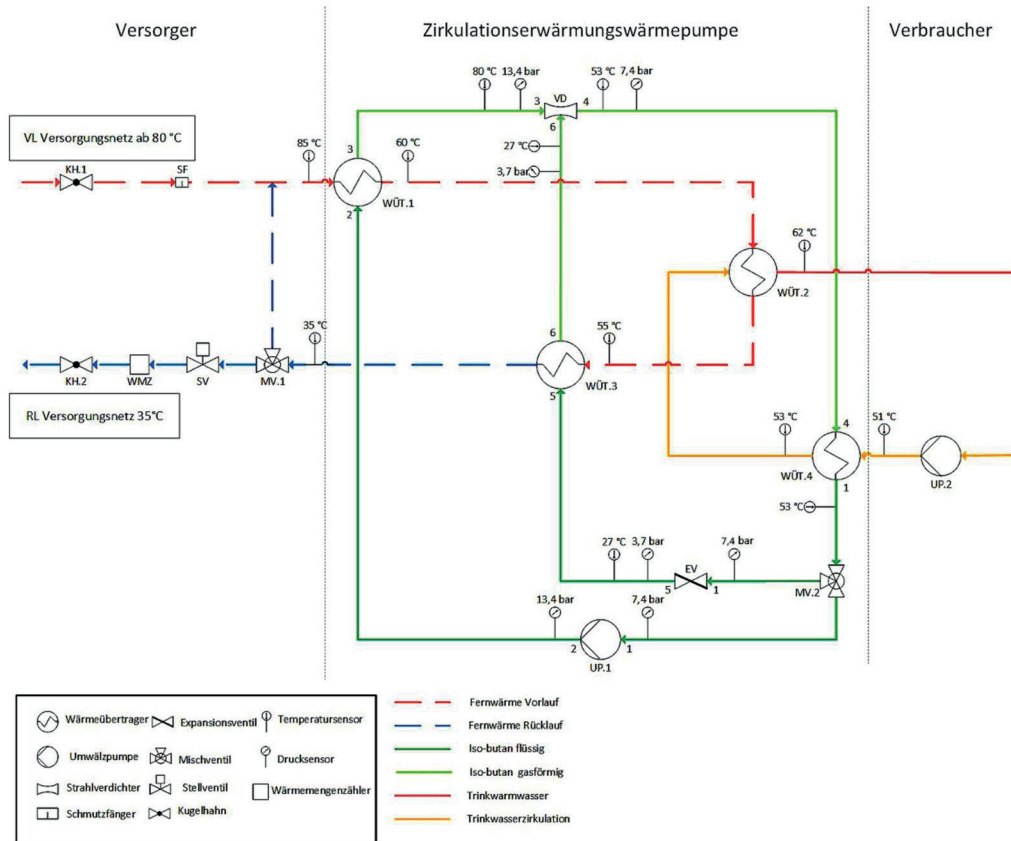


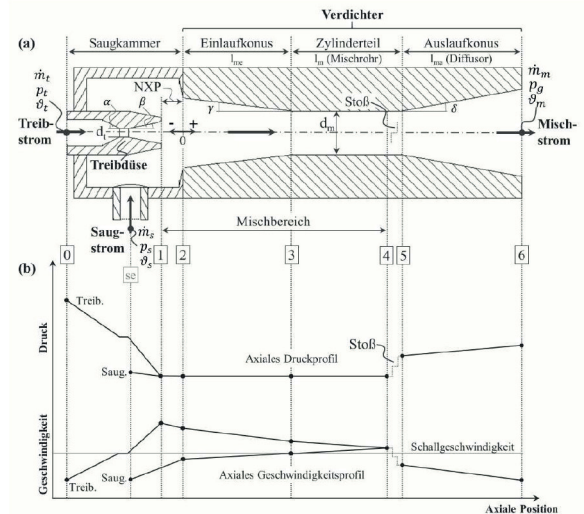
Abbildung 1: Systemschema der zu entwickelnden Dampfstrahlwärmepumpe mit Versorger und Verbraucher (Eigene Darstellung).

1. Einleitung

Bei der dritten Generation von Fernwärmenetzen liegen die Temperaturen im Allgemeinen unter 100 °C. Diese dritte Generation wird manchmal als „skandinavische Fernwärmetechnologie“ bezeichnet [3]. Die Warmwasserbereitung nur durch Fernwärme ohne zusätzliche Nacherwärmung kann zu einer unzureichenden Senkung der Rücklauftemperaturen auf der Gebäudeseite führen. Aus Gründen der Legionellenprävention kann beim Warmwasser von dem Temperaturniveau 60/55 °C nicht abgewichen werden. Das Legionellenwachstum wird reduziert, wenn die Temperatur über 50 °C liegt, bei über 60 °C sterben sie ab [1]. Zudem wird durch die unzureichende Absenkung der Temperatur die Effizienz des Wärmenetzes verringert. Daher werden immer wieder finanzielle Anreize für Gebäudebetreibende (bspw. Boni oder Pönalen) diskutiert, um niedrigere gebäudeseitige Rücklauftemperaturen zu realisieren [4].

In der Literatur finden sich Untersuchungen zur Machbarkeit der Kühlung mit Wärme (Solarthermie) in einem Wärmepumpenprozess, der durch einen kompressorlosen Verdichter (Strahlverdichter) angetrieben wird [5]. Die vorliegende Studie untersucht, wie dieser Ansatz für Wärmenetze genutzt werden kann, um den gebäudeseitigen Rücklauf auszukühlen und die Wärme auf einen hö-

heren Temperaturniveau (z.B. für die Speichernachbeladung) zu nutzen. Die Simulationsergebnisse der Analyse werden hier ebenfalls vorgestellt.



2. Funktionsweise und Leistung des Strahlverdichters

Die ersten Modelle zur Analyse von Luft- Strahlverdichtern wurden von Keenan et al. (1950) vorgestellt. Im Laufe der Zeit wurden Strahlverdichter mit verschiedenen Kältemitteln untersucht [7].

Die Anlage besteht in der Regel aus: zwei Wärmequellen, einem Hochdruckverdampfer und einem Niederdruckverdampfer (mit niedriger Temperatur), einem Ejektor, einem Kondensator, einer Umwälzpumpe und einem Expansionsventil. Die wichtigste Komponente des Kreislaufs ist der Strahlverdichter (siehe Abbildung 2). Im Ejektor tritt das vom Generator (2-3 siehe Abbildung 1) kommende Treibmittel mit hohem Druck und geringer Geschwindigkeit in die Treibdüse ein. Nach der Expansion verlässt es den Treibdüsenaustritt mit hoher kinetischer Energie und niedrigem statischen Druck. Dadurch wird das unter niedrigem Druck stehende (angesaugte) Fluid in die vom Verdampfer (5-6 siehe Abbildung 1) des Kühlkreislaufs kommende Saug-Düse gezogen, in der die Auskühlung der Fernwärme erfolgt. Aufgrund des großen Geschwindigkeitsunterschieds zwischen dem Treib- und dem Saugfluid entsteht eine Scherschicht zwischen den beiden Strömen, die zur Beschleunigung des Saugstroms führt [8]. Der Zustand, in dem das angesaugte Fluid die Schallgeschwindigkeit erreicht, wird oft als Doppelstoßbetrieb ("double shock") bezeichnet. Der Mischvorgang nach der Austrittsebene der Treibdüse ist recht komplex. Die Strömung des Treibstroms kann durch eine Reihe schräger/ normaler Stoßwellen charakterisiert werden, die als Stoßfolge bezeichnet werden [9, 10]. Der statische Druck des Treibstroms steigt während dieses Vorgangs allmählich an, bis er sich dem Druck des angesaugten Kältemittels angleicht. Je nach Betriebsbedingungen kommt es nach Abschluss des Mischvorgangs zu einem abschließenden Stoß irgendwo im Bereich der konstanten Fläche oder am Anfang des Diffusors [8].

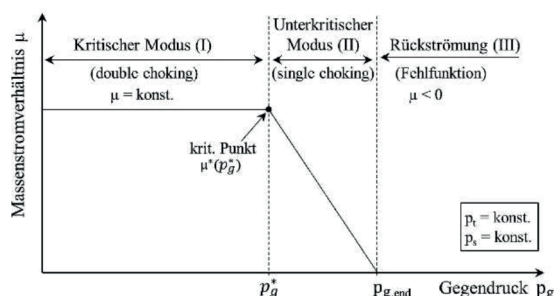


Abbildung 3: Betriebsmodus des Strahlverdichters [6].

Der Strahlverdichter hat drei Betriebsmodi, siehe Abbildung 3. Der erste Modus ist der kritische Modus. In diesem Modus herrscht ein konstantes Massenstromverhältnis μ , was für die Anlage erwünscht ist. Außerdem treten in diesem Modus zwei Stöße auf. Die beiden Stöße dienen der Verdichtung (siehe auch Abbildung 2). Modus 1 dauert an, bis der Kondensatordruck den kritischen Druck, d. h. den Gegendruck, erreicht. Wird der Kondensatordruck über den kritischen Druck hinaus erhöht, neigt der Stoß dazu, sich rückwärts in den Mischbereich zu bewegen und stört die Vermischung von Treib- und Saugstrom [11]. Sobald dieser Gegendruck überschritten wird, befindet sich der Prozess im unterkritischen Modus, in dem μ nicht mehr konstant ist, sondern linear abfällt. Dies wirkt sich natürlich auf das gesamte System und die Gesamtdimensionierung der Anlage aus, wobei sich diese immer noch im funktionsfähigen Zustand befindet. In diesem zweiten Modus steigt der Gegendruck allmählich an, der Massenstrom wird zurückgedrängt und der Saugstrom wird stark eingeschränkt. Beim Erreichen des μ -Wertes von Null gibt es bereits keinen Saugstrom mehr und der dritte Modus ist eingetreten, so dass der Strahlverdichter nicht mehr funktioniert.

Die Leistung eines Ejektors wird häufig anhand des Massenstromverhältnisses gemessen, das wie folgt definiert ist:

$$\mu = \frac{\dot{m}_{\text{Saug}}}{\dot{m}_{\text{Treib}}} \quad (1)$$

Das Massenstromverhältnis ist sowohl für die Effizienz als auch für den Betrieb des Systems wichtig. Dieses ist ebenfalls ausschlaggebend für die Dimensionierung des Systems und die Auskühlung der Fernwärme. Aus den Ergebnissen geht hervor, dass dieser μ -Wert je nach Temperatur und Druck analysiert werden sollte. Der hohe Wert von μ für 80°C, der hier analysiert wird, führt zu einer besseren Abkühlung in den Fernwärmenetzen und auch dazu, dass das Zirkulationswarmwasser die gewünschten Temperaturen erreicht siehe Abbildung 8.

3. Analyse zur Effizienz des Verfahrens

In dieser eingehenden Untersuchung wurde auch die Effizienz (Coefficient of Performance, COP) einer Dampfstrahl-Wärmepumpe analysiert.

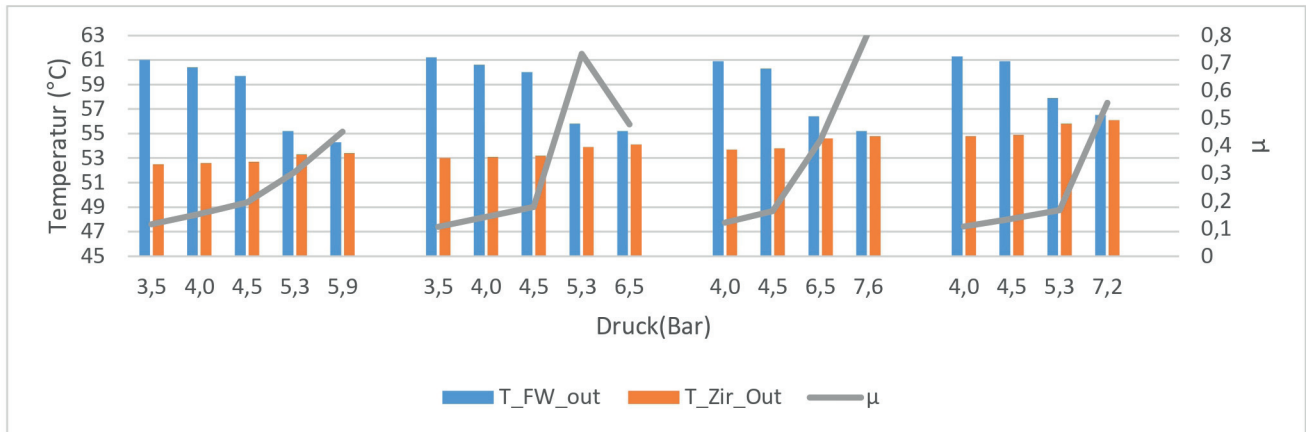


Abbildung 4: Vergleich der Fernwärmerücklauftemperatur und der Zirkulationswarmwasserrücklauftemperatur bei unterschiedlichen Drücken durch Änderung des Durchflusses von Zirkulationswarmwasser in Matlab-SimScape.

Die Effizienz einer Wärmepumpe wird durch die COP dargestellt. In Abbildung 5 ist das Druck-Enthalpie-Diagramm des Systems eingezeichnet. Es ergibt sich folgender COP des Systems, der das Verhältnis von Nutzen und Aufwand verdeutlicht:

$$COP = \frac{|\dot{Q}_{Kond}|}{\dot{Q}_{Gen} + \dot{Q}_{Evap} + \dot{W}_P} \quad (2)$$

Mit dem ersten Hauptsatz der Thermodynamik für offene Systeme unter Vernachlässigung der kinetischen und potenziellen Energie:

$$\dot{Q}_{12} + \dot{W}_{12} = \dot{m} (h_2 - h_1) \quad (3)$$

dem Mischstrom:

$$\dot{m}_m = \dot{m}_{Treib} + \dot{m}_{Saug} \quad (4)$$

und der Approximation des Expansionsventils als adiabate Drossel:

$$h_7 = h_8 \quad (5)$$

ergibt sich der COP der Dampfstrahlwärmepumpe zu:

$$COP = \frac{(\mu+1)(h_6-h_7)}{(h_0-h_7)+\mu(h_{se}-h_7)} \quad (6)$$

Die Energy Efficiency Ratio einer Dampfstrahlkältemaschine entspricht:

$$EER = \mu \frac{(h_{se}-h_7)}{(h_0-h_7)} \quad (7)$$

Diese Besonderheit resultiert aus der dualen Präsenz des Massenstromverhältnisses im Zähler und Nenner des COP-Ausdrucks. Diese doppelte Präsenz bewirkt eine Kompensation, wodurch der mathematische Einfluss des Massenstromverhältnisses nahezu eliminiert wird. Anders ausgedrückt führen Veränderungen im Massenstromverhältnis praktisch zu vernachlässigbaren Auswirkungen auf den Leistungskoeffizienten der Dampfstrahl-

Wärmepumpe, da es gleichermaßen in die Berechnungen der Leistung und des Energieverbrauchs einfließt [12].

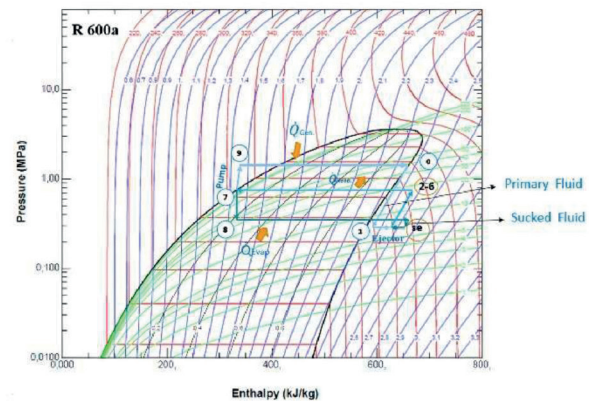


Abbildung 5: Nummeriertes ln(P)-h-Diagramm des Systems (eigene Darstellung)

Im Gegensatz zur Dampfstrahlkältemaschine, bei der der EER (Energy Efficiency Ratio) im Wesentlichen proportional zum Massenstromverhältnis ist, sofern die Differenzen der spezifischen Enthalpien nahezu konstant sind, zeigt sich bei der Dampfstrahl-Wärmepumpe eine bemerkenswerte Unempfindlichkeit des COP gegenüber Veränderungen im Massenstromverhältnis.

4. MATLAB-SimScape Model

In Matlab- SimScape [13] werden die Komponenten, die für eine Simulation benötigt werden, als Module aufbereitet und zu Kältemaschinen zusammengefügt. Alle Komponenten werden zunächst einzeln für das Dampfstrahl-Wärmepumpensystem analysiert und aus den Ergebnissen wird das Dampfstrahl-Wärmepumpensystem gebildet. Die Simulationsergebnisse des Einsatzes des Dampfstrahl-Wärmepumpensystems zur Kühlung der Fernwärmenetze und zur Erwärmung des Zirkulationswarmwassers werden in dem nächsten Abschnitt detailliert untersucht.

5. Ergebnisse

Die Ergebnisse der Untersuchung lassen sich in zwei Kategorien einteilen: erstens die Ergebnisse vor der Optimierung und zweitens die Ergebnisse nach der Optimierung. Die Ergebnisse vor der Optimierung werden ebenfalls in 3 Kategorien unterteilt. Die Parameter, die in diesen Ergebnissen konstant gehalten werden, sind die Temperatur in den Fernwärmenetzen (Siehe Abbildung 1 für den Fernwärmeanschluss) $T_{FW_in} = 80^\circ\text{C}$, die Durchflussmenge in den Fernwärmenetzen ($\dot{m}_{FW}$) = 0,038 kg/s, das Verhältnis der engsten Stelle der ersten Treibdüse (Strahldüse) (A_t) zur Austrittsfläche der ersten Treibdüse (A_1), d.h. $A_1/A_t = 19$, der andere konstant gehaltene

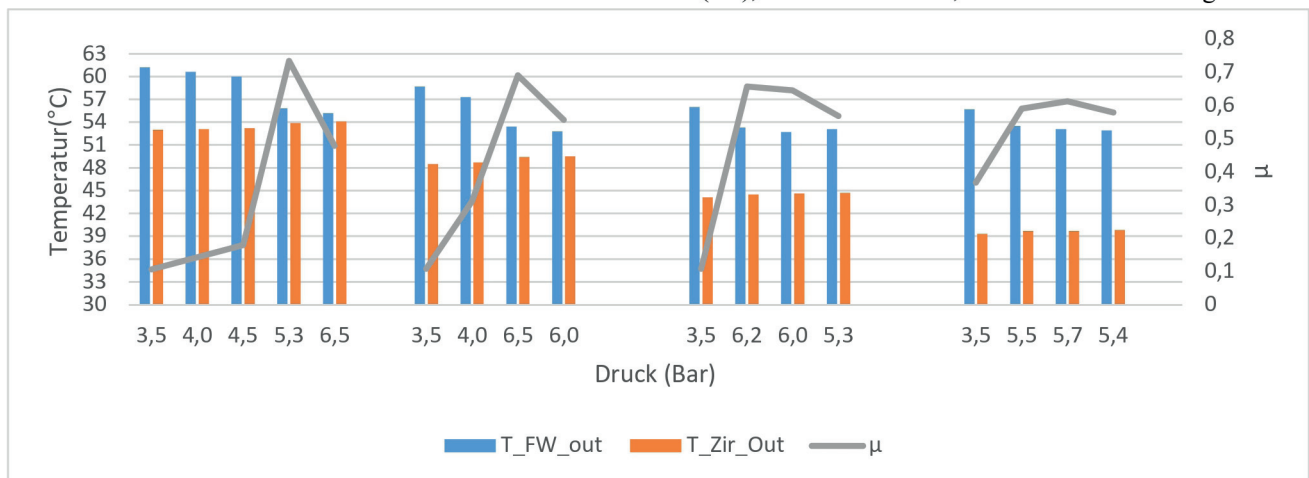


Abbildung 6: Vergleich der Fernwärmerücklauftemperatur und der Zirkulationswarmwasserrücklauftemperatur bei unterschiedlichen Drücken, durch die Änderung der Zirkulationswarmwasservorlauftemperatur in Matlab-SimScape.

Die Matlab-Modellierung beginnt mit dem Strahlverdichter (STV), der als das zentrale Element des Systems betrachtet wird. Das Modell basiert auf dem Artikel „A 1-D analysis of ejector performance“ von B.J. Huang et al [14, 15] und verwendet thermodynamische und strömungsmechanische Prinzipien, um die gewünschten Ergebnisse zu simulieren.

Mit den durch Iteration gewonnenen Ergebnissen aus dem mit Hilfe von Pounds et al [16] und Eames et al [17] erstellten mathematischen Modell wurde die A_t Fläche für die STV bestimmt und parallel dazu eine geometrische Dimensionierung erstellt. Darüber hinaus wurde $\dot{m}_{Saug}$ als Ergebnis des Treibstroms, der in die Treibdüse eintritt, ermittelt. Danach wurde die Modellierung mit Matlab- SimScape gestartet und andere Parameter und Ergebnisse wurden entsprechend den Simulationsergebnissen ermittelt. Zum Beispiel wurden $\dot{m}_{FW}$ und $\dot{m}_{ZW}$ entsprechend der Menge von $\dot{m}_{Treib}$ und $\dot{m}_{Saug}$ bestimmt.

Parameter ist das Verhältnis der engsten Fläche der ersten Treibdüse (A_t) zur engsten Fläche der zweiten Treibdüse (A_m), d. h. $A_m/A_t = 20$.

Nach diesen festgelegten Werten wurden die Ergebnisse durch Änderung von $\dot{m}_{ZW}$, T_{ZW_in} und A_t erfasst. Anschließend wird das optimierte System durch die Veränderung derselben Parameter erstellt und die Ergebnisse werden in den Diagrammen dargestellt. Im Folgenden werden die Ergebnisse all dieser variierten Parameter im Detail diskutiert.

Aus Abbildung 6 geht hervor, dass die Temperatur in den Fernwärmenetzen 80 °C und der Durchfluss 0,038 kg/s beträgt und die Vorlauftemperatur des Zirkulationswarmwassers dementsprechend 50 °C beträgt. Verglichen werden die Massenstromverhältnisse (μ) und die Abkühlung in den Fernwärmenetzen in °C sowie die Änderungen der Temperatur des Zirkulationswarmwassers in °C als Ergebnis der Änderung der Zirkulationswarmwasser-Eintrittsmenge. Die primäre Achse der Abbildungen zeigen die Temperatur, die sekundäre Achse die Durchflussraten (μ), und die x-Achse stellt den Saugdruck dar. Es lässt sich erkennen, dass mit steigendem Saugdruck die Temperaturdifferenz in den Fernwärmenetzen allmählich zunimmt. Sobald der Saugdruck wieder abnimmt, verringert sich auch die Temperaturdifferenz. Gleichzeitig wird angestrebt, die Zirkulationswassertemperatur auf bis zu 55°C zu erhöhen, um die Probleme mit Legionellen zu lösen. Die Ergebnisse des nicht optimierten Systems, d. h. des **ersten Teils**, werden anschließend in drei Kategorien analysiert.

Dies ist problematisch, wenn das Kühlmittel, das zur Pumpe geleitet werden soll, nicht in flüssiger Form vorliegt. Außerdem kommt es in Systemen mit P_{Saug} unter 3,5 bar zu keinem Ansaugen, selbst bei $m_{\text{ZW}}=0,2$ und 0,15 kg/s kommt es unter $P_{\text{Saug}}=4$ bar zu keinem Ansaugen.

- ii. Die Ergebnisse bei abnehmender Temperatur $T_{\text{ZW_in}}$ sind in Abbildung 6 dargestellt. Wie hier zu sehen ist, sinkt mit der Verringerung von $T_{\text{ZW_in}}$ die Temperatur am Rücklauf der Fernwärmenetze allmählich unter 54 °C und parallel dazu sinkt die Rücklauftemperatur des Zirkulationswarmwassers ($T_{\text{ZW_out}}$) allmählich unter 40 °C. Diese Situation führt zu besseren Ergebnissen in dem optimierten System, was im nächsten Abschnitt erläutert wird.

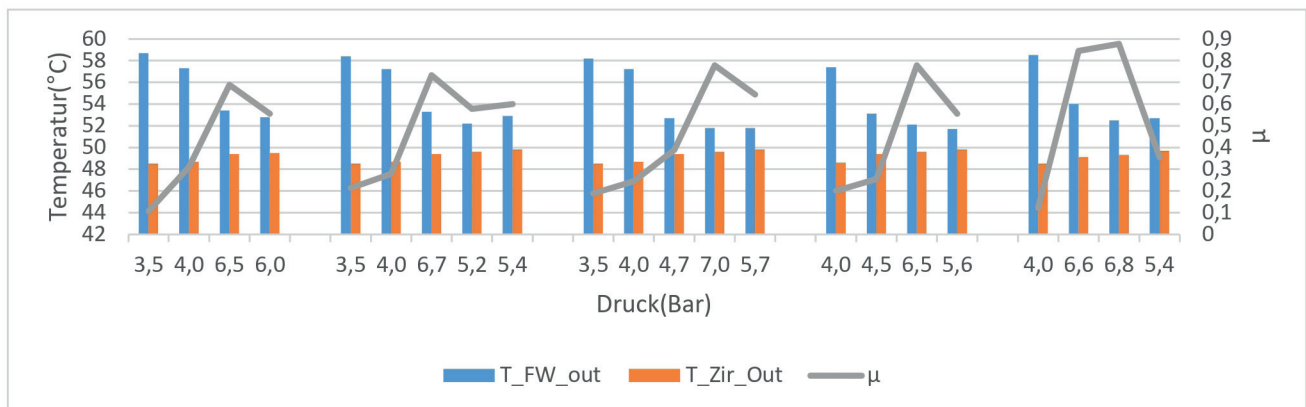


Abbildung 7: Vergleich der Fernwärme-Rücklauftemperatur und der Zirkulationswarmwasser-Rücklauftemperatur bei unterschiedlichen Drücken, durch Erhöhung von A_t in Matlab-SimScape.

- i. Die Ergebnisse der Abnahme von m_{ZW} sind in Abbildung 4 dargestellt. Mit abnehmendem m_{ZW} steigt die $T_{\text{ZW_out}}$ und dementsprechend versagen die Systeme bei niedrigen Saugdrücken, d. h. unter 4 bar. μ erreicht seinen höchsten Wert bei $m_{\text{ZW}}=0,2$ kg/s. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der Saugdruck, bzw. die Saugtemperatur, auf höhere Werte erhöht werden kann. Allerdings kann auch dieser P_{Saug} bis zu einem bestimmten Druck erhöht werden (je nach Parameter variiert der Saugdruck). Positiv auf μ wirkt sich hier auch die Tatsache aus, dass der Wärmetauscher WÜT.3 (siehe Abbildung 1) bei Niederdruckwärmetauschern die Wärme mit weniger Verlusten übertragen. Hier besteht ein Gleichgewicht: Wird m_{ZW} zu stark erhöht, wird die Temperatur der Fernwärmenetze nicht gesenkt, und wird sie zu stark gesenkt, verschlechtert sich die Kühlung im Kondensator.

Dieses allmähliche Absinken der $T_{\text{ZW_in}}$ führt zu einem allmählichen Absinken des μ . Der einzige Vorteil hier ist, dass die $T_{\text{FW_out}}$ allmählich abnimmt. Allerdings ist dieser Vorteil dadurch eingeschränkt, dass in dieser Konfiguration, außer bei einer $T_{\text{ZW_in}}$ von über 50°C (ganz links in Abbildung 6), die für das Abtöten der Legionellen erforderliche Temperatur nicht erreicht wird. Darüber hinaus nimmt mit sinkender $T_{\text{ZW_in}}$ die Kondensationsmenge des Kältemittels (0,038 kg/s) allmählich ab. Im Laufe der Zeit kann diese Abnahme zu einer unzureichenden Kühlung des Systems und folglich zum Ausfall der Pumpe und des STV führen.

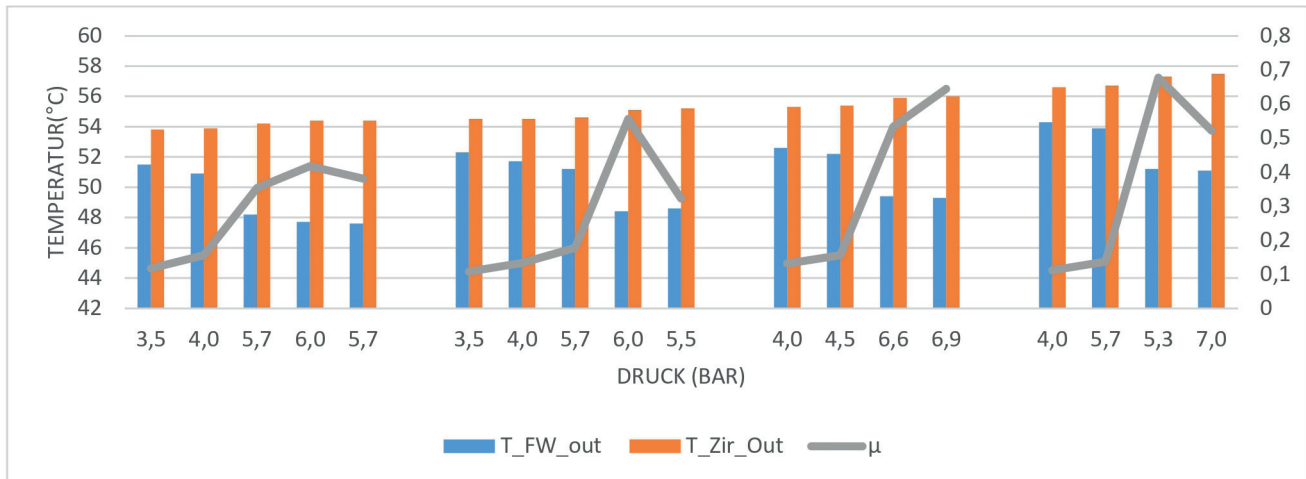


Abbildung 8: Vergleich der Fernwärmerücklauftemperatur und der Zirkulationswarmwasserrücklauftemperatur bei unterschiedlichen Drücken durch Senkung des Massenstroms von Zirkulationswarmwasser in dem optimierten System in Matlab-SimScape.

- iii. In diesem Fall wurde eine Zunahme von A_t untersucht. Wie in Abbildung 7 zu sehen ist, steigt mit zunehmendem A_t der μ -Wert allmählich an. Dies führt zu mehr m_{Saug} . Da sich der Durchfluss der m_{Treib} nicht ändert, sinkt parallel dazu der P_{Treib} -Druck mit der Vergrößerung der Oberfläche und somit der Gesamtdruck am Mischpunkt der ersten Lavalldüse. Da jedoch die Gesamtmischtemperatur, bzw. der Druck, niedrig ist, kann die gewünschte Temperatur $T_{FW_out} < 50$ °C nicht erreicht werden.

analysierten Ergebnisse mit dem WÜT2 detailliert betrachtet.

Die Analyse erfolgt hier wie bereits oben erwähnt auch in drei Teilen.

- a. Die Ergebnisse der m_{ZW} -Senkung sind in Abbildung 8 dargestellt. Die T_{FW_out} Temperatur wird von 61 °C auf 51,5 °C und bei hohen Temperaturen, d.h. P_{Saug} , sogar auf 47,6 °C reduziert. Dies bedeutet, dass die Temperatur $T_{FW_out} = 47,6$ °C unter die Temperatur $T_{ZW_in} = 50$ °C fällt. Dies wird in zukünftigen Studien genauer analysiert werden. Denn diese Temperatur ist niedriger als die für die Kondensation angegebene Temperatur des Warmwassers. Der Hauptzweck dieses Projekts bestand darin, das System ohne den Einsatz zusätzlicher Antriebsmaschinen, wie z.B. Kompressoren usw., so weit zu senken, wie es geht.

Der **zweite Teil** der Untersuchung besteht in einem Vergleich der Ergebnisse des optimierten Systems. Die Optimierung wird durch das Hinzufügen eines zusätzlichen Wärmetauschers zum System erreicht (siehe **Abbildung I**). Der Wärmetauscher WÜT2 ist der zusätzliche Wärmetauscher für das System. In den Folgenden werden die

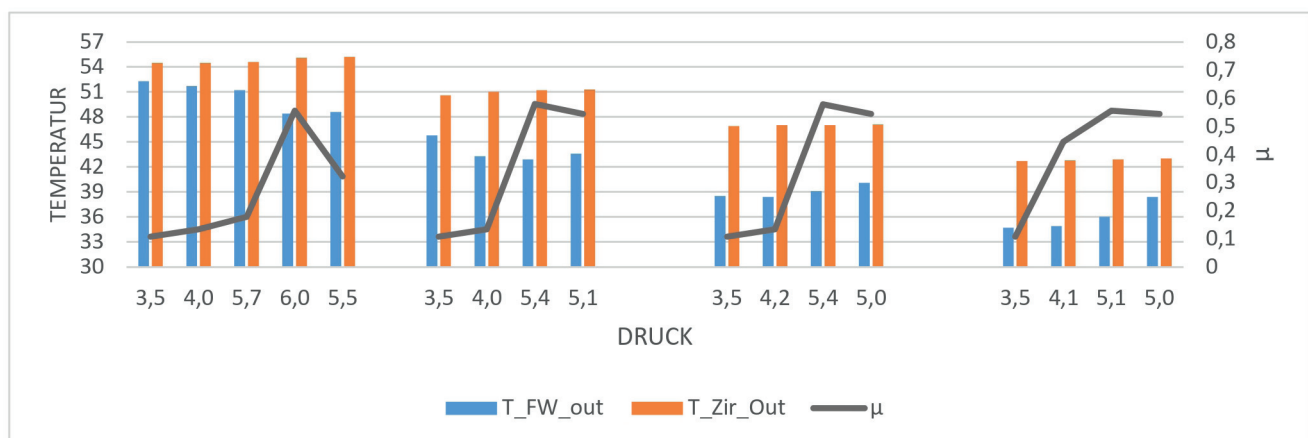


Abbildung 9: Vergleich der Fernwärmerücklauftemperatur und der Zirkulationswarmwasserrücklauftemperatur bei unterschiedlichen Drücken, durch die Änderung der Zirkulationswarmwasservorlauftemperatur in dem optimierten System in Matlab-SimScape.

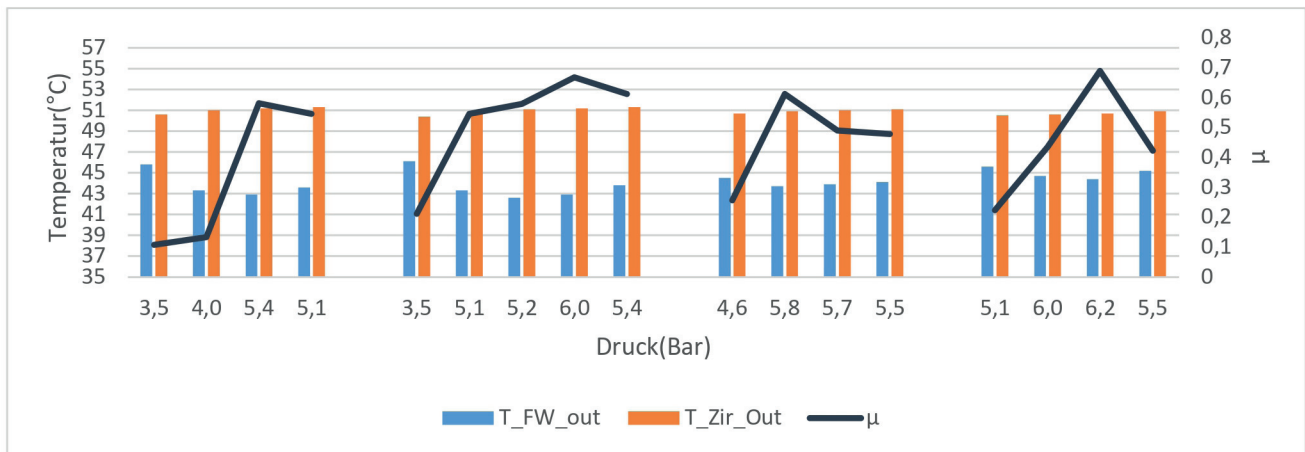


Abbildung 10: Vergleich der Fernwärme-Rücklauftemperatur und der Zirkulationswarmwasser-Rücklauftemperatur bei unterschiedlichen Drücken, durch Erhöhung von A_t in dem optimierten System in Matlab-SimScope.

Diese Ergebnisse haben zu einer weiteren Intensivierung der Forschung in dieser Richtung geführt. Bei einem Massendurchfluss $m_{ZW}=0,29 \text{ kg/s}$ wurde die Temperatur T_{ZW_out} auf $54,5 \text{ °C}$ erhöht, während die Temperatur T_{FW_out} auf $47,6 \text{ °C}$ gesenkt wurde.

Bei einem Massendurchfluss von $m_{ZW}=0,15 \text{ kg/s}$, konnte die Temperatur T_{ZW_out} auf 57 °C erhöht und T_{FW_out} auf 51 °C gesenkt werden.

Diese Optimierung führte jedoch zu einer Reduzierung der μ -Werte.

Mit anderen Worten: Diese Optimierung hatte im Fall 1 positive Auswirkungen auf die Temperaturen, beeinflusste jedoch die μ -Werte negativ.

- b. Dieses System kann nicht als eine direkte Verbindung der Zirkulationswarmwassernetze betrachtet werden, sondern als ein System, bei dem das Warmwasser zunächst mit Kaltwasser gespeist und dann in das System übertragen wird. Die Grafik dazu ist in Abbildung 11 dargestellt. Hier ist die angestrebte Absenkung der Temperatur des T_{FW_out} in jeder Variante zu erkennen. Die Ergebnisse bei der Reduzierung von T_{ZW_in} im optimierten System sind in Abbildung 9 dargestellt. Wie hier zu sehen ist, hat sich T_{FW_out} allmählich verringert, da T_{ZW_in} immer reduziert wurde.

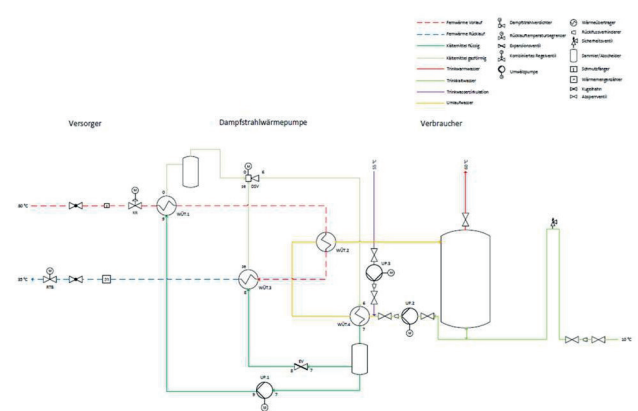


Abbildung 11: Dampfstrahlwärmepumpe mit Kaltwasser Einspeisung(eigene Darstellung).

Das andere Ziel einer Temperatur $T_{ZW_out} > 50 \text{ °C}$, das für die Reduktion von Legionellen erforderlich ist, wird jedoch nur bei der Temperatur $T_{ZW_in} = 50 \text{ °C}$ erreicht. Eine separate Optimierung ist bei einer Temperatur von $T_{ZW_in} = 45 \text{ °C}$ erforderlich, um eine Temperatur von $T_{ZW_out} > 50 \text{ °C}$ zu erreichen.

- c. Vergleicht man dieses Diagramm (Abbildung 10) mit dem nicht optimierten System (Abbildung 7) mit der Erhöhung der A_t -Fläche, stellt man fest, dass die T_{FW_out} Temperatur in allen Varianten um ca. 20% abnimmt. Abgesehen davon kam es bei der Vergrößerung von A_t nicht zu einer Abkühlung bei T_{FW_out} , im Gegenteil, die Temperatur des Systems bei T_{FW_out} stieg noch weiter an. In diesem Diagramm ist der μ -Wert besser als der des nicht optimierten Systems. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Temperatur im System höher ist als im nicht optimierten System und daher ein besserer P_{Saug} erhalten werden kann. Dies führt jedoch nicht zu einer Verringerung der T_{FW_out} Temperatur, die eines der Hauptziele ist. Die kälteste Temperatur $T_{FW_out}=42,6 \text{ °C}$ wird bei $T_{ZW_out}=45 \text{ °C}$ und $A_t=3,6$ erreicht.

6. Diskussion und Ausblick

Das Hauptziel dieser Studie besteht darin, durch die Integration von Fernwärme die Rücklauftemperatur des Zirkulationswarmwasserkreislaufs zu erhöhen und somit eine energieeffiziente, Kompressorlose Kältemaschine zu realisieren. Parallel dazu wird angestrebt, die Rücklauftemperatur des Fernwärmenetzes zu reduzieren. Die umfassende Darstellung des vorgeschlagenen Systems beinhaltet einen gründlichen Vergleich bestehender Strahlverdichter Anlagen, um deren Eignung für das spezifische Projekt zu evaluieren. Bei der Betrachtung dieser Anlagen ist es von entscheidender Bedeutung, dass das Massenstromverhältnis (μ) einen vordefinierten Wert nicht unterschreitet, um einen effektiven Saugstrom in den Strahlverdichter zu gewährleisten.

Die Ergebnisse der Studie, sowohl basierend auf dem mathematischen Modell [18] als auch dem MATLAB-Modell, demonstrieren, dass unter bestimmten Bedingungen Kondensationstemperaturen oberhalb der angestrebten 55 °C erreicht werden können. Die erzielten Resultate stellen sicher, dass der Strahlverdichter als zentrales Element des Systems innerhalb des gewünschten Temperatur- und Druckbereichs arbeitet. Der nächste Schritt dieser Forschung ist die ganzheitliche Integration des Systems, bestehend aus Wärmetauschern (Hoch- und Niederdruck), Strahlverdichtern, Ventilen und Pumpen, in einer Simulationsumgebung. Dieser innovative Ansatz birgt das Potenzial, die Effizienz von Fernwärmenetzen zu verbessern, indem sowohl der Warmwasserbedarf gedeckt als auch die Rücklauftemperatur der Fernwärmenetze gesenkt wird.

Die durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass das System zuverlässig funktioniert und die erwarteten Ergebnisse liefert. Durch den erfolgreichen Simulationsaufbau und die nachfolgenden Tests konnte ein tieferes Verständnis der Funktionsweise des Systems gewonnen werden. Die Analyse der Simulationsergebnisse bestätigt die Wirksamkeit des gewählten Ansatzes. Es wurde jedoch festgestellt, dass bestimmte Parameter, wie etwa A_t , nur für eine Betriebstemperatur von 80°C optimiert sind. Weitere Parameter bedürfen einer Optimierung. Diese Optimierungen werden in zukünftigen Studien untersucht und die Ergebnisse für verschiedene Parametereinstellungen detailliert berichtet. Die bisherigen Erkenntnisse verdeutlichen, dass die geplante Methode zur Kühlung der Fernwärme tatsächlich umsetzbar ist.

In der nächsten Phase werden wir unsere Versuche fortsetzen, um den optimalen Betriebsbereich des Systems zu finden. Darüber hinaus muss eine Automatisierung eingerichtet werden, damit das System reibungslos funktioniert. Hierfür ist ebenfalls eine Automatisierung über Matlab-Simulink vorgesehen. Außerdem wird uns diese

Automatisierung mehr Freiheit verschaffen, da sie für Warmwasser oder Wärme genutzt werden kann, die im Tagesverlauf in wechselnden Beträgen benötigt wird.

Danksagung

Für die Förderung dieses Projekts danken wir dem Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) im Rahmen des Zentralen Innovationsprogramms Mittelstand (ZIM) unter dem Förderkennzeichen KK5309302MP1. Darüber hinaus spreche ich der EKSH meinen besonderen Dank für die maßgebliche Unterstützung dieser Dissertation aus

7. References

- [1] H. Y. Buse, M. E. Schoen, and N. J. Ashbolt, "Legionellae in engineered systems and use of quantitative microbial risk assessment to predict exposure," *Water research*, vol. 46, no. 4, pp. 921–933, 2012, doi: 10.1016/j.watres.2011.12.022.
- [2] Ö. Kacmaz, M. Wiegand, and O. Opel, "Entwicklung einer thermisch über einen Strahlverdichter angetriebenen Zirkulationserwärmungswärmepumpe zur gebäudeseitigen Rücklaufauskühlung," 1. Konferenz zur Norddeutschen Wärmeforschung, Göttingen, 2023.
- [3] H. Lund *et al.*, "4th Generation District Heating (4GDH)," *Energy*, vol. 68, pp. 1–11, 2014, doi: 10.1016/j.energy.2014.02.089.
- [4] Martin Beer, "Die Zukunft der Fernwärme. Dokumentation des Fachworkshops zum „Masterplan 100 % Klimaschutz“ am 9. Mai 2017.," Stadt Kiel, Kiel, May. 2017. [Online]. Available: kiel.de/klimaschutz
- [5] S. Varga, A. C. Oliveira, and B. Diaconu, "Analysis of a solar-assisted ejector cooling system for air conditioning," *International Journal of Low-Carbon Technologies*, vol. 4, no. 1, pp. 2–8, 2009, doi: 10.1093/ijlct/ctn001.
- [6] F. Kuebel-Heising, "Untersuchung des Stofftransports in einem n-Octan/Wasser-betriebenen Dampfstrahlverdichter zur Anwendung in der Kältetechnik," 2021.
- [7] J. H. Keenan, E. P. Neumann, and F. Lustwerk, "An investigation of ejector design by analysis and experiment," 0021-8936, 1950.
- [8] S. Varga, A. C. Oliveira, X. Ma, S. A. Omer, W. Zhang, and S. B. Riffat, "Experimental and numerical analysis of a variable area ratio steam ejector," *International Journal of Refrigeration*, vol. 34, no. 7, pp. 1668–1675, 2011, doi: 10.1016/j.ijrefrig.2010.12.020.
- [9] A. Bouhanguel, Philippe Desevaux, and E. Gavi-gnet, "Flow visualization in supersonic ejectors using laser tomography techniques," *International Journal of Refrigeration-revue Internationale Du Froid*, vol. 34, pp. 1633–1640, 2011.
- [10] Y. Bartosiewicz, Z. Aidoun, and Y. Mercadier, "Numerical assessment of ejector operation for refrigeration applications based on CFD," *Appl Therm Eng*, vol. 26, pp. 604–612, 2006.
- [11] K. Chunnanond and S. Aphornratana, "Ejectors: applications in refrigeration technology," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 8, no. 2, pp. 129–155, 2004, doi: 10.1016/j.rser.2003.10.001.
- [12] J. Gulden, Ed., *Tagungsband REGWA - 30. Energie-Symposium: Nutzung regenerativer Energiequellen und Wasserstofftechnik*. Stralsund: Hochschule Stralsund, Institut für Regenerative Energiesysteme - IRES, 2023.
- [13] *MATLAB-Simscape*: The MathWorks, Inc., 2023. [Online]. Available: <https://matlab.math-works.com/>
- [14] Bin-Juine Huang, J.M. Chang, C.P. Wang, and Vb.A. Petrenko, "A 1-D analysis of ejector performance,"
- [15] R. H. Yen *et al.*, "Performance optimization for a variable throat ejector in a solar refrigeration system," *International Journal of Refrigeration*, vol. 36, no. 5, pp. 1512–1520, 2013, doi: 10.1016/j.ijrefrig.2013.04.005.
- [16] D. A. Pounds, J. M. Dong, P. Cheng, and H. B. Ma, "Experimental investigation and theoretical analysis of an ejector refrigeration system," *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 67, pp. 200–209, 2013, doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2012.11.001.
- [17] I. Eames, S. Aphornratana, and H. Haider, "A theoretical and experimental study of a small-scale steam jet refrigerator," *International Journal of Refrigeration*, vol. 18, no. 6, pp. 378–386, 1995, doi: 10.1016/0140-7007(95)98160-M.
- [18] Ö. Kacmaz, M. Wiegand, and O. Opel, "Entwicklung einer Dampfstrahlwärmepumpe zur Trinkwarmwasserbereitung und dezentralen Rücklaufauskühlung in Wärmenetzen," in *Tagungsband REGWA - 30. Energie-Symposium: Nutzung regenerativer Energiequellen und Wasserstofftechnik*, Stralsund, 2023, pp. 81–91.

Gebäudebetriebsoptimierung mit einer BIM-basierten Heizlastberechnung für Bestandsgebäude

Malte Myrau ^{1*}, Moritz Fluch ¹, Christian Blatt ¹, Sebastian Fiedler ¹

¹ Technische Hochschule Lübeck, Fachbereich Bauwesen, Fachgruppe Nachhaltiges Planen, Bauen und Betreiben, Mönkhofer Weg 239, 23562 Lübeck, Deutschland

*Korrespondierender Erstautor. malte.myrau@gmail.com, +49 173 6125368

Kurzfassung

Ziel der vorliegenden Arbeit war es, die Normheizlast eines Bestandsgebäudes nach der DIN EN 12831 über die vorhandenen Schnittstellen der Planungs- und Simulationstools Solar Computer, mh-Software und IDA ICE (EQUA) mit Abschätzungsberechnungen anhand von Literaturdaten zu quantifizieren und damit die Modellgüte zu überprüfen. Im Sinne des open big BIM-Ansatzes wurden verschiedene Programmschnittstellen (Revit Energiemodell, gbXML und IFC) zu Planungsinstrumenten (Solar Computer, mh-Software und IDA ICE) erprobt und die Ergebnisse verglichen. Der Literaturerwartungswert nach der Baualtersklasse wurde mit ungefähr $35 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ angenommen. Die überschlägig berechnete Heizlast des Gebäudes fiel mit ca. $34 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ vergleichbar aus. Die Ergebnisse von Solar Computer betrugen ca. $37 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, mh-Software ca. $47 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ und IDA ICE lieferte $45 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. Zwischen den Planungstools gab es vor allem deutliche Unterschiede bei den Lüftungswärmeverlusten. Die Untersuchung ergab eine maximale Differenz zum Literaturwert zwölf $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ und die minimale Abweichung von zwei $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ auf. Die Ergebnisse. Am nächsten am Literaturwert lag somit Workflow 1. Die Ergebnisse werden für ganzjährige Energiesimulationen unter Einbezug von Gebäudelebensdaten (LoRaWAN-Funkmessgeräte) weiterverwendet.

Keywords – Digitaler Zwilling, thermische Anschlussleistung, TGA-Planung, Wärmenetze, Building Information Modeling (BIM), Digitalisierung, Gebäudebetriebsoptimierung

1. Einleitung

Die Transformation des Energiesystems schreitet weiter voran. Der Dekarbonisierung der Wärmeversorgung kommt dabei eine besondere Bedeutung zu, da hier der Anteil erneuerbarer Energieträger mit 17,7 Prozent (2023) noch gering ist [1]. Gerade Bestandsgebäude, welche mit einem neuen Heizwärmeerzeuger ausgestattet oder energetisch saniert werden sollen, bedürfen der erneuten Auslegungsberechnung – der Heizlastberechnung. Dies ist mit entsprechender Fachsoftware heute bereits möglich. Vor dem Hintergrund, dass die Lebenszyklusphase des Betriebes eines Gebäudes sehr lang ist, das Gebäude einer Nutzungsänderung unterworfen werden kann und die Lebenszyklusphase des Rückbaus eine nachhaltige Weiternutzung von Baumaterialien ermöglichen sollte, ist es sinnvoll, eine strukturierte Bauteildatenerfassung durchzuführen. Für diese Aufgabe bietet sich die Methode des Building Information Modeling (BIM) an. Nicht zuletzt, weil die BIM-Methode zunehmend Einfluss in Planungsprozesse erhält. Mit Hilfe eines Koordinationsmodells können weitere Analysen und Simulationen, zu einer treibhausgassparenden Betriebs-

weise führen. Weiterhin sind Komfortanalysen und damit die Identifikation einer höheren Nutzungsqualität möglich. Im Projekt "Digitale Infrastruktur für einen nachhaltigen Gebäudebetrieb" (DING) der Technischen Hochschule Lübeck werden neben digitalen Gebäude-modellen IoT-Messdaten aus dem Gebäudebetrieb erhoben. [1] [2] Um die Modellgüte zu analysieren soll in dieser Arbeit die interoperable Verwendung von Schnittstellen zu drei Berechnungstools (Solar Computer, mh BIM 7 und IDA ICE), die eine Heizlastberechnung ermöglichen, mit einem Koordinationsmodell als gemeinsame Datenbasis untersucht werden. Das Modell soll später für Untersuchungen im Bereich der Gebäudebetriebsoptimierung dienen. Im vorliegenden Papier wird zunächst die Problemstellung weiter erörtert (2. Abschnitt). In Abschnitt 3 werden die Grundlagen des Building Information Modeling sowie der Heizlastberechnung nach DIN EN 12831 erläutert. Im vierten Abschnitt 4 werden die Erstellung des digitalen Gebäudezwillings sowie die einzelnen Workflows beschrieben. Im fünften Kapitel werden die erhaltenen Berechnungsergebnisse dargelegt, welche im sechsten Kapitel diskutiert werden.

Ebenfalls wird dort auf die Komplexität der jeweiligen Workflows eingegangen.

2. Problemstellung

Die deutsche Bundesregierung hat mit ihrem Klimaschutzplan die Ziele und Ergebnisse der Pariser Klimakonferenz 2015 in nationales Recht umgesetzt. [2] [3] Das Klimaschutzgesetz wurde im Jahr 2021 noch einmal nach einem Beschluss des Bundesverfassungsgerichts verschärft: So sind bis 2030 mindestens 65 Prozent der Treibhausgasemissionen gegenüber 1990 einzusparen. Bis 2040 beträgt das Emissionsziel 88 Prozent. 2045 soll die Treibhausgasneutralität erreicht werden und nach 2050 sollen negative Treibhausgasemissionen erzielt werden. Obwohl im Jahr 2024 die erst im Jahr 2021 eingeführten Sektorenziele (u.a. Gebäude und Energiewirtschaft), in ihrer Relevanz gemindert wurden, bleibt der Emissionsreduktionspfad bis 2030 weiterhin steil. Fortan sind die aggregierten Jahresemissionsgesamtmengen über alle Sektoren hinweg entscheidend. Liegt in zwei aufeinander folgenden Jahren die Gesamtemissionsmenge über der festgelegten Zielmarke, muss die Regierung noch im selben Jahr der Verfehlung Maßnahmen beschließen, welche für eine Rückkehr auf den Zielpfad sorgen. [1]

Das Potential für die Einsparung von Treibhausgasemissionen im Gebäudesektor ist groß: Nach einer Studie des Bundesinstitutes für Bau-, - Stadt- und Raumforschung entfalle ein Drittel der nationalen Treibhausgasemissionen auf die Nutzung und den Betrieb der Wohn- und Nichtwohngebäude [2]. Daher kommt dem Gebäudebestand mit seinen 19 Millionen Wohn- und 1,98 Millionen Nichtwohngebäuden eine besondere Bedeutung zu [3]. Angesichts der langen Nutzungsdauer und großer Sanierungsintervalle von Gebäuden werden vor dem Erreichen des Jahres 2045 viele Gebäude entweder nur noch einmal energetisch saniert oder gar nicht mehr [7]. In beiden Fällen erweist sich die Nutzung digitaler Methoden, wie beispielsweise des BIM, im Rahmen der integralen Planung als vorteilhaft. Dadurch lässt sich eine Datenbasis effizient erstellen, auf deren Basis im Anschluss Betriebs- und Sanierungsmaßnahmen mithilfe von Simulationswerkzeugen abgeleitet werden können. Dies ist insbesondere im Kontext der Sanierungsplanung sowie der Energieberatung von Bedeutung. Die Voraussetzung hierfür stellt eine interoperable Datenbasis mit diversen Anwendungskontexten dar. Um perspektivisch Variantsimulationen für den Gebäudebetrieb im Hinblick auf eine gesteigerte Nutzungs- und Energieeffizienz zu untersuchen, soll in einem ersten Schritt die Heizlast des Beispielgebäudes mit verschiedenen Programmen berechnet werden, um die Modellgüte zu prüfen.

3. Grundlagen

Die beiden nachfolgenden Abschnitte führen zum einen in die Methode des Building Information Modeling ein.

Zum anderen werden die nötigen Grundlagen zur Heizlastberechnung eines Gebäudes nach DIN EN 12831 vermittelt.

3.1 Digitale Bauwerksdatenerfassung mit Building Information Modeling

Die Historie des Building Information Modeling (BIM) reicht bis in das Jahr 1974 zurück. Damals beschäftigte sich die Arbeitsgruppe von Charles Eastman an der Carnegie Mellon University in den Vereinigten Staaten mit virtuellen Gebäudemodellen. Die technischen Grundlagen wurden jedoch im Maschinenbau gelegt, wo zu dieser Zeit bereits strukturierte Produktmodelle für den Datenaustausch eingesetzt wurden. Der „Standard for the Exchange of Product Model Data“ (STEP) stellte einen implementierungsneutralen Austausch von geometriebeschreibenden Produktdaten über den kompletten Herstellungs- und Lebenszyklus eines Produktes im Maschinenbau dar. Die Standardisierung als ISO 10303 im Jahr 1994 ebnete den Weg für eine Weiterentwicklung hin zu einer objektorientierten Darstellung. Diese wurde mit Hilfe der Beschreibungssprache EXPRESS umgesetzt. Diese Grundlagen wurden im Bauwesen in den 1990er Jahren im Rahmen der Industrieallianz für Interoperabilität (IAI) formalisiert. Seit 2003 ist diese Organisation als buildingSMART bekannt, welche die Formalisierung des heute eigenständigen Produktdatenmodells Industry Foundation Classes (IFC) als ISO 16739 standardisiert und weiterentwickelt. [4] Dabei wird in verschiedene technologische Ausprägungen bei der Umsetzung der BIM-Methode unterschieden. Neben dem Arbeiten mit einem 3D-Modell in einem proprietären Dateiformat innerhalb einer Software ("little closed BIM"), wird der interoperable Informationsaustausch zwischen allen Fachdisziplinen im Rahmen aller Planungsphasen der integralen Planung sowie allen Phasen des Lebenszyklus eines Gebäudes in Form eines Koordinationsmodells als "open big BIM" bezeichnet. Weiterhin existieren Mischformen wie "closed big BIM" und "open little BIM". [5] Die ausschließliche Nutzung von BIM im Kontext der Gebäude- und Energietechnik wird als BIM2BEM (Building Information Model to Building Energy Model) bezeichnet [6].

3.2 Heizlastberechnung nach DIN EN 12831

Der Wärmebedarf eines Gebäudes kann mit standardisierten Verfahren ermittelt werden. Mit der Einführung der DIN EN 12831 im Jahr 2003 und dem dazugehörigen nationalen Anhang (Beiblatt 1) wurde die bisherige DIN 4701-1 bis -3 (Energetische Bewertung heiz- und raumlufttechnischer Anlagen) abgelöst. Weiter wurde die energetische Bewertung in die Normenreihe DIN V 18599 ausgelagert. Der bisherige Begriff "Wärmebedarf", angegebene Energie in Kilowattstunden, wurde durch die Bezeichnung Heizlast (Angabe in Watt) ersetzt. [7] Die witterungsbedingten Wärmeverluste beheizter Gebäude müssen durch Zuführen einer entspre-

chenden Wärmeleistung nachgeführt werden. Die Normgebäudeheizlast $\Phi_{HL,build}$ ist diejenige Wärmeleistung in Watt, die nötig ist, um einen bestimmten Innentemperaturzustand $\vartheta_{int,i}$ bei einer ortsabhängigen definierten Tiefsttemperatur (Normauslegungstemperatur) ϑ_e herzustellen. Dabei ist die Normheizlast die Summe der Transmissionsheizlast und der Lüftungsheizlast. Erstere dient dem Ausgleich der Wärmeverluste durch Transmission durch Umschließungsflächen und letztere dem Ausgleich der Wärmeverluste aufgrund nach außen entweichender Raumluft, bzw. eindringender aufzuheizender Außenluft. Die vollständige Berechnung wird in Gl. 1 gezeigt.

In Gl. 1 ist die Norm-Heizlast des Gebäudes $\Phi_{HL,build}$, $\sum_i \langle \Phi_{T,ie} + \Phi_{T,iae} + \Phi_{T,ig} \rangle$ die Summe der direkt oder indirekt nach außen erfolgenden Transmissionswärmeverluste für alle enthaltenen Räume (i), $\Phi_{V,build}$ die Lüftungswärmeverluste des gesamten Gebäudes, $\sum_i \langle \Phi_{hu,i} \rangle$ die Summe der Aufheizleistungen, die simultan unter Norm-Außenbedingungen auftreten, und $\sum_i \langle \Phi_{gain,i} \rangle$ die Summe der internen und externen Gewinne darstellt. Alle Größen werden in Watt aufgeführt. Die Transmissionsheizlast durch Infiltration wird anhand der Luftwechselrate (Tabellenwert nach Baualtersklasse) abgeschätzt. Alternativ kann in der Praxis ein Blower Door Test tatsächliche Luftwechselraten liefern. [7] [8]

Gl. 1,

$$\begin{aligned} \Phi_{HL,build} = & \sum_i \langle \Phi_{T,ie} + \Phi_{T,iae} + \Phi_{T,ig} \rangle \\ & + \Phi_{V,build} \\ & + \sum_i \langle \Phi_{hu,i} - \Phi_{gain,i} \rangle \end{aligned}$$

Anhand der notwendigen Berechnungsparameter können das notwendige Parameterset sämtlicher Bauteile für das Architekturmodell sowie die Berechnungsparameter für die Heizlastberechnung erstellt werden (Vgl. Abschnitt 4.1).

4. Material und Methoden

Um die Heizlastberechnung mit Hilfe der Arbeitsmethode BIM zu untersuchen, wird der Arbeitsprozess über drei verschiedene Schnittstellen nachvollzogen. Daraus resultieren drei verschiedene Workflows, deren Ergebnisse mit den Literaturwerten und dem Ergebnis einer überschlägigen Heizlastberechnung verglichen werden. Betrachtet wird außerdem, welche Anteile der Heizlast bei den drei Workflows maßgeblich für die ggf. auftretenden Differenzen bei den Ergebnissen sind. Das Ausgangsmodell ist ein Revit-Architekturmodell. Revit ist ein BIM-fähiges Planungsprogramm des amerikanischen Herstellers Autodesk, welches mit 3D-CAD-Modellen arbeitet. Es verwendet standardmäßig das proprietäre Dateiformat *.rvt, besitzt jedoch interoperable Schnittstellen. Im Rahmen der Schnittstellenuntersuchung er-

folgt eine Analyse des Datenaustausches mit den Berechnungsprogrammen und Simulationstools Solar Computer, mh BIM 7 und IDA ICE.

4.1 Erstellung des Digitalen Zwilling

Bei dem Untersuchungsgebäude handelt es sich um das Gebäude 14 der Technischen Hochschule Lübeck. Das Gebäude wurde 1970 errichtet. 2014 wurde es umfassend energetisch saniert und baulich mit dem Gebäude 15 verbunden. Das Gebäude wurde im Laufe der Zeit an der Nord-Ost und Süd-Ost Seite um einen Anbau erweitert. Es umfasst drei oberirdische Geschosse und ein Kellergeschoss. Dadurch hat das Gebäude eine Nettogrundfläche von ca. 4664 m². Durch die zahlreichen baulichen Änderungen hat sich die Informationslage über das Gebäude geändert. Allerdings gingen bei diesem Prozess viele Planungsunterlagen verloren.

In der Konsequenz wird der Versuch unternommen, die Informationslücken in Form von Material- und Bauteilkatalogen zu schließen. Häufig wird dieser Katalog auch BIM-Katalog genannt. Angesichts der Heizlastuntersuchung mit der Arbeitsmethode BIM fokussierte sich die Datenlage auf festgelegte Eingangsparameter. Für die Baukonstruktion handelt es sich um die Rohdichten ρ [kg m⁻³], spezifische Wärmespeicherkapazitäten c_p [J kg⁻¹ K⁻¹], Wärmeleitfähigkeiten λ [W m⁻¹ K⁻¹], Schichtdicken d [m]. Die Informationen über die Nutzung des Gebäudes und die technische Gebäudeausstattung belaufen sich auf die Parameter Auslegungstemperaturen θ [°C], mechanische Luftvolumenströme nach ASR 37/1 und DIN V 18599-10 V [m³ h⁻¹], hüllflächenbezogene Luftdurchlässigkeiten $q_{env,50}$ [m³ m⁻² h⁻¹], Wärmebrückenzuschläge nach DIN TS 12831-1 ΔU_{WB} [W m⁻² K⁻¹], Wirkungsgrad der Wärmerückgewinnung η [%], Nutzungsart [beheizt/unbeheizt] und der Zulufttemperatur ϑ_{zu} [°C].

Um das Koordinationsmodell zu erstellen, werden die Attribute bei der Erstellung der Bauteile einheitlich implementiert. Die Bauteil- und Materialinformationen wurden über die Familieneigenschaften der Bauteile integriert. Dafür wurden die Materialien der Familie editiert. Für die Nutzungsinformationen und die Informationen über die technischen Eigenschaften wurden die Raumfamilien des Modells um diese Eigenschaften erweitert.

4.2 Workflows

Die Workflows beschreiben den Informationstransport von Revit zu den Planungs-, Berechnungs- und Simulationstools. Für die Bewertung des Arbeitsschritts ist die Richtigkeit und Menge der übertragenen Informationen sowie die Komplexität des Schrittes von entscheidender Bedeutung.

Zunächst spielt das Dateiformat eine Rolle. Bei BIM wird unter anderem auf die beiden offenen Dateiformate Green Building eXtensible Markup Language (gbXML)

und Industry Foundation Classes (IFC) zurückgegriffen. Das gbXML-Format wurde dafür entwickelt, um den Transfer von Gebäudeinformationen zu vereinfachen und fokussiert sich auf den Transfer zwischen Gebäudedesign- und technischen Analysesoftwaretools. [9] Diese Schnittstellen werden von den Programmen IDA ICE, mh BIM 7, und Solar Computer, verwendet. Solar Computer wurde vom gleichnamigen Softwarehersteller entwickelt, um Berechnungen zur technischen Gebäudeausrüstung (TGA) und Energieeffizienz durchzuführen und greift neben den genannten Schnittstellen auf eine weitere Art der Datenübertragung zurück. Die Informationen werden über ein Plug-in von Revit (Revit Energiemodell) zu Solar Computer übertragen. Dieser Transferprozess ist in der Abbildung 1 als Workflow 1 bezeichnet.

Beim Workflow 2 wird mh BIM 7, ebenfalls eine Software, die auf die Planung der technischen Gebäudeausrüstung ausgerichtet ist, in Kombination mit der gbXML-Schnittstelle des Programms untersucht. Der Transfer von Revit zu mh BIM 7 über eine gbXML-Datei ist in der Abbildung 1 als Workflow 2 abgebildet.

Workflow 3 verwendet IDA ICE. Die Abkürzung steht für Indoor Climate and Energy und befasst sich mit Simulationen der sogenannten Gebäudeperformance, was unter anderem den Endenergieverbrauch oder die Heizlast umfasst. In diesem Fall wird auf die IFC-Schnittstelle zurückgegriffen. [10] Simplebim prüft die IFC-Datei während des Transportprozesses, welcher als Workflow 3 in der Abbildung 1 abgebildet ist [11]. Dieser Transferprozess von Revit zu Solar Computer wird von dem ersten Workflow erfasst. Solar Computer kann über die etablierte Verbindung auf die Informationen des Revit-Modells zurückgreifen, ohne ein eigenes Modell zu erstellen. Für die Informationen wird das Energie-Modell von Revit verwendet.

Das Revit-Gebäudemodell wird durch den Bauteilkatalog ergänzt. Dadurch wird jeder Wandtyp, Boden- bzw. Deckentyp, Fenster- und Türentyp implementiert. In einem Mapping-Prozess werden die Bauteile aus dem Bauteilprogramm B02 mit dem Heizlastprogramm von Solar Computer zugeordnet. Die Nutzungsinformationen, welche in eigenen Raum- und Bauteilparametern gespeichert werden, lassen sich nun in die Maske von Solar Computer übertragen. Zu den Nutzungsinformationen zählen beispielsweise die Auslegungssinnentemperatur oder der Luftvolumenstrom der mechanischen Lüftung.

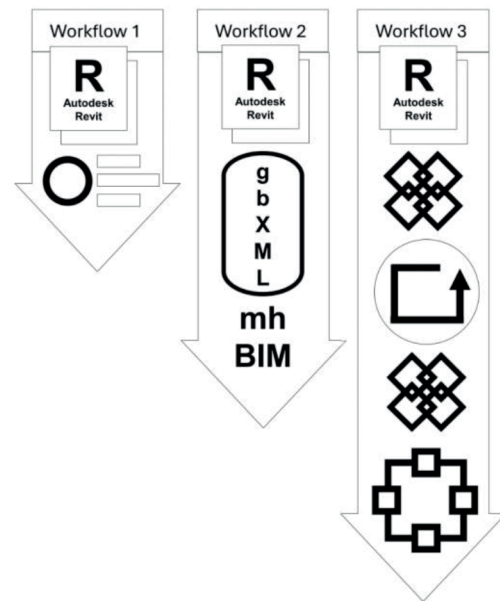


Abbildung 1: Schematische Darstellung der drei Workflows.

Da die Übertragungsart keinen Datelexport oder -import erfordert, müssen erforderliche Anpassungen für die Berechnungen über Autodesk Revit realisiert werden. Dabei empfiehlt es sich, eine weitere Version des Basis-Revit-Modells zu erstellen, da die Anpassungen erheblichen Einfluss auf die Struktur des Modells haben können.

Bei dem Übergabeprozess des zweiten Workflows stellt die gbXML-Datei die einzige Verbindung zwischen den Programmen dar. Die Datengrundlage dieser Datei ist ebenfalls das Energie-Modell von Autodesk Revit. Neben den CAD-basierten Gebäudegeometrien werden auch Bauteilinformationen übergeben. Diese gilt es anhand des BIM-Bauteilkatalogs zu prüfen. Zusätzlich werden die Materialeigenschaften mit dem Katalog abgeglichen. Die Nutzungsinformationen des Gebäudes werden nicht an das Programm übergeben. Bevor die Bauteil- und Nutzungsinformationen implementiert werden, erstellt mh BIM 7 ein programminternes Gebäudemodell. Für die Erstellung des Modells muss dieses um Informationen der Geschosshöhen ergänzt werden. In einem weiteren Schritt kann das Modell auf Fehler in der Konstruktion und Zuordnung der Bauteile geprüft werden.

Bei dem Export der IFC-Datei im Kontext des dritten Workflows wird die Model View Definition (MVD) IFC 2x3 Coordination View 2.0 verwendet. Im Weiteren wird die Mapping Table angepasst. So wird sichergestellt, dass die Revit-Bauteile den richtigen IFC-Klassen zugeordnet werden. Im Anschluss werden die Klassenzuordnungen der Export-IFC-Datei mit Hilfe der Software Simplebim auf Kompatibilität zu IDA ICE geprüft. Mit dem Import der Datei werden die Geometrien und die Bauteilkennung an IDA ICE übergeben. Um das Modell zu vervollständigen, wird der Ressourcencontainer angepasst. Wie auch bei den anderen Workflows sind die

Bauteilinformationen und die Nutzungsinformationen dort zu implementieren. Durch ein Mapping-Verfahren wird der Ressourcencontainer mit dem Modell verknüpft. Ähnlich wie mh BIM 7 erzeugt auch IDA ICE ein programminternes CAD-Modell des Gebäudes. Da bei der Übertragung trotz der Prüfung durch Simplebim Fehler auftreten können, ist es von entscheidender Bedeutung, dass das Modell einer Sichtprüfung unterzogen wird.

5. Ergebnisse

Um die Auswertung der Berechnungsergebnisse der spezifischen Heizlast besser nachvollziehen zu können, werden diese anhand eines Literaturwertes und einer überschlägig berechneten Heizlast verglichen. Der Literaturwert wurde anhand der Baualtersklasse bestimmt und beträgt aufgrund der energetischen Sanierung $35 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ [12]. Für die überschlägig berechnete Heizlast wurde nachfolgende Formel aus Gl. 2 für das gesamte Gebäude verwendet [13].

$$\phi_{HL,Geb} = (U_m \cdot A + 0,34 \cdot V \cdot n_{Geb}) \cdot (\theta_{int} - \theta_e) \quad \text{Gl. 2,}$$

mit: $\phi_{HL,Geb}$ für die Gebäudeheizlast in Watt, U_m für den Gesamtwärmeübergangskoeffizienten des Gebäudes in $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}$, A für die thermische Hüllfläche in m^2 , V für das Nettovolumen des Gebäudes in m^3 , n_{Geb} als Anhaltswert für den stündlichen Luftwechsel des Gebäudes in h^{-1} sowie θ_{int} für die mittlere Rauminnentemperatur sowie θ_e für die Normaußentemperatur für den Standort des Gebäudes, jeweils in $^{\circ}\text{C}$.

Diese überschlägige Berechnung ergibt für das Gebäude einen Wert von $34 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. Solar Computer gibt eine spezifische Heizlast von $37 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ aus. Dieser Wert weicht am geringsten von den Kontrollwerten ab. Die Differenz beträgt zwei bzw. drei $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ zu dem Literaturwert und dem überschlägig berechneten Wert. mh BIM 7 berechnet $47 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ für die spezifische Heizlast. Damit liefert das Programm den höchsten Wert der Versuchsreihe. Dieser weicht zehn $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ von dem durch Solar Computer errechneten Wert ab, $13 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ von dem überschlägig berechneten Wert und zwölf $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ von dem Literaturwert. Der Wert von IDA ICE ähnelt dem Wert von mh BIM 7. Das Ergebnis beträgt $45 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. Somit übersteigt das Ergebnis die überschlägige Berechnung um elf $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ und den Literaturwert um zehn $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$.

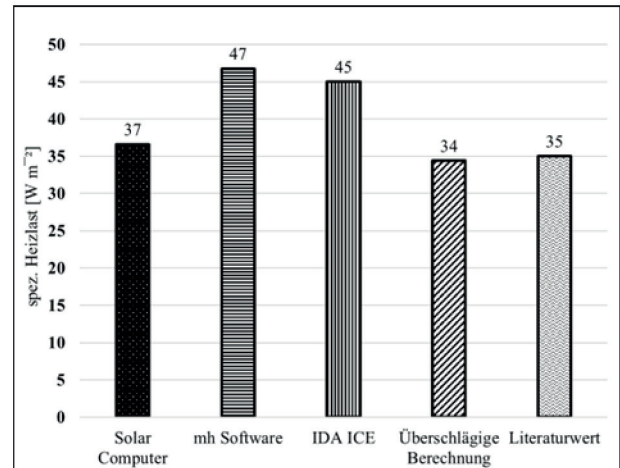


Abbildung 2: Berechnete und recherchierte spezifische Heizlasten des Beispielgebäudes.

Bei Betrachtung der Zusammensetzung der Heizlast sind Unterschiede erkennbar. Dafür werden die Berechnungsergebnisse von Solar Computer und mh BIM 7 in Kategorien von Wärmeverlusten verglichen (Tabelle 1). Die von IDA ICE vorgenommenen Kategorisierungen der Wärmeverluste weist keine Vergleichbarkeit mit den Kategorien der anderen Tools auf. Für eine bessere Vergleichbarkeit werden die prozentualen Anteile der Kategorie an der Heizlast betrachtet. Es ist erkenntlich, dass die relativen Anteile der Transmissionswärmeverluste an das Erdreich und an die Außenluft vergleichbar sind und kaum voneinander abweichen. Das gilt auch für die absoluten Werte der Transmissionswärmeverluste. Die größten relativen Unterschiede weisen die Ergebnisse in der Kategorie Technischer Volumenstrom auf. Die Werte differieren um 17 Prozent. In der Kategorie Transmissionswärmeverluste an unbeheizte/beheizte Räume beträgt die Differenz 15 Prozent. Auch in der Kategorie Undichtigkeiten und Außenluftdurchlässe ist ein prozentualer Unterschied der Wärmeverluste zu verzeichnen. Dieser beträgt 8 Prozent.

Tab. 1: Vergleichende Betrachtung der Lüftungs- und Transmissionswärmeverluste nach der Berechnung durch Solar Computer und mh BIM 7.

Kategorie [kW] ([%])	Solar Computer	mh BIM 7
Undichtigkeiten und Außenluftdurchlässe	21,3 (13)	35,3 (21)
Technischer Volumenstrom	31,8 (19)	60,9 (36)
Transmissionswärmeverluste an Außenluft	80,3 (47)	80,1 (47)
Transmissionswärmeverluste an Erdreich	4,2 (2)	4,2 (2)
Transmissionswärmeverluste an unbeheizte/beheizte Räume	31,5 (19)	57,4 (34)

6. Diskussion

Die unterschiedlichen Arten des Informationstransfers haben zur Folge, dass jeder Workflow vor anderen praktischen Herausforderungen steht. So ist der Datenaustausch des ersten Workflows über das Solar Computer Plug-in am schnellsten. Durch die direkte Verbindung der Programme muss keine Exportdatei erstellt werden, die in das Programm importiert werden muss. Durch die Integration der Solar Computer-Parameter in das Revit-Modell können die Informationen gebündelt übergeben werden. Der Übergabeprozess der Informationen über die gbXML-Schnittstelle bedarf eines höheren zeitlichen Aufwandes. Allerdings ist keine Vorbereitung in Form einer MVD nötig. Das Dateiformat nimmt die Selektion der zu übertragenden Daten selber vor. Da bei diesem Vorgang nicht alle Daten übernommen werden, ist der Import mit einer aufwändigeren Nachbearbeitung verbunden. Die erforderlichen Eintragungen sind in Bezug auf den Aufwand mit den Eintragungen von IDA ICE zu vergleichen. Der dritte Workflow, für welchen eine IFC-Datei verwendet wird, hat bezüglich des Datentransfers den größten Aufwand. Das ist mit der Vorbereitung der Transferdatei zu begründen, welche mit der Wahl der MVD und der Anpassung der Mapping-Table am zeitintensivsten ist.

Neben dem Datenaustausch gibt es drei weitere Arbeitsschritte. Dazu gehören die Fehlerbehebung des Berechnungsmodells, die Implementierung der Bauteil- und Nutzungsinformationen und schließlich die Datenauswertung. An dieser Stelle ist zu betonen, dass bei IDA ICE andere Eingabedaten nötig sind, da es sich nicht um eine reine additive Heizlastberechnung nach DIN EN 12831 handelt, sondern um die Simulation eines Tages unter Auslegungsbedingungen (Tabelle 2). [14] Der Bearbeitungsschritt der Fehlerbehebung hingegen ist je nach Komplexität und Größe des Modells der aufwändigste. Diesbezüglich hat der erste Workflow aufgrund der simultanen Arbeitsweise die größten Nachteile. Fehlerhaft implementierte Bauteile werden im Energiemodell von Revit dargestellt, dadurch ist die Darstellung oft ungenau. Hinzu kommt die Ladezeit, wenn beide Programme miteinander interagieren. Durch die Erstellung eines eigenen CAD-Modells profitieren mh BIM 7 und IDA ICE von einer reduzierten, übersichtlichen Darstellung des Modells. Zudem ist das Modell einfacher zu editieren, da Änderungen beziehungsweise Fehlerbehebungen programmintern getätigt werden können.

Bei Betrachtung der Berechnungsergebnisse der Heizlast sind Differenzen zwischen den berechneten Werten von Solar Computer und den anderen Berechnungsprogrammen zu beobachten, obwohl mh Software und Solar Computer auf der Norm DIN EN 12831 basieren. Dabei fällt auf, dass der Wert von Solar Computer am ehesten dem Literaturwert und dem überschlägig berechneten Wert entspricht. Zudem zeigt sich, dass die Berechnungsprogramme mh BIM 7 und IDA ICE ähnliche

Werte liefern. Diese weichen jedoch stärker von den Erwartungswerten ab. Dies kann bei Auslegungen für die Praxis dazu führen, dass eine zu hohe Anschlussleistung berechnet wird und Wärmeerzeuger überdimensioniert werden. Bei genauerer Betrachtung der Wärmeverluste von Solar Computer und mh BIM 7 ist anzumerken, dass einige Kategorien gibt, die kaum voneinander abweichen. Dabei handelt es sich um die Transmissionswärmeverluste an das Erdreich und an die Außenluft. Somit liegt die Differenz der Berechnungsergebnisse bei den Kategorien der Lüftungswärmeverluste und den Wärmeverlusten an andere Räume. Letzteres ließe sich mit dem entstandenen Split-Level-Aufbau des Gebäudes in Verbindung bringen. Dabei würde die übertragene Wärme des Hauptgebäudes an die Anbauten nicht berücksichtigt und als Verluste angesehen werden. Demnach würde die Heizlast diese Verluste kompensieren. Ob dieser Sachverhalt mit einer mangelnden Modellgüte, einer fehlerhaften Datenübertragung oder –Auswertung liegt, können nachfolgende Untersuchungen mit anderen Forschungsobjekten zeigen.

Tab. 2: Vor- und Nachteile der untersuchten Workflows im Anwendungskontext.

	Vorteile	Nachteile
Workflow 1	schneller Datenaustausch; Keine Exportdatei, keine MVD nötig	Anpassungen nur über Originalmodell in Revit möglich
Workflow 2	Keine MVD nötig, moderater Aufwand	Splitlevel-Geschosse erzeugen Mehraufwand
Workflow 3	Ermöglicht direkt weitere bauphysikalischen Analysen, durch IFC interoperabel	Hoher Aufwand; Nicht DIN EN 12831 konforme Berechnung

Für das Projekt DING bietet sich die Nutzung des IDA ICE Modells an, da die angestrebte Zielanwendung erreicht wird, wodurch weiterführende thermische Simulationen möglich sind.

7. Zusammenfassung

Im Zuge der Energiewende ist die Steigerung der Energieeffizienz und die Umstellung auf erneuerbare Energien unerlässlich. Der Gebäudebestand birgt auf Grund langer Nutzungszyklen und einer in der Vergangenheit zögerlichen energetischen Sanierung ein besonders hohes Effizienzpotential. Um den Gebäudebetrieb zu optimieren kann die Nutzung von digitalen Methoden eingesetzt werden, um den steilen Transformationspfad bis 2030 zu unterstützen. Bevor Energieverbrauchssimulationen angestellt werden können, müssen digitale Gebäudemodelle auf ihre Plausibilität hin überprüft werden. Zu diesem Zweck liefert der Vergleich der Heizlastberechnungen

nung mit drei unterschiedlichen professionellen Softwaretools einen ersten Einblick. Je nach untersuchter Schnittstelle differiert der Aufwand den Informationsfluss zwischen Koordinationsmodell und Softwareumgebung herzustellen. Die berechneten spezifischen Heizlasten wichen maximal zu 27 Prozent voneinander ab. Dabei fällt auf, dass die Abweichung bei den Transmissionswärmeverlusten gering ausfiel, es jedoch große Unterschiede bei den berechneten Lüftungswärmeverlusten gab. Dieser Umstand muss näher untersucht werden, bevor das Koordinationsmodell einer Energieverbrauchssimulation mit Hilfe von IoT-Messgeräten unterzogen wird.

8. Literaturverzeichnis

- [1] S. Fiedler, W. Sharmak und M. Myrau, „Digitale Infrastruktur für einen nachhaltigen Gebäudebetrieb (DING)“, *Lützkendorf, Jarmer et al. Januar 2022 – Nachhaltigkeit im Bauwesen*, p. 26–27.
- [2] M. Myrau, S. Fiedler und W. Sharmak, „Betriebliche Effizienz in Bestandsgebäuden mit Hilfe von digitalen Zwillingen: Infrastrukturvorbereitungen und Herausforderungen“, HAWK Hochschule für angewandte Wissenschaft und Kunst, Göttingen, Germany, 2023.
- [3] Umweltbundesamt, „Treibhausgasminderungsziele Deutschlands“, 16 August 2024. [Online]. Available: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/treibhausgasminderungsziele-deutschlands#internationale-vereinbarungen-weisen-den-weg>. [Zugriff am 28.10.2024].
- [4] Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung, „Umweltfußabdruck von Gebäuden in Deutschland. Kurzstudie zu sektorübergreifenden Wirkungen des Handlungsfelds „Errichtung und Nutzung von Hochbauten“ auf Klima und Umwelt“, Bonn, 2020.
- [5] Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), „dena-Gebäudereport 2023. Zahlen, Daten, Fakten zum Klimaschutz im Gebäudebestand“, dena, Berlin, 2022.
- [6] C. van Treeck, R. Elixmann, K. Rudat, S. Hiller, S. Herkel und M. Berger, *Gebäude. Technik. Digital - Building Information Modeling*, Berlin; Heidelberg: Springer Vieweg, 2016.
- [7] C. van Treeck, E. Fichter, S. Weck-Ponten, J. Siwiecki und A. Nouri, „BIM für die Energiebedarfsermittlung und Gebäudesimulation“, in *Building information modeling. Technologische Grundlagen und industrielle Praxis*, Wiesbaden, Springer Vieweg, 2021, p. 427–441.
- [8] L. C. Tagliabuea, S. Maltese, F. R. Cecconi, A. L. C. Ciribini und E. De Angelis, „BIM-based interoperable workflow for energy improvement of school buildings over the life cycle“, in *35th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC 2018)*, Berlin, Germany, 2018.
- [9] T. Laasch und E. Laasch, *Haustechnik. Grundlagen - Planung - Ausführung*, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2013.
- [10] D. Böhne, *Gebäudetechnik und technischer Ausbau von Gebäuden*, Wiesbaden, Germany: Springer Vieweg, 2022.
- [11] Green Building XML (gbXML) Schema, Inc., „About gbXML. Some background info and the organizations involved“, 2024. [Online]. Available: https://www.gbxml.org/About_Green-BuildingXML_gbXML. [Zugriff am 29. Oktober 2024].
- [12] EQUA Solution AG, „IDA Indoor Climate and Energy. Das Simulations- und Planungstool der nächsten Generation“, 2024. [Online]. Available: <https://www.equa.se/images/building/IDA-ICE---Experte.pdf>. [Zugriff am 29. Oktober 2024].
- [13] Datacubist Oy, „Simplebim. Key Highlights“, 2024. [Online]. Available: <https://simplebim.com/desktop/#key-highlights>. [Zugriff am 29. Oktober 2024].
- [14] R. Anderer, *Tabellenbuch SHK für die Erstausbildung*, Köln, Germany: Westermann, 2022.
- [15] W. Pistohl, C. Rechenauer und B. Scheuerer, *Handbuch der Gebäudetechnik - Planungsgrundlagen und Beispiele*, Köln, Germany: Reguvis Fachmedien, 2023.
- [16] A. Community, „Gelöst: Revit Heizlastberechnung - Autodesk Community - International Forums“, 2024. [Online]. Available: <https://forums.autodesk.com/t5/revit-bim-360-deutsch/revit-heizlastberechnung/td-p/7567811>. [Zugriff am 29. Oktober 2024].
- [17] T. Lützkendorf, T. Jarmer, P.-G. Frank, M. Westermann und N. Wilezich, „Nachhaltigkeit im Bauwesen. 683. Baugespräch“, *Mitteilungsblatt / Arbeitsgemeinschaft für Zeitgemäßes Bauen e.V., Kiel*, Januar 2022.

Effizienzsteigerung von Photovoltaik-Modulen durch Kombination mit Solarthermie-Modulen

Thorsten Völker

Hochschule Bremen, Neustadtswall 30, 28199 Bremen
thorsten.voelker@hs-bremen.de

Kurzfassung

Die Erzeugung elektrischer Energie in Photovoltaik-Modulen ist ein wichtiger Bestandteil des Strommixes in Deutschland. Der elektrische Wirkungsgrad von am Markt erhältlichen Modulen beträgt zurzeit unter 25 % aber kann durch die gleichzeitige Nutzung der Wärme aus demselben Modul gesteigert werden, wenn diese dadurch gekühlt werden. In diesem Paper werden zwei verschiedene sogenannte PVT-Module untersucht, die eine Kombination aus Photovoltaik und Solarthermie darstellen. Durch die Kombination Photovoltaik und Solarthermie kann zum einen neben dem Strom noch zusätzlich Wärme erzeugt werden und außerdem der Ertrag an elektrischer Energie gesteigert werden. Dies wird anhand zweier unterschiedlicher PVT-Module durch Messungen bestätigt, indem die zwei PVT-Module bei parallelen Messungen jeweils mit und ohne Nutzung der Wärme verglichen werden. Der elektrische Wirkungsgrad der PVT-Module steigt dabei um 16,0 % bzw. 16,5 %. Der Gesamtwirkungsgrad der PVT-Module steigt bei zusätzlicher Nutzung der Wärme sogar von 14,5 % auf 67,5 %; das entspricht einer Steigerung von fast 370 %.

Schlagworte

Photovoltaik, Solarthermie, Wärmepumpe, Effizienz, Sonnenenergie, PVT-Module

1 Einleitung

Die Energiewende ist in Deutschland und auch in vielen anderen Ländern der Erde in vollem Gang. Dabei zeigt sich immer wieder, dass die Sektoren Strom und Wärme nicht getrennt voneinander betrachtet werden sollten [3]. In diesem Paper soll untersucht werden, ob hier Synergien zwischen dem Strom- und Wärmesektor erzielt werden können. Hierfür wird die Kombination aus Photovoltaik und Solarthermie untersucht, um den maximalen Energieertrag aus der Sonne zu erzielen.

Bei einer gemeinsamen Betrachtung der Strom- und Wärmenutzung lassen sich zum Teil große Energieeinsparungen erzielen. Im Rahmen der Arbeit werden die im folgenden beschriebenen kombinierten Photovoltaik-Solarthermie-Module untersucht. Der Hauptaspekt der Arbeit liegt dabei in der möglichen Ertragssteigerung der Elektrischen Energie durch die Nutzung der Solarthermie und damit verbundenen Kühlung der Photovoltaik-Module. Es wird dazu ein Messaufbau vorgestellt und die Ergebnisse präsentiert.

2 Material und Methoden

In diesem Paper werden Solar-Module untersucht, die eine Kombination aus Photovoltaik-Modulen zur Stromerzeugung und Solarthermie-Modulen zur Gewinnung

von Wärme darstellen. Diese Module werden Photovoltaik-Thermie-Module (PVT-Module) genannt. Sie bestehen aus den Photovoltaik-Zellen auf der Vorderseite und einem Thermie-Modul auf der Rückseite (siehe Abbildung 1).

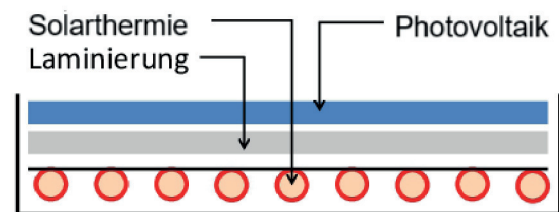


Abbildung 1: Aufbau eines kombinierten Photovoltaik-Solarthermie Moduls (PVT-Modul) (angelehnt an [1])

Durch die Nutzung der Wärme wird das Photovoltaik-Modul gekühlt und der elektrische Wirkungsgrad des Photovoltaik-Teils steigt. Die Temperatur der PV-Module erreicht bei Sonneneinstrahlung schnell Werte von über 75 °C. Die Leerlaufspannung V_{OC} einer Si-Solarzelle verringert sich um ca. 2,3 mV pro Kelvin, dies entspricht einem Temperaturkoeffizienten von ca. $-0,4\%$ pro Kelvin. [4] Wenn es gelingt, die Temperatur der Module auf 25 °C herunter zu kühlen, erhöht sich der Ertrag an elektrischer Energie der Photovoltaikmodule um bis zu 20 %.

In der folgenden Abb. 2 ist ein System für die gleichzeitige Nutzung von Strom und Wärme in einem Modul (PVT-Modul) zu sehen.

In dem PVT-Modul wird bei Sonneneinstrahlung elektrische Energie erzeugt, die über einen Photovoltaik-Wechselrichter in das elektrische Netz eingespeist wird und so den elektrischen Verbrauchern zur Verfügung steht.

Gleichzeitig wird in dem solarthermischen Teil Wärme gewonnen, die z. B. für die Warmwasserbereitung genutzt werden kann. (siehe Abbildung 2).

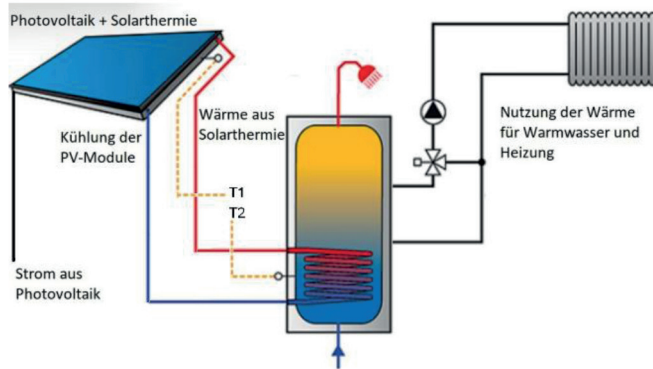


Abbildung 2: Konzept der Wärmeversorgung mit PVT-Modulen und Wärmepumpe

Die Temperatur der Nutzwärme aus dem solarthermischen Teil kann außerdem noch über eine Wärmepumpe angehoben werden. Dadurch kann die thermische Energie gerade im Frühjahr und Herbst besser genutzt werden, da in diesen Jahreszeiten noch ausreichend elektrische Energie für die Wärmepumpe zur Verfügung steht jedoch die geringen Außentemperaturen eine direkte Nutzung der Solarthermie kaum möglich machen.

Durch die Nutzung der Wärme wird der Photovoltaik-Teil des PVT-Moduls abgekühlt und der elektrische Ertrag gesteigert. Der Grund dafür ist die Temperaturabhängigkeit des elektrischen Ertrags der Photovoltaik-Module. Diese Abhängigkeit ist in der folgenden Abbildung 3 zu sehen.

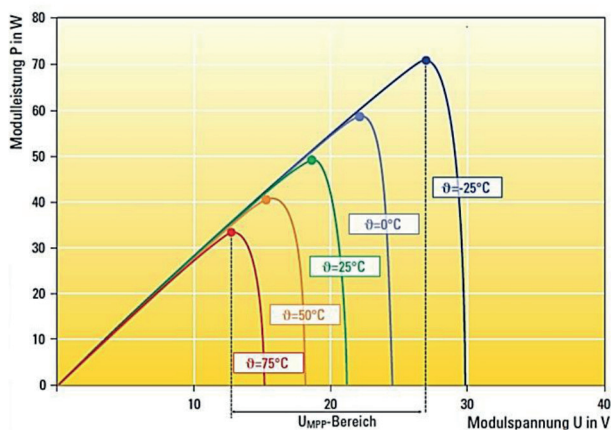


Abbildung 3: Temperaturabhängige Leistung von Photovoltaik-Modulen [2]

Die Photovoltaik-Module, die auf Silizium basieren, haben einen negativen Temperaturkoeffizienten zwischen -0,3 % und -0,5 % pro Kelvin.

Das bedeutet, dass der elektrische Ertrag der Photovoltaik-Module um 0,3 % bis 0,5 % pro Grad Celsius Erwärmung sinkt.

Die Reduzierung des Wirkungsgrades der Photovoltaik-Module bei steigender Temperatur hat mehrere Ursachen.

Mit steigender Temperatur verringert sich die Bandlücke des Halbleitermaterials. Dadurch erhöht sich die Wahrscheinlichkeit der Rekombination von Elektronen mit Löchern und eine reduzierte Effizienz des Photovoltaik-Moduls ist die Folge.

Eine weitere Ursache ist, dass hohe Temperaturen mehr freie Ladungsträger in dem Halbleitermaterial generieren. Auch dadurch kommt es zu einer verstärkten Rekombination und einem Nettoverlust der elektrischen Leistung.

Die erhöhte Temperatur führt außerdem zu einer Abnahme der Beweglichkeit der Ladungsträger. Dadurch entsteht eine Erhöhung des internen Widerstands der Zelle und die Spannung sowie die Gesamtleistung werden reduziert.

Die Kombination von Photovoltaik und Solarthermie in den PVT-Modulen hat also einen doppelten Nutzen:

- zusätzliche Gewinnung von Wärme
- gesteigerter Ertrag an elektrischer Energie

Es entsteht dadurch eine wesentlich verbesserte Ausnutzung derselben Fläche, die alternativ ein reines Photovoltaik-Modul ohne thermischer Energiegewinnung in Anspruch nimmt.

2.1 Prüfstand

Die Ergebnisse wurden anhand mehrerer Messungen mit unterschiedlichen PVT-Modulen verifiziert. Die elektrische Energie wird über eine elektronische Last gemessen. Die elektronische Last (Höcherl & Hackl PLI2106) ist in der Lage die gesamte Kennlinie des Photovoltaik-Teils zu messen oder über einen MPP-Tracker (Maximum Power Point – Tracker) die maximale Leistung zu bestimmen.

Der Standort des Prüfstands ist auf dem Dach der Hochschule Bremen mit einer südwestlichen Ausrichtung. Die Module sind in einem Winkel von 45° aufgeständert. Die Messungen wurden am 23.08.2023 durchgeführt.

Ein schematischer Aufbau des Prüfstands ist in der folgenden Abbildung 4 zu sehen.

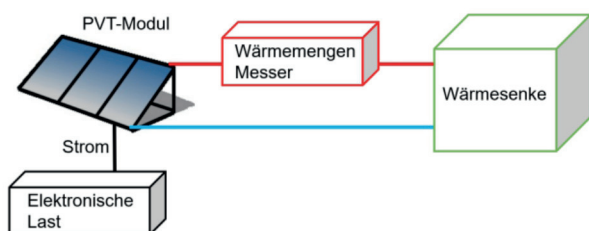


Abbildung 4: Schematische Aufbau des Prüfstands [eigene Darstellung]

Die dem PVT-Modul entnommene Wärme wird über einen Wärmemengenzähler (Zenner zelsius® C5-ISF) mit einer Auflösung von 0,1 W gemessen. Das Medium wird dann in einer Wärmesenke (Begleitzähler Nasskühler BGL 60) abgekühlt.

Die PVT-Module sind auf dem Dach der Hochschule Bremen in südlicher Ausrichtung platziert und in einem Winkel von 30° aufgeständert (siehe Abbildung 5).



Abbildung 5: PVT-Prüfstand der Hochschule Bremen mit dem PVT-Modul 1



Abbildung 6: Rückansicht des PVT-Modul 1

In diesem Paper werden zwei unterschiedliche PVT-Module untersucht.

In Abbildung 5 und Abbildung 6 ist das PVT-Modul 1 zu sehen. Das Modul hat die technischen Daten wie in Tabelle 1 zu sehen. Es handelt sich um ein Modul, das auf einem üblichen Photovoltaik-Modul basiert und mit Kupferleitungen für den thermischen Teil auf der Rückseite des Photovoltaik-Teil erweitert wurde. Dieses PVT-Modul ist ein kommerzielles Produkt. Die Leitungen halten einem Druck von bis zu 10 bar stand und sind auf der Rückseite thermisch isoliert.

Tabelle 1: Daten des PVT-Moduls 1

PVT-Modul 1	
Elektr. Leistung PMPP	310 W
Maße	164 cm x 99 cm
Max. Betriebsdruck	10 bar
P _{Thermisch}	Keine Angaben

Außerdem wurde das PVT-Modul 2 untersucht, das speziell als PVT-Modul entwickelt wurde (siehe Abbildung 7). Es ist wesentlich kleiner als übliche Photovoltaik-Module und besitzt ein Kunststoff-Gehäuse, das so konstruiert ist, dass der Photovoltaik-Teil direkt von dem Kühlmedium überströmt wird.

Laut Herstellerangaben hält das Modul nur einen Druck von maximal 1 bar stand. Die Module können in einander gesteckt werden, so dass der thermische Teil zwischen den einzelnen Modulen automatisch verbunden ist.

Die Daten des PVT-Moduls 2 sind in der Tabelle 2 Tabelle 4 zu sehen.



Abbildung 7: PVT-Modul 2, Einzelansicht (links) und 3 Module angeschlossen (rechts)

Tabelle 2: Daten des PVT-Moduls 2

PVT-Modul 2	
Elektr. Leistung PMPP	40 W
Maße	38 cm x 56 cm
Max. Betriebsdruck	1 bar
$P_{\text{Thermisch}}$	95 W

Der elektrische Kreis der PVT-Module wurde an eine elektronische Last der Firma Höcherl & Hackl angeschlossen. Diese Elektronische Last besitzt einen integrierten MPP-Tracker. Der Thermische Kreis der PVT-Module ist über einen Wärmemengenmesser der Firma Zenner zelsius an die Wärmesenke (Nasskühler BGL 60) angeschlossen.

3 Ergebnisse

Im Folgenden werden die Messergebnisse der beiden untersuchten PVT-Module dargestellt.

Es wurden immer zwei identische Aufbauten gemessen, von denen die eine Anordnung an den thermischen Kreis angeschlossen wurde und die andere nicht. Somit konnte die Messung des PVT-Moduls mit einem Referenzmodul ohne den thermischen Kreis bzw. ohne Kühlung verglichen werden.

3.1 Messergebnisse PVT-Modul 1

Im Folgenden zeigt die Abbildung 8 die Messung der Kennlinie des PVT-Moduls 1 ohne Kühlung und die Abbildung 9 die Messung der Kennlinie des PVT-Moduls 1 mit Kühlung.

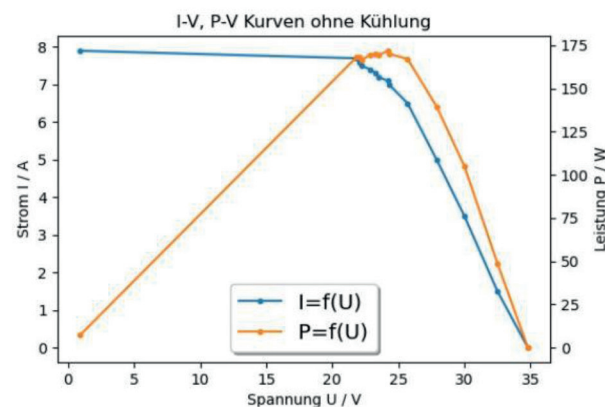


Abbildung 8: Messung PVT-Modul 1 ohne Kühlung

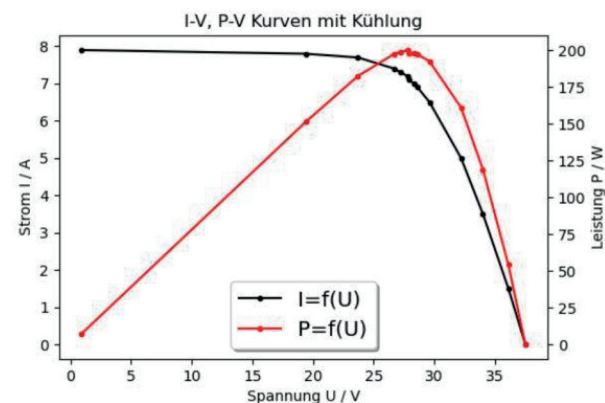


Abbildung 9: Messung PVT-Modul 1 mit Kühlung

Beim Vergleich der Kennlinien in Abbildung 8 und Abbildung 9 ist zu erkennen, dass besonders die Leerlaufspannung (V_{OC}) der Kennlinien einen deutlichen Unterschied aufweist. Die Leerlaufspannung ist mit der Kühlung um knapp 8% höher. Der Kurzschlussstrom (I_{SC}), der fast ausschließlich von der Intensität der Sonneneinstrahlung und nicht von der Temperatur abhängt, zeigt hier keinen Unterschied mit jeweils 7,9 A. Die folgende Tabelle 3 zeigt die Zusammenfassung der Messergebnisse des PVT-Moduls 1.

Tabelle 3: Messergebnisse PVT-Modul 1

	Ohne Kühlung	Mit Kühlung
P_{MPP} [W]	171,82	200,2
V_{MPP} [V]	24,2	27,8
I_{MPP} [A]	7,1	7,2
V_{OC} [V]	34,8	37,5
I_{SC} [A]	7,9	7,9

Im Punkt der maximalen Leistung (P_{MPP} , mit der Spannung V_{MPP} und dem Strom I_{MPP}) ist hier eine Leistungssteigerung von 171,8 W auf 200,2 W zu erkennen. Dies

entspricht einer Steigerung um 16,5 %. V_{MPP} und I_{MPP} zeigen die Spannung und den Strom im Punkt der maximalen Leistung.

3.2 Messergebnisse PVT-Modul 2

Im Folgenden zeigt die Abbildung 10 Abbildung 8 die Messung der Kennlinie des PVT-Moduls 2 ohne Kühlung und die Abbildung 11 die Messung der Kennlinie des PVT-Moduls 2 mit Kühlung.

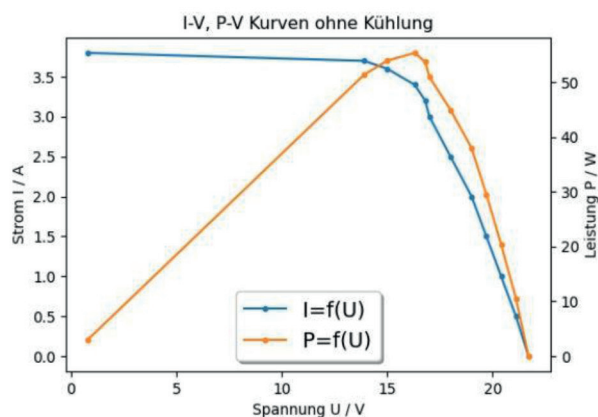


Abbildung 10: Messung PVT-Modul 2 ohne Kühlung

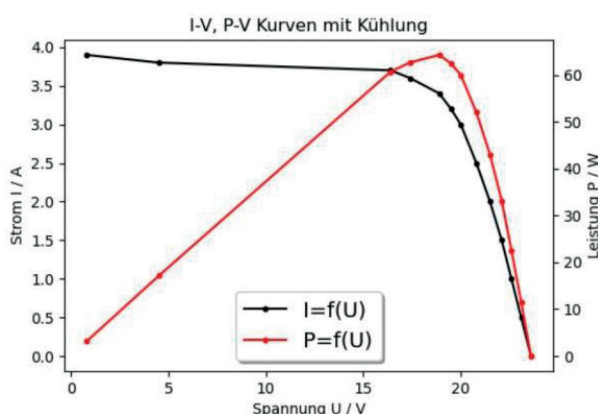


Abbildung 11: Messung PVT-Modul 2 mit Kühlung

Beim Vergleich der Kennlinien in Abbildung 10 und Abbildung 11 Abbildung 9 ist zu erkennen, dass auch hier die Leerlaufspannung (V_{OC}) der Kennlinien einen Unterschied aufweist. Der Kurzschlussstrom (I_{SC}), der fast ausschließlich von der Intensität der Sonneneinstrahlung und nicht von der Temperatur abhängt, zeigt hier keinen Unterschied. Zusätzlich gibt es einen minimalen Unterschied beim Kurzschlussstrom. Die folgende Tabelle 4 zeigt die Zusammenfassung der Messergebnisse des PVT-Moduls 2.

Tabelle 4: Messergebnisse PVT-Modul 2

	Ohne Kühlung	Mit Kühlung
P_{MPP} [W]	55,42	64,26
V_{MPP} [V]	16,3	18,9
I_{MPP} [A]	3,4	3,4
V_{OC} [V]	21,7	23,6
I_{SC} [A]	3,8	3,9

Im Punkt der maximalen Leistung (P_{MPP} , mit der Spannung V_{MPP} und dem Strom I_{MPP}) ist hier eine Leistungssteigerung von 55,42 W auf 64,26 W zu erkennen. Dies entspricht einer Steigerung um 16,0 %. V_{MPP} und I_{MPP} zeigen die Spannung und den Strom im Punkt der maximalen Leistung.

4 Diskussion

Die stationären Messungen der zwei unterschiedlichen PVT-Module zeigen bei gleichzeitiger Kühlung der Module eine Steigerung der elektrischen Peakleistung um 16 % bzw. 16,5 %. In der folgenden Tabelle 5 sind die Ergebnisse der Langzeitmessungen des PVT-Moduls 1 über einen Tag zu sehen. Auch hier ist eine Steigerung des elektrischen Ertrags von 16,2% zu erkennen.

Tabelle 5: Ergebnisse der Langzeitmessung über einen Tag

Langzeit-mes-sung über ei-nen Tag (PVT-Modul 1)	PVT-Modul		Referenz-mo-dul
	Elektrische Energie	Thermische Energie	
Sonnen-ein-strahlung	7,35 kWh		
Ertrag	1,22 kWh	3,8 kWh	1,05 kWh
Wirkungsgrad	16,8 %	50,7 %	14,5 %
Gesamt- wir-kungsgrad	67,5 %		14,5 %
Außentemp.	26 °C		26 °C
Durchschnittl. Oberflächen-temperatur	28 °C		45 °C
Temperatur des Kühlmedi-ums	15,5 °C		n.V.

Durch die Messungen im Rahmen dieses Papers kann damit sowohl bei der stationären Messung als auch bei der Langzeitmessung über einen Tag eine Steigerung der elektrischen Leistung bzw. Energie von 16 % bis 16,5 % gezeigt werden.

5 Zusammenfassung

Die Messergebnisse zeigen, dass der elektrische Ertrag der PVT-Module durch den kühlenden Effekt der Wärmenutzung auf die Siliziumzellen ca. 16 % größer ist als bei dem ungekühlten Referenzmodul. Zusätzlich zum gesteigerten elektrischen Wirkungsgrad, lässt sich die thermische Energie z. B. zur Warmwasserbereitung nutzen. Der Gesamtwirkungsgrad des PVT-Moduls steigt bei zusätzlicher Nutzung der Wärme sogar von 14,5 % auf 67,5 %; das entspricht einer Steigerung von fast 370 %.

In [5] wird eine Leistungssteigerung des elektrischen Ertrags von ca. 30 % präsentiert. Da hier weder die Temperatur des PV-Moduls noch die Temperatur des Kühlmediums angegeben ist, lässt sich dieser Wert schlecht einschätzen. Eine Thermografische Untersuchung zeigt lediglich einen Temperaturunterschied von 9°C, was diese Ertragssteigerung nicht erklären lässt. In [6] ist eine Steigerung des elektrischen Ertrags um ca. 7,6 % gemessen worden. Dieser Wert ist plausibel, da die Kühlung im Vergleich zu den Messungen in diesem Paper geringer war. Somit decken sich die Ergebnisse in [6] mit den Ergebnissen in diesem Paper.

Die Ergebnisse in diesem Paper lassen sich grundsätzlich mit den Werten aus der Literatur vergleichen. Bei den hier vorliegenden Temperaturen sind die Messwerte realistisch und decken sich mit den theoretischen Erwartungen.

6 Literaturverzeichnis

- [1] M. Pröll, Entwicklung eines schwach konzentrierenden CPC PVT Flachkollektors, München: Pröll, Markus, 2019.
- [2] Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie e.V., Planning and Installation photovoltaik systems: a guide for Installers, architects and engineers, London: 2nd ed. Earthscan, 2008.
- [3] A. Palzer und H.-M. Henning, „A comprehensive model for the German electricity and heat sector in a future energy system with a dominant contribution from renewable energy technologies – Part II: Results,” Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 30, S. 1019–1034, 2014.
- [4] K. Mertens, Photovoltaik - Lehrbuch zu Grundlagen und Praxis, Hanser-Verlag 2025
- [5] C.A.F Ramos et al: Photovoltaic-thermal (PVT) technology: Review and case study, 2019 IOP Conf. Ser.: Earth Environ
- [6] H.A. Kazem et al: Performance evaluation of solar photovoltaic/thermal system performance: An experimental and artificial neural network approach, Case Studies in Thermal Engineering, Volume 61, 2024,

Praxisbericht Bürgerhaus in Meiendorf - Effizienzsteigerung in einem öffentlichen Gebäude mit Wärmepumpe und Innendämmung

Felix Doucet^{1), 2)}

¹⁾ EnHH GmbH – Energieberatung Hamburg, Hartwicusstr. 4, 22087 Hamburg, doucet@enhh.de, 040 57309320

²⁾ Competence Center für Erneuerbare Energie und Energie-Effizienz (CC4E) der HAW Hamburg, Steindamm 96, 20099 Hamburg

Kurzfassung

Das vorliegende Energie-Konzept wurde für das Objekt Bürgerhaus in Meiendorf (BiM), Saseler Straße 21 in 22145 Hamburg in enger Zusammenarbeit mit den beteiligten Akteuren (u.a. Sprinkenhof, Architekturbüro Luetkens und PV Gutachter Nord) für die Gemeinde Wandsbek erstellt. Es fand eine Bauunterlagenanalyse, eine vor Ort Begutachtung sowie eine Ist-Zustandsanalyse nach DIN 18599 statt. Darauf basierend wurde ein Maßnahmenkatalog entwickelt, mit dem das Objekt BiM den förderfähigen Energie-Standard „Effizienzgebäude 70 - EE-Klasse“ erreicht, indem die einzelnen Maßnahmen zusammengeführt werden. Folgende Sanierungsmaßnahmen wurden umgesetzt:

- Dämmung der Außenwände ohne Veränderung der Gebäude-Ansicht,
- Dämmung der oberen Geschossdecke (Altbau 1885),
- Dämmung der Flachdächer (Bau von 1930 und 1960),
- Austausch der Kunststofffenster,
- Ertüchtigung der Fenster mit historischem Holzrahmen (Austausch der Verglasung),
- Abdichtung und Dämmung unterer Gebäudeabschluss,
- Rückbau der Gas-Heizungen und Installation einer Luft-Wasser Wärmepumpe mit Pufferspeicher und
- Installation einer Photovoltaik (PV)-Anlage.
- Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung für den Zuschauersaal

Durch eine Kombination aus Innendämmung und Kerndämmung der Luftschicht in den Wänden wird das anspruchsvolle Niveau „Effizienzgebäude 70 – EE-Klasse“ erreicht, ohne dass die Gebäude-Ansicht verändert wird.

Schlagworte

Dämmung, Wärmepumpe, hydraulischer Abgleich, Solarstromnutzung, Effizienzgebäude

1 Einleitung

Abbildung 1 visualisiert den Vergleich des Primärenergiebedarfs vor der Sanierung („Ist-Zustand“) und den Zielzustand „Saniert“. Bei der Umsetzung des Konzeptes

in die Praxis kam es zu Abweichungen. Ziel der Sanierung ist der „Effizienzgebäude 70 – EE-Klasse“ Energie-Standard, bei dem im Rahmen der „Bundesförderung für effiziente Gebäude“ [1] ein Zuschuss von 35 % der förderfähigen Kosten von der Kreditbank für Wiederaufbau (KfW) erstattet wird.

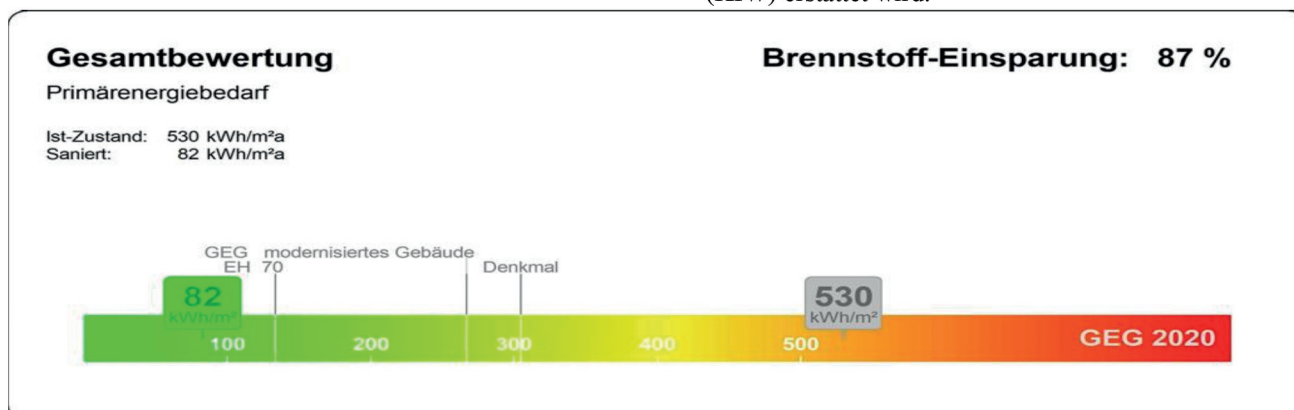


Abbildung 1: Energieberatung DIN 18599, Vergleich IST- Zustand und Saniert (gemäß ursprünglicher Planung)

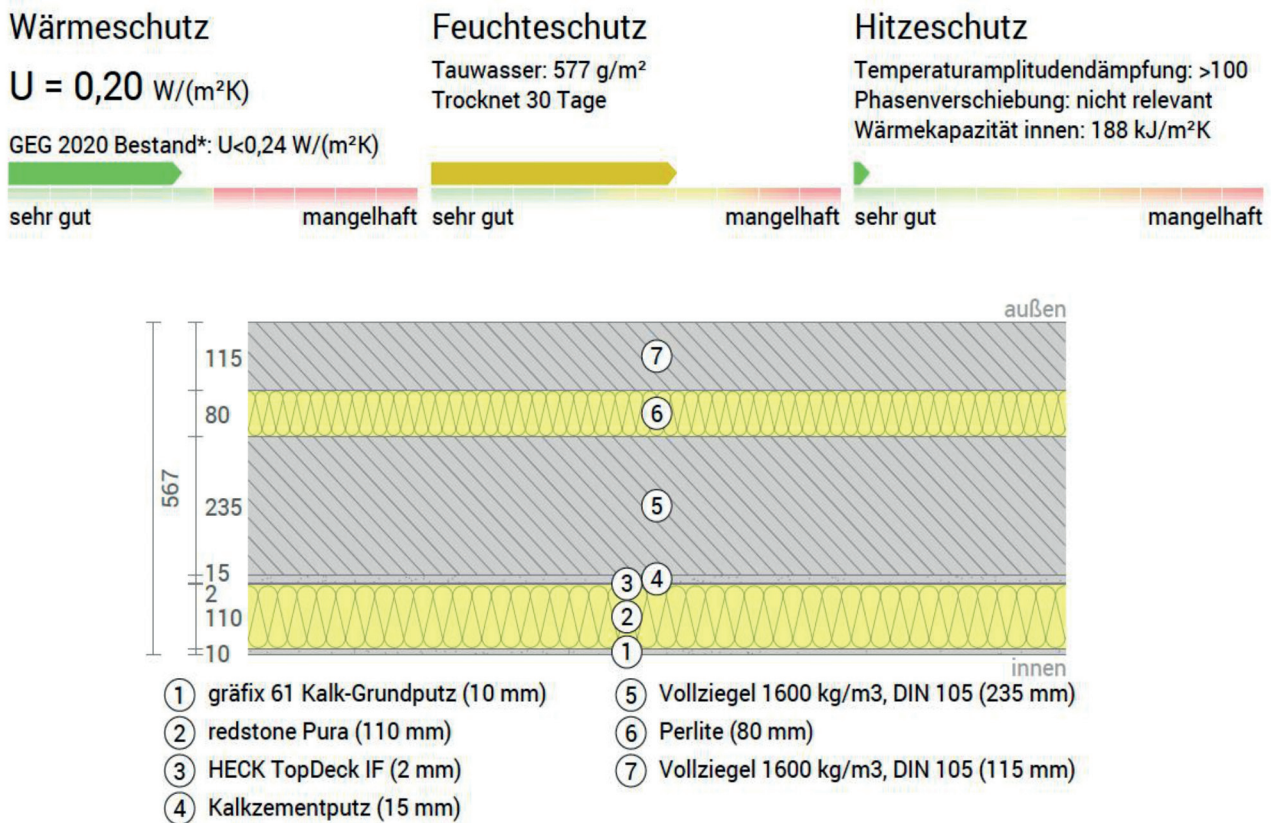


Abbildung 2: Wärmeschutz Außenwand nach Sanierung mit Kern- und Innendämmung

2 Material und Methoden

Die Bilanzierung des Objektes erfolgte mit der Software „Energieberater 18599 3D PLUS – Version 11.6.4“ von Hottgenroth [2]. Die Gebäude-Geometrie wurde im 3D-Modell erfasst, um die relevanten Hüllflächen und Volumen zu ermitteln. Die Gesamtbewertung des Gebäudes erfolgt anhand der DIN 18599 [3] und des jährlichen Primärenergiebedarfs pro m² Nutzfläche – vor Sanierung beträgt dieser $530 \text{ kWh}/\text{m}^2\text{a}$.

Dämmen der Außenwände

Eine Dämmung der Außenwände reduziert den Wärmebedarf erheblich, so reduzieren sich die laufenden Kosten und der CO₂-Ausstoß. Zusätzlich steigt der Wohnkomfort, da die Innenoberflächen der Außenwände im Winterhalbjahr wärmer sind. Auch das Schimmelrisiko wird dadurch reduziert. Jeder Dämmstoff ist ökologisch sinnvoll, besonders nachhaltig sind aber Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen, wie Holz, Hanf oder Jute. Die Dämmeigenschaften sind etwas schlechter als bei herkömmlichem Dämmmaterial, die Dämmstärke muss daher zunehmen.

Kerndämmung

Der Anbau von 1930 wurde zweischalig und mit einer Luftschicht gebaut. Diese Luftschicht wurde vorab mit Probebohrungen untersucht und auf ca. 80 mm geschätzt. Somit bietet sich eine Kerndämmung an. Hierbei wird ein Dämmmaterial, wie z.B. Mineralwolle, durch Bohrungen in den Fugen in den Hohlraum eingeblasen. Diese

Maßnahme ist als Einzelmaßnahme förderfähig, sofern ein Dämmmaterial mit einer WLS 035 oder besser eingeblasen wird. Für den Effizienzgebäude Standard ist zusätzlich zur Kerndämmung eine Innendämmung notwendig.

Innendämmung

Im Anbau von 1920 (Zuschauersaal), sowie im Originalbau von 1885 ist keine Luftschicht vorhanden. Hier wird eine Innendämmung angebracht. Mit 14 cm mineralischer Dämmung erreichen die Wände einen U-Wert von $0,24 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$. Der Feuchteschutz muss bei Innendämmung gesondert betrachtet werden. Hier empfiehlt sich eine hygrothermische Simulation und Freigabe des Aufbaus durch den Hersteller der Innendämmung.

Kerndämmung + Innendämmung

Eine Innendämmung ist auch im Bereich mit Kerndämmung vorgesehen. Bei dieser Kombination reicht bereits 110 mm aus, um den für Wände förderfähigen U-Wert von $0,20 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$ zu erreichen, wie Abbildung 2 zeigt.

Dämmen von Heizkörpernischen

Heizkörpernischen sorgen für hohe Wärmeverluste, da diese bisher keine Dämmung aufweisen. Durch die dünnen Wände hinter den Heizkörpern geht unnötig viel Heizenergie verloren. Diese wird daher gedämmt. Neben

Wärmeschutz

$$U = 0,126 \text{ W/(m}^2\text{K)}$$

BEG Einzelmaßn.*: $U < 0,14 \text{ W/(m}^2\text{K)}$

sehr gut

mangelhaft

Hitzeschutz

Temperaturamplitudendämpfung: 84

Phasenverschiebung: 14,5 h

Wärmekapazität innen: 51 kJ/m²K

sehr gut

mangelhaft

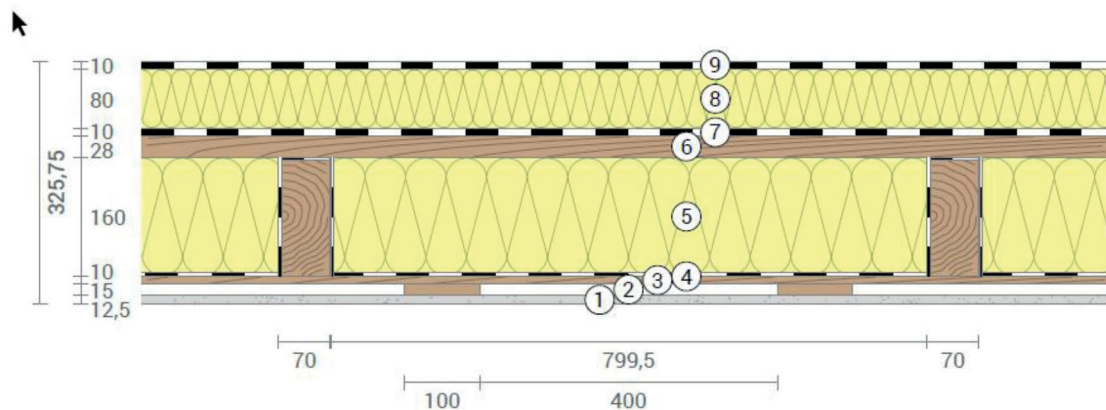
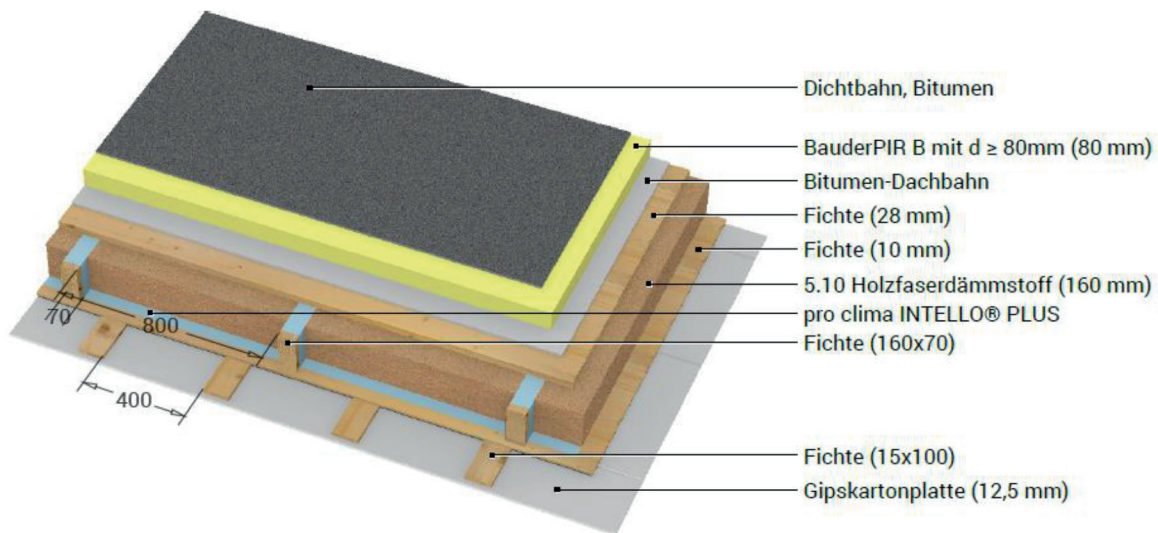


Abbildung 3: Wärmeschutz Dach nach Sanierung mit Zwischensparrendämmung und Aufsparrendämmung

Dämmplatten aus Hartschaum bietet sich auch das Zumauern der Nischen an, z.B. mit Porenbeton. Für die Durchführung dieser Maßnahme muss der Heizkörper ausgebaut und eine längere Konsole (Halterung) an der Wand befestigt werden.

Wärmedämmverbundsystem (WDVS)

Für den WC-Anbau von 1960 ist das Anbringen eines WDVS geplant. Dabei werden Dämmplatten aufgeklebt und mit Dübeln fixiert. Anschließend wird die Oberfläche verputzt. Alternativ kann bei einem WDVS auch eine Vorsatzschale oder eine hinterlüftete Vorhangsfassade Verwendung finden. Dabei wird eine Unterkonstruktion auf den bestehenden Außenwänden aufgeschraubt und dazwischen ein Dämmmaterial eingebaut. Für die Gestaltung der Oberfläche gibt es viele Möglichkeiten: Putzträgerplatte, Holzbretter, Stein- oder Glasoberflächen. Nahezu alles ist möglich, sodass die Außenwand nach Belieben optisch aufgewertet werden kann. Wichtig

ist, dass Wärmebrücken vermieden werden, indem auf die Anschlüsse z.B. an das Dach oder die Fenster geachtet wird. Um den förderfähigen U-Wert von $0,2 \text{ W/m}^2\text{K}$ zu erreichen, muss z.B. eine 180 mm Dämmung WLS 035 angebracht werden:

Dachsanierungen

Jedes Dach wird irgendwann schadhaf und muss dann saniert werden. Das sollte Anlass sein, um das Dach besonders gut zu dämmen. Dadurch wird der Wohnkomfort deutlich verbessert: Im Winter sind die Oberflächen weniger kalt und das neue Dach ist winddicht. Unbehagliche Zugluft wird effektiv vermieden. Auch der sommerliche Wärmeschutz wird deutlich verbessert (insbesondere durch pflanzliches Dämmmaterial, z.B. Holzfaserdämmplatten), sodass der Aufenthalt im Dachgeschoss auch an heißen Sommertagen deutlich angenehmer wird. Die Dachsanierung ist als Einzelmaßnahme förderfähig, wenn die Dachflächen nach der Sanierung einen U-Wert

von 0,14 W/m²K oder kleiner aufweisen. Durch die abdichtenden Maßnahmen wird das Dach deutlich luftdichter, was zu einer Erhöhung der Luftfeuchtigkeit im Wohnraum führen kann. Daher sieht die DIN 1946-6 vor, dass bei einer Abdichtung von mehr als 1/3 der Dachfläche ein Lüftungskonzept erstellt werden muss.

Flachdach Anbau 1930

Abbildung 3 zeigt, wie ein anspruchsvoller U-Wert von 0,13 W/m²K erreicht wurde, es bedarf neben einer Zwischensparrendämmung auch einer zusätzlichen Aufsparrendämmung. Das Dach muss nach innen luftdicht mit einer Dampfbremse ausgeführt werden. Ein Luftdichtheitstest hilft, alle Komponenten (Folie, Presslatten, Klebeband, etc.) zu prüfen. Um Schäden durch Tauwasserbildung zu vermeiden, muss der Aufbau der Konstruktion gut geplant und die Ausführung sorgfältig durchgeführt werden. Nach außen wurde nicht mit einem diffusionsoffenen Unterdach gearbeitet. Daher ist das Risiko von Tauwasser oder eintretendem Regenwasser mit großer Sorgfalt zu prüfen, da Feuchtigkeit nicht nach außen, sondern nur im Sommer über die feuchtevariable Folie nach innen austrocknen kann. Zudem muss das Dach nach außen winddicht sein, damit kalte Luft nicht in das Haus bzw. in die Dämmebene eindringt.

Oberste Geschossdecke (OGD) Altbau 1885

Im Bestandsgebäude von 1885 wird die thermische Hüllfläche durch die oberste Geschossdecke (OGD) definiert. Um die Wärmeverluste durch die OGD zu reduzieren, bietet sich eine nachträgliche Verbesserung der Dämmung an. Diese Maßnahme ist als Einzelmaßnahme förderfähig, wenn ein U-Wert von 0,14 W/m²K oder kleiner erreicht wird. Bei der vorhandenen Decke wird dies z.B. mit einer 360 mm Dämmung WLS 040 (z.B. Zellulose) erreicht. Dafür müssen die vorhandenen Balken um 140 mm aufgedoppelt werden. Der Dachstock sollte etwas belüftet sein, damit aus dem Wohnraum aufsteigende Feuchtigkeit aus dem Haus gelangen kann.

Dächer Anbau 1960

Aus Gründen des Brandschutzes wird für die Dächer des Anbaus von 1960 (WC und Garage) ein U-Wert von 0,2 W/m²K angesetzt. Dies ist als Einzelmaßnahme nicht förderfähig, die Kosten können aber bei der Erreichung von Effizienz-Gebäude Standards als förderfähige Kosten angesetzt werden.

Fenster

Die vorhandenen Fenster waren alt - sie haben ihre Lebenserwartung erreicht. Über Undichtigkeiten der Rahmen geht unnötig viel warme Luft verloren und die alte Zweifach-Verglasung verursacht hohe Wärmeverluste. Teilweise waren sogar noch Fenster mit Einfach-Verglasung vorhanden. Nach Rücksprache mit dem Architekturbüro Luetkens wird ein Teil der Fenster, die Holzfenster, ertüchtigt. Die Kunststofffenster werden ausgetauscht gegen Fenster mit Holzrahmen.

Fenster mit Kunststoffrahmen erneuern

Alle Fenster mit Kunststoffrahmen werden komplett durch Fenster mit Dreifachverglasung ausgetauscht. Diese müssen einen U-Wert von 0,95 erreichen. Neue Fenster sind deutlich luftdichter als die alten. Das ist gewollt, kann aber auch dazu führen, dass die Luftfeuchtigkeit im Haus zu stark ansteigt. Daher ist es nach DIN 1946-6 notwendig, ein Lüftungskonzept zu erstellen, wenn mehr als 1/3 der Fensterfläche ausgetauscht wird. Die Fuge zwischen Fensterrahmen und Außenmauerwerk ist nach dem RAL-Leitfaden auszuführen, d.h. im 3-Ebenen-Modell. Innen wird das Fenster luftdicht und außen diffusionsoffen und winddicht angeschlossen. Dazwischen wird gedämmt. Für die Förderfähigkeit von Fenstern gilt der Uw-Wert des gesamten Fensters und nicht der Ug-Wert des Glases!

Fenster mit Holzrahmen ertüchtigen

Bei Fenstern mit Holzrahmen bleibt der Rahmen erhalten und es werden nur die Scheiben getauscht. Diese Fenster müssen einen U-Wert von 1,3 W/m²K erreichen. Um diesen U-Wert zu erreichen, muss die neue Verglasung so gut wie möglich sein. Neben einer Edelgasfüllung und der Wärmeschutzbeschichtung ist auch auf einen besonders guten Randverbund zu achten.

Türen erneuern

Auch die Hauseingangstüren sind alt und verursachen hohe Wärmeverluste. Ein Austausch reduziert nicht nur die Wärmeverluste, sondern kann bei entsprechendem Schließmechanismus auch die Einbruchssicherheit deutlich verbessern. Türen müssen einen U-Wert von 1,3 W/m²K oder kleiner aufweisen, um förderfähig zu sein.

Dämmen der Bodenplatte:

Für den Bereich des Bodens, der gedämmt wird, wird ein förderfähiger U-Wert von 0,25 W/m²K angenommen. Hier wird der förderfähige Wert durch eine trittfeste Dämmplatte erreicht.

Größtenteils ist noch der alte Holzfußboden vorhanden. Der Bereich, in dem der Boden gedämmt werden kann, ist nach Rücksprache mit Architekturbüro Luetkens definiert. Abgesehen von den Ausnahmen, müssen für ein Effizienzgebäude 70 Großteile der Bodenplatten saniert und gedämmt werden.

Einbau einer Sole-Wasser-Wärmepumpe

Sole-Wasser Wärmepumpen entziehen der Umwelt erneuerbare Wärme und nutzen dafür als Hilfsenergie Strom. Durch diese Heizungstechnik reduziert sich der CO₂-Ausstoß erheblich. Der Betrieb einer effizienten Wärmepumpe ist kostengünstiger als mit Gas zu heizen, vor allem, wenn für den Betrieb der Wärmepumpe ein vergünstigter Wärmepumpentarif genutzt wird. Zusätzlich entfallen die Kosten für den Schornsteinfeger und die Grundgebühr für das Erdgas. Für die Bohrungen der Sonden muss eine Genehmigung bei der zuständigen

Wasserbehörde eingeholt werden. Wärmepumpen können über das Bundesförderprogramm BEG und zusätzlich über das Förderprogramm "Erneuerbare Wärme" der Hamburgischen Investitions- und Förderbank (IFB) bezuschusst werden.

Wärmepumpen gibt es in allen möglichen Leistungsklassen. Die Vorlauftemperatur (Heizwasser-Temperatur) sollte allerdings limitiert werden - i.d.R. auf ca. 55°C. Damit ist ein Betrieb der Wärmepumpe mit normalen Heizkörpern möglich, aber die Heizkörper müssen ausreichend groß ausgelegt sein, um die Räume auch bei sehr niedrigen Außentemperaturen warm zu bekommen. Daher wurde eine raumweise Heizlastberechnung nach DIN 12831 [4] und ein hydraulischer Abgleich der Heizflächen durchgeführt.

Warmwasser:

Warmwasser wird aktuell über elektrische Durchlauferhitzer bereitgestellt. Dies soll weiterhin so bleiben. Warmwasser wird bereitgestellt in der Hausmeisterwohnung, in den Toiletten und in der Teeküche der Büros im Obergeschoss.

Photovoltaik (PV)-Anlage

Im Zuge der Dachsanierung soll das Dach mit PV-Modulen versehen werden. Aktuell sind 180 Module mit insgesamt 63 kWp geplant und einer Batterie mit 41 kWh. Im Rahmen der Detailplanung kam es zur Verkleinerung der PV-Anlage auf 43,74 kWp mit Batteriespeicher von 21 kWh.

3 Ergebnisse

Die Energieverluste über die Gebäudehülle, durch den Luftwechsel sowie bei der Erzeugung und Bereitstellung der benötigten Wärme konnten durch die Sanierung deutlich reduziert werden, auch wenn es aufgrund von Ände-

Der Primärenergiebedarf errechnet sich aus dem Endenergiebedarf und dem Primärenergiefaktor des Energieträgers. Im Bürgerhaus liegt nach der Sanierung nur noch Strom als Energieträger vor, der wiederum in Teilen aus der PV-Anlage auf dem Dach stammt. Es verbleibt ein Strombedarf für Wärme (Wärmepumpe und Warmwasser) von 38,8 kWh/(m²·a) und für die restlichen gebäudebezogenen Verbraucher wie Umwälzpumpen, Beleuchtung und die Lüftungsanlage von 25,0 kWh/(m²·a). Der Primärenergiefaktor von Strom beträgt im Jahr 2024 den Wert 1,8 und durch Multiplikation mit dem Strombedarf von 63,8 kWh/(m²·a) ergibt sich der Primärenergiebedarf.

Der Energie-Standard „Effizienzgebäude 70 EE-Klasse“ wurde trotz dieser Änderungen erreicht, da es bei der Sanierung der Gebäudehülle zu keiner Ambitionsmindering kam und beim Primärenergiebedarf in der Planung ein großer Puffer vorhanden war.

Gemäß Referenzort Hamburg mit der Außentemperatur gemäß DIN 12831 $\theta_{e,ref} = -10,3^\circ\text{C}$ ergibt sich eine Standard-Heizlast von 36,6 kW, die sich aus Transmission durch die Hüllfläche von 22,7 kW und Lüftungsverlusten von 9,9 kW zusammen setzt.

Die Berechnung der raumweisen Heizlast diene als Grundlage für die Auslegung der Heizkörper im OG, sowie der Fußbodenheizung im EG. Der Wärmebedarf je Raum in Kombination mit einer Analyse der Heizkörper und Heizflächen dient dem hydraulischen Abgleich, der für eine effiziente und bedarfsgerechte Beheizung der Räume sorgt.

4 Diskussion

Es sollte für die Einordnung der Ergebnisse stets berücksichtigt werden, dass der berechnete Endenergiebedarf lediglich den Strom mit Gebäudebezug (Wärme, Licht,

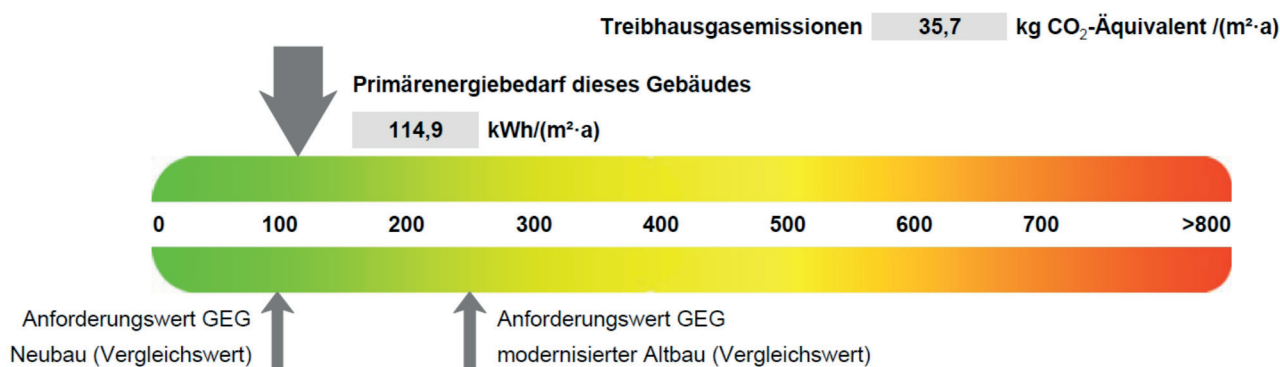


Abbildung 4: Ergebnis nach Sanierung gemäß DIN 18599

runge gegenüber der Planung zu einem weniger ambitionierten Primärenergiebedarf im Vergleich zur Planung (Abbildung 1) gekommen ist. Abbildung 4 zeigt den Primärenergiebedarf nach der Sanierung, der 115 kWh/m² im Jahr beträgt. Die Änderungen betreffen die Anlagentechnik: Die PV-Anlage fiel kleiner aus und die Wärmepumpe ist als Luft/Wasser Wärmepumpe ausgeführt worden.

Lüftung) bei einer Nutzung gemäß DIN 18599 berücksichtigt. Das tatsächliche Nutzerverhalten, sowie Stromverbraucher wie Arbeitsplätze, Veranstaltungstechnik, Server oder Küchengeräte sind in der Bilanz nach DIN 18599 nicht berücksichtigt und die tatsächlichen Verbräuche können teilweise stark nach oben oder unten abweichen.

Abbildung 5 gibt einen Einblick in die Berechnung der Energiebilanz mit der DIN 18599. Anhand von Wetterdaten wird der Wärmebedarf, Strombedarf der relevanten Verbraucher und Stromertrag der PV-Anlage je Kalendermonat ermittelt. Darauf basierend ergibt sich ein Netto-Verbrauch je Kalendermonat, der im Sommerhalbjahr von Mai bis August aufgrund der PV-Anlage negativ ist und mit Null angesetzt wird. Demnach wird in der DIN 18599 vereinfacht davon ausgegangen, dass der Solarstrom innerhalb eines Monats immer für Verbraucher zwischengespeichert werden kann, was in der Realität über einen solchen Zeitraum nicht umsetzbar ist. Darüber hinaus wird der überschüssige Strom aus dem Sommer nicht weiter in der Bilanz berücksichtigt.

Mit Blick auf den Primärenergiebedarf darf davon ausgegangen werden, dass der Primärenergiefaktor sich analog zu der Entwicklung in der Vergangenheit auch in Zukunft weiter Reduziert mit Voranschreiten der Energie-

ein energetisches Niveau verbessert, welches besser gedämmt ist als der gesetzliche Mindeststandard (GEG) ist. Die Ansicht der Klinker-Fassade wurde nicht verändern und auch die Fenster mit historischen Holzrahmen konnten mit einer neuen Verglasung erhalten werden. Die „BiM – Zeitenwende“ wird durch die Abkehr von Erdgas als Energieträger vollendet. Dank der Kombination aus Wärmepumpe und PV-Anlage wird ein Großteil des stark reduzierten Energiebedarfs lokal und erneuerbar selbst generiert. In Kombination mit einem Ökostrom-Tarif und der auf Bundesebene voranschreitenden Energiewende (100 % Erneuerbare Energie im Strommix bis 2035) kann hier von einer vollendeten Zeitenwende gesprochen werden.

Das Sanierungs-Projekt sucht seines Gleichen und sollte medienwirksam umgesetzt werden um als Vorbild für Gemeinden und Bürger*innen in Hamburg, Deutschland und auch darüber hinaus zu dienen.

in kWh	Gesamt	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
Strom-Mix	4584	780	676	589	142	0	0	0	0	278	578	740	802
Strom (Sonderta...	34235	8095	6458	3429	319	0	0	0	0	242	1599	5410	8684
Strom (Hilfsener...	24663	4265	3547	2979	696	0	0	0	0	1397	3029	4084	4666
Strom (PV) *	-37611	-856	-1174	-2864	-5401	-5409	-4829	-4851	-4937	-3629	-2274	-886	-502
Gesamt	63482	13139	10681	6997	1157	0	0	0	0	1918	5206	10233	14151

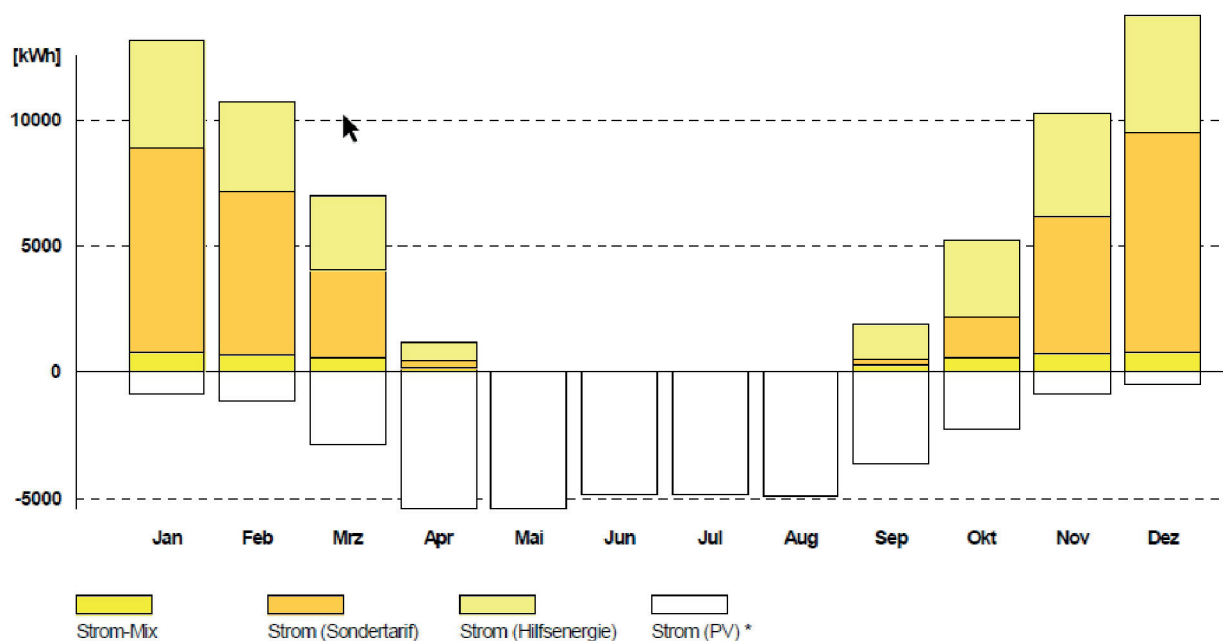


Abbildung 5: Monatliche Energiebilanz nach Sanierung gemäß DIN 18599

wende. Die Bilanz des Gebäudes wird sich demnach ohne weitere Maßnahmen stetig verbessern!

5 Zusammenfassung

Das vorliegende Energie-Konzept nach DIN 18599 zeigt eine Gesamtanierung des BiM in einem Zug auf. Durch die Umsetzung der Maßnahmen wird das Gebäude auf

6 Verzeichnis

- [1] Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, „Richtlinie für die Bundesförderung für effiziente Gebäude– Nichtwohngebäude (BEG NWG)“. 9. Dezember 2022. Zugegriffen: 11. Februar 2025. [Online]. Verfügbar unter:
- [2] Hottgenroth Software AG, *Energieberater 18599 3D PLUS – Version 11.6.4.* (2022).
- [3] DIN Deutsches Institut für Normung e. V., „DIN V 18599-1:2016-10, Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung – Teil 1: Allgemeine Bilanzierungsverfahren, Begriffe, Zonierung und Bewertung der Energieträger“. Oktober 2016. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.din.de>
- [4] DIN Deutsches Institut für Normung e. V., „DIN/TS 12831-1 Verfahren zur Berechnung der Raumheizlast – Teil 1: Nationale Ergänzungen zur DIN EN 12831-1“. April 2020. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.din.de>

Definition typischer sanierter niedersächsischer Wohngebäude als Basis für die dynamische Gebäudesimulation

Teil I: Gebäudehülle und Randbedingungen für ein repräsentatives Niedersächsisches Einfamilienhaus (Archetyp EFH) Version 14.08.2024

Tanja Mehring^{1*}, Felix Kleff¹, Abdulraheem Salaymeh², Stefan Holler², Sebastian Föste¹, Erik Bertram¹

Hochschule für angewandte Wissenschaft und Kunst Hildesheim/Holzminde/Göttingen,

¹Billerbeck 2, 37603 Holzminde und ² Rudolf-Diesel-Straße 12, 37075 Göttingen.

*Korrespondierender Erstautor: tanja.mehring@hawk.de, +49 5531/ 126 164

Kurzfassung

Repräsentative Gebäudemodelle für thermische Simulationen sind eine etablierte Methode zur Ableitung grundlegender Zusammenhänge. Diese Arbeit entwickelt spezifisch für Niedersachsen Wohngebäudemodelle, die sowohl den aktuellen Gebäudebestand als auch Sanierungsvorgaben einbeziehen. Ziel ist es, Abweichungen der Archetypen von der IWU-Gebäudetypologie in Bezug auf Heizlasten und Energiebedarfe zu analysieren und typische Werte für den sanierten, klimaneutralen Bestand abzuleiten. Daraus werden zahlreiche Planungsparameter ermittelt, die zur Erstellung von Temperatur- und Wärmekatastern genutzt werden. Zusätzlich entstehen für jeden Archetyp frei zugängliche digitale Gebäudemodelle im IFC-Format und dazugehörige Dokumentationen.

Schlagworte

Dynamische Gebäudesimulation; Energetische Gebäudesanierung; Niedersächsischer Wohngebäudebestand; Wärmeversorgung; Niedersächsischer Archetyp Einfamilienhaus

1 Einleitung

Die Definition von Referenzhausmodellen ist eine etablierte wissenschaftliche Methode, um grundlegende, allgemeine Zusammenhänge für Gebäude und Liegenschaftsbestände zu untersuchen. Die Modelle erlauben die detaillierte instationäre, thermische Modellierung des Gebäudes und damit die Bewertung und den Vergleich von Komponenten, Bauteilen, Energieversorgungssystemen und Sanierungsstrategien [1], [2]. Typischerweise werden dafür Referenzhäuser definiert, die repräsentativ für ganze Regionen, wie z. B. Mitteleuropa sind und verschiedene Dämmstandards (z. B. saniert/unsaniert) aufweisen. Dabei erfolgt die Definition der Gebäude in der Regel auf Basis aktueller Bauvorschriften, Querschnittstudien und noch häufiger auf Grundlage einer Kombination aus Annahmen und eigenen Einschätzungen [bspw. 2 u. 3].

Auch das vorliegende Papier definiert Referenzgebäude zur Modellierung von Einfamilienhauswohngebäuden. Allerdings repräsentiert das definierte Gebäude den vorhandenen niedersächsischen Gebäudebestand und bildet

gleichzeitig die aktuell geltenden niedersächsischen Sanierungsziele [4] und Sanierungsempfehlungen [5] für den Gebäudebestand ab. In der Folge erlauben die in Gebäudemodellen umgesetzten Referenzhäuser regionsspezifische Aussagen für das Land Niedersachsen.

Das hier definierte „regionsspezifische, sanierte Referenzhaus“ repräsentiert die Gruppe von Wohngebäuden der Einfamilienhäuser und wird als „Archetyp EFH“ bezeichnet. Für die Gebäudetypen Einfamilienhaus, Zweifamilienhaus, Reihenhaushaus und großes Mehrfamilienhaus wird ebenfalls jeweils ein Archetyp als Repräsentant definiert. Die Definition dieser Archetypen ergibt sich aus einer Analyse der Bestandsdaten der Gebäudekubatur, der Bauteileigenschaften und auch der Heizungstechnik.

Aus Maximalwertanalysen der Gebäude- und Wohnungszählung "Zensus 2011" [6] ergeben sich die dominanten vorherrschenden Baualtersklassen sowie die entsprechenden durchschnittlichen Wohnflächen der Archetypen. Mithilfe der Wohngebäudetypologie des Instituts für Wohnen und Umwelt (IWU) [4] kombiniert mit eigenen Einschätzungen lässt sich anschließend die Bauform

für die dominante Baualtersklasse ableiten und für den Archetyp EFH übernehmen.

Für die entwickelten Gebäude werden drei etablierte energetische Standards als zukünftige Sanierungszustände festgelegt. Den minimalen Effizienzstandard im sanierten Zustand stellen die Anforderungen des Gebäudeenergiegesetzes (GEG) [7] dar. Den mittleren Standard bildet der Effizienzhaus 55-Standard (EH 55) [8], der vom Niedersächsischen Sanierungsleitfaden [5] empfohlen wird. Den höchsten Sanierungszustand stellt der Passivhaus-Standard (PH) [9] dar.

Insbesondere die Definition der Heizungstechnik ist von zentraler Bedeutung, da anhand der Archetypen die notwendigen Auslegungstemperaturniveaus in sanierten Gebäuden abgeleitet werden sollen. Denn aufgrund der verbesserten Bauteileigenschaften nach einer Sanierung sinkt der Energieverbrauch und damit auch das notwendige Temperaturniveau der Bestandsheizkörper. Die Übertragung dieser notwendigen Temperaturniveaus auf Basis der Referenzhäuser auf ganze Liegenschaftsbestände ist Ziel des Forschungsprojektes „Transformationsstrategien für Wohngebäude und –quartiere mit modellbasierten Wärme- und Temperaturkatastern“ (Tra-WoKat), bei dem neben klassischen Wärmekatastern auch Temperaturkataster entwickelt werden sollen, die die Anwendbarkeit von Niedertemperaturnetzen und Wärmepumpen aufzeigen.

Ergebnis dieses Papiers ist die Untersuchung, inwieweit die Archetypen in Bezug auf die spezifischen Heizlasten und Energiebedarfe von der Gebäudetypologie des IWU abweichen. Ferner sollen typische Werte des sanierten, klimaneutralen Gebäudebestands wie u. a. Vor- und Rücklauftemperaturen abgeleitet werden. Als Outputs gehen für jeden Archetyp ein digitales Gebäudemodell im IFC-Format sowie eine Dokumentation hervor, die für die Baupraxis und Forschung frei zugänglich bereitgestellt werden. Damit wird eine vielseitige Weiterverwendung in Modellierungs-, Berechnungs- und Simulationstools für die Sanierung von Gebäuden und Anlagen ermöglicht (s. **Tabelle 1**). Idealerweise lässt sich die angewandte Methodik zur Analyse des niedersächsischen Wohngebäudebestands auf andere Regionen übertragen.

1.1 Kubatur

Im Laufe der Zeit haben sich Baustile, Bauweisen und Anforderungen an Gebäude geändert [10], sodass die Baualtersklasse eines Gebäudes als Indikator für typische Volumen- und Strukturmerkmale herangezogen werden kann. Für die Festlegung der Gebäudekubatur des Archetyps EFH sind die dominante Baualtersklasse in der Kategorie Einfamilienhäuser und die entsprechende mittlere Wohnfläche aus der Gebäude- und Wohnungszählung „Zensus 2011“ [6] ermittelt worden. Dabei beschreibt die dominante Baualtersklasse jene mit dem höchsten Gebäudezuwachs pro Jahr des Zeitraums der Baualtersklasse. Zur Korrektur von Ausreißern, sind die

kleinsten und größten 10 % der Einfamilienhäuser (bezogen auf die mittlere Wohnfläche) vernachlässigt worden.

Die sich daraus ergebende Baualtersklasse 1979 – 1983 und mittlere Wohnfläche von 115 m² wird auf den Archetyp EFH angewandt und im weiteren Verlauf mit einer für die Baualtersklasse typischen Bauform kombiniert. Die Kubatur des typischen Einfamilienhauses basiert auf einer Kombination des Referenzhauses „EFH_G“ aus der Deutschen Wohngebäudetypologie des Instituts für Wohnen und Umwelt (IWU) [11], [12] sowie eigenen Einschätzungen. Kennzeichnend für die Kategorie Einfamilienhaus der Baualtersklasse 1979 – 1983 ist der zwei-geschossige, quaderförmige Baukörper mit vollständiger Unterkellerung und einem geneigten Satteldach [12] (s. Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.).

Es wird angenommen, dass der Archetyp mit einer Abweichung von 0° zur Nordrichtung ausgerichtet ist und das Satteldach eine Dachneigung von 35° aufweist. Die Grundrisse orientieren sich an beispielhaften Wohngebäuden mit vergleichbarer Kubatur und Fläche (s. **Abbildung 3** und **Abbildung 4**).

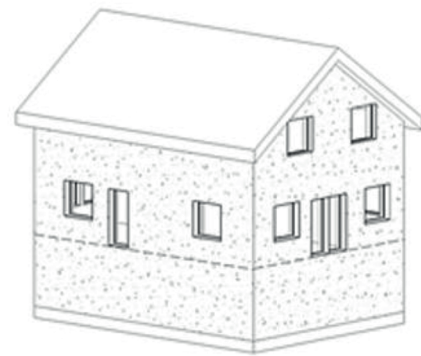


Abbildung 1: Gebäudeansicht der Süd- und Ostfassade

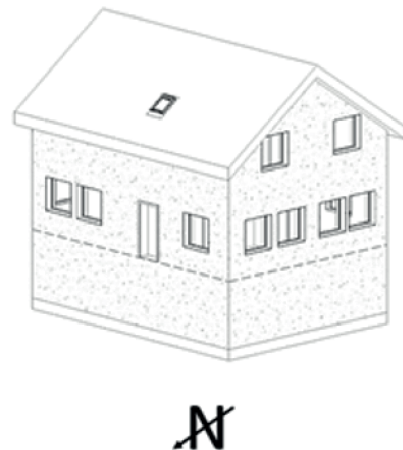


Abbildung 2: Gebäudeansicht der Nord- und Westfassade

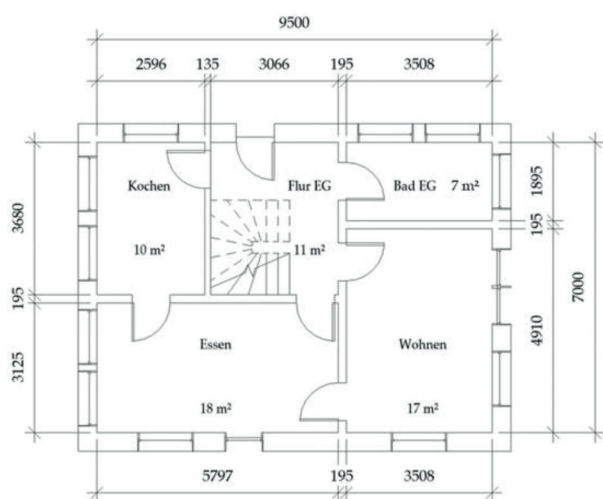


Abbildung 3: Grundriss Erdgeschoss des Archetyps EFH

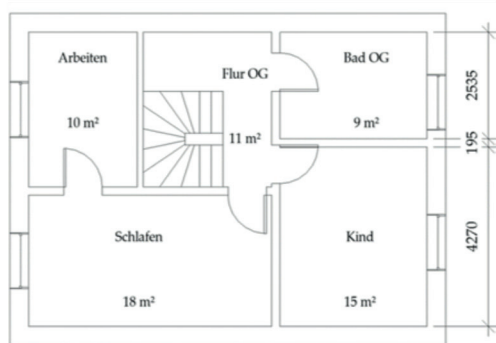


Abbildung 4: Grundriss Obergeschoss des Archetyps EFH

1.2 Bauteile der Gebäudehülle

Die Mindestanforderungen an die Wärmedurchgangskoeffizienten der Außenbauteile ergeben sich entsprechend der zu untersuchenden Effizienzstandards GEG [7], EH 55 [8] und PH [9] und werden als Bauteilwerte festgelegt, wodurch die Wärmebrücken vernachlässigt werden. Bei den Anforderungswerten des EH 55-Standards handelt es sich um jene, die als alternativer Nachweis zum spezifischen Transmissionswärmeverlust (H_T') und Jahresprimärenergiebedarf (Q_P) für die Erreichung des

Effizienzstandards herangezogen werden können [8]. **Tabelle 1** fasst die Anforderungswerte der unterschiedlichen Effizienzstandards zusammen.

Auf Basis der zu erreichenden Vorgaben aus **Tabelle 1** und vorhandenen typischen Bauteilen im Bestand, wurden Aufbauten für die sanierten Bauteile festgelegt. Es handelt sich um Konstruktionen massiver Bauweise, die den bauphysikalischen Mindestanforderungen des jeweiligen Effizienzstandards genügen (s. **Tabelle 3**).

Tabelle 1: Mindestanforderungen an die Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Werte) der Außenbauteile entsprechend der Effizienzstandards Gebäudeenergiegesetz (GEG), Effizienzhaus 55 (EH 55) und Passivhaus (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
Hauseingangstüren	1,80	1,30	0,80

1.3 Fenster

In Anlehnung an die Deutsche Wohngebäudetypologie und den Gebäudetyp „EFH_G“ der Baualtersklasse 1979 – 1983 erfolgt die Festlegung der Fensterflächen und die Zuordnung zu den Fassadenflächen [12]. Diese sind der **Tabelle 2** zu entnehmen. Die Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden. und **Abbildung 2** zeigen mit einer vereinfachten Gebäudeansicht die Anordnung der Fenster.

Tabelle 2: Fenster- und Verglasungsflächen in m², opake und gesamte Wandinnenflächen in m² sowie der auf die opake Wandinnenfläche bezogene Fensterflächenanteil in % je nach Orientierung nach Nord, Ost, Süd und West

	Fensterfläche in m²	Verglasungsfläche in m²	Opake Wandinnen- fläche in m²	Ges. Wandinnen- Fläche in m²	Fensterflächen- anteil in %
Nord	5,69	4,84	35,82	40,66	14 %
Ost	10,67	9,07	28,17	37,24	32 %
Süd	5,33	4,53	36,13	40,66	13 %
West	10,37	8,81	28,43	37,24	31 %
gesamt	32,06	27,25	128,55	155,80	21 %

Da es sich bei dem Archetyp um einen Repräsentanten in vollständig saniertem Zustand handelt, wird angenommen, dass die Bestandsfenster ausgetauscht wurden und den Mindestanforderungen der eingangs festgelegten

Standards genügen. Differenziert nach Effizienzstandards enthält **Tabelle 3** Angaben zu den Fensterkonstruktionen und bauphysikalischen Eigenschaften. Der Rahmenanteil aller Fenster beträgt 15 %.

Tabelle 3: Fensterkonstruktionen und bauphysikalische Spezifikationen außenluftberührender Bauteile in Abhängigkeit zum Effizienzstandard

Standard	Konstruktion in mm	Höhe in m	Breite in m	U_{Glas} in $W/(m^2K)$	U_{Rahmen} in $W/(m^2K)$	ψ in $W/(m^2K)$	τ_{au}	g-Wert	U_{ges} $W/(m^2K)$ (Anforderung)
GEG SF	6;15;4	1,300	1,330	1,10	2,0	0,06	0,52	0,59	1,19 (1,30)
GEG Tür	6;15;4	2,050	0,915	1,10	2,0	0,06	0,52	0,59	1,19 (1,30)
GEG DF	6;15;4	0,650	0,780	1,10	2,0	0,06	0,52	0,59	1,19 (1,30)
EH 55 SF	6;15;6;15;4	1,300	1,330	0,60	2,0	0,06	0,24	0,50	0,74 (0,90)
EH 55 Tür	6;15;6;15;4	2,050	0,915	0,60	2,0	0,06	0,24	0,50	0,74 (0,90)
EH 55 DF	6;15;6;15;4	0,650	0,780	0,60	2,0	0,06	0,24	0,50	0,74 (0,90)
PH SF	6;15;6;15;4	1,300	1,330	0,60	2,0	0,06	0,24	0,50	0,74 (0,80)
PH Tür	6;15;6;15;4	2,050	0,915	0,60	2,0	0,06	0,24	0,50	0,74 (0,80)
PH DF	6;15;6;15;4	0,650	0,780	0,60	2,0	0,06	0,24	0,50	0,74 (0,80)

2 Infiltration und mechanische Lüftung

Ausgehend vom Niedersächsischen Sanierungsleitfaden [5] werden zunächst die Sanierung der Gebäudehülle, die energieeffiziente Optimierung der Belüftung sowie der Anlagentechnik, als mindestens erforderliche Maßnahmen zur energetischen Ertüchtigung eines Gebäudes auf den Archetypen angewandt.

Bezugnehmend auf den § 26 des Gebäudeenergiegesetzes (GEG) wird für den GEG-Standard ohne raumlufttechnische Anlagen die Luftdichtheit der Gebäudehülle mit $n_{50} \leq 2,0 \text{ h}^{-1}$ [14] und für das EH 55 mit mechanischer Lüftung mit $n_{50} \leq 1,5 \text{ h}^{-1}$ [8] festgelegt. Für den PH-Standard wird eine mechanische Belüftung mit Wärmerückgewinnung sowie ein Luftdichtheitskennwert von $n_{50} \leq 0,6 \text{ h}^{-1}$ [9] vorgegeben.

Für den gesetzlichen Mindeststandard nach GEG wird ein konstanter Infiltrationsluftwechsel von $0,3 \text{ h}^{-1}$ durch Undichtheiten in den Außenbauteilen angenommen. Im Vergleich dazu gelten für das Effizienzhaus 55 und das Passivhaus strengere Vorgaben mit einem Luftwechsel von $0,15 \text{ h}^{-1}$. Zudem wird angenommen, dass für den GEG-Standard eine Stoßlüftung erfolgt, die zweimal täglich (um 07:00 Uhr und 19:00 Uhr) für eine Dauer von jeweils fünf Minuten ein Fenster pro Fassadenfläche und Geschoss vollständig öffnet.

Im Falle des Effizienzhaus 55- und Passivhaus-Standards wird jeweils eine zentrale Lüftungsanlage zur Be- und Entlüftung des EFH-Archetyps eingesetzt. Mit einem reduzierten Luftwechsel von $0,55 \text{ h}^{-1}$ (inkl. des Infiltrationsluftwechsels) wird das Wohngebäude mit Zuluft versorgt und es werden CO_2 , Feuchtigkeit und Gerüche abgeführt. Die Anlage verfügt über eine Wärmerückgewinnung mit einem Wärmebereitstellungsgrad von 80 % [8]. Eine Anpassung der Betriebsart und Abschaltung der Lüftungsanlage im Tagesverlauf bleiben zunächst unberücksichtigt.

Eine freie nächtliche Lüftung findet zur passiven Kühlung des Gebäudes 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. Zeitrahmen: 21:00 Uhr bis 08:00 Uhr
2. Mittlere Außentemperatur der vergangenen 24 Std. $> 12^\circ\text{C}$
3. Zonentemperatur über 24°C
4. Umgebungstemperatur mindestens 2°C unterhalb der aktuellen Zonentemperatur

3 Randbedingungen

3.1 Interne Lasten

Es werden für alle Effizienzstandards einheitlich folgende interne Lasten festgelegt:

1) Personenbelegung

Ausgehend von einer mittleren Anzahl von 3 Bewohnenden für ein Niedersächsisches Einfamilienhaus (Ermittlung auf Grundlage der Zensus 2011; Mittelwert für die Baualtersklasse 1979 – 1983) erfolgt die Definition der pauschalen täglichen An- bzw. Abwesenheiten über ein Zeitprofil. Dieses wird auf Basis der Erhebung zur Zeitverwendung privater Haushalte des Statistischen Bundesamtes (DESTATIS) [15] definiert. In dieser sind jeweils die mittleren täglichen Zeitaufwände, differenziert für verschiedene Tätigkeiten enthalten. 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. Eine längere Abwesenheit der Bewohnenden durch Urlaub bleibt zunächst unberücksichtigt.

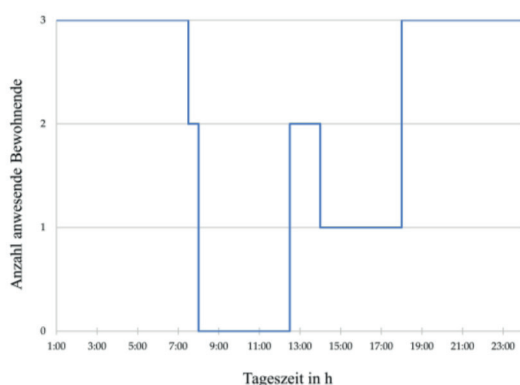


Abbildung 5: Anzahl der im Tagesverlauf im Archetyp EFH anwesenden Bewohnenden abgeleitet aus der Erhebung zur Zeitverwendung privater Haushalte 2022 des Statistischen Bundesamtes

Der Eintrag sensibler und latenter Wärme in die Zone sowie die CO₂-Produktion in der Zone sind gemäß ASHRAE [16] abhängig von Art und Umfang der Bekleidung (CLO) und dem Aktivitätslevel (MET) der Personen.

Folgende Annahmen werden ausgehend von einer mittleren Körperoberfläche eines Erwachsenen von 1,8 m²

für die Ermittlung der ungefähren Wärmeabgabe durch die Hausbewohner getroffen:

Für eine durchschnittliche Körperoberfläche von 1,8 m² pro Erwachsenen und den Mittelwert der Wärmeleistung für eine sitzende und eine stehende Aktivität, ergibt sich eine durch die drei Bewohnenden des Archetyps entstehende gesamte Wärmeleistung von 346,5 W. Diese berücksichtigt den Mittelwert aus Art und Umfang sommerlicher und winterlicher Bekleidung.

2) Elektrische Geräte

Ausgehend von dem Standardlastprofil für den Tageslastgang des Haushaltstromes des Bundesverbands der Energie- und Wasserwirtschaft e. V. wird ein repräsentatives Profil für den Niedersächsischen EFH-Archetypen angepasst an einen mittleren Jahresverbrauch von gerundet 2.500 kWh/a für einen 3-Personen-Haushalt erstellt [17]. Dieses enthält mittlere stündliche Leistungswerte differenziert nach Jahreszeiten und Kalendertagen.

3) Beleuchtung

Ausgehend von einer zeitgemäßen, stromsparenden Beleuchtungsanlage mit LED-Leuchtmitteln wird eine spezifische Wärmeleistung von 4 W/m² festgelegt [18]. Der Betrieb wird in Abhängigkeit von der Belegung und den Zonen-Sollwerten über ein Zeitprofil im Gebäudesimulationsmodell umgesetzt. Die Regelungssollwerte 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) [19].

4 Ausblick

Dieser Artikel gibt einen Überblick über die Definition des Referenzgebäudes des Niedersächsischen Einfamilienhauses „Archetyp EFH“, das im Rahmen des Forschungsprojekts „TraWoKat“ entwickelt wurde. Eine Weiterverwendung für Folgeuntersuchungen und die praktische Anwendung wird ausdrücklich gewünscht und unterstützt. Daher werden die zusammengetragenen Erkenntnisse, sowie deren Schlussfolgerungen auf Nachfrage in Form eines verpackten Archivs zur Verfügung gestellt. Die Inhalte dieses Archivs, deren Dateiformate und verwendete Tools fasst die **Tabelle 4** zusammen.

Tabelle 4: Übersicht über die Inhalte, die zur Erstellung verwendeten Softwares sowie Dateiformate eines Dateiarchivs für einen jeden Archetypen

Archiv-Inhalte	Verwendete Software	Dateiformat
Log-Files	MS Word	*.pdf
Dokumentation Archetyp	MS Word	*.pdf
3D-Gebäudemodell	Autodesk Revit ®	*.ifc (2x3)
Heizlastberechnung	Solar-Computer	*.pdf

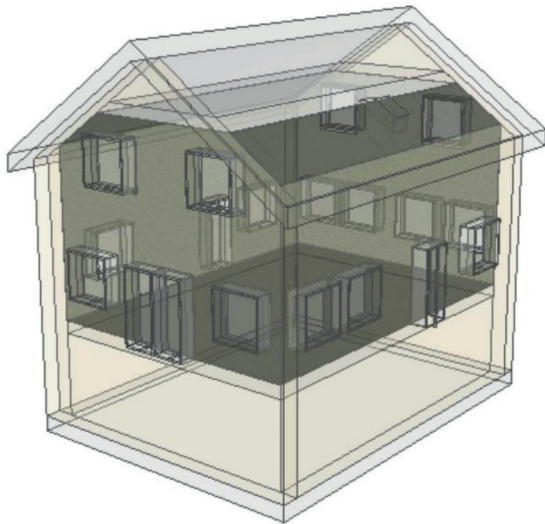


Abbildung 6: IFC-Modell des Archetyps Einfamilienhaus, importiert in die Gebäudesimulationssoftware IDA ICE

Da im zeitlichen Verlauf des Projekts mit Änderungen der Grundparameter des Archetyp EFH zu rechnen ist, die aufgrund von Rückmeldungen z. B. durch Projektpartner eingebracht werden, werden die Archive mit einer Versionsnummer und einem Log-File versehen, aus dem die wesentlichen Veränderungen hervorgehen.

Im weiteren Projektverlauf soll die entwickelte Methodik auch auf größere Wohngebäude wie z. B. Mehrfamilienhäuser übertragen werden, sodass das Ziel, den gesamten Niedersächsischen Wohngebäudebestand repräsentativ zu untersuchen, erreicht werden kann. Außerdem werden Detailuntersuchungen durchgeführt, in denen die Unterschiede zwischen den Berechnungsergebnissen (u. a. Jahresverlauf der Betriebsdaten von Heizung & Lüftung) von IDA/ICE bzw. Polysun herausgearbeitet und minimiert werden. Der fortwährende Austausch mit Praxispartnern und die daraus folgende Anpassung des Gebäudemodells, soll es Herstellern (z. B. für simulationsbasierte Produkterprobung), Forschungseinrichtungen aber auch Projektentwicklern oder Liegenschaftsverwaltungen erleichtern, mit für Niedersachsen repräsentativen Wohngebäuden zu arbeiten.

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] 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.
- [2] T. Loga, „Gebäudetypologien europäischer Länder – Schema für die energetische Bewertung nationaler Gebäudebestände“, *Bauphysik*, Bd. 34, Nr. 2, S. 78–83, Apr. 2012.
- [3] R. Vollmer u. a., „Bericht zu AP 3.1: LowEx-Bestand Referenzgebäude: Geometrie, Bauphysik, Last-Zeitreihen und Sanierungsszenarien“, Apr. 2022.
- [4] § 3 NKlimaG, *Niedersächsische Klimaziele, Hinwirkungsverpflichtung, Vorbildfunktion, Berücksichtigungsgebot*. 2023.
- [5] Klimaschutz- und Energieagentur Niedersachsen GmbH, Hrsg., „Energetische Sanierung - Ein Praxisleitfaden zur Gebäudehülle“. Klimaschutz- und Energieagentur Niedersachsen GmbH, Dezember 2022.
- [6] Statistische Ämter des Bundes und der Länder, „Zensus11_Datensatz_Gebaeude“. 1. März 2018.
- [7] *Gesetz zur Einsparung von Energie und zur Nutzung erneuerbarer Energien zur Wärme- und Kälteerzeugung in Gebäuden (Gebäudeenergiegesetz - GEG)*. 2023.
- [8] KfW, „Anlage zum Merkblatt: Energieeffizient Bauen“, KfW, Frankfurt, Jan. 2020.
- [9] Passivhaus Institut, Hrsg., „Gebäudekriterien - Passivhaus - EnerPHit - PHI-Energiesparhaus“. April 2023.
- [10] W. Pehnt, *Deutsche Architektur seit 1900*. Deutsche Verlags-Anstalt, 2005.
- [11] Institut Wohnen und Umwelt, „Geb-Typologie D - Datensätze - IWU -April 2005.xls“. April 2005. Zugriffen: 25. September 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://www.iwu.de/fileadmin/publikationen/gebaeudebestand/2005_IWU_Deutsche-Geb%C3%A4udetypologie-Daten-und-Bilder.zip
- [12] T. Loga, B. Stein, N. Diefenbach, R. Born, und Institut Wohnen und Umwelt, Hrsg., *Deutsche Wohngebäudetypologie: beispielhafte Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von typischen Wohngebäuden*, 2., erw. Aufl. Darmstadt: IWU, 2015.

- [13] M. Mittag, *Kleine Eigenheime - Planen und Einrichten*. Gütersloh: C. Bertelsmannverlag.
- [14] *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. Zugriffen: 25. September 2024.
- [15] „Statistischer Bericht - Erhebung zur Zeitverwendung privater Haushalte“, Feb. 2024.
- [16] American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. Atlanta, Georgia, Hrsg., „ASHRAE Handbook-Fundamentals“. 2021.
- [17] M. Frondel und N. Ritter, „Datenauswertung zum Energieverbrauch der privaten Haushalte differenziert nach Gebäudemerkmale: Sonderauswertung im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS)“, Rheinisch-Westfälisches Institut für Wirtschaftsforschung, Essen, RWI Projektbericht, 2012.
- [18] T. Meyer und C. Fieberg, „Analyse der Lastarten bei der Kühllastberechnung von bestehenden Gebäuden“, *KI - Kälte · Luft · Klimatechnik*, S. 44–48, Sep. 2018.
- [19] 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.

Definition typischer sanierter niedersächsischer Wohngebäude als Basis für die dynamische Gebäudesimulation

Teil II: Heizkörper und Warmwasserprofile für ein repräsentatives Niedersächsisches Einfamilienhaus (Archetyp EFH) Version 14.08.2024

Felix Kleff^{1*}, Tanja Mehring¹, Abdulraheem Salaymeh², Stefan Holler², Sebastian Föste¹, Erik Bertram¹

Hochschule für angewandte Wissenschaft und Kunst Hildesheim/Holzminde/Göttingen,

¹Billerbeck 2, 37603 Holzminde und ² Rudolf-Diesel-Straße 12, 37075 Göttingen.

*Korrespondierender Erstautor: felix.kleff@hawk.de, +49 5531/ 126 125

Kurzfassung

Die Entwicklung repräsentativer Gebäudemodelle für thermische Simulationen ist eine etablierte wissenschaftliche Methode zur Untersuchung von Gebäudebeständen und einer Ableitung grundlegender Zusammenhänge. Für das Land Niedersachsen werden Wohngebäudemodelle entwickelt, die den niedersächsischen Gebäudebestand abbilden und gleichzeitig aktuelle Vorgaben zur Sanierung von Wohngebäuden berücksichtigen. Aus diesem speziell auf Niedersachsen ausgerichteten methodischen Rahmen lassen sich zahlreiche Planungsparameter für Wohngebäude ableiten, die im weiteren Projektverlauf verwendet werden, um darauf aufbauend nicht nur Wärme- sondern auch Temperaturkataster zu erstellen.

Schlagworte:

Dynamische Gebäudesimulation; Energetische Gebäudesanierung; Niedersächsischer Wohngebäudebestand; Wärmeversorgung, Niedersächsischer Archetyp Einfamilienhaus

1 Einleitung

Die Konzeption von Referenzhausmodellen ist eine anerkannte wissenschaftliche Methode zur Untersuchung von Gebäude- und Liegenschaftsbeständen. Diese Modelle ermöglichen es, eine umfassende stationäre thermische Simulation von Gebäuden durchzuführen, mithilfe derer sowohl eine detaillierte Betrachtung als auch eine Bewertung von Komponenten, Bauteilen, Energieversorgungssystemen und Sanierungsstrategien durchführbar ist [1], [2]. Häufig werden für diese Methode Referenzhäuser definiert, die ganze Regionen – wie beispielsweise Mitteleuropa – repräsentieren und verschiedene Dämmstandards (z. B. saniert/unsaniert) aufweisen. Die Festlegung dieser Gebäude fußt zumeist auf aktuellen Bauvorschriften, Querschnittstudien und wird häufig durch eigene Annahmen und Einschätzungen ergänzt [2], [3].

Im vorliegenden Papier wird auf das Referenzgebäude eines typischen sanierten niedersächsischen Einfamilienhauses Bezug genommen, das im Rahmen des Forschungsprojektes „Transformationsstrategien für Wohngebäude und –quartiere mit modellbasierten Wärme- und Temperaturkatastern“ (TraWoKat) entwickelt wurde und als Archetyp EFH bezeichnet wird. Die in diesem Papier beschriebenen Erkenntnisse erlauben es daher, regionspezifische Rückschlüsse für das Land Niedersachsen zu ziehen. Für dieses Gebäude wird, neben der Gebäudehülle, die verbaute Anlagentechnik Einfluss auf die notwendigen Wärmemengen und Temperaturniveaus nehmen. Die definierte Anlagentechnik beinhaltet die

Lüftungstechnik, die Trinkwarmwasserversorgung und die Heizungsanlage auf der Verteilseite, d. h. exkl. der Wärmeerzeugungsanlage. Für die Lüftungstechnik ergeben sich Unterschiede vor allem aus den angesetzten Sanierungsstandards, während die Trinkwarmwasserversorgung für alle Sanierungsstandards als identisch angenommen wird.

Die Definition der Heizungstechnik ist essenziell, um anhand der Archetypen die notwendigen Temperaturniveaus sanierter Wohngebäude abzuleiten. Durch die verbesserten Bauteileigenschaften nach einer energetischen Sanierung sinkt nicht nur der Energiebedarf, sondern auch das notwendige Temperaturniveau der verbauten Heizkörper. Ziel des Forschungsprojekts ist es, die ermittelten notwendigen Temperaturniveaus der unterschiedlichen Archetypen (d. h. Referenzhäuser der Typen Einfamilienhaus, Mehrfamilienhaus und Reihenhaus) auf ganze Liegenschaftsbestände zu übertragen. Neben klassischen Wärmekatastern sollen zusätzlich auch Temperaturkataster entwickelt werden, mit deren Hilfe die Eignung von Niedertemperatur Wärmenetzen und dezentralen elektrischen Wärmepumpen überprüft werden können soll.

In vorliegendem Papier wird die Methodik zur Ermittlung der Heizkörper sowie das Trinkwarmwasserzaprofil des Archetyp EFH vorgestellt. Die Ermittlung der Bestandsheizkörper und die Auswirkungen einer energetischen Sanierung sowie eines Heizkörperaustausches auf die benötigten Vor- und Rücklauftemperaturen werden in diesem Artikel beispielhaft anhand des Effizienzhaus

55-Standards (EH 55) aufgeführt, da dieser vom Niedersächsischen Sanierungsleitfaden [4] empfohlen wird.

2 Raumwärmeversorgung

Für die Definition des Archetyps EFH werden grundlegende Parameter für die einzelnen Komponenten wie z. B. die Größe und der Typ der in den Räumen verbauten Heizkörper im Ausgangszustand benötigt, um damit eine Aussage über die mögliche Absenkung der Versorgungstemperaturen des wassergeführten Heizsystems im sanierten Zustand treffen zu können. Die Definition des Verteilnetztyps im Bestand und der Bestandsheizkörper wird in nachfolgendem Unterkapitel 2.1 hergeleitet. Exemplarisch für die Sanierung auf den EH 55-Standard werden die Absenkungen der Auslegungstemperaturen der einzelnen Heizkörper ausgehend von typischen Heizkörperauslegungen im unsanierten Zustand der Errichtung der Heizkörperanlage berechnet.

Zur Beheizung von Neubauten und Bestandsgebäuden kommen sowohl wassergeführte Systeme als auch Luftheizsysteme und Stromdirektheizungen in Form von Infrarotpaneelen oder sogenannten Nachtspeicherheizungen zum Einsatz. Die Verwendung von wassergeführten Systemen, insbesondere von Zweirohrsystemen, die in mehr als 89 % aller Gebäude verbaut wurden, stellt den Normalfall in Deutschland dar [5], [6].

Dabei erfolgt in den meisten Fällen die Wärmeversorgung zentral und die Wärme für Trinkwarmwasser und Heizungswasser wird durch ein 4-Leiternetz verteilt [6]. Ebenfalls häufig wird die Raumwärmeversorgung zentral mithilfe eines 2-Leiternetzes sichergestellt, wo die Erwärmung von Trinkwarmwasser (TWW) dezentral mittels z. B. elektrischer Durchlauferhitzer erfolgt [6]. Um die mögliche Variationsbreite zu begrenzen und sich auf die Varianten mit der größten Praxisrelevanz zu beschränken, wird der Archetyp EFH sowohl mit einem 4-Leiternetz ausgestattet untersucht als auch mit einem 2-Leiternetz.

Die Zuleitung (horizontale Verteilung) der Raumwärmeversorgung zu den Steigsträngen wird in den meisten Fällen unterhalb der untersten Geschossdecke ausgeführt und wird als untere Verteilung bezeichnet [6]. Im fünften Teil der DIN V 18599 [7] werden zur energetischen Gebäudebilanzierung und der damit verbundenen Ermittlung der Verteilleitungslängen vier bzw. fünf verschiedene Verteilnetztypen angegeben. Im Gebäudebestand sind hier vor allem der „Steigstrangtyp“ und der „Etagenringtyp“ vorzufinden [8]. Der Archetyp des Niedersächsischen Einfamilienhauses wird mit einer Heizungsverteilung in Form des Etagenringtyps definiert, da diese Art der Verteilung sowohl im Altbau als auch im Neubau vorhanden ist [8]. Bei diesem Verteilnetztyp wird jedes Geschoss mit demselben Steigstrang erschlossen, von welchem die Ringleitung zur Wärmeverteilung im entsprechenden abgeht. Eine schematische Darstellung des Typs ist **Abbildung 1** zu entnehmen. In Rot dargestellt

ist der Wärmeerzeuger, der über wasserführende Leitungen die Heizkörper (als schwarz umrandete Kästen dargestellt) des Erdgeschosses (EG) und des Obergeschosses (OG) versorgt.

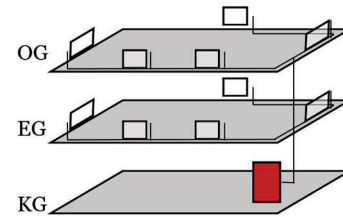


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Heizkörperanbindung im Erdgeschoss (EG) und im Obergeschoss (OG) an den in Rot dargestellten Wärmeerzeuger im Kellergeschoss (KG) für den Archetyp EFH nach Schema des Verteilnetztyp I „Etagenringtyp“ nach DIN V 18599-5 [7].

Die im Verlauf des Artikels ermittelten Auslegungstemperaturen der Heizkörper sind unabhängig vom vorzufindenden Verteilnetz und können entsprechend in allen zuvor genannten Fällen verwendet werden.

2.1 Heizkörper im Ausgangszustand und im Archetyp EFH

Im Gebäudebestand ist auch innerhalb einer Baualtersklasse eine Vielzahl unterschiedlicher Heizkörpertypen vorzufinden. Die Wahl der verbauten Heizkörper erfolgte im Gebäudebestand häufig ohne vorangegangene Heizlastberechnung oder Heizkörperbemessung [9]. Da bei der Definition des Archetyp EFH ein besonderer Fokus auf der Reduzierung der Versorgungstemperaturen durch eine energetische Gebäudesanierung und durch einen Heizkörpertausch liegt, soll eine raumweise Berechnung der Heizkörpergrößen möglich sein. Vor diesem Hintergrund werden Annahmen dazu getroffen, welche Heizkörper (Typ, Länge und Höhe) in den Räumen vorzufinden sind.

Die Größe der Heizkörperfläche wird danach festgelegt, wieviel Fläche in einem Raum für einen Heizkörper zur Verfügung steht und um welchen Heizkörpertypen es sich im Bestand handelt. Der Ansatz zur Ermittlung der verbauten Heizflächen sowie eine Übersicht über die verbauten Heizkörper vor und nach der Sanierung inkl. der nötigen Auslegungstemperaturen wird nachfolgend vorgestellt. Für die Berechnungen wurden folgende Annahmen getroffen:

- 1.) Jeder beheizte Raum verfügt über mindestens eine Heizfläche.
- 2.) Diese Heizfläche ist immer unter dem Fenster angeordnet. Diese ist bei wassergeführten Heizungsanlagen deshalb in den meisten Fällen unterhalb des Fensters angeordnet, um Fallluftströme vor den Fensterflächen zu kompensieren und so für eine behagliche Umgebung zu sorgen [10]. Für die Untersuchung bietet es sich daher an, die verfügbare Heizfläche an der vorhandenen Fensterfläche auszurichten. Die Heizkörperlänge (L_{HK}) ergibt sich also aus der zur Verfügung stehenden Fensterbreite.

- 3.) Die Standardheizkörperhöhe des Archetyps EFH wird bei Anordnung unterhalb eines Fensters auf 0,60 m festgelegt. Die Brüstungshöhe ist ebenfalls in der Niedersächsischen Bauordnung [11] zu finden – diese beläuft sich auf mindestens 0,80 m bei Bauten mit einer Absturzhöhe von 1,00 m bis 12,00 m. Bei über 12,00 m Absturzhöhe muss die Brüstungshöhe mindestens 0,90 m betragen.

Die Berechnung der Fensterbreite bzw. der Heizkörperlänge erfolgt mithilfe der beschriebenen Annahmen durch Division der Fensterfläche des Raums durch die Höhe des Fensters. Somit bedarf es einer Festlegung der Fensterflächen der Räume.

Der Mindestfensterflächenanteil bezogen auf die Grundfläche eines Wohnraumes ist in den Landesbauordnungen festgelegt und beträgt in Niedersachsen 12,5 % [11]. Generell kann die mit diesen Annahmen ermittelte Heizfläche als sehr konservativ, d. h. eher klein, eingestuft werden, da die in den Landesbauordnungen festgelegten Mindestfensterflächenanteile den Anforderungen der Tageslichtnorm DIN EN 17037 [12] nicht gerecht werden können. Tendenziell werden heute grundflächenbezogene Fensterflächenanteile von 20 %, teilweise von 25 % realisiert.

Daher werden die tatsächlich vorhandenen Fensterflächen des Archetyps mitberücksichtigt. Diese wurden in Anlehnung an die Daten der IWU-Gebäudetypologie [13] und den Gebäudetypen „EFH-G“ der Baualtersklasse 1979 – 1983 festgelegt und liegen mit 21,5 % deutlich über den 12,5 %, die als Mindestfensterflächenanteil durch die Niedersächsische Bauordnung [11] vorgegeben sind.

Da jedoch nicht jedes Fenster aufgrund der Art des Fensters (z. B. bodentiefe Terrassentüren), der Raumnutzung oder der Zimmereinrichtung dafür geeignet ist, um vor diesem einen Heizkörper anzubringen, wurde für jeden Raum eine nutzbare Fensterfläche bestimmt, um diesen Effekt zu berücksichtigen.

Die vorgestellte Ermittlung von L_{HK} über die grundflächenbezogenen Fensterflächenteile stellt einen Kompromiss zwischen einer konservativen, also einer eher zu kleinen Heizkörperabschätzung, und einer gleichzeitig möglichst realitätsnahen Abbildung dar. Aus diesem Grund werden die nutzbaren grundflächenbezogenen Fensterflächenanteile der Räume gemittelt und anschließend jedem Raum derselbe Wert zugewiesen. Somit

verfügt jeder Raum über einen grundflächenbezogenen Fensterflächenanteil von mindestens 16,9 %.

Ausnahmen stellen Räume dar, die eine höhere Norm-Raumtemperatur als 20 °C benötigen (z. B. Badezimmer, 24 °C). Diese Räume erhalten zur Kompensation der höheren Heizlast bei gleichzeitig niedrigerer Übertemperatur des Heizkörpers, einen erhöhten für die Anbringung eines Heizkörpers nutzbaren grundflächenbezogenen Fensterflächenanteil. Der Wert zur Erhöhung dieses Fensterflächenanteils wird aus dem Verhältnis der Differenz zwischen Norm-Raumtemperatur des Badezimmers und Norm-Außentemperatur zur Differenz zwischen der Norm-Raumtemperatur eines normalen Wohnraums und Norm-Außentemperatur ermittelt.

Aus den zugrunde gelegten Raumgrößen, der energetischen Qualität des Gebäudes und weiteren Parametern wie der Raumtemperatur und der Luftwechselrate, ergeben sich Raumheizlasten nach DIN EN 12831-1 [14], die durch die zur Verfügung stehenden Heizkörper gedeckt werden müssen. Dabei wird davon ausgegangen, dass die Raumwärme im Auslegungsfall (Referenzgebäude, Baualtersklasse 1979 - 1983) durch den Heizkörper mit einer Vorlauftemperatur von 70 °C und einer Rücklauftemperatur von 55 °C in den jeweiligen Raum eingebracht wird. Diese Annahme beruht auf der „Bekanntmachung der Regeln zu Datenaufnahme und Datenverwendung im Wohngebäudebestand“ [15], in der diese Temperaturen vorgegeben werden für den Fall, dass keine Auslegungstemperaturen bekannt sind.

Mithilfe der ermittelten Heizfläche (Höhe 600 mm, Länge L_{HK} aus **Tabelle 1**) und der logarithmischen Übertemperatur $\Delta\theta_{ln,alt}$ (42,06 °C), kann durch Umrechnen der Normheizleistungen der Bestandsheizkörper $q_{Norm,HK,alt}$ nach DIN EN 442 [16] bzw. DIN 4703-1 [17] ein passender Heizkörpertyp gewählt werden, der mindestens so viel Leistung $q_{HK,alt}$ aufweist, wie der Raum an Leistung q_{alt} benötigt.

Neben der Sanierung des Gebäudes führt auch der gezielte Austausch kritischer Heizkörper zu niedrigeren Auslegungstemperaturen. Mit dem Ziel, die nötigen Temperaturen der im Gebäude verbauten Heizkörper so weit wie möglich zu senken, werden beide Möglichkeiten ausgeschöpft. Eine Übersicht über die gewählten Heizkörpertypen im Ausgangszustand wird in **Tabelle 1** gegeben.

Tabelle 1: Übersicht über die Parameter (Länge, Typ, Heizleistung) der verbauten Heizkörper mit einer Höhe von 600 mm als auch der Raumheizlasten des Archetyp EFH im Ausgangszustand (Baualtersklasse 1979-1983) sowie der sich daraus ergebenden Überdimensionierung

	Raum	Heizlast q_{alt} in W	L_{HK} in mm	Heizkörpertyp	Normheizleistung $q_{Norm,HK,alt}$ in W	Heizleistung $q_{HK,alt}$ bei $\Delta\vartheta_{in,alt}$ in W	Überdimensionierung ($q_{HK,alt} / q_{alt}$) - 1
EG	Kochen	1.098	1.200	21	1.687	1.353	23,2 %
	Flur	629	1.500	11	1.415	1.134	80,4 %
	Bad	1.153	1.000	22	1.694	1.191	3,3 %
	Wohnen	1.511	2.200	11	2.075	1.664	10,1 %
	Essen	1.621	2.400	11	2.263	1.815	12,0 %
OG	Bad	1.153	1.300	21	1.828	1.285	11,5 %
	Flur	553.0	1.500	11	1.415	1.134	105,1 %
	Kind 1	1.176	1.900	11	1.792	1.437	22,2 %
	Arbeiten	935.0	1.200	21	1.687	1.353	44,7 %
	Schlafen	1.369	2.400	11	2.263	1.815	32,6 %

Die Heizkörper sind zwischen 3,3 % und 105,1 % zu groß ausgelegt bzw. überdimensioniert und verfügen daher über eine weiterhin vorsichtige jedoch durchaus realitätsnahe Größe. Im Bestand sind Heizkörperdimensionierungen zu finden, die zwischen 20 % und 390 % überdimensioniert sind [9]. Durch diese Überdimensionierung könnten die zu groß ausgelegten Heizkörper auch bereits im Bestand mit einer niedrigeren Temperatur eine für die Räume ausreichend hohe Heizleistung erbringen. Die mögliche Reduktion der Versorgungstemperaturen wird daher nicht nur die energetische Gebäudesanierung und den Heizkörpertausch beeinflusst, sondern auch durch die Überdimensionierung der Heizkörper. Um zu verdeutlichen welche Heizkörper getauscht werden müssten, um nach einer Sanierung auf EH 55-Standard

bestimmte Auslegungstemperaturen zu erreichen, wurde das nachfolgende Diagramm (**Abbildung 2**) erstellt. Sofern die Punkte außerhalb des rot hinterlegten Bereiches liegen, ist die Heizleistung des Heizkörpers q_{HK} ausreichend, um mit den angegebenen Temperaturpaaren die jeweilige Raumheizlast nach erfolgter Sanierung auf EH 55-Standard q_{EH55} zu decken. Es wird ersichtlich, dass sämtliche Heizkörper mit einer Vorlauftemperatur von 55°C und einer Rücklauftemperatur von 45°C (55/45) ausreichende Heizleistungen aufweisen. Bei einer Absenkung der Auslegungstemperaturen auf 45/35 müssten die Heizkörper in den Bädern getauscht werden – entsprechend 20 % aller Heizkörper. Ohne Heizkörpertausch ist eine Absenkung der Auslegungstemperatur des kritischen Heizkörpers von 70/55 auf 46/36 möglich.

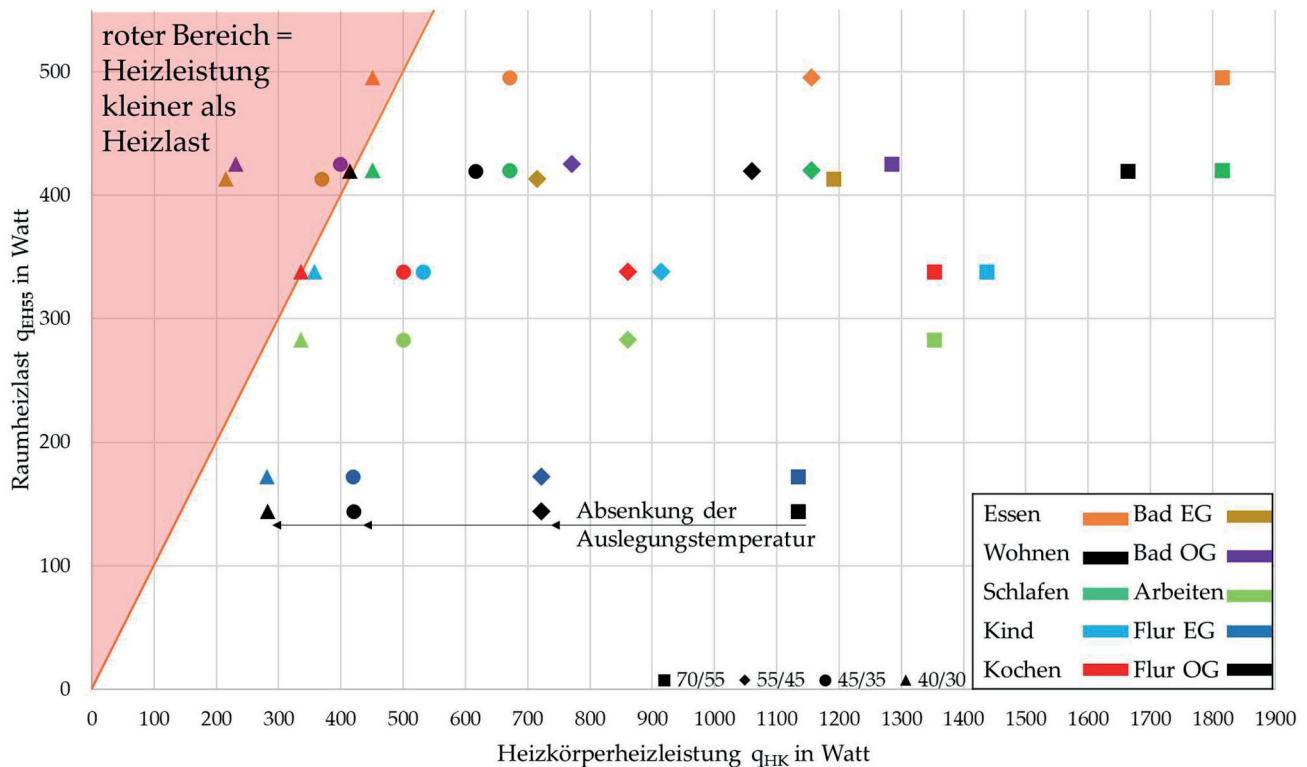


Abbildung 2: Darstellung der verbauten Heizkörper und deren Leistung q_{HK} bei verschiedenen Auslegungstemperaturen im Verhältnis zur Raumheizlast q_{EH55} nach erfolgter Sanierung

Mit dem Anspruch die Auslegungstemperaturen so weit wie möglich abzusenken, gleichzeitig jedoch auch den finanziellen Aufwand für den Heizkörperaustausch so niedrig wie möglich zu halten, werden lediglich die Heizkörper der Badezimmer getauscht. Durch diese Maßnahme werden die Auslegungstemperaturen des kritischen Heizkörpers auf ca. 42/32 abgesenkt und für den auf EH 55-Standard sanierten Archetyp EFH festgelegt. Die ermittelte Normheizleistung aller Heizkörper nach erfolgtem Heizkörperaustausch beläuft sich damit auf insgesamt 20,26 kW.

3 Trinkwarmwasserbedarf

Neben der Raumwärmeversorgung kommt, insbesondere in Wohngebäuden, der Deckung des Trinkwarmwasserbedarfs der Hausbewohnenden eine große Bedeutung zu. Dies gilt umso mehr für sanierte Gebäude, da der Heizwärmebedarf durch die erfolgten Dämmmaßnahmen sinkt, der Trinkwarmwasserbedarf zumeist aber unabhängig von der Gebäudesanierung ist. Da den Autor*innen für dieses Themengebiet keine für Niedersachsen spezifischen Regelwerke bekannt sind, erfolgt die Herleitung des Trinkwarmwasserbedarfs mithilfe von für Deutschland und zum Teil für Europa geltenden Vorgaben. Die unterschiedlichen Vorgaben der verschiedenen Quellen werden im Folgenden verglichen.

Der Trink(warm)wasserbedarf Deutschlands kann seit Mitte 2023 beim Warmwasserspiegel [18], der vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz gefördert wird, eingesehen werden. Die Daten beruhen auf den Eingaben von Endnutzenden. Aus den Daten geht hervor,

dass Privatpersonen in Deutschland pro Tag zwischen 27 l bis 49 l Trinkwarmwasser beziehen. Diese Werte entsprechen (Zapftemperatur 40 °C, Kaltwassertemperatur 10 °C) 2,83 kWh/d (27 l) bis 5,12 kWh/d (49 l) und werden auf der rechten Seite der **Abbildung 3** durch den hellblauen Balken dargestellt, der die obere und untere Grenze abbildet. Die Trinkwarmwasserbedarfe, die sich aus der DIN EN 12831-3 [19], der VDI 2067 Blatt 12 [20] ergeben sind ebenfalls in **Abbildung 3** aufgezeigt. Das Blatt 12 der VDI 2067 [20] überspannt einen Bereich von 1,49 kWh/d bis 4,95 kWh/d, während durch die DIN EN 12831-3 [19] zwischen 2,79 kWh/d und 11,16 kWh/d angesetzt werden können. Die Werte der DIN V 18599-5 [7] und einer Untersuchung des Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR [21] sind abhängig von der Nettogrundfläche des Gebäudes und belaufen sich auf 3,51 kWh/d bzw. 3,42 kWh/d. Außerdem in **Abbildung 3** zu sehen ist die EU-Delegierten Verordnung Nr. 811/2013 [22], die einen Tagesbedarf von 5,845 kWh/d ansetzt. Dieser Wert findet ebenfalls in DIN EN 16147 [23], der VDI 4645 [24], der DIN EN 15450 [25] Anwendung.

Vor dem Hintergrund, dass der Anteil des Trinkwarmwasserbedarfs am Gesamtenergiebedarf eines Wohngebäudes bei sinkenden Raumwärmebedarfen durch energetische Gebäudesanierung steigt, sowie wassersparende Armaturen zu sinkenden Trinkwarmwasserbedarfen führen [26], wird der Energiebedarf in Übereinstimmung mit der DIN V 18599-5 [7] auf 3,51 kWh/d festgelegt.

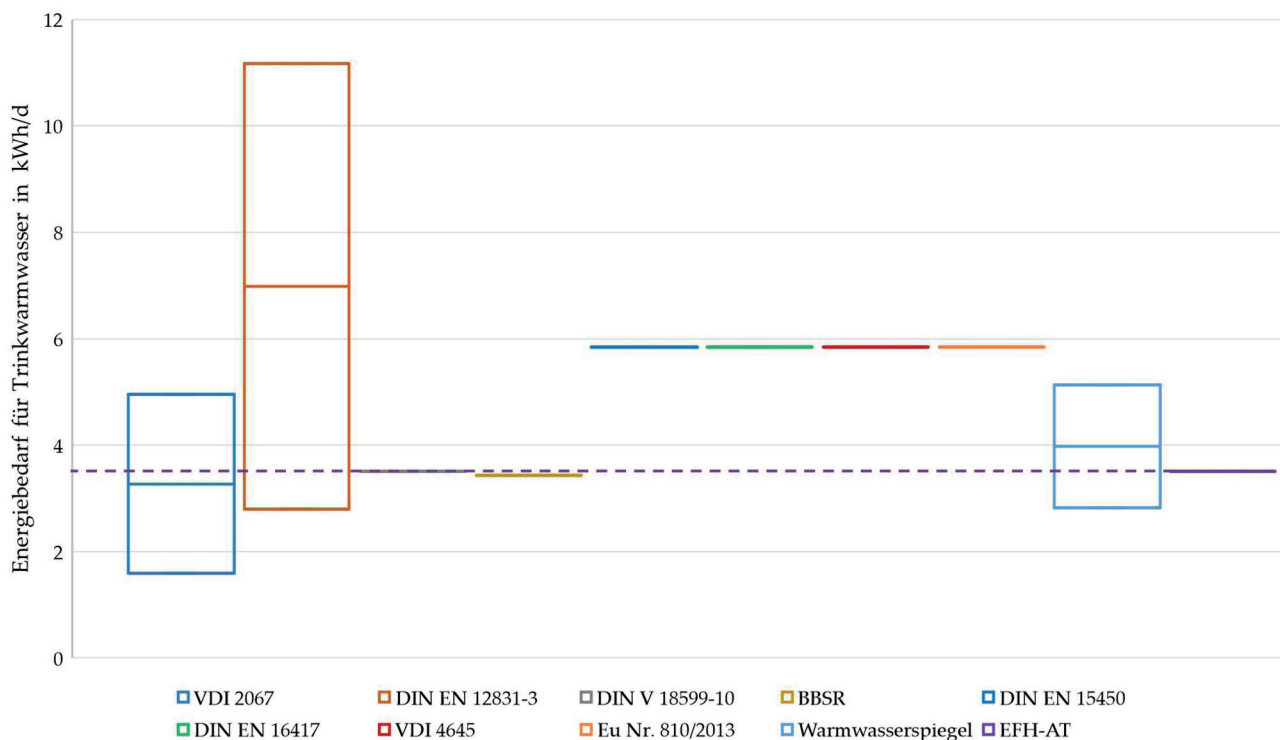


Abbildung 3: Gegenüberstellung der möglichen ansetzbaren Energiebedarfe in Form von Trinkwarmwasser in Abhängigkeit zur gewählten Literaturquelle

Der Tagesbedarf an Trinkwarmwasser soll als Grundlage für die Simulation in ein Zapfprofil überführt werden, sodass die Wärmeerzeugeranlage modelliert werden kann. In der EU-Delegierten Verordnung Nr. 811/2013 [27] wird nicht nur ein Trinkwarmwasserbedarf für einen Tag vorgegeben, sondern es sind auch Zapfprofile für Familien zu finden. Aus dem Profil M geht hervor, dass der Trinkwarmwasserbedarf i. H. v. 5,845 kWh/d täglich durch insgesamt 23 Zapfungen bezogen wird, wobei die Zapfungen um 07:05 Uhr und um 21:30 Uhr die höchsten Energiebedarfe aufweisen. Der angesetzte Energiebedarf aus der Delegierten Verordnung Nr. 811/2013 [27] liegt somit 60 % über dem festgelegten Energiebedarf des Archetyps EFH und muss entsprechend angepasst werden. Um den Einfluss relevanter (größerer) Zapfungen auf die Spitzenlasten der Wärmeerzeuger dennoch möglichst vollständig zu berücksichtigen, werden sämtliche Zapfungen, bei denen 0,105 kWh benötigt werden, nicht mit in das Zapfprofil des Archetyps EFH aufgenommen. Es verbleiben daher die Zapfungen um 07:05 Uhr, um 12:45 Uhr, um 20:30 Uhr und um 21:30 Uhr. Da die verbleibende Energiemenge dieser 4 Zapfvorgänge (Q_{tap}) jedoch weiterhin über dem Tagesbedarf des Archetyps EFH liegen würde, wird eine prozentuale Anpassung vorgenommen, um die Energiemengen der Zapfungen des Archetyps EFH $Q_{\text{tap,EFH,AT,i}}$ zu bestimmen. Für die Zapftemperatur ($T_{\text{tap,i}}$) der einzelnen Entnahmezeitpunkte werden die Temperaturen aus der EU Nr. 811/2013 [27] nicht verändert. Die maximalen Volumenströme ($\dot{V}_{\text{tap}}$) der jeweiligen Zapfungen werden auf 6 l/min festgesetzt. Damit liegen die Volumenströme der Entnahmen um 12:45 Uhr und um 20:30 Uhr bis zu

50 % über den Werten aus der EU Nr. 811/2013 [27]. Dieser Wert wurde gewählt, um einen Ausgleich zu den höheren angesetzten Volumenströmen der Zapfungen um 07:05 Uhr und um 21:30 Uhr in der DIN EN 15450 [25] (10 l/min) zu schaffen. Die Kaltwassertemperatur wird für alle Zapfungen in Übereinstimmung mit der EU Nr. 811/2013 [27] auf 10 °C festgelegt. Die beschriebenen Zusammenhänge werden in nachstehender **Tabelle 2** aufgezeigt.

Tabelle 2: Zapfzeitpunkte und Entnahmemengen gemäß EU Delegierten Verordnung Nr. 811/2013 [41] und daraus abgeleitet die Zapftemperatur, der Volumenstrom als auch die Zapfzeitpunkte und Entnahmemengen für den Archetyp EFH

Zapfzeitpunkt	07:05	12:45	20:30	21:30	Σ
$Q_{\text{tap,i}}$ (EU Nr. 811/2013) in kWh	1,4	0,315	0,735	1,4	3,85
Anteil in %	36,36 %	8,18 %	19,09 %	36,36 %	100,00 %
$Q_{\text{tap,EFH,AT,i}}$ in kWh	1,28	0,29	0,67	1,28	3,51
Volumenstrom $\dot{V}_{\text{tap}}$ in l/min	6	6	6	6	
Zapftemperatur $T_{\text{tap,i}}$ in °C	40	55	55	40	

4 Ausblick

Dieser Artikel stellt die Methodik zur Ermittlung der verfügbaren Heizkörperflächen in den einzelnen Räumen und der nötigen Versorgungstemperaturen dieser Heizkörper im Archetyp EFH vor, welche im Rahmen des Forschungsprojekts „TraWoKat“ entwickelt wurde. Es zeigt sich, dass durch die energetische Sanierung des Archetyps EFH auf den EH 55-Standard und einen gezielten Heizkörperaustausch drastische Absenkungen der Versorgungstemperaturen möglich sind – von 70/55 auf ca. 42/32 am kritischen Heizkörper. Darüber hinaus wurde die Herleitung des Trinkwarmwasserbedarfs sowie des Trinkwarmwasserzaprofils des Archetyp EFH dargestellt.

Da im zeitlichen Verlauf des Projekts mit Änderungen der Grundparameter des Archetyps EFH zu rechnen ist, die aufgrund von Rückmeldungen z. B. durch Projektpartner eingebracht werden, werden die Archive (vgl. [28] Kapitel 8) mit einer Versionsnummer und einem Log-File versehen, aus dem die wesentlichen Veränderungen hervorgehen.

Im weiteren Projektverlauf soll die entwickelte Methodik auch auf größere Wohngebäude wie z. B. Mehrfamilienhäuser übertragen werden, sodass das Ziel, den gesamten Niedersächsischen Wohngebäudebestand repräsentativ zu untersuchen, erreicht werden kann. Außerdem werden Detailuntersuchungen durchgeführt, in denen die Unterschiede zwischen den Berechnungsergebnissen (u. a. Jahresverlauf der Betriebsdaten von Heizung & Lüftung) von IDA ICE [29] bzw. Polysun [30] herausgearbeitet und minimiert werden.

Der fortwährende Austausch mit Praxispartnern und die daraus folgende Anpassung des Gebäudemodells, soll es Herstellern (z. B. für simulationsbasierte Produkterprobung), Forschungseinrichtungen aber auch Projektentwicklern oder Liegenschaftsverwaltungen erleichtern, mit für Niedersachsen repräsentativen Wohngebäuden zu arbeiten.

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.

Literaturverzeichnis

- [1] 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.
- [2] T. Loga, „Gebäudetypologien europäischer Länder – Schema für die energetische Bewertung nationaler Gebäudebestände“, *Bauphysik*, Bd. 34, Nr. 2, S. 78–83, Apr. 2012.
- [3] R. Vollmer u. a., „Bericht zu AP 3.1: LowEx-Bestand Referenzgebäude: Geometrie, Bauphysik, Last-Zeitreihen und Sanierungsszenarien“, Apr. 2022.
- [4] *Gesetz zur Einsparung von Energie und zur Nutzung erneuerbarer Energien zur Wärme- und Kälteerzeugung in Gebäuden (Gebäudeenergiegesetz - GEG)*. 2023.
- [5] M. Offermann, B. von Manteuffel, und K. Dr. Bettgenhäuser, „Lösungsoptionen für Wärmepumpen in Bestandsgebäuden“, März 2023.
- [6] G. Eikenloff u. a., „Einfluss der Verteilungsverluste bei der energetischen Modernisierung von Mehrfamilienhäusern. Analyse und Ableitung von Optimierungsmaßnahmen“. 2012.
- [7] „DIN V 18599-5:2018-09, Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung - Teil 5: Endenergiebedarf von Heizsystemen“, Beuth Verlag GmbH. doi: 10.31030/2875514.
- [8] K. Jagnow, „Relevanz und Planung der Wärmeverteilung und Übergabe in energieeffizienten Gebäuden“. März 2016.
- [9] K. Jagnow, „Verfahren zur energetischen und wirtschaftlichen Bewertung von Qualitätssicherungsmaßnahmen in der Heizungsanlagentechnik“.
- [10] W. Richter und J. Seifert, „Zur Anordnung von freien Heizflächen in Gebäuden mit höherem Wärmeschutzniveau“, 2007, [Online]. Verfügbar unter: <https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:14-ds-1200579061673-72892>
- [11] Niedersachsen, *Niedersächsische Bauordnung (NBauO)*. 2012.

- [12] „DIN EN 17037:2022-05, Tageslicht in Gebäuden; Deutsche Fassung EN_17037:2018+AC:2021+A1:2021“, Beuth Verlag GmbH. doi: 10.31030/3319148.
- [13] T. Loga, B. Stein, N. Diefenbach, R. Born, und Institut Wohnen und Umwelt, Hrsg., *Deutsche Wohngebäudetypologie: 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“, 2., erw. Aufl.* Darmstadt: IWU, 2015.
- [14] *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.
- [15] Dr. Renner und Rathert, „Bundesministerium für Wirtschaft und Energie - Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat - Bekanntmachung der Regeln zur Datenaufnahme und Datenverwendung im Wohngebäudebestand“, *Bundesanzeiger*, Nr. B1, S. 31, Dez. 2020.
- [16] „DIN EN 442-1:2015-03, Radiatoren und Konvektoren - Teil 1: Technische Spezifikationen und Anforderungen; Deutsche Fassung EN_442-1:2014“. Beuth Verlag GmbH. doi: 10.31030/2157930.
- [17] „DIN 4703-1:1999-12, Raumheizkörper - Teil 1: Maße von Gliedheizkörpern“, Beuth Verlag GmbH. doi: 10.31030/8133855.
- [18] „Warmwasserspiegel“. Zugegriffen: 25. April 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.warmwasserspiegel.de/verbrauch-pruefen/>
- [19] *DIN EN 12831-3:2017-09, Energetische Bewertung von Gebäuden - Verfahren zur Berechnung der Norm-Heizlast - Teil 3: Trinkwassererwärmungsanlagen, Heizlast und Bedarfsbestimmung, Module M8-2, M8-3; Deutsche Fassung EN_12831-3:2017.* doi: 10.31030/2575031.
- [20] *VDI 2067 Blatt 12 - 2017-04.* Zugegriffen: 11. April 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.beuth.de/de/technische-regel/vdi-2067-blatt-12/261571718>
- [21] Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR), Hrsg., „Nutzenergiebedarf für Warmwasser in Wohngebäuden“. 2017.
- [22] Die europäische Kommission, *DELEGIERTE VERORDNUNG (EU) Nr. 811/2013 DER KOMMISSION vom 18. Februar 2013 zur Ergänzung der Richtlinie 2010/30/EU des Europäischen Parlaments und des Rates im Hinblick auf die Energiekennzeichnung von Raumheizgeräten, Kombiheizgeräten, Verbundanlagen aus Raumheizgeräten, Temperaturreglern und Solareinrichtungen sowie von Verbundanlagen aus Kombiheizgeräten, Temperaturreglern und Solareinrichtungen.* 2017. Zugegriffen: 20. Juni 2024. [Online]. Verfügbar unter: http://data.europa.eu/eli/reg_del/2013/811/2017-03-07/eng
- [23] *DIN EN 16147:2023-12, Wärmepumpen mit elektrisch angetriebenen Verdichtern - Prüfungen, Leistungsbemessung und Anforderungen an die Kennzeichnung von Geräten zum Erwärmen von Brauchwarmwasser; Deutsche Fassung EN_16147:2017+A1:2022.* doi: 10.31030/3237220.
- [24] *VDI 4645 - Heizungsanlagen mit Wärmepumpen in Ein- und Mehrfamilienhäusern Planung, Errichtung, Betrieb.*
- [25] *DIN EN 15450:2007-12, Heizungsanlagen in Gebäuden - Planung von Heizungsanlagen mit Wärmepumpen; Deutsche Fassung EN_15450:2007.* doi: 10.31030/9854436.
- [26] M. Gattermann und D. Dr. Quack, „PROSA Sanitärarmaturen - Entwicklung der Vergabekriterien für ein klimaschutzbezogenes Umweltzeichen“. Öko-Institut e.V., 19. März 2013. Zugegriffen: 2. Juli 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://www.oeko.de/okodoc/1734/2013-430-de.pdf&ved=2ahUKEwi0o7KBt4iHAXv9gIHHXj6C4wQFnoECD8QAQ&usg=AOvVaw25naxciW8QBFBn_xXDjUhR
- [27] Die europäische Kommission, *Delegierte Verordnung (EU) Nr. 811/2013 der Kommission vom 18. Februar 2013 zur Ergänzung der Richtlinie 2010/30/EU des Europäischen Parlaments und des Rates im Hinblick auf die Energiekennzeichnung von Raumheizgeräten,*

Kombiheizgeräten, Verbundanlagen aus Raumheizgeräten, Temperaturreglern und Solareinrichtungen sowie von Verbundanlagen aus Kombiheizgeräten, Temperaturreglern und Solareinrichtungen Text von Bedeutung für den EWR. [Online]. Verfügbar unter: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=celex%3A32013R0811>

- [28] 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.
- [29] *IDA ICE*. (2025). EQUA Solution AG.
- [30] *Polysun*. Vela Solaris AG. Zugegriffen: 2. April 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.velasolaris.com/software/>

Combining Temperature And Mass Flow As Variables In Linear Optimisation Models

Patrik Schönfeldt¹, Geert Petrin¹, Sunke Schlüters¹

¹German Aerospace Center (DLR), Institute of Networked Energy Systems, Oldenburg, Germany

patrik.schoenfeldt@dlr.de, +49 441 99906-465

Abstract

Linear programming is a powerful tool for optimizing unit commitment or power flows in energy supply systems. However, it faces a significant limitation when applied to certain systems. Power in heat supply systems, for example depends on the velocity of the medium as well as temperature. Thus, both quantities must be optimised simultaneously, resulting in a bilinear problem. To address this issue, either of the quantities can be discretised. This paper presents a method that combines the two options by introducing a new heat storage formulation. It also describes mathematical models for heat pumps and solar thermal collectors following the approach.

Keywords

Energy system, Linear programming, Mathematical models, Optimization

1 Introduction

In energy system design, linear optimisation is a commonly used approach. Early studies include the work of Wene [1], who investigated the optimal retrofitting rates for residential buildings in the (that time future) time period between 1980 and 2020. A comprehensive review of current methods can be found in [2].

For heating systems, either temperature or volume flow of the medium is discretised. The present contribution aims to bridge these methods. This way, variables in linear thermal energy system models can be chosen more flexibly, helping to increase the level of detail with a limited increase in computational time. Also, it is possible to easily switch between formulations focused on computational performance and formulations allowing to handle temperatures as variables.

Our description is chosen with an graph based formulation of an energy system in mind that is used in order to formulate a (mixed-integer) linear optimisation problem. In Python, there are several tools implementing that approach, that are often used for expansion planning. For example, there are PyPSA [3], urbs [4], OSeMOSYS [5], FINE [6], PowerGAMA [7], Minpower [8], MOST [9], Calliope [10], and oemof.solph [11]. It is also noteworthy that they have similar dependencies, i.e. most are based on Pyomo [12, 13]. As a result, improvements to one of those tools can generally be adapted for the others. We implemented the method presented in this publication based on *oemof.solph*.

2 Mathematical Problem Description

2.1 Nonlinear Formulation

As a basis, we start with a non-linear formulation. Note that the goal is a mixed-integer linear energy system optimisation model, not an in-detail thermodynamic simulation model. Thus, we already consider quantities as constants where meaningful in the scope of this work. For improved readability, indexes for the components are omitted whenever there is no ambiguity. The indexes i, o

are used to signify input and output.

To optimise energy flows, the most fundamental relation is the one for heat transfer

$$\dot{Q} = \rho c_p \dot{V} \times (T_i - T_o), \quad (1)$$

where ρ is the fluid's density, c_p is the heat capacity, $\dot{V}$ describes the (typically variable) volume flow and the T_x describe the temperatures.

2.1.1 Heat Storage

The most simple approach to model heat storage is the fully mixed formulation

$$Q = \rho c_p V \times (T_s - T_{\text{ref}}). \quad (2)$$

It assumes that a volume V has a homogeneous temperature T_s . Heat is defined using a reference temperature T_{ref} . In particular, temperature distributions and heat flows within the storage tank can be modelled. An example study comparing quadratic modelling approaches using discrete temperatures and discrete volumes to lab measurements is provided by Zinsmeister et al. [14]. As described later also in our present work, the same two options also exist for linear models: Sub-volumes either of variable volume and constant temperature or of constant volume and variable temperature are defined. The first option can be referred to as the moving boundary model, the latter as the nodal model.

2.1.2 Heat Exchanger

The heat exchanger model we use was originally proposed for radiators [15]

$$\dot{Q} = UA \times \frac{(T_i - T_a) - (T_o - T_a)}{\ln(T_i - T_a) - \ln(T_o - T_a)}, \quad (3)$$

where T_a is the temperature outside the heat exchanger, A is its surface area, and U is the (assumed to be constant) heat transfer coefficient between the fluid and the

outside. Combination with Eq. (1) yields

$$T_o = (T_i - T_a) \times \exp\left(-\frac{AU}{\rho c_p \dot{V}}\right) + T_a. \quad (4)$$

Note that the formulation is very generic. So not only heat transfer from radiator to a room but also from the soil to a geothermal heat exchanger can be expressed this way. For large areas or small volume flows, the outlet temperature will approach the ambient one, meaning $T_o \approx T_a$ when the exponential term becomes small.

2.1.3 Solar Thermal Collector

A flat plate solar thermal collector [16, Eq. 6.6.4], can be seen as an extended case of the heat exchanger model as described in Eq. (4). It adds additional contributions by the solar radiation S :

$$\frac{T_o - T_a - S/U_L}{T_i - T_a - S/U_L} = \exp\left(-\frac{U_L A_C F'}{\rho c_p \dot{V}}\right). \quad (5)$$

Here, U_L is the heat transfer coefficient from the fluid to the ambient air, $F' = U_b/U_L$ is the collector efficiency factor, which is constant for given collector design and fluid flow rate, and A_C is the collector area. In the collector efficiency factor, $U_b = k/L$ is the back loss coefficient (k insulation thermal conductivity).

2.1.4 Heat Pump

Heat pumps are typically modelled based on the theoretical thermodynamic optimum [17], often called Carnot factor

$$\eta_c = \frac{1}{COP_{Carnot}} = 1 - \frac{\langle T_C \rangle}{\langle T_H \rangle}, \quad (6)$$

where

$$\langle T_x \rangle = \frac{T_{x,i} - T_{x,o}}{\ln T_{x,i} - \ln T_{x,o}}, \quad (7a)$$

with $x = H$ signifying the hot and $x = C$ signifying the cold side connected to the heat pump. For small differences the relation (7a) can be approximated as [17]

$$\langle T_x \rangle \approx \frac{(T_{x,i} + T_{x,o})}{2}. \quad (7b)$$

An efficiency factor is then multiplied

$$COP = \eta_{Lorenz} \times COP_{Carnot} \quad (8)$$

to obtain realistic values for the COP. Often, η_{Lorenz} is set in a way that the characteristics of a specific heat pump are approximated. Using this temperature-dependent factor, energy going in and out of a heat pump can be related using

$$\dot{Q} = P \times COP \quad (9a)$$

$$= \dot{A} \times \left(\frac{COP}{COP - 1} \right), \quad (9b)$$

where $\dot{A}$ is the anergy flow and P is the (typically) electrical power to pump the heat to the higher temperature.

2.2 Linearised Problem Formulation

As seen in Eq. (1), the problem to be solved is of bilinear nature. Because of computational performance, it is advised to linearise the problem [18]. To do so, in our previous work on the topic [19], we decided to discretise the temperatures

$$T_n, n \in \{0, \dots, N-1\}, \quad (10)$$

leaving $\dot{V}$ to be the optimisation variable. This particularly makes sense when design temperatures are to be met. However, the other choice is possible, thus we define

$$\dot{V}_n, n \in \{0, \dots, N-1\}. \quad (11)$$

It is particularly meaningful if part-load operation is avoided anyway, which is the case for many commercially available heat pumps, leaving $N = 2$ to allow either on or off state.

Instead of constraining one component with the temperature of another, it can also be meaningful to define a shared reference temperature. This way, it is possible to express the heat transfer to and from a component separately. The quantities $\dot{Q}_i$ and $\dot{Q}_o$ can then be calculated using Eq. (1) but using T_i or T_o as the minuend and T_{ref} as the subtrahend.

2.2.1 Heat Storage

A storage model that works particularly good with discrete temperatures is the moving boundary model, we used in [19]. A more detailed version can be found in [20]. If the temperature is variable, however, fully mixed or nodal storage models are more handy. While use of nodal models in combination with discrete temperature levels for heat production and demand is generally possible and done e.g. in [21], it should be considered that the available temperature depends on the storage content. This way, storage components can be used to switch from discrete temperature to discrete volume or flow component models.

At defined temperature levels, the content of fully mixed heat storage as described by Eq. (2) is

$$Q_n := \rho c_p V \times (T_n - T_{ref}). \quad (12)$$

Now, we want that an active (or usable) level is signified by the binary status variable $y_n(t) \in \{0, 1\}$ with

$$y_n(t) = 0 \text{ if } Q(t) < Q_n, \text{ and} \quad (13a)$$

$$y_n(t) = 1 \text{ if } Q(t) \geq Q_n. \quad (13b)$$

Note that Q is being optimised, so Eq. (13) cannot be read as a causal relation. We also need a linear formulation. We suggest

$$y_n(t) \leq \frac{Q(t)}{Q_n}, \quad (14a)$$

$$\hat{y}_n(t) \geq \frac{Q(t) - Q_n}{Q_{\max}}, \quad (14b)$$

$$\bar{y}_n(t) = 1 - \hat{y}_n(t), \quad (14c)$$

where $Q_{\max}$ is the maximum storage content. Equation (14a) guarantees Eq. (13a) but relaxes Eq. (13b) in

the sense that y_n is not forced to be active. To compensate for that, Eq. (14c), enforces $\bar{y}_n = 0$ for the given case. The symbol is chosen to emphasise that it can be read as an inverse status. If this should be strictly the case, also

$$1 = y_n(t) + \bar{y}_n(t) \quad (14d)$$

has to be defined to eliminate the possibility that $y_n(t) = \bar{y}_n(t)$, i.e. at $Q = Q_n$, where both can be 1.

Now, note that heat leaving the storage needs to have lower temperature than the storage and higher temperature is needed to increase the storage content. Thus,

$$\dot{Q}_{\text{out},n}(t) \leq y_n(t) \times \dot{Q}_{\text{out,max},n}, \quad (15a)$$

$$\dot{Q}_{\text{in},n}(t) \leq \bar{y}_n(t) \times \dot{Q}_{\text{in,max},n}, \quad (15b)$$

where $\dot{Q}_{\text{out},n}$ and $\dot{Q}_{\text{in},n}$ denote the heat flow out of and into the storage, respectively, at the temperature T_n . $\dot{Q}_{\text{out,max},n}$ and $\dot{Q}_{\text{in,max},n}$ are the absolute limits of these flows. This way, it is guaranteed that $\dot{Q}_{\text{out}}(t) = 0$ if the storage content is not sufficient and $\dot{Q}_{\text{in}}(t) = 0$ if the storage content is too high.

So, at each point in time, the storage content Q defines the temperature T in the storage and thus limits the withdrawal temperature or the feed temperature. As multiple output and input flows can be active at the same time, it is meaningful to also define a weighted limit

$$\sum_n \dot{Q}_{\text{out},n}(t) \times w(p_n) \leq \dot{Q}_{\text{out,max}}, \quad (16)$$

so that the total heat flow out of the storage, and analogously for the input flows, is also constrained.

A further complication comes up due to discrete time steps. If the point in time the storage heat passes a temperature level T_n is not covered by a discrete point in time, $\dot{Q}_{\text{out},n}(t) > 0$ will be allowed when the storage temperature is already below T_n on a continuous time scale. This issue can be solved by a time-discrete reformulation of Eq. (15)

$$\dot{Q}_{\text{out},n,t} \leq y_{n,t} \times \dot{Q}_{\text{out,max},n}, \quad (17a)$$

$$\dot{Q}_{\text{in},n,t} \leq \bar{y}_{n,t} \times \dot{Q}_{\text{in,max},n}, \quad (17b)$$

where the index t denotes the time interval between t and $t + \Delta t$. If now the constraint for the status variable is defined by the energy content at the end of that time interval

$$y_{n,t} \leq \frac{Q_{t+\Delta t}}{Q_n}, \quad (18)$$

it is no longer possible to cross a level T_n using the corresponding power flows. This implies that at any time the lowest level cannot be used for storing energy and energy at the highest level cannot be obtained from the storage. For the extreme case of a fully mixed heat storage, this implication can be read as the fact that a storage will never reach (exactly) the temperature that is used to feed it.

2.2.2 Heat Exchanger

As can be seen in Eq. (4), optimisation of the flow cannot be performed linearly. However, the relation between the temperatures is linear and can be calculated directly if $\dot{V}$ is set. This is particularly interesting when using nodal storage models. When a fully mixed storage model is used as a source, there is no need for optimisation, as the energy will just be drawn from the storage independent from the return temperature.

Still, it is meaningful to define a lower limit for the flow temperature that can still serve the demand. The combination of Eqs. (4) and (1) results in

$$T_i = \frac{1}{1 - \exp\left(-\frac{AU}{\rho c_p \dot{V}}\right)} \times \frac{\dot{Q}}{\rho c_p \dot{V}} + T_a, \quad (19)$$

which can be used as a lower limit for the storage temperature using the maximum flow for $\dot{V}$.

2.2.3 Solar Thermal Collector

For discrete temperature levels, possible heat gains can be calculated for every T_n . See [19] for reference. With variable temperature, it is possible to implement Eq. (5) to the linear optimisation. Assuming that the fluid for the collector is directly withdrawn from the storage with a constant flow $\dot{V}$, the heat drawn from the collector can be expressed as

$$\dot{Q}_{\text{ST,raw}} = \tilde{U}_C \times A_C \times \left(T_A + \frac{S}{U_L} - T_S\right), \quad (20)$$

where

$$\tilde{U}_C := \frac{\rho c_p \dot{V}}{A_C} \times \left(1 - \exp\left(-\frac{U_L A_C F'}{\rho c_p \dot{V}}\right)\right) \quad (21)$$

is a virtual thermal transmittance. Note that $\dot{Q}_{\text{ST,raw}}$ becomes negative for low solar radiation S . Because of this, it is meaningful to restrict the use of the solar collector to times where positive yields can be expected. To include edge cases in the optimisation, a binary variable y_{ST} can be introduced so that the controlled gain is

$$\dot{Q}_{\text{ST}} \leq \dot{Q}_{\text{ST,max}} \times y_{\text{ST}} \quad \text{and} \quad (22a)$$

$$\dot{Q}_{\text{ST}} \leq \dot{Q}_{\text{ST,raw}} + (1 - y_{\text{ST}}) \times \dot{Q}_{\text{ST,max}}. \quad (22b)$$

2.2.4 Heat Pump

If temperatures are known a-priori, Eq. (9) can be directly implemented, resulting in a constant COP. This can be considered the standard way to go and is applied e.g. in [22, 23, 24]. In mixed integer models, it is also possible to model part-load efficiencies [25, 18].

If the modelled real-world device does not run in part load, $\dot{V}$ has to be set to the maximum value when the heat pump is running. For other heat-pumps, it can be considered an approximation. Further, it is possible to define a fixed intermediate temperature T_M and split the calculation of the performance of the heat pump into two parts. While due to the last term in

$$\varepsilon_{\text{CH}} = \varepsilon_{\text{CM}} + \varepsilon_{\text{MH}} - \varepsilon_{\text{CM}}\varepsilon_{\text{MH}}, \quad (23)$$

the total thermodynamic performance is still bilinear, the individual steps just rely on ε_{CM} and ε_{MH} . In this case, it is a good choice to set the electric power to be discrete. Introducing the binary status variable y_{HP} in Eq. (9) yields

$$\dot{Q} = y_{HP} \times COP \times P \quad (24a)$$

and

$$\dot{A} = y_{HP} \times (COP - 1) \times P. \quad (24b)$$

From these equations in the form $x_b = y \times x$, with a binary variable y , a continuous variable x , and a continuous or zero variable x_b , MILP constraints can be formulated by replacing using [26]

$$x_b \leq y \times x_{\max}, \quad (25a)$$

$$x_b \leq x, \quad (25b)$$

and

$$x_b \geq x - (1 - y) \times x_{\max}. \quad (25c)$$

If a linear approximation for the COP is used instead of Eq. (6), both, the higher and the lower temperature can be optimised.

Instead of approximating the COP calculation, also the flow and return temperatures for the warm side can be set. This way, $\dot{Q}$ becomes the defining property of the heat pump model. In that case, Equation (6) can be directly applied and $\langle T_C \rangle$ is the variable in a linear equation. In that case, only the approximation of Eq. (7b) has to be used, to replace the mean logarithmic temperature difference by a linear equation. So,

$$\dot{Q} \leq \dot{Q}_{\max} \times y_{HP}, \quad (26a)$$

meaning that only full-load or no operation is now allowed by the binary status variable y_{HP} . Energy conversion

$$\dot{A} = \dot{Q} - P, \quad (26b)$$

allows the use of additional electricity if the cold side cannot provide sufficient energy. On the other hand, the maximum technical efficiency

$$P \geq \frac{\dot{Q}_{\max}}{\eta_{\text{Lorenz}}} \times \left(y_{HP} - \frac{T_{C,i} + T_{C,o}}{2 \times \langle T_H \rangle} \right), \quad (26c)$$

can be optimised by adjusting the source temperature.

3 Case study

3.1 Energy system layout

The energy system layout is displayed in Fig. 1. Additionally to the components present in oemof.solph, we manually formulated constraints using Pyomo. Its core consists of cold and warm storage tank, 50 m³ each, that are connected by a heat pump (HP) with $\dot{Q}_{\max} = 250$ kW. The heat pump takes heat from the cold storage, rises the temperature and feeds into the warm storage. Both of these storage tanks are modelled to be fully mixed, i.e. their heat content is described by one temperature. A solar thermal collector (ST) with a surface of 500 m², flow rate of 21/s, efficiency $F' = 0.988$, and heat loss coefficient of $U_L = 3.5$ W/m²K is also connected to both of

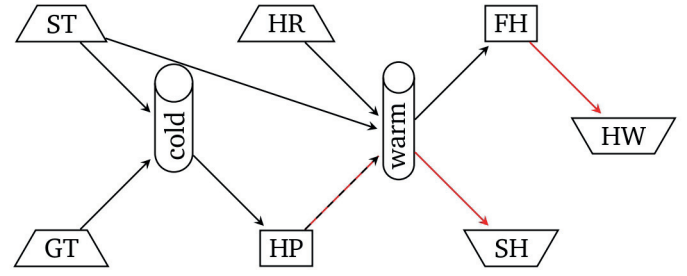


Figure 1: Layout of the energy system graph; the abbreviation stand for ST: solar thermal, HR: heating rod, FH: flow heater, HW: hot water, SH: space heating, HP: heat pump, and GT: geothermal. Arrows point into the direction of heat transfer. Black flows have a variable temperature, red ones a fixed one. The temperatures of heat transfer between heat pump and warm storage are fixed for this study but can be variable using a linear approximation for the COP.

these storage tanks. It can feed either into the cold storage or warm one. The cold storage can also be fed by a geothermal heat exchanger (GT). Its mass flow is fixed so that it delivers 150 kW at a design $\Delta T = 5$ K. We assume that it delivers an outlet temperature which is equal to the soil temperature. Thus, even at constant mass flow, its power will approach zero if cold storage temperature approaches the soil temperature. For warmer storage temperatures, which can be reached using the solar thermal collector, the geothermal heat exchanger is switched off.

So far, the described layout (not the mathematical model of the components) equals the one presented in [19]. However, due to the conceptual difference, two adjustments were made. First of all, our present study does not consider pumping energy needed to fulfil the heat demand. This is in particular due to the choice to set a time-dependent lower temperature limit as defined by Eq. (19), that can still supply the space heating demand (SH) at maximum flow. In the formulation using discrete temperature levels, it was possible to optimise the electricity demand of the pumps in a linearised formulation. Secondly, in [19] the temperature of the heat supplied by the heating rod could always be preserved. Due to the fully mixed storage model used in this study, this is no longer the case. While direct electric heating is already part of the heat pump model as described in Eq. (26c), the heating rod is preserved to cover edge cases in the demand where the heat pumps output is not sufficient. The newly added electric flow heater (FH) enables supply of hot water (HW) independently from storage temperature.

3.2 Optimisation results

We performed an economic optimisation where the only considered cost is due to the consumption of electricity by the heat pump and by the flow heater. To facilitate comparability to [19], the same prices based on 2017 day ahead prices were used. Including taxes and levies, they are in the range 34.07 €/MWh to 280.65 €/MWh. Example results of the optimisation are displayed in Fig. 2.

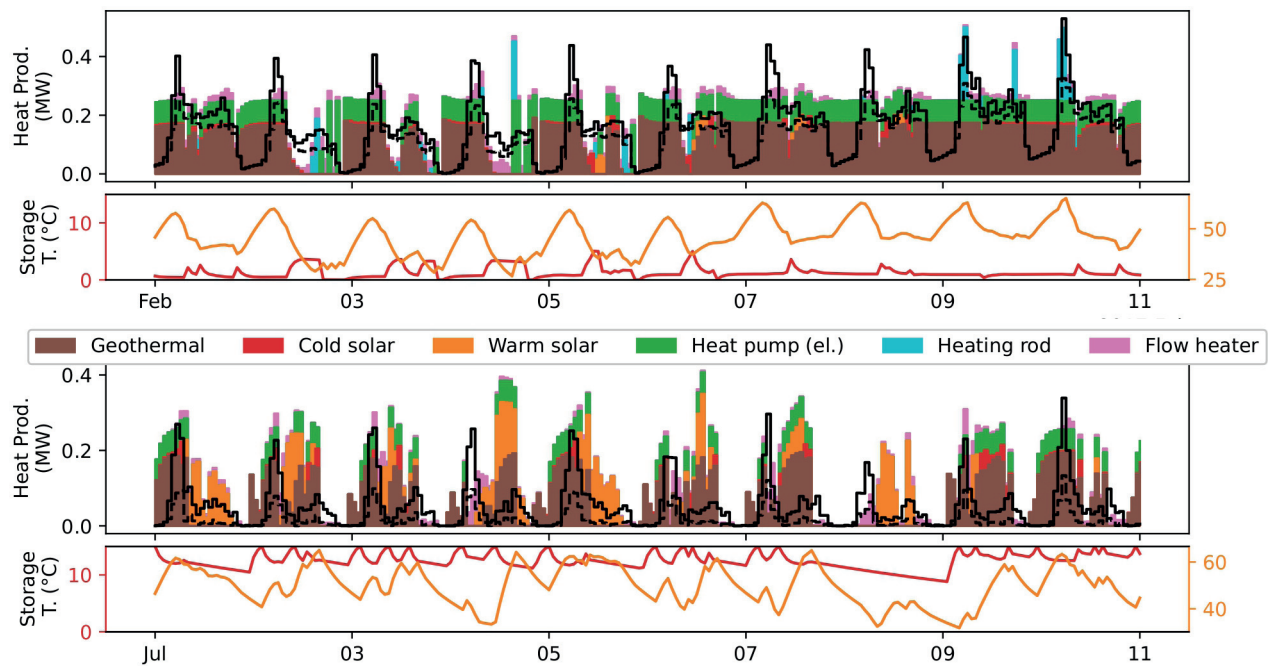


Figure 2: Optimised operation for the energy system for ten days in February (top) and in July (bottom). Coloured areas represent use of the respective heat sources in the time period, the solid black line represents the total heat demand, the dashed black line give the space heating demand. For the storage temperature, the red line represents the cold storage temperature (left axis) and the orange line the warm storage temperature (right axis).

In first ten days of February, a clear preference for geothermal based heating becomes apparent, as a near constant high energy influx in combination with the utilisation of the heat pump can be noticed. Thus the storage temperature of the cold storage is kept low throughout the time frame, to allow for a sufficient amount of geothermal energy extraction. These low temperatures not only benefit the geothermal well, but also the solar thermal collectors, which predominately feed into the cold storage except for day 6-8, where the amount of direct sunlight is sufficient to provide energy to the warm storage. Another noteworthy effect is the low amount of energy from the solar thermal collectors, which enters the cold storage even at night if the outside temperature is above the one of the storage. While the cold storage features no apparent pattern, the hot storage's temperature is closely connected to the demand in space heating and hot water consumption, with temperatures rising before and dropping after the typical morning spike. On the one hand, this reduces the amount of additional heating by the flow heater required for the hot water demand, on the other hand the high up-time of the heat pump, especially near the end of the simulation, indicates that this rise in temperature is also needed as an energy buffer to fulfil the demand. This point is reinforced by the deployment of the electric boiler near the end, which supplements the remaining energy sources with up to 250 kW, to meet demand during the morning spike. Throughout the year, the system operation changes alongside the weather conditions, like shown for the beginning of July. The most noticeable change is the lower share of geothermal power

in the system and the increased share of solar thermal heat for the warm storage, which covers most of the afternoon and evening consumption in many cases. The higher share of solar thermal input also highlights the model's ability to switch between the hot and cold storages, with feed in into the cold storage now being limited to morning, evening and night time. Despite the higher share of solar thermal, the geothermal well in combination with the heat pump is still crucial to the system, especially during the morning peak or days with lower solar input.

4 Conclusion and Outlook

We have presented a method that allows to optimise temperature as a variable in linear energy system models. The method can be combined with formulations optimising mass flows using discrete temperatures, especially if storage components are present. For those, our presented method can interface with both possible formulations. In a case study using *oemof.solph*, we have shown a reference optimisation that emphasises the importance of having variable temperatures, e.g. to reduce electricity use of flow heaters or to reduce storage losses between phases of high demand.

For real-world operation, we expect better applicability of operational strategies optimised using variable temperature. This, however, comes at the cost of lower computational performance limiting the applicability of variable temperature methods to shorter time horizons. Average annual metrics like operational costs, on the other hand, should not deviate much, allowing to use discrete temperature methods in the design phase. As adequately

validating the models calls for the transfer of the optimised operational strategies to a real-world device, a comprehensive benchmark of the model, both in terms of computational performance and accuracy, is left for future work.

Acknowledgements

This work has been funded by the German Federal Ministry of Education and Research as part of the Project “Wärmewende Nordwest”, Grant No. 03SF0624L.

We thank Lennart Schürmann for discussions about the storage level formulation and Francesco Witte for his idea to introduce a constant intermediate temperature for the heat pump. Maximilian Hillen and Herena Torio are acknowledged for feedback on the manuscript.

References

- [1] C. Wene, “The optimum mix of conservation and substitution: An example from retrofitting of old buildings,” *International Journal of Energy Research*, vol. 4, no. 3, p. 271 – 282, 1980. [Online]. Available: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/er.4440040309>
- [2] M. Hoffmann, B. U. Schyska, J. Bartels, T. Pelser, J. Behrens, M. Wetzel, H. C. Gils, C.-F. Tang, M. Tillmanns, J. Stock, A. Xhonneux, L. Kotzur, A. Praktiknjo, T. Vogt, P. Jochem, J. Linßen, J. M. Weinand, and D. Stolten, “A review of mixed-integer linear formulations for framework-based energy system models,” *Advances in Applied Energy*, vol. 16, p. 100190, 2024. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666792424000283>
- [3] T. Brown, J. Hörsch, and D. Schlachtberger, “PyPSA: Python for power system analysis,” *Journal of Open Research Software*, vol. 6, no. 1, p. 4, jan 2018. [Online]. Available: <https://openresearchsoftware.metajnl.com/article/10.5334/jors.188/>
- [4] J. Dorfner, K. Schönleber, M. Dorfner, sonercandas, froehlie, smuellr, dogauzrek, WYAUDI, Leonhard-B, lodersky, yunusozsahin, adeeljsid, T. Zipperle, S. Herzog, kais siala, and O. Akca, “tum-ens/urbs: urbs v1.0.1,” Jul. 2019. [Online]. Available: <https://zenodo.org/records/3265960>
- [5] M. Howells, H. Rogner, N. Strachan, C. Heaps, H. Huntington, S. Kypreos, A. Hughes, S. Silveira, J. DeCarolus, M. Bazillian, and A. Roehrl, “OsemoSys: The open source energy modeling system: An introduction to its ethos, structure and development,” *Energy Policy*, vol. 39, no. 10, pp. 5850–5870, 2011, sustainability of biofuels. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421511004897>
- [6] L. Welder, D. Ryberg, L. Kotzur, T. Grube, M. Robinius, and D. Stolten, “Spatio-temporal optimization of a future energy system for power-to-hydrogen applications in germany,” *Energy*, vol. 158, pp. 1130–1149, 2018. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S036054421830879X>
- [7] H. G. Svendsen and O. C. Spro, “Powergama: A new simplified modelling approach for analyses of large interconnected power systems, applied to a 2030 western mediterranean case study,” *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, vol. 8, no. 5, p. 055501, 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1063/1.4962415>
- [8] A. Greenhall, R. Christie, and J.-P. Watson, “Minpower: A power systems optimization toolkit,” in *2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting*, 2012, pp. 1–6. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/PESGM.2012.6344667>
- [9] C. E. Murillo-Sánchez, R. D. Zimmerman, C. L. Anderson, and R. J. Thomas, “Secure planning and operations of systems with stochastic sources, energy storage, and active demand,” *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 4, no. 4, pp. 2220–2229, 2013. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/TSG.2013.2281001>
- [10] S. Pfenninger and B. Pickering, “Calliope: a multi-scale energy systems modelling framework,” *Journal of Open Source Software*, vol. 3, no. 29, p. 825, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.21105/joss.00825>
- [11] U. Krien, P. Schönfeldt, J. Launer, S. Hilpert, C. Kaldemeyer, and G. Pleßmann, “oemof.solph – a model generator for linear and mixed-integer linear optimisation of energy systems,” *Software Impacts*, vol. 6, Nov 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.simpa.2020.100028>
- [12] M. L. Bynum, G. A. Hackebeil, W. E. Hart, C. D. Laird, B. L. Nicholson, J. D. Sirola, J.-P. Watson, and D. L. Woodruff, *Pyomo – optimization modeling in python*, 3rd ed. Springer Science & Business Media, 2021, vol. 67.
- [13] W. E. Hart, J.-P. Watson, and D. L. Woodruff, “Pyomo: modeling and solving mathematical programs in python,” *Mathematical Programming Computation*, vol. 3, no. 3, pp. 219–260, 2011.
- [14] D. Zinsmeister, P. Tzscheutschler, V. S. Perić, and C. Goebel, “Stratified thermal energy storage model with constant layer volume for predictive control — formulation, comparison, and empirical validation,” *Renewable Energy*, vol. 219, p. 119511, 2023. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S096014812301426X>
- [15] S. P. Grétarsson, P. Valdimarsson, and V. K. Jónsson, “Heat transfer modelling of a plate radiator for district heating applications,” *International Journal of Energy Research*, vol. 15, no. 4, pp. 301–315,

1991. [Online]. Available: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/er.4440150406>
- [16] J. A. Duffie and W. A. Beckman, *Solar Engineering of Thermal Processes*. John Wiley & Sons, Apr. 2013.
- [17] H. Lorenz, “Die Ermittlung der Grenzwerte der thermodynamischen Energieumwandlung,” *Zeitschrift für die gesamte Kälte-Industrie*, vol. 2, pp. 27 – 32, 1895.
- [18] H. Ahmadisedigh and L. Gosselin, “Combined heating and cooling networks with part-load efficiency curves: Optimization based on energy hub concept,” *Applied Energy*, vol. 307, p. 118245, 2022. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261921015087>
- [19] P. Schönfeldt, A. Grimm, B. Neupane, H. Torio, P. Duran, P. Klement, B. Hanke, K. v. Maydell, and C. Agert, “Simultaneous optimization of temperature and energy in linear energy system models,” in *1st International Workshop on Open Source Modelling and Simulation of Energy Systems (OSMSES)*, 2022, pp. 1–6. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9768967>
- [20] D. Muschick, S. Zlabinger, A. Moser, K. Lichtenegger, and M. Göllés, “A multi-layer model of stratified thermal storage for milp-based energy management systems,” *Applied Energy*, vol. 314, p. 118890, 2022. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261922003166>
- [21] T. Schütz, R. Streblow, and D. Müller, “A comparison of thermal energy storage models for building energy system optimization,” *Energy and Buildings*, vol. 93, pp. 23–31, 2015. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037877881500136X>
- [22] K. Vilén and E. O. Ahlgren, “Linear or mixed integer programming in long-term energy systems modeling – a comparative analysis for a local expanding heating system,” *Energy*, vol. 283, p. 129056, 2023. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544223024507>
- [23] A. Meriläinen, J.-H. Montonen, A. Kosonen, T. Lindh, and J. Ahola, “Cost-optimal dimensioning and operation of a solar pv–bess–heat pump-based on-grid energy system for a nordic climate townhouse,” *Energy and Buildings*, vol. 295, p. 113328, 2023. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778823005583>
- [24] E. Georges, B. Cornélusse, D. Ernst, V. Lemort, and S. Mathieu, “Residential heat pump as flexible load for direct control service with parametrized duration and rebound effect,” *Applied Energy*, vol. 187, pp. 140–153, 2017. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261916315975>
- [25] H.-H. Niu, Y. Zhao, S.-S. Wei, and Y.-G. Li, “A variable performance parameters temperature–flowrate scheduling model for integrated energy systems,” *Energies*, vol. 14, no. 17, 2021. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/17/5400>
- [26] U. Krien, C. Kaldemeyer, S. Günther, P. Schönfeldt, H. Simon, J. Launer, J. Röder, C. Möller, J. Kochems, H. Huyskens, B. Schachler, F. Pl, S. Sayadi, P.-F. Duc, J. Endres, F. Büllslebach, D. Fuhrländer, F. Witte, P. Kassing, E. Zolotarevskaja, S. Berendes, B. Lancien, L. Schürmann, J.-O. Delfs, T. Smalla, J. Wolf, E. Gaudchau, T. Rohrer, and M.-C. Gering, “oemof.solph,” Jan. 2024. [Online]. Available: <https://zenodo.org/records/10497413>

Der Rechtsrahmen für den direkten Wasserstoffeinsatz in der Gebäudebeheizung

Sina Freitag¹

¹ Fachhochschule Westküste, Institut für die Transformation des Energiesystems, Markt 18, 25746 Heide, freitag@fh-westkueste.de, 0481 123769-28

Kurzfassung

Der vorliegende Beitrag stellt die regulatorischen Anforderungen für den Einsatz von Wasserstoff zur Erfüllung der Erneuerbare Energien-Nutzungspflicht vor. Neben der Ausweisung von Wasserstoffnetzausbaubereichen und dem Einbau von H₂-ready-Heizungsanlagen stehen dabei insbesondere die zu erstellenden Wasserstofffahrpläne im Vordergrund. Die Herleitung der Sinnhaftigkeit und voraussichtlichen Praxisrelevanz dieser Regelungen sind integraler Bestandteil des Beitrags.

Die finalen Regelungsinhalte des novellierten Gebäudeenergiegesetzes vom 16.10.2023 umfassen eine von den Entwurfsfassungen deutlich abweichende Ausgestaltung der Vorgaben zur Erfüllung der Erneuerbare Energien-Nutzungspflicht anhand der Erfüllungsvariante Wasserstoff. Die Entwurfsfassungen wurden im Rahmen der 1. Norddeutschen Wärmekonferenz vorgestellt.

Schlagworte

Gebäudebeheizung; Gebäudeenergiegesetz; H₂-ready-Heizungsanlage; Regulatorik; Wasserstoff

1 Einleitung

Mehr als 80 % der deutschen Wärmenachfrage wird zum gegenwärtigen Zeitpunkt aus der Verbrennung fossiler Energieträger gedeckt. [1, S. 1] Zur Erreichung der nationalen Klimaschutzziele und zügigen Abkehr von der Abhängigkeit fossiler Energieträger verankert das Gebäudeenergiegesetz (GEG) vom 16.10.2023 die 65 % Erneuerbare Energien-Nutzungspflicht (EE-Nutzungspflicht) in der Gebäudebeheizung.

Neben zahlreichen weiteren Erfüllungsoptionen stellt gemäß § 71f GEG auch der Einsatz von grünem oder blauem Wasserstoff bzw. Wasserstoffderivaten eine mögliche Erfüllungsvariante dar. Die bislang fehlende Wasserstoffinfrastruktur [1, S. 123] führt zum gegenwärtigen Zeitpunkt dazu, dass die Erfüllungsoption des § 71f GEG, die den sofortigen Einsatz von 65 % Wasserstoff vorsieht, keine Praxisrelevanz entfalten kann.

Um diesem Umstand Rechnung zu tragen hat der Gesetzgeber mit § 71k GEG eine zeitlich begrenzte Übergangsregelung für Gebäudeeigentümer:innen geschaffen, die Wasserstoff zur Gebäudebeheizung einsetzen möchten. [1, S. 123] Bis zum erforderlichen Anschluss an ein Wasserstoffnetz besteht unter gewissen Voraussetzungen die Möglichkeit, von der Übergangsregelung des § 71k GEG für Heizungsanlagen, die sowohl Gas als auch Wasserstoff verbrennen können, zu profitieren. Neben dem Erfordernis, dass sich das betreffende Gebäude in einem ausgewiesenen Wasserstoffnetzausbaubereich befinden muss, stehen zum gegenwärtigen Zeitpunkt insbesondere die durch die Bundesnetzagentur zu definierenden Inhalte der Wasserstofffahrpläne der Gasverteil-

netzbetreiber im Vordergrund der öffentlichen Diskussion. [2] Der vorliegende Beitrag stellt die Regelungsinhalte der Übergangsvorschrift für den direkten Wasserstoffeinsatz in der Gebäudebeheizung vor und ordnet diese hinsichtlich ihrer praktischen Bedeutung ein.

2 Übergangsregelung für H₂-ready-Heizkessel

2.1 Anforderungen des § 71k GEG

Die Übergangsregelung des § 71k GEG ermöglicht es Gebäudeeigentümer:innen, die bereitgestellte Wärme übergangsweise bis zum Anschluss der Heizungsanlage an ein Wasserstoffnetz vollständig aus fossilen Energieträgern wie Erdgas zu decken. Hierfür müssen die in der folgenden Abbildung dargestellten drei Voraussetzungen erfüllt sein, die im weiteren Verlauf im Detail vorgestellt werden sollen.

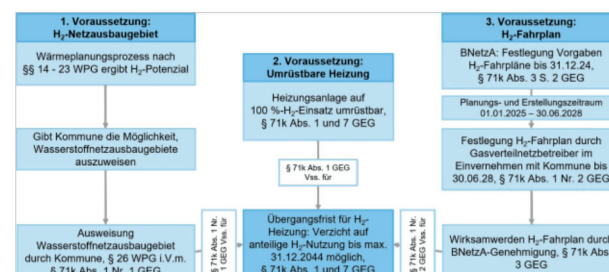


Abbildung 1: Voraussetzungen für die Inanspruchnahme der Übergangsregelung des § 71k GEG. Eigene Darstellung.

2.2 Wasserstoffnetzausbaubereichsausweisung

Zunächst muss sich das betreffende Gebäude, in dem die Wärmeversorgung vollständig aus der Verbrennung von Wasserstoff gedeckt werden soll, nach § 71k Abs. 1 Nr. 1

GEG in einem ausgewiesenen Wasserstoffnetzausbaubereich befinden. Die in einem derartigen Gebiet befindlichen Gebäude sollen nach Maßgabe der Übergangsregelung bis spätestens zum 31.12.2044 vollständig mit Wasserstoff versorgt werden.

Die für die Wärmeplanung verantwortliche Stelle hat nach § 26 Abs. 1 S. 1 Wärmeplanungsgesetz (WPG) die Möglichkeit, unter der Berücksichtigung der Ergebnisse des kommunalen Wärmeplans Wasserstoffnetzausbaubereiche auszuweisen. Folglich sind zwei Schritte für die Erfüllung der ersten Voraussetzung notwendig: Neben der Veröffentlichung des Wärmeplans bedarf es zusätzlich der erst im Anschluss möglichen Wasserstoffnetzgebietsausweisung. Gemäß § 26 Abs. 1 S. 2 WPG handelt es sich hierbei um eine gebäudescharfe Ausweisung, so dass diese nur für das Teilgebiet gilt, für die die Ausweisung auch tatsächlich getroffen wurde. Einen Anspruch auf Einteilung des eigenen Grundstücks als Wasserstoffnetzausbaubereich haben Gebäudeeigentümer:innen nach § 26 Abs. 2 WPG nicht. Befindet sich das Grundstück nicht in einem ausgewiesenen Wasserstoffnetzausbaubereich, kann folglich auch nicht von der Übergangsregelung des § 71k GEG profitiert werden. Wasserstoffnetzausbaubereichsausweisungen entfalten demzufolge immer Außenwirkung. Darüber hinaus wird die EE-Nutzungspflicht des § 71 Abs. 1 GEG gemäß § 71 Abs. 8 S. 3 GEG einen Monat nach Bekanntgabe der Ausweisung ausgelöst. Dies gilt ungeachtet der ansonsten an die Veröffentlichung der Wärmepläne gekoppelten Auslösefristen. Die Rechtsfolge zeigt die Verzahnung des WPG mit dem GEG.

2.3 H₂-ready-Heizungsanlage

Des Weiteren bedarf es für die Erfüllung der Voraussetzungen der Übergangsregelung einer Heizungsanlage, die gemäß § 71k Abs. 1 1. Hs. GEG auf die Verbrennung von 100 % Wasserstoff umrüstbar ist.

Dies ist nach § 71k Abs. 7 S. 1 GEG der Fall, sofern der Anlagenbetrieb „mit niederschweligen Maßnahmen nach dem Austausch einzelner Bauteile“ auf die vollständige Wasserstoffversorgung umgestellt werden kann. Die Niederschwelligkeit der Maßnahme knüpft der Gesetzgeber an den finanziellen und nicht an den baulichen Aufwand. Die Umrüstungsmaßnahmen müssen im „Verhältnis zu den Anschaffungs- und Installationskosten verhältnismäßig gering ausfallen“. [3] Eine Definition der Verhältnismäßigkeit liefert der Gesetzgeber jedoch nicht. Die entsprechende Nachweisführung über die H₂-ready-Fähigkeit kann gemäß § 71k Abs. 8 S. 2 GEG anhand einer Hersteller- oder Handwerkererklärung erbracht werden. Eine Definition der Hersteller- bzw. Handwerkererklärung enthält das Gesetz nicht, weshalb das Format und der Umfang der Erklärung letztlich im Ermessen des Herstellers bzw. Handwerkers liegt. Die Berücksichtigung des § 71k Abs. 1 1. Hs. GEG im Rahmen des § 96 Abs. 1 Nr. 11 GEG legt jedoch nahe, dass mit einer Hersteller- bzw. Handwerkererklärung eine

Unternehmererklärung gemeint sein könnte. Demgemäß hat der Unternehmer Gebäudeeigentümer:innen unverzüglich nach Abschluss der Arbeiten für den Einbau oder Aufstellung zum Zweck der Inbetriebnahme der Heizungsanlage eine schriftliche Bestätigung über die Erfüllung der Anforderungen nach § 71k Abs. 1 GEG auszuhandigen.

2.4 Genehmigter Wasserstofffahrplan

Die dritte und letzte Voraussetzung für die Inanspruchnahme der Übergangsregelung des § 71k GEG ist das Vorliegen eines genehmigten Wasserstofffahrplans.

§ 71k Abs. 1 Nr. 2 GEG setzt voraus, dass der Gasverteilnetzbetreiber, an dessen Netz die H₂-ready-Heizungsanlage angeschlossen ist, einen Wasserstofffahrplan veröffentlicht hat. Hierbei handelt es sich um eine verbindliche Planung des Gasverteilnetzbetreibers unter Einbeziehung der für die Wärmeplanung verantwortlichen Stelle. Der Wasserstofffahrplan ist vom Gasverteilnetzbetreiber und der planungsverantwortlichen Stelle gemeinsam einzureichen. [4, S. 1] Die Erstellung eines Wasserstofffahrplans ist dabei immer freiwillig; die Pflicht zur Erstellung entsprechender Fahrpläne besteht nicht. [4, S. 1]

In dem Fahrplan stellt der Gasverteilnetzbetreiber in detaillierter Form dar, wie das Gasverteilnetz auf den Transport von Wasserstoff umgestellt werden soll. Integraler Bestandteil des Fahrplans ist gemäß § 71k Abs. 1 Nr. 2 GEG die Festlegung eines geographisch abgegrenzten Umstellungsgebiets, in dem die bestehende Erdgasnetzinfrastruktur bis zum Ablauf des 31.12.2044 vollständig auf Wasserstoff umgewidmet werden soll. [4, S. 2] In diesem Zusammenhang ist es für die Inanspruchnahme der Übergangsregelung erforderlich, dass das gesamte Umstellungsgebiet als Wasserstoffnetzausbaubereich i.S.v. § 26 WPG ausgewiesen wurde. Das Umstellungsgebiet kann sich dabei auch aus verschiedenen Wasserstoffnetzausbaubereichen zusammensetzen. [4, S. 2]

§ 71k Abs. 1 Nr. 2, Abs. 2 und 3 GEG liefern erste Hinweise zur planerischen Ausgestaltung der Fahrpläne. Darunter fallen gemäß § 71k Abs. 1 Nr. 2 lit. a) GEG neben technischen und zeitlichen Schritten der Umstellung der Netzinfrastruktur auch Informationen zur Wasserstoffbeschaffung. Der Gasnetzbetreiber muss in diesem Zusammenhang plausibel darlegen, dass die Wasserstoffverfügbarkeit über einen Anschluss an das Wasserstoff-Kernnetz oder über die Erzeugung und Speicherung vor Ort sichergestellt werden kann. Des Weiteren sind nach § 71k Abs. 1 Nr. 2 lit. b) GEG Angaben zur Finanzierung der Umstellung auf die vollständige netzgebundene Wasserstoffversorgung zu tätigen. Dabei ist insbesondere die Frage nach dem Kostenträger zu beantworten. Nach Maßgabe des § 71k Abs. 1 Nr. 2 lit. c) GEG muss der Gasverteilnetzbetreiber zudem in zeitlichen und räumlichen Zwischenschritten für die Jahre 2035 und 2040 dar-

legen, wie die Umstellung der Netzinfrastruktur im Einklang mit den Bundes-Klimaschutzzielen erfolgen soll. Schließlich muss nach § 71k Abs. 2 GEG auch ein in zwei- bis dreijährlichen Meilensteinen untergliederter Investitionsplan als Teil des Wasserstofffahrplans vorgelegt werden.

Die Detailvorgaben (Format) zur Erstellung der Fahrpläne legt gemäß § 71k Abs. 3 Nr. 2 S. 2 GEG i.V.m. § 29 Abs. 1 Energiewirtschaftsgesetz die Bundesnetzagentur (BNetzA) mit dem laufenden Festlegungsverfahren „FAUNA“ („Fahrpläne für die Umstellung der Netzinfrastruktur auf die vollständige Versorgung der Anschlussnehmer mit Wasserstoff“) bis zum 31.12.2024 fest. Sowohl der Regelungsinhalt als auch die Erwägungen wurden bis September 2024 konsultiert. Die Veröffentlichung des finalen Formats steht zum Zeitpunkt der Veröffentlichung des Beitrags noch aus. Der Entwurf zur Festlegung des Formats der Fahrpläne zeigt, dass der Fahrplan in einen informatorischen und einen planerischen Abschnitt aufgeteilt werden soll. [4, S. 1] Der planerische Teil setzt sich aus zahlreichen Angaben zum Gasverteilnetzbetreiber zusammen. [4, S. 1] Auf diese Weise sollen Gebäudeeigentümer:innen alle relevanten Informationen zentral zur Verfügung gestellt werden, so dass diese ohne großen Suchaufwand alle benötigten Informationen zusammentragen können. [5, S. 5]

Der planerische Teil dient wiederum der vertieften Darstellung des Umstellungsvorhabens. [5, S. 6] In diesem Rahmen muss der Gasverteilnetzbetreiber Angaben zu folgenden Themen leisten: Bestimmung des Umstellungsgebiets, Ist- und Ziel-Zustand des Umstellungsgebiets, Zwischenschritte, Prognose zur Entwicklung des definierten Umstellungsgebiets, Klimaschutzziele und zur Wirtschaftlichkeit. Zusätzlich sind verschiedene Nachweise einzureichen. Darunter fallen die Entscheidung über die Ausweisung als Wasserstoffnetzausbaugbiet, etwaige Anschluss- und Benutzungszwänge im Umstellungsgebiet, Angaben zur Herkunft des Wasserstoffs, Wasserstofftauglichkeit der Infrastruktur im Ist- und Zielzustand sowie ggf. weitere freiwillige Nachweise. [4, S. 5]

§ 71k Abs. 1 Nr. 2 GEG stellt klar, dass die finalen Wasserstofffahrpläne bis zum 30.06.2028 veröffentlicht werden müssen. Eine spätere Einreichung bei der BNetzA als zuständige Regulierungsbehörde ist ausgeschlossen; eine Genehmigung wäre in diesem Fall nicht mehr möglich. [4, S. 7] Der Wasserstofffahrplan wird gemäß § 71k Abs. 3 S. 1 GEG mit der Genehmigung durch die BNetzA wirksam und veröffentlicht.

2.5 Regelmäßige Überprüfung und Regressregelung

Die Umsetzung der Umstellung der Gasverteilnetzinfrastruktur gemäß dem genehmigten Fahrplan wird nach Maßgabe des § 71k Abs. 3 S. 1 GEG durch die BNetzA alle drei Jahre überprüft. Kommt die BNetzA dabei zu

dem Entschluss, dass die Umsetzung, wie in dem genehmigten Wasserstofffahrplan angegeben, erfolgt, können Gebäudeeigentümer:innen ihre Heizungsanlagen ohne Erfüllung jeglicher EE-Mindestanforderungen bis spätestens zum 31.12.2044 weiter betreiben.

Ob der Heizungsanlagenbetrieb nach Maßgabe des § 71k Abs. 1 GEG ohne Einhaltung der Anforderungen nach § 71 Abs. 1 oder Abs. 9 GEG bis einschließlich 2044 möglich ist, hängt folglich von der regelmäßigen Überprüfung bzw. dem entsprechenden Prüfergebnis ab. Die BNetzA kann bei ihrer Überprüfung auch zu dem Ergebnis kommen, dass die Fahrplan-Umsetzung nicht wie geplant vorstattengeht bzw. die Umsetzung grundsätzlich nicht weiterverfolgt wird oder werden kann. Diesen Umstand stellt die Regulierungsbehörde gemäß § 71k Abs. 4 S. 1 GEG gegenüber dem Betreiber des Gasverteilnetzes und der nach Landesrecht für die Wärmeplanung zuständigen Stelle durch Bescheid fest. Nach der öffentlichen Bekanntgabe über die Bestandskraft des BNetzA-Beschlusses haben betroffene Gebäudeeigentümer:innen die Erfüllung der 65 %-EE Nutzungspflicht des § 71 Abs. 1 GEG nach § 71k Abs. 4 S. 1 GEG innerhalb von drei Jahren nachzuweisen. Demzufolge muss in der angegebenen Frist eine neue Erfüllungsvariante i.S.v. §§ 71, 71b ff. GEG ausgewählt und verbaut werden.

Hat der Gasverteilnetzbetreiber die durch den erforderlichen Heizungsanlagenwechsel entstehenden Kosten zu vertreten, findet zudem die Regressregelung aus § 71k Abs. 6 i.V.m. Abs. 4 GEG Anwendung. Gebäudeeigentümer:innen, die im Vertrauen auf die Umsetzung des Fahrplans eine H₂-ready-Heizungsanlage verbaut haben, haben in diesem Fall nach § 71k Abs. 6 GEG einen privatrechtlichen Erstattungsanspruch gegen den Gasverteilnetzbetreiber. § 71k Abs. 6 GEG statuiert folglich eine Haftungsregelung, die den Schutzgedanken der Norm gegenüber den Verbraucher:innen deutlich macht.

3 Diskussion

Mit § 71k GEG hat der Gesetzgeber eine Übergangsregelung geschaffen, die es Gebäudeeigentümer:innen unter Umständen ermöglicht, die eigene Gebäudewärme ohne Einhaltung der Vorgaben des § 71 Abs. 1 S. 1. und Abs. 9 GEG noch über Jahrzehnte mit fossilen Energieträgern bereitzustellen. Wie die Darstellung der drei Voraussetzungen des § 71k GEG zeigt, ist die Inanspruchnahme der Übergangsregelung jedoch mit zahlreichen Hürden verbunden ist. Aus diesen Gründen dürfte die Übergangsvorschrift für Wasserstoff nur in Ausnahmefällen Anwendung finden. Dies lässt sich unter anderem anhand der Konsultationsentwürfe der BNetzA erkennen. Demnach stellt die Erstellung entsprechender Fahrpläne ein für den Gasverteilnetzbetreiber komplexes sowie zeit- und kostenintensives Unterfangen dar. Ein hierfür eindrucksvolles Beispiel liefern die Erwägungen zum Festlegungsentwurf der BNetzA. Wie bereits dargestellt muss der Gasverteilnetzbetreiber im planerischen Teil des Fahrplans auch angeben, ob die Wasserstoffverfügbarkeit durch einen Anschluss an das Wasserstoff-Kernnetz oder durch eine ausreichende Erzeugung vor Ort sichergestellt werden soll. Für den ersten Fall schreibt die BNetzA zusätzlich vor, dass sich der Gasverteilnetzbetreiber nicht nur mit den vor- und nachgelagerten Netzbetreibern, sondern auch mit Industriekunden und Betreibern von Biogaseinspeiseanlagen abstimmen muss. [5, S. 27] Diese Anforderung begründet die BNetzA mit der engen Vermaschung des Gasverbundnetzes und der Tatsache, dass Gasverteilnetze oftmals mehrere vorgelagerte Netzebenen haben. Bereits das Erfordernis der Abstimmung mit zahlreichen weiteren Akteur:innen könnte ein wesentlicher Hemmschuh für die Erstellung entsprechender Fahrpläne bedeuten.

Die vorgestellte Regressregelung des § 71k Abs. 6 GEG macht deutlich, mit welchem Verbindlichkeitsgrad der Gasverteilnetzbetreiber bei etwaigen Fahrplanplanungen konfrontiert ist. Zusätzlich erschwerend kommt die Frist zur Einreichung der Fahrpläne hinzu. Der 30.06.2028 stellt neben der Abgabefrist für Wasserstofffahrpläne auch die Frist zur Veröffentlichung von Wärmeplänen in kleineren Kommunen mit bis zu 100.000 Einwohner:innen dar. Um in dieser kurzen Frist entsprechende Fahrpläne erstellen zu können, muss der Gasverteilnetzbetreiber folglich bereits früh im Prozess der kommunalen Wärmeplanung involviert sein und die Aussichten auf die im Anschluss an die Veröffentlichung der Wärmepläne möglich werdende Wasserstoffnetzgebietsausweisung sondieren. Eine Erklärung für die Datumswahl 30.06.2028 liefert die Gesetzesbegründung des GEG nicht. [4] Ein denkbarer Grund könnte die Zielsetzung sein, die Inanspruchnahme der Übergangsregelung weiter einzuschränken und auf diese Weise sicherzustellen, dass möglichst viele Gebäudeeigentümer:innen auch tatsächlich unmittelbar mit Pflichtauslösung die 65 % EE-Anteile in der Gebäudebeheizung vorweisen können.

Für die Inanspruchnahme der Übergangsregelung des § 71k GEG ist zudem ein zeitlicher Gleichlauf zwischen der Ausweisung von Wasserstoffnetzgebieten und der Veröffentlichung der Wasserstofffahrpläne erforderlich. Wie bereits dargestellt wird einen Monat nach Bekanntgabe der Wasserstoffnetzgebietsausweisung die EE-Nutzungspflicht des § 71 Abs. 1 GEG ausgelöst. Liegt zu dem Zeitpunkt noch kein genehmigter Wasserstofffahrplan vor, kommt die Inanspruchnahme der Übergangsregelung des § 71k GEG nicht in Betracht. In diesen Fällen bleibt Gebäudeeigentümer:innen nur die Möglichkeit, die allgemeine Übergangsregelung des § 71i GEG in Anspruch zu nehmen. Auf diese Weise können Gebäudeeigentümer:innen durch den Einbau einer Heizungsanlage, die nicht die Anforderungen des § 71 Abs. 1 GEG erfüllt, die Zeit bis zur Genehmigung des Fahrplans für höchstens fünf Jahre überbrücken. Wieviel Zeit zukünftige Genehmigungsprozesse von Wasserstofffahrplänen in Anspruch nehmen werden, bleibt abzuwarten. Die Konsultationsdokumente der BNetzA umfassen jedenfalls keine entsprechenden Überlegungen für Bearbeitungshöchstfristen. [4, 5]

Schlussendlich stellt sich trotz Gebietsausweisung und genehmigtem Wasserstofffahrplan die Frage, ob der Einsatz von Wasserstoff ökonomisch sinnvoll ist. Studienergebnisse zeigen, dass der Betrieb einer wasserstoffbetriebenen Heizungsanlage gegenüber dem Einsatz einer Wärmepumpe deutlich teurer ausfallen wird. [6, 7, S. 38] Im Zusammenhang mit § 71k GEG stellt auch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz fest, dass *„eine dezentrale Wasserstoffversorgung insbesondere von Heizkunden bzw. einzelnen Haushalten derzeit u. a. wegen der hohen Kosten des Wasserstoffs im Wärmesektor und vor allem wegen der voraussichtlich beschränkt verfügbaren Mengen wenig wahrscheinlich [erscheint]“*. [8, S. 11]

Zum gegenwärtigen Zeitpunkt lässt sich nicht abschätzen, wann mit der Wasserstoffversorgung der Gebäudeeigentümer:innen gerechnet werden kann, sofern der Gasverteilnetzbetreiber den Wasserstoff über das Wasserstoff-Kernnetz beziehen möchte. Denn bereits die Inbetriebnahme des übergeordneten Transportnetzes ist gemäß § 28q Abs. 4 Nr. 3 EnWG erst bis zum Ablauf des Jahres 2032 vorgesehen. Mit der Anbindung weiterer Anschlussnehmer wie Gebäudeeigentümer:innen, kann erst nach dem Anschluss von Projekten i.S.v. § 28q Abs. 4 Nr. 4 EnWG gerechnet werden. Wann dies der Fall sein wird, lässt sich zum gegenwärtigen Zeitpunkt nicht abschätzen. Dies könnte letztlich auch dazu führen, dass die zeitlich begrenzte Übergangsregelung des § 71k GEG eher den Charakter einer dauerhaften Übergangsregelung einnehmen könnte.

4 Zusammenfassung

Mit den §§ 71f und 71k GEG hat der Gesetzgeber die rechtliche Grundlage dafür geschaffen, Wasserstoff in der Gebäudebeheizung zukünftig einsetzen zu können

und gleichzeitig die Anforderungen der EE-Nutzungspflicht zu erfüllen.

Die Inanspruchnahme der Übergangsregelung für den Einsatz von Wasserstoff in der Gebäudebeheizung ist jedoch mit zahlreichen regulatorischen Hürden verbunden. Die strengen Anforderungen des § 71k GEG werden aller Voraussicht nach dazu führen, dass die Übergangsregelung nur in Ausnahmefällen Anwendung finden wird. Wie viele Gebäudeeigentümer:innen zukünftig die Übergangsregelung in Anspruch nehmen können, hängt maßgeblich davon ab, ob planungsverantwortliche Stellen Wasserstoffnetzausbaubereiche ausweisen und wie das Format zur Erstellung von Wasserstofffahrplänen ausgestaltet werden wird. Erst dann können Gasverteilnetzbetreiber entscheiden, ob für sie die Erstellung entsprechender Fahrpläne in Betracht kommt. Von Bedeutung dürfte zudem die Entwicklung von Wasserstoffpreisen sein.

5 Literaturverzeichnis

[1] Deutscher Bundestag, Bundestagsdrucksache 20/6875, 17.05.2023.

[2] Tagesspiegel Background Energie & Klima, Wasserstofffahrpläne an Klimaschutzgesetz geknüpft, 09.09.2024.

[3] Deutscher Bundestag, Bundestagsdrucksache 20/7619, 05.07.2023.

[4] Bundesnetzagentur, Entwurf zur Festlegung zum Format der Fahrpläne für die Umstellung der Netzinfrastruktur auf die vollständige Versorgung der Anschlussnehmer mit Wasserstoff gemäß § 71k Gebäudeenergiegesetz (GEG), 2024, abrufbar unter: https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Energie/Unternehmen_Institutionen/Wasserstoff/Regelungsinhalt_Konsultation.pdf?__blob=publicationFile&v=3.

[5] Bundesnetzagentur, Erwägungen zu den Inhalten des Konsultationsdokumentes für eine Festlegung zum Format der Fahrpläne für die Umstellung der Netzinfrastruktur auf die vollständige Versorgung der Anschlussnehmer mit Wasserstoff nach § 71k Gebäudeenergiegesetz, 2024, abrufbar unter: https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Energie/Unternehmen_Institutionen/Wasserstoff/Erwaegungen_Festlegung.pdf?__blob=publicationFile&v=3.

[6] Clausen, J., Huber, M., Kemfert, C., & Klafka, P., Das Erdgasnetz, das Heizen mit Wasserstoff und die Wärmepumpe. Berlin: Borderstep Institut, 2024.

[7] Meyer, R., Herkel, S., Kost, C., Die Rolle von Wasserstoff im Gebäudesektor: Vergleich technischer Möglichkeiten und Kosten defossilisierter Optionen der Wärmeerzeugung, 2021, abrufbar unter: https://ariadneprojekt.de/media/2021/09/Ariadne-Analyse_Wasserstoff-Gebaeudesektor_September2021-1.pdf.

[8] Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, Green Paper Transformation Gas-/Wasserstoff-Verteilernetze, 2024, abrufbar unter: https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/G/green-paper-transformation-gas-wasserstoff-verteilernetze.pdf?__blob=publicationFile&v=4.

Initiale Eignungsbereichsermittlung für Wärmeversorgungsoptionen mittels GIS-Analyse – von 100 m x 100 m Gitterzellen zur Baublockebene

Timmy Schwarz ¹⁾, Yannick Gerling ¹⁾

¹⁾ Hochschule Bremen, Fakultät 2, Abt. Bau und Umwelt, Neustadtswall 30, 28199 Bremen, waermewende@hs-bremen.de

Kurzfassung

Bei der Durchführung der kommunalen Wärmeplanung existieren teils große Herausforderungen, z. B. bei der Identifikation von Vorranggebieten für die im Wärmeplanungsgesetz geforderten Maßnahmen. Der nachfolgend angewendete Ansatz kann hierbei eine erste Orientierungshilfe darstellen: Mit in der Regel vorliegenden Geodaten (Gemeindegrenzen, Wärmeverbrauchs- oder -bedarfsdaten, Straßennetz sowie Baublöcken) lassen sich mit dem anpassbaren Modell erste Übersichtsergebnisse erzeugen. Die hierbei erstellte räumliche Visualisierung von Eignungsbereichen für unterschiedliche Wärmeversorgungsoptionen von der Fernwärme, über (kalte) Nahwärmenetze bis hin zur Einzelversorgung liefert schnell und intuitiv erfassbar einen räumlichen Überblick der bedarfsseitigen Abschätzung zu Wärmeversorgungsoptionen. Das Modell wurde für die Visualisierung der Ergebnisse auf Baublöcke angepasst.

Schlagworte

Geodatenbasierte Wärmeleitplanung; Geoinformationssysteme; Wärmeliniedichte; Wärmeplanung; Wärmewende; Baublöcke

1 Einleitung

Der dieser Arbeit zugrunde liegende Ansatz weist neben der einfachen Anwendbarkeit für Gebiete einer oder mehrerer Kommunen folgende Eigenschaften auf: Es werden sog. Nachbarschaftseffekte berücksichtigt, welche ansonsten bei einer einfachen Aggregation von Wärmebedarfen außer Acht gelassen würden. Dies betrifft ebenso die Wärmeliniedichte, welche sich explizit unter Berücksichtigung direkt benachbarter Gebiete auf die Eignung für bestimmte Versorgungsoptionen auswirkt. Durch die verwendete Fuzzy Logik [1, S. 8-10] entstehen gezielt unscharfe Bereiche, die in diesem Ansatz als indifferente Gebiete ausgegeben werden. Da die aus dem Modell erzeugbaren Ergebnisse keine Detailplanung vorwegnehmen sollen, sondern zur Unterstützung der strategischen Planung dienen, bleiben in Übergangsbereichen bewusst offene Entscheidungsspielräume vorhanden. Diese weisen so auf genau jene Gebiete hin, die z. B. aufgrund ihrer Lage und damit verbundener Nachbarschaft in eben diesem Kontext bei der Detailplanung besonders beachtet werden müssen.

Um den genutzten Workflow (vgl. [2]) so anzupassen, dass im Ergebnis nicht nur sehr kleinräumig unterteilte Eignungsbereiche entstehen, wurden Anpassungen vorgenommen, um auf Ebene von Stadtteilen oder Quartieren einen Überblick der hauptsächlichen Eignung für bestimmte Wärmeversorgungsoptionen in einzelnen Baublöcken abzubilden.

2 Material und Methoden

Für die bedarfsseitige Identifikation geeigneter Wärmeversorgungsoptionen auf Baublockebene wurde ein bestehender ArcGIS Pro Workflow (abrufbar unter [3]) genutzt und weiterentwickelt. Abbildung 1 zeigt die wesentlichen Eingangsgeodaten, die zur Ermittlung von Eignungsbereichen (Wärmeversorgungsoptionen) benötigt werden, für ein Ergebnis in gitterzellenbasierter Darstellung. Die nachfolgend vorgestellten Anpassungen betreffen das genutzte Straßennetz sowie das Aggregationsgitter.

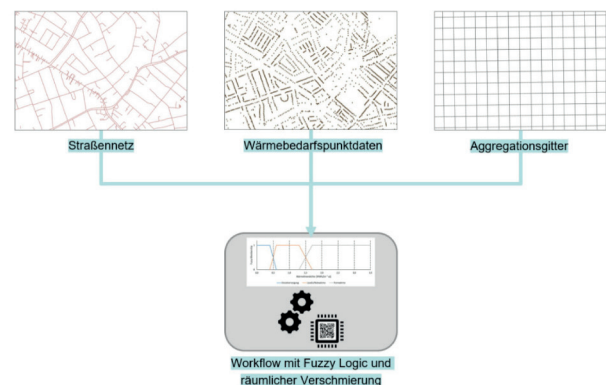


Abb. 1: Schematische Darstellung der für den Workflow benötigten Eingangsgeodaten, verändert nach [1, S. 9]

Anpassungen im Eingabelayer „Straßennetz“

Gemäß [4, S. 14] „sollten Verbrauchsdaten entlang von Straßen aggregiert werden, da dies in den meisten Fällen

dem Verlauf der Infrastrukturen zur Wärmeversorgung entspricht“. Das Ziel des Workflows ist wie im Wärmeplanungsgesetz (WPG) auch, „die Eignung der verschiedenen Wärmeversorgungsarten für verschiedene Teilgebiete entsprechend §§ 18 und 19 WPG beurteilen zu können“ [5, S. 53]. Hierzu wird die Kenngröße der Wärmelinien-dichte ermittelt, welche die Wärmebedarfsmenge, „die entlang eines Straßenabschnitts anfällt, ins Verhältnis zur Länge des Straßenabschnitts bzw. der für die Wärmeversorgung relevanten Trassenlänge“ [5, S. 53] setzt.

Verfügbare Geodaten aus OpenStreetMap oder ALKIS sind, wie in Abbildung 2 zu sehen, hierzu jedoch nur bedingt geeignet. Das Filtern, Selektieren bzw. Löschen von für ein Wärmenetz durch Vorgabe vorhandener Straßenzüge nicht benötigter Polylinien (Parallelsuren, Stichstraßen und dergleichen) ist komplex. Diese Prozesse sind aufwendig und fehleranfällig. Wie in der Abbildung ersichtlich, reicht nicht alleine das Löschen einer „Spur“ bei vorliegenden parallel verlaufenden Linien. Viele an der einen oder anderen parallel verlaufenden Linie angeschlossene Segmente des Straßennetzes wären in diesem Fall gar nicht mehr verbunden. Beim Vorliegen komplexer und breiter Straßenkreuzungen würden in der Praxis Hauptwärmeleitungen genau einmal im betrachteten Abschnitt verlegt werden. Modelle zur Berechnung der Wärmelinien-dichte kalkulieren in solchen Bereichen aber fälschlicherweise mit einer zu großen Netzlänge, wenn ein unbereinigtes Straßennetz verwendet wird.



Abb. 2: Beispieldarstellung Straßennetz, links mit Hintergrund, rechts ohne Hintergrund (Basiskarte: © GeoBasis-DE / BKG (2024); Straßennetz: OpenStreetMap (2022))

Anstelle des bisher genutzten Straßenlayers wurde ein neues Eingabenetz erstellt. Ausgangspunkt hierfür waren die sog. statistischen Baublöcke in Bremen [6], einer frei über das Geoportal des Landes Bremen bezieharen, (kleinsten statistisch) räumlichen Gliederungsebene. Durch Anwenden eines Puffers und Entfernen der Überlappungen in GIS wurde anhand der dann vorliegenden „erweiterten Außengrenzen“ dieser Baublöcke ein simples, fiktives Wärmenetz erzeugt und anstelle des bisherigen Straßenlayers im Modell verwendet. Abbildung 3 visualisiert vereinfacht diese Schritte: Als Pufferbreite wurden 20 m gewählt. Mit einem weiteren Geoverarbeitungswerkzeug wurden die entstandenen Überlappungen entfernt. Hierbei wurde mit der sog. Centerline-Methode gearbeitet, bei welcher die Grenze so erstellt wird, dass die Überlappungsflächen gleichmäßig auf die betroffenen Polygone aufgeteilt werden.



Abb. 3: Von Baublöcken (Polygonen) über Puffer und Entfernen von Überschneidungen zu einem fiktiven Wärmeleitungsnetz (Polylinien)

Anpassungen im Eingabelayer „Aggregationsgitter“

Bei vollständiger Workflowdurchführung erfolgt eine Aggregation der Wärmelinien-dichten inkl. Fuzzy-Membership-Analyse und Berücksichtigung von Nachbarschaftseffekten. Für die direkte Berechnung auf Baublockebene muss das vorliegende Modell tiefergehend angepasst werden. Vorläufige Ergebnisse waren noch stark fehlerbehaftet. Deshalb lag der Fokus zunächst darauf, lediglich eine Ergebnisdarstellung auf Baublockebene zu erzeugen, ausgehend vom ansonsten weitgehend unveränderten Workflow. Diese Darstellung dient im weiteren Anpassungsprozess auch als Validierungsmöglichkeit bzw. Plausibilitätscheck.

Projektion der Workflowergebnisse auf Baublöcke

Unter Verwendung der zuvor beschriebenen, erweiterten Baublock-Außengrenzen anstelle eines Straßenlayers wurden wie gehabt Ergebnisse auf 100 m x 100 m Gitterzellen erzeugt. Diese wurden anschließend mit den Polygonen der Baublöcke verschnitten. Den einzelnen Baublock-Polygonen wurde dann für die Visualisierung (Darstellung der Eignungsbereiche) der nach flächenanteil größte (kumulierte) Gitterzellen-Eignungswert zugewiesen. Abbildung 4 zeigt schematisch den Prozess der Projektion über die Verschneidung im GIS und anschließende Visualisierung der überwiegend vorkommenden Eignungsbereichszuordnung jedes Baublocks.

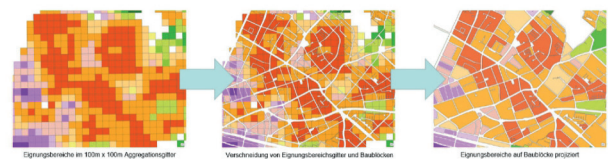


Abb. 4: Projektion der gitterzellenbasierten Eignungsbereichsergebnisse auf Baublock-Polygone

Die genauen Schritte zur Anpassung des ArcGIS Pro Workflows werden in [7] beschrieben.

3 Ergebnisse

Unter Anwendung der Methodik werden wie beschrieben die für 100 m x 100 m Gitterzellen ermittelten Wärmeversorgungsoptionen mit den Baublock-Polygonen im GIS verschnitten. Für die Visualisierung wird dann der jeweils flächenanteilmäßig größte Eignungsbereich genutzt. Abbildung 5 zeigt das Resultat für einen beispielhaften Ausschnitt.



Abb. 5: Auf Baublöcke projizierte Eignungsbereiche der Wärmeversorgung

4 Diskussion

Das über Baublock-Außengrenzen anstelle von Straßen angenommene, fiktive „Hauptwärmenetz“ orientiert sich nicht zwangsläufig an vorhandenen Sackgassen, Stichstraßen oder kleinen Ringstraßen innerhalb der Baublöcke. Durch das notwendige Puffern der Baublock-Polygone entfallen solche Einschnitte. Wie in Abbildung 6 zu sehen, ergibt sich dadurch eine deutliche „Bereinigung“.

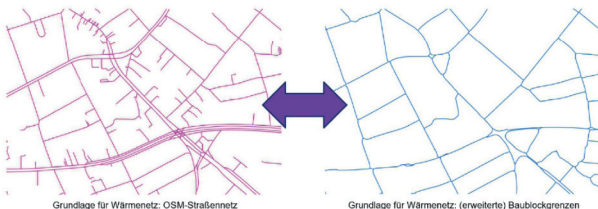


Abb. 6: Vergleich der möglichen Eingabelayer „Straßen“ links und (erweiterte) Baublock-Außengrenzen rechts

Abbildung 7 zeigt beispielhaft, wie das Anschließen einzelner Versorgungsteilnehmer an das Hauptwärmenetz deshalb von vorhandenen Straßen in der Lage leicht abweichen kann. Allerdings wird dies als unproblematisch erachtet, da im Resultat dennoch eine vergleichbare Netzlänge und somit im Wesentlichen realitätsnahe Wärmelinien-dichte erzeugt wird. Es überwiegt ferner der Vorteil gegenüber den ansonsten verzerrten Wärmelinien-dichten im Falle unbereinigter Straßenlayer (vgl. Abbildung 2).

Im Ergebnis erhält man homogene Baublockflächen, ohne weitere innere Unterteilung oder Darstellung bspw. der zweithäufigst vorkommenden Eignungsbereiche. In den Geodaten bleiben die Informationen der Flächenanteile allerdings erhalten. Dadurch wäre im Rahmen einer konkreten Einzelfallbetrachtung zur Detailplanung für einzelne Baublöcke oder Nachbarschaften noch ein Zugriff auf diese möglich.



Abb. 7: Im Workflow erzeugte Anschlussleitungen einzelner Wärmeabnehmer zu den fiktiven Hauptleitungen des Wärmenetzes (Baublock-Außengrenzen)

Abbildung 8 demonstriert den „Informationsverlust“, der durch die einheitliche Projektion pro Baublock optisch entsteht.



Abb. 8: Im Ergebnis homogene Eignungsbereiche pro Baublock ohne weitere Unterteilung oder Darstellung der zweithäufigst vorkommenden Zuordnung

5 Zusammenfassung und Ausblick

Durch die Berechnung von (durch die Bedarfsseite bestimmten) Wärmeversorgungsoptionen auf relativ kleinen räumlichen Einheiten (100 m x 100 m Gitterzellen) erhält man für ein großes Stadtgebiet einen quasi kontinuierlichen Wertebereich. Demgegenüber stellen Baublöcke zunächst größere Inseln und damit diskrete Räume dar: Flächenhafte Straßen erzeugen Abstände der Baublöcke zueinander, sodass es keine direkten Angrenzungen gibt. Der Fokus auf einzelne Baublöcke alleine, die definitionsgemäß von Straßen begrenzt werden, verengt den Blick im Zuge der Wärmeplanung zum Teil unzureichend: Gerade Straßen wären bei leitungsgebundener Wärmeversorgung eher als verbindende Elemente anzusehen – schließlich bilden sie eine Planungsgrundlage für den Verlauf von Wärmenetzverbünden. Damit folgt konsequenterweise, dass in der Regel keine losgelöste Einzelfallbetrachtung eines Baublocks alleine, ohne Blick auf umliegende bzw. „auf der anderen Straßenseite liegende“ Nachbarblöcke in Frage kommen kann.

Im vorgestellten Ansatz werden solche Grenzen zunächst für die Berechnung außen vorgelassen. Die Baublockgrenzen fließen indirekt nur über die in jeder Gitterzelle vorliegende Wärmelinien-dichte ein. Damit liegen die Ergebnisse als kontinuierlicher Werteraum im über das Stadtgebiet gelegten Raster vor. Erst im Folgeschritt werden die Ergebnisse dann auf die diskreten Baublöcke projiziert und die Informationsauflösung hierbei durch die gröbere Struktur der Baublöcke gegenüber den Gitterzellen in der Fläche „geglättet“.

In der gewählten Methodik entsprechen die (erweiterten) Außengrenzen der Baublöcke dem grundlegend denkbaren Wärmenetz, anstelle der ansonsten hierfür verwendeten Straßen. In der Regel entsprechen diese Grenzen dem Straßenverlauf, da sich Baublöcke v. a. durch umschließende Straßenzüge definieren.

Abbildung 9 zeigt das Zielbild der weiteren Workflowanpassung für eine Berechnung der Wärmeversorgungsoptionen im bestehenden Modell direkt auf Baublockebene. Hierbei würden die Zwischenschritte der Aggregation auf Gitterzellen und anschließenden Projektion auf Baublöcke entfallen.

Die Pufferbreite beim Erzeugen der erweiterten Baublöcke ist selbst wählbar. Die erweiterten Baublock-Außengrenzen dienen nicht nur als Ersatz für das Straßennetz. Im Workflow des Modells ist es ebenfalls essenziell, dass benachbarte Baublöcke direkt aneinandergrenzen, um Nachbarschaftseffekte bei der Eignungsbereichsermittlung zu berücksichtigen.

Durch die gewählte Pufferbreite kann hierüber auch der tatsächlich abgrenzende Charakter bei real größeren „Hindernissen“ zwischen zwei Baublöcken erhalten bleiben. Dies trifft beispielsweise bei Flüssen, Autobahnen, breiten Bundesstraßen oder Bahntrassen zu.

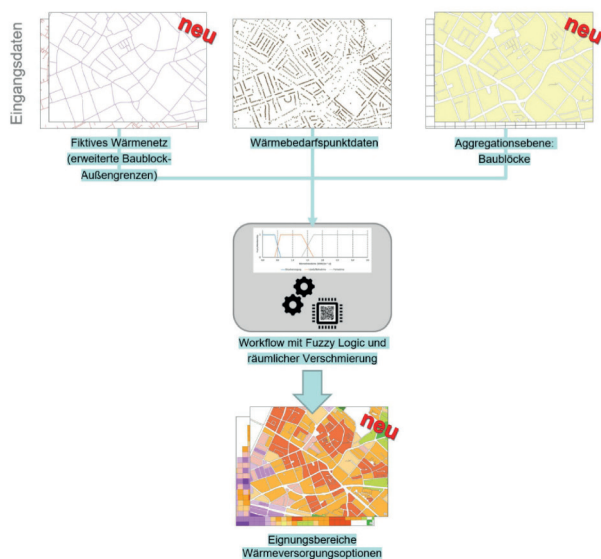


Abb. 9: Zielbild der Modellanpassung mit direkter Berechnung der Eignungsbereiche auf Baublockebene

Um Akteuren der Wärmeplanung neben statisch erzeugten Ergebnissen des beschriebenen Workflows weitere interaktive Entscheidungsunterstützung zu bieten, wurde am Beispiel der Städte Oldenburg und Bremen an weitergehenden Konzepten und WebGIS-Anwendungen gearbeitet (vgl. [8] und [9]). In diesem Sinne soll auch die Validierung der Ergebnisse auf Baublockebene fortgeführt und in vorhandene Lösungen integriert werden.

6 Danksagung

Die Autoren bedanken sich beim BMBF für die Förderung des Projektes WärmewendeNordwest - Digitalisierung zur Umsetzung von Wärmewende- und Mehrwertanwendungen für Gebäude, Campus, Quartiere und Kommunen im Nordwesten - Arbeitspakete: Potentiale für eine stadtweite und quartiers-bezogene Transformation der Wärmeversorgung sowie Bildungsformate für nachhaltige Entwicklung (Förderkennzeichen: 03SF0624H). Des Weiteren bedanken sich die Autoren bei den zwei anonymen Gutachtern.

7 Literatur

- [1] J. Knies, *Modellentwicklung für die kommunale Wärmeplanung*, 2023, verfügbar unter: <https://doi.org/10.26092/elib/2086>.
- [2] J. Knies, P. Heinrich, N. Steyer, Y. Gerling und T. Schwarz, *Ein ArcGIS-Pro-Modell zur Ermittlung von Eignungsbereichen für Wärmeversorgungsoptionen am Beispiel der Stadt Bremen*, 2024, verfügbar unter: <https://doi.org/10.26092/elib/2640>.
- [3] J. Knies, Y. Gerling und P. Heinrich, *Ein ArcGIS-Pro-Modell zur Ermittlung von Eignungsbereichen für Wärmeversorgungsoptionen*, 2024, verfügbar unter: <https://doi.org/10.5281/zenodo.10675339>.
- [4] BMWK, Hg., *„Leitfaden kompakt“: Einordnung und Zusammenfassung des Leitfadens Wärmeplanung*, Berlin, 2024, verfügbar unter: https://api.kww-halle.de/fileadmin/user_upload/Leitfaden_Waermeplanung_kompakt_Juni2024_web_bf.pdf.
- [5] S. Ortner, B. Köhler, B. Ott, C. Kluge, A. Bartsch, N. Langreder und A. Billerbeck, *Leitfaden Wärmeplanung: Empfehlungen zur methodischen Vorgehensweise für Kommunen und andere Planungsverantwortliche*, Heidelberg, Freiburg, Stuttgart, Berlin, 2024, verfügbar unter: <https://www.bmwbsb.bund.de/SharedDocs/downloads/Webs/BMWSB/DE/veroeffentlichungen/wohnen/leitfaden-waermeplanung-lang.pdf>.

- [6] Statistisches Landesamt Bremen, *Statistische Baublöcke der Stadt Bremen*, 2024, verfügbar unter: https://gdi2.geo.bremen.de/inspire/download/Statistische_Baubloecke/data/Statistische_Baubloecke_HB.zip.
- [7] T. Schwarz, *Projektion gitterzellenbasierter Ergebnisse auf Baublöcke: Beschreibung der Workflowanpassung* (<https://doi.org/10.5281/zenodo.10675339>) zur Projektion der in 100 m x 100 m Gitterzellen dargestellten Eignungsbereiche für Wärmeversorgungsoptionen auf statistische Baublöcke, 2024, verfügbar unter: <https://zenodo.org/doi/10.5281/zenodo.13833697>.
- [8] M. Elbeshausen, K.-K. Cao, J. Buschmann, M. Schnabel, T. Vogt, R. Steinberger-Wilckens und S. Koch, *Strategische Entscheidungsunterstützung in der Regionalen Wärmeplanung*, in *2. Konferenz der Norddeutschen Wärmeforschung: Book of Abstracts*, I. Weidlich, P. Vuthi und S. Bechtel, Hg., S. 27–28, 2024, verfügbar unter: <https://doi.org/10.34712/142.56>.
- [9] Y. Gerling und T. Schwarz, *Dashboard-Anwendung zur Eignungsbereichsdarstellung von Wärmeversorgungsoptionen*, in *3R Fachzeitschrift für sichere und effiziente Rohrleitungssysteme*, Bd. 03 2024, S. 50–53, 2024, verfügbar unter: <https://www.vulkan-shop.de/catalog/product/view/id/15841/s/3R-03-2024/>.

Strategische Entscheidungsunterstützung in der Regionalen Wärmeplanung

Moritz Elbeshausen¹⁾ Karl-Kiên Cao²⁾, Jan Buschmann²⁾, Marvin Schnabel¹⁾ Thomas Vogt²⁾, Robert Steinberger-Wilckens²⁾, Sascha Koch¹⁾

¹⁾ Jade Hochschule, Institut für Angewandte Photogrammetrie und Geoinformatik (IAPG), Ofener Straße 16/19, 26121 Oldenburg, moritz.elbeshausen@jade-hs.de, 0441 7708-3515

²⁾ Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) - Institut für Vernetzte Energiesysteme, Carl-von-Ossietzky-Straße 15, 26129 Oldenburg, karl-kien.cao@dlr.de

Die Energiewende erfordert den regionalen Ausbau erneuerbarer Energien, um Strom, Wärme und Treibstoffe für ein klimaneutrales Energiesystem bereitzustellen. Herausforderungen bestehen in der Berücksichtigung sektorenübergreifender Synergien und Interessen regionaler Akteure. Letztere können zur Entscheidungsunterstützung im Rahmen der kommunalen Wärmeplanung Modelle nutzen, welche es ermöglichen, Potenziale für emissionsfreie Energieerzeugung und alternative Energieträger zu bestimmen und Grundlagen in Form von interaktiven Dashboards bereitzustellen. Am Beispiel des Landkreises Wesermarsch wird ein solches Modell evaluiert, um Standorte für zum Beispiel Elektrolyseure sowie Strom- und Druckluftspeicher zu identifizieren.

Energieplanung, Wärmeplanung, Energiewende, Sektorenkopplung, Regionale Strategische Energieplanung (ReStEP), Renewable Energy Mix (REMIX)

1 Einleitung

Die Energiewende erfordert auch einen regionalen Ausbau von erneuerbaren Energien [1]. Im zukünftigen klimaneutralen Energiesystem wird hierzu eine Vielzahl an Standorten für die Bereitstellung dieser Energie erforderlich. Diese werden benötigt, um sowohl Strom als auch Wärme und Treibstoffe für die verschiedenen Säulen des Energiesystems zu gewinnen. Für politische Entscheidungsträger und Unternehmen im Energiesektor sind Modelle zur Optimierung von Energiesystemen wertvolle Werkzeuge zur Planung des Transformationsprozesses. Je nach ihrem Hintergrund haben die Beteiligten unterschiedliche Hauptinteressen, wie beispielsweise Energiekosten, Geschäftsmodelle, Emissionsreduktionsziele oder Versorgungssicherheit [2]. Die Planung von Anlagen zur Gewinnung, Verteilung und Nutzung erneuerbarer Energien ist mit einer Reihe von Herausforderungen verbunden, wie der Berücksichtigung vielfältiger rechtlicher Rahmenbedingungen, sektorenübergreifender Synergieeffekte und der Interessen verschiedener regionaler und überregionaler Akteure [3]. Darüber hinaus sind sektorenübergreifende Betriebskonzepte und Handlungsempfehlungen erforderlich, um den Akteuren eine gesamtheitliche strategische Entscheidungsunterstützung zu liefern. Hierfür können Modelle zur Bestimmung des Potenzials für regionale emissionsfreie Wärme- und Stromerzeugung genutzt werden, um datengestützte Entscheidungen zur Energieplanung treffen zu können und die Klimaschutzziele zu erreichen [4]. Dazu wird ein Modell entwickelt und mit lokalen Einschränkungen und Anforderungen, wie zum Beispiel dem Wärmebedarf von Gebäuden oder der benötigten Kapazität für Energiespeicherung, parametrisiert. Grundlage für

die Modellierung ist das Modellierungsframework REMIX (Renewable Energy Mix), das Potenziale für emissionsarme Energieträgerbereitstellung in einer Region bestimmt [2]. Dessen Ergebnisdaten werden zusammen mit Analysemethoden zur geodatenbasierten Energieplanung und vorhandenen Geodaten kombiniert und in Form von Dashboards als interaktives Cockpit visuell aufbereitet (siehe Abb. 1). Unter Berücksichtigung von limitierenden Faktoren wie den Verlusten bei leitungsgelinktem Wärmetransport oder tatsächlichen Temperaturniveaus können so Szenarien modelliert werden, welche das zukünftige Energiesystem abbilden sollen. Akteure haben somit die Möglichkeit, die modellierten Szenarien individuell anzupassen, um eigene Erkenntnisse für die zukünftige Entwicklung der Region zu gewinnen. Auf diese Weise können Maßnahmen, die zum Erreichen der Klimaneutralität beitragen, regional besser geplant und lokal umgesetzt werden [5]. Als exemplarischer Anwendungsfall wird das Modell im Landkreis Wesermarsch evaluiert, da dieser ein hohes Potenzial für die Gewinnung erneuerbaren Stroms und leicht zugängliche Energieinfrastruktur aufweist. Das Ziel ist es, Aussagen über technisch und wirtschaftlich geeignete regionale Standorte für z. B. Elektrolyseure oder Strom- und Gasspeicher zu ermöglichen [6]. Unter Einbeziehung von Zusammenhängen wie z. B. der lokalen Nachfrage nach Wärme, Strom, Gasen und Treibstoffen soll, durch die Kombination verschiedener Ansätze im Kontext der geodatenbasierten Energieplanung, ein positiver Beitrag zur Energiewende geleistet werden. Dazu werden Dashboards entwickelt, welche beispielhaft eine strategische Planung von Standorten für Elektrolyseure unter Berücksichtigung ihrer Abwärmepotenziale ermöglichen und so Akteuren bei Maßnahmenentscheidungen helfen.

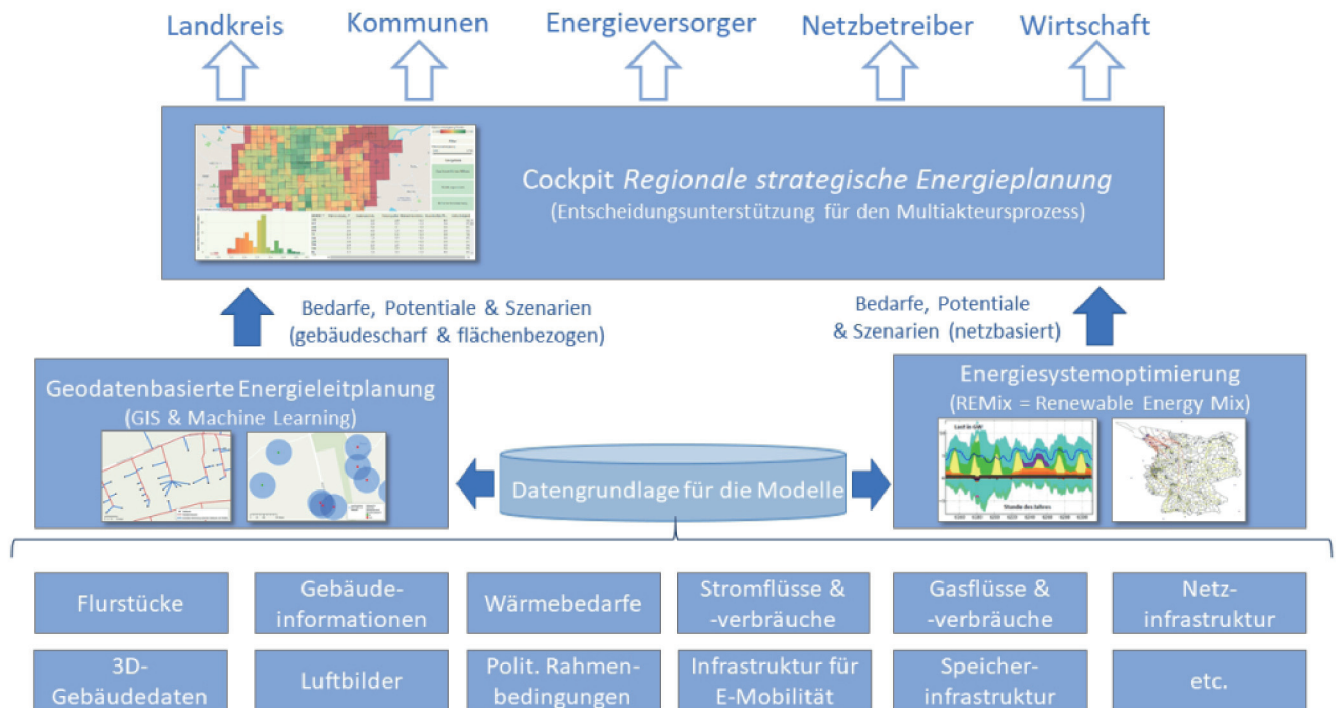


Abbildung 1: Konzept eines Cockpits für die strategische Entscheidungsunterstützung

2 Material und Methoden

2.1 Entwicklung eines Cockpits zur strategischen Entscheidungsunterstützung

Strategische Entscheidungsunterstützung mit Business Intelligence (BI)-Tools umfasst den Einsatz datenbasierter Analysen, um fundierte und zukunftsorientierte Entscheidungen zu treffen [7]. Mithilfe von BI-Tools lassen sich große Datenmengen sammeln, strukturieren und analysieren. Um den Akteuren in der Wärmeplanung ein Werkzeug zu liefern, werden, wie in Abb. 1 konzeptionell dargestellt, die Daten in Form von Dashboards oder interaktiven Karten in so einem BI-Tool aufbereitet. Das Cockpit ermöglichen es Entscheidungsträgern, komplexe Zusammenhänge zu verstehen und Szenarien für die strategische Planung heranzuziehen.

So lassen sich z. B., wie in Abb. 2 zu sehen, Gebiete mit hohem Wärmebedarf identifizieren. Die Integration von weiteren Modellen reichert die Darstellungen dabei weiter an. Durch die Verknüpfung von BI-Tools mit Geodaten entsteht eine Plattform, die es ermöglicht, lokale und regionale Gegebenheiten präzise darzustellen und datengestützte Entscheidungen zu treffen. Zur besseren Darstellung werden die Ergebnisse für die strategische Entscheidungsunterstützung auf übergeordnete, für die Wärmeplanung relevante Planungsebenen, aggregiert wie z.B. Raster oder Baublöcke [8]. Dies ermöglicht eine sinnvolle Betrachtung von potenziellen Versorgungsgebieten und vermeidet zu große Stückelungen der Planungsgebiete [9]. Um eine bestmögliche Visualisierung von Bedarfen und Potenzialen auf räumlicher Ebene zu

erhalten, werden Dashboards zur Darstellung von Kennzahlen und Visualisierungsformen wie z.B. Karten erstellt.



Abbildung 2: Aufbereitung von Wärmebedarfen modelliert von DBI Gas- und Umwelttechnik GmbH [10] in einem Dashboard für die Energieplanung

2.2 Geodatenbasierte Energieleitplanung

Der Einsatz geografischer Daten und entsprechender Analysen zur Planung von Energieinfrastrukturen, insbesondere zur Gewinnung, Verteilung und Nutzung von Energie bietet entscheidende Vorteile wie das Erkennen von räumlichen Mustern und Ausprägungen von Kennzahlen auf vorhandenen Planungsebenen wie Baublöcken, Flurstücken oder Rastern, welche für die Wärmeplanung typischerweise genutzt werden [8]. Die Informationen zu geografischen Merkmalen wie Topografie, Landnutzung, Gebäudeinfrastruktur, Bevölkerung, sowie vorhandener Infrastruktur wie z.B. Anlagen zur Energiegewinnung und Netzen bietet einen entscheidenden

den Vorteil sowohl bei der Analyse als auch der Bewertung strategischer Prozesse wie z.B. der Wärmeplanung. Durch die Verknüpfung dieser Daten mit Energiebedarfs- und Versorgungsmodellen, lassen sich potenzielle Standorte für Energiegewinnung und -speicherung identifizieren, und effiziente Netzstrukturen können geplant werden.

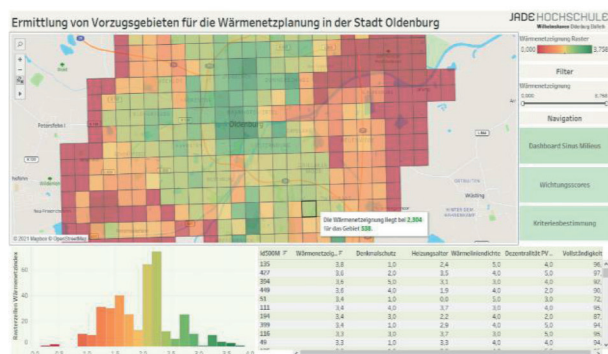


Abbildung 3: Beispiel für die Aufbereitung von Geodaten zur Ermittlung von Vorzugsgebieten für die Wärmenetzplanung [11]

Die Unterstützung von energieplanerischen Prozessen durch geodatenbasierte Planungsinstrumente lässt sich als geodatenbasierte Energieleitplanung bezeichnen. Wie in Abb. 3 zu sehen, spielt die geodatenbasierte Energieplanung in der Wärmeplanung eine entscheidende Rolle bei der Planung von z. B. Wärmeversorgungsoptionen [11]. Da Wärme nur über geringe Distanzen transportiert werden kann ergibt sich hier der Bedarf nach räumlichen Analysemethoden [5]. Diese Darstellungen ermöglichen es, Regionen mit z. B. hohem Wärmebedarf zu identifizieren, und so die passenden Wärmeversorgungsoptionen zu identifizieren [12]. Dazu können Kennzahlen wie z. B. die Wärmelinienindichte herangezogen werden [8]. Die Modellierung dieser Linien kann als Basis für antizipierte Trassenverläufe dienen. Dazu werden Straßenabschnitte aufbereitet, um Verläufe von potenziell geeigneten Trassen zu visualisieren und über eine Verbindung mit Wärmeabnehmern eine antizipierte Netzstruktur zu erzeugen [9]. Im Kontext der Wärmeplanung spielen räumliche Daten eine Schlüsselrolle. Geodaten wie Gebäudestandorte, Wärmebedarfsdichten oder Potenziale für erneuerbare Energien können durch BI-Tools analysiert und visualisiert werden, um effiziente Wärmeversorgungsstrategien zu entwickeln [11].

2.3 Energiesystemoptimierungsmodell REMix

Um die Zukunft betreffende Fragestellungen der Energieversorgung im Kreis Wesermarsch beantworten zu können, wird das Energiesystemoptimierungsmodell-Framework REMix (Renewable Energy Mix) eingesetzt. Dafür wird eine Modellinstanz der Wesermarsch genutzt, in der kostenminimierend die Strom-, Wärme- und E-Mobilitätsnachfrage in der Wesermarsch durch den Ausbau und Einsatz verschiedener Technologien gedeckt werden müssen. Aufbauend darauf werden verschiedene Untersuchungsszenarien definiert und analysiert. Bei den zu lösenden Optimierungsproblemen handelt es sich um

Lineare Programme (LPs), da im Vergleich zu reinen Inselmodell-Betrachtungen der Betrieb und damit die Interaktionen des Energiesystems der Wesermarsch innerhalb des niedersächsischen und deutschen Stromversorgungssystems modellendogen mitoptimiert werden sollen. Das heißt aber auch, dass technische Restriktionen, wie Stillstandzeiten oder Teillastwirkungsgrade von thermischen Kraftwerken nicht berücksichtigt werden können.

Der klassische Anwendungsfall von REMix liegt auf Betrachtungen des Gesamtenergieversorgungssystems, z.B. mit Fokus auf Deutschland oder Europa. Das modellierte Netzwerk basiert darin in der Regel entweder auf der Topologie der Energietransportnetze oder auf den Grenzen von administrativen Regionen.

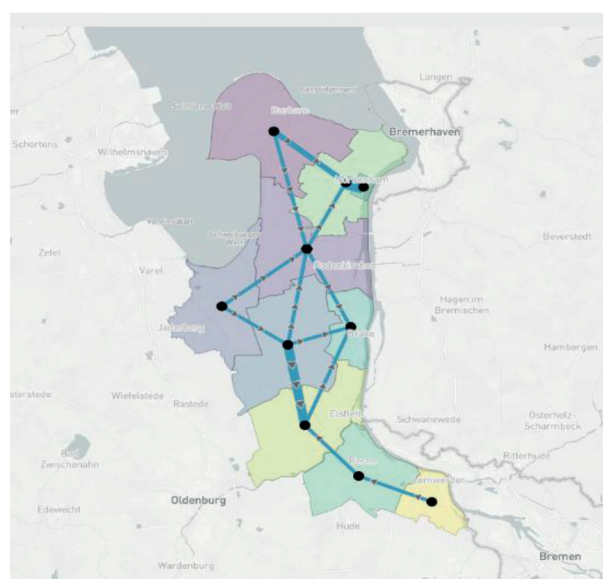


Abbildung 4: Netzknoten für das an die Wesermarsch angepasste REMix Modell

Im ReStEP Projekt wird erstmals ein gemeinschaftliches Modell eines Landkreises genutzt. Dabei werden die Gemeinden, wie in Abb. 4 dargestellt, als Netzknoten angenommen und Erzeugungs- und Verbrauchskapazitäten pro Gemeinden entsprechend aggregiert. Die entsprechenden Eingangsdaten und deren Quellen sind in der Tab. 1 aufgeführt. Dadurch lassen sich Modellergebnisse erzielen, die bei energiepolitischen Entscheidungen auf Gemeindeebene helfen können.

Tab. 1: Eingangsdaten für das REMix Modell der Wesermarsch und deren Quellen

Eingangsdaten	Quelle
Nachfragezeitreihe Strom	[13]
Nachfragezeitreihe Wärme	[13]
EE-Erzeugungszeitreihen	projektspezifische Potentialanalyse
Bestandskraftwerke	[14]

E-Mobilitätszeitreihen	[15]
technoökonomische Daten	[16]
Verbrauch PKW	[14]
Verbrauch Zugmaschinen & LKW	[14]

Das Energiesystemmodell bildet mehrere Sektoren ab und es stehen verschiedene Technologien zur Versorgung der Sektoren als auch zur Energiespeicherung zur Verfügung (siehe Tab. 2)

Tab. 2: Abgebildete Sektoren, Versorgungs- und Speichertechnologien im REMix-Modell der Wesermarsch

Sektoren	Versorgung	Speicher
Strom	Wind Onshore	Druckluftspeicher
	Photovoltaik	Vehicle2Grid-E-Mobile
	Biomasse	Lithium-Ion-Batterien
	Gaskraftwerk	
Wärme	Import	
	Gas Kessel	
	Wärmepumpe	
	Elektrolyseur	
Mobilität	E-PKW	

Die folgenden Szenarien sollen exemplarisch zeigen, welche Möglichkeiten die Wesermarsch bei der Umstellung ihres Energiesystems zur Wasserstoffproduktion und Nutzung der entstehenden Abwärme bietet. Grundlage dafür sind die Ziele aus dem aktuellen Zwischenstand des noch in Bearbeitung befindlichen Klimaschutzkonzepts (siehe Tab. 3).

Tab. 3: Grundannahmen für die Parametrisierung des Energiesystemmodells für das Jahr 2040 basierend auf dem sich in Arbeit befindlichen Klimaschutzkonzept

Zielparameter	Größe
Anteil E-Mobilität	75 %
Wärmepumpenanteil	57 %
Ausbauziel Wind	737 MW
Ausbauziel PV	532 MW

Darauf aufbauend wird für das Basisszenario angenommen, dass die gesamte Kraftstoffnachfrage für Zugmaschinen und LKW aus dem Jahr 2019 [14] aus eigener Wasserstoffproduktion mittels Elektrolyseur in der Gemeinde Elsfleth gedeckt werden muss. Im Modell wird lediglich vorgegeben, dass die benötigte Menge Wasserstoff bis zum Ende des berechneten Zieljahres produziert wird. Der Elektrolyseur wird vollständig stromgeführt betrieben, wodurch seine Betriebsweise ausschließlich durch das verfügbare Stromangebot gesteuert wird. Bi-

lanziell wird dabei zudem sichergestellt, dass der benötigte Strom für die erzeugte Wasserstoffmenge zu 100% aus Erneuerbaren Energiequellen der Wesermarsch stammt. Im zweiten Szenario sind die grundlegenden Annahmen die gleichen wie im Basisszenario. Allerdings kann die Abwärme der Elektrolyse jetzt zur Deckung des Wärmebedarfs in der Wesermarsch genutzt werden. Zudem wird die Option der Ausbauroptimierung für Elektrolyseure auf vier Gemeinden der Wesermarsch mit Nahwärmenetzpotential erweitert.

3 Ergebnisse

In der Folge werden exemplarisch die Auswirkungen von unterschiedlichen Standorten und Fahrweisen von Elektrolyseuren in der Wesermarsch analysiert. Dabei wurden vereinfachende Annahmen wie der verlustfreie Abwärmetransport, die Vernachlässigung von Temperaturniveaus der Wärmenachfrager sowie ein durchschnittliches Abwärmepotenzial von 30% des eingesetzten Stroms getroffen. Ein Ergebnis aus dem Basisszenario mit einem Elektrolyseur ohne Abwärmennutzung ist in Abbildung 5 zu erkennen. Zu sehen ist die Betriebszeitreihe des Elektrolyseurs für die potenzielle Abwärme über das gesamte Jahr. Dem gegenüber steht die Wärmenachfrage anhand von Wärmebedarfen für Gebäude in der Wesermarsch.

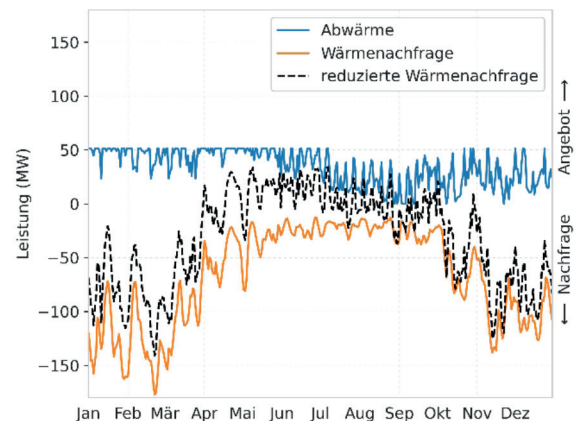


Abbildung 5: Verlauf der Abwärme des Elektrolyseurs (blau), Wärmenachfrage (orange) und der reduzierten Wärmenachfrage bzw. -überschuss aus beiden (schwarz) im Modelllauf mit einem Elektrolyseur in der Gemeinde Elsfleth

An der durch die Abwärme reduzierten Wärmenachfrage (gestrichelte schwarze Linie) ist zu erkennen, dass hier ein deutliches Potential zur Abwärmennutzung aus Elektrolyse vorhanden ist. Zur Nutzung dieses Potenzials müssen Elektrolyseure allerdings verbrauchernah installiert werden, sodass damit Nahwärmenetze verlustarm gespeist werden können. Wird aufgrund geringer Distanzen zunächst vereinfachend ein verlustfreier Wärmetransport angenommen, können unter Einbeziehung von Daten einer bedarfsseitigen Eignungsprüfung mögliche Standorte für Elektrolyseure identifiziert werden. Die städtebauliche Struktur sowie die Wärmenachfragemengen der Gemeinden Nordenham, Brake, Lemwerder

und Elsflöth führen zu deren Identifikation als potenzielle Abnehmer aufgrund ihrer dichteren Bebauung und der damit höheren ermittelten Eignung für netzgebundene Wärmeversorgungsoptionen. Die Verarbeitung dieser Informationen mit dem REMix-Modell erlaubt die räumliche Analyse des Elektrolyseur-Ausbaus verteilt auf die genannten Gemeinden. In Abb. 6 sind die resultierenden Elektrolyse-Kapazitäten durch die Größe der blauen Kreise dargestellt.

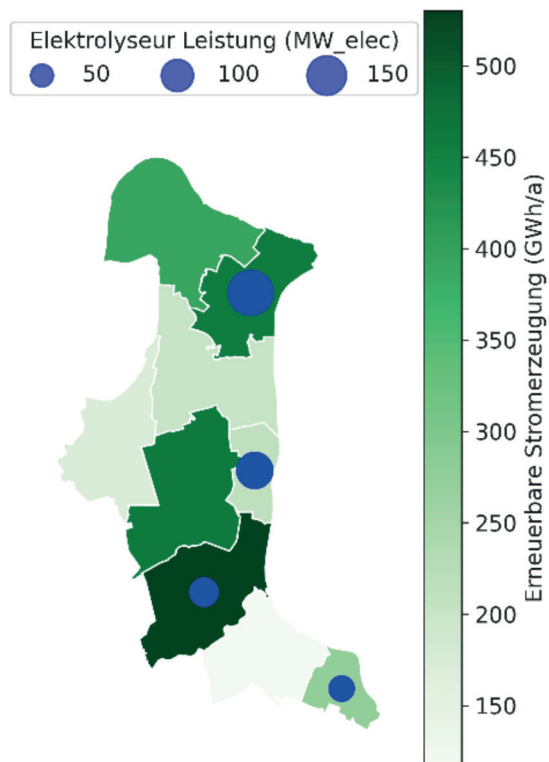


Abbildung 6: Leistung der angenommenen Leistung von Elektrolyseuren mit Abwärmenutzung (blaue Kreise) gegenüber der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien (grüne Flächen)

Abbildung 7 zeigt zudem eine deutlich veränderte Abwärmezeitreihe der Elektrolyseure, deren Verlauf nun enger mit dem Wärmebedarfsprofil korreliert. Die reduzierte Wärmenachfrage bleibt durchgängig im negativen Bereich, was bedeutet, dass 100 % der Abwärme genutzt

wird. Dadurch erhöht sich der Anteil der Wärme aus erneuerbaren Quellen von 57 % auf 78 %.

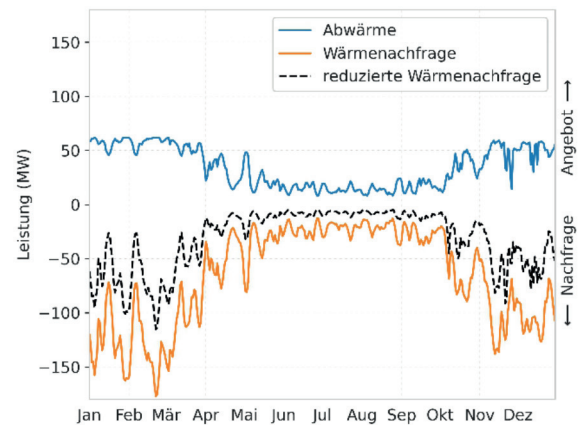


Abbildung 7: Verlauf der Abwärme der Elektrolyseure (blau) und der Wärmenachfrage (orange) im Modelllauf mit Abwärmenutzung von vier Elektrolyseuren

Die sich so ergebenden Erzeugungsbilanzen von Elektrolyseuren werden für die Aufbereitung in einem BI-Tool verwendet und sollen für die strategische Wärmeplanung genutzt werden. Bei der Planung von Wasserstoffelektrolyseuren müssen z. B. verschiedene Standortfaktoren berücksichtigt werden, um die technische, wirtschaftliche und ökologische Machbarkeit zu gewährleisten. Zu den klassischen Standortfaktoren zählen z.B. die Lokalität von Anlagen zur Stromgewinnung, Wasserverfügbarkeit, Abnehmer vor Ort sowie Transportkapazitäten. Elektrolyseure benötigen große Mengen an Strom, idealerweise aus erneuerbaren Quellen wie Wind- oder Solarenergie, um "grünen" Wasserstoff zu produzieren [17]. Hierzu werden die mit dem REMix-Modell ermittelten Produktionskapazitäten für erneuerbaren Strom herangezogen. Die Daten für potenzielle Wasserstoffnachfrage sowie die Bedarfsstruktur auf Gemeinde- und Rasterebene werden den Akteuren bereitgestellt, um Entscheidungen über die potenziellen zukünftigen Standorte der Anlagen treffen zu können. In Abb. 8 ist zu sehen, was die bedarfsseitige Prüfung möglicher Versorgungsoptionen anhand von Siedlungsbestand inkl. Wärmebedarfen sowie antizipierter Trassennetze nach der Methodik von [18] ergeben hat. Als Beispiel wird die Region um

Nordenham genutzt, um potenzielle Standorte für Elektrolyseure zu finden.

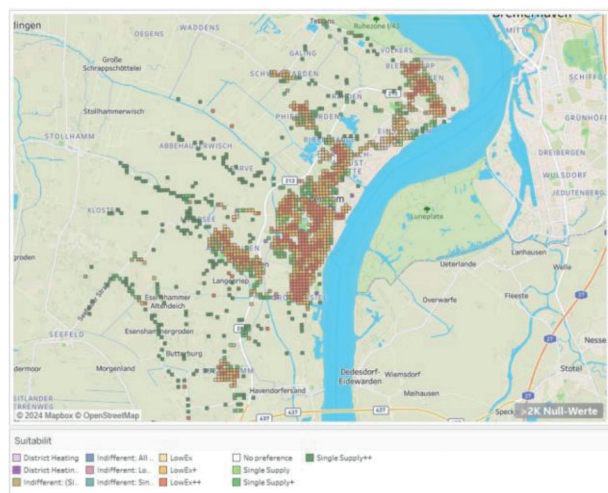


Abbildung 8: Anwendungsorientiert aufbereitete Eignungsoptionen zur strategischen Entscheidungsunterstützung nach [18]

Die Ergebnisse der bedarfsseitigen Eignungsprüfung geben Aufschluss über die räumliche Verteilung möglicher Eignungsgebiete für die zukünftige Wärmeversorgung. Die Rasterdarstellung zeigt eine Einteilung in Fernwärme, Nahwärme sowie Einzelversorgungsgebiete. Zudem gibt es indifferente Gebiete, welche keine direkte Zuordnung zulassen und sich für mehrere Optionen eignen könnten. Die spezifische Verteilung der Eignungsoptionen für Nordenham ergibt sich wie in Abb. 8 dargestellt. Dabei stechen vor allem LowEx+ sowie LowEx++,Single Supply ++ und Indifferent: (Single Supply and LowEx) als Eignungsoptionen hervor. LowEx wird hier als potenzielle Eignungsoption Nahwärme (gelb, orange) betrachtet, Single Supply (grün, dunkelgrün) als potenzielle Einzelversorgung mit z.B. Wärmepumpen. In diesem Beitrag wird vor allem die Eignungsoption Nahwärme (LowEx) betrachtet.

Mithilfe des BI-Tools lassen sich nun verschiedene Parameter setzen und Filter anwenden, welche entsprechend der Zuordnung einer Rasterzelle zu einer Versorgungsoption eine Aussage über die voraussichtliche Güte für die jeweilige Option ermöglichen. Dies ergibt wie in Abb. 9 zu sehen ein deutlich differenzierteres Bild für die Versorgungsoption Nahwärme (LowEx) unter Ausschluss der nur bedingt für Nahwärme geeigneten und für Einzelversorgung gut geeigneten Gebiete über die Güte der Rasterzelle für die jeweilige Versorgungsoption.

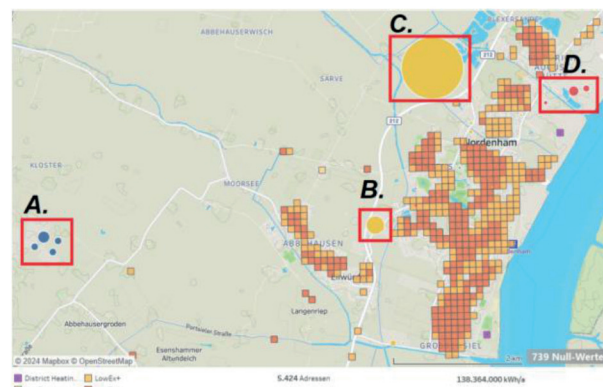


Abbildung 9: Gefilterte Darstellung der voraussichtlich für Wärmenetze geeigneten Prüfgebiete

Es ist zu sehen, dass 5424 Abnehmer im Bereich in und um Nordenham innerhalb dieser Prüfgebiete liegen. Abb. 9 zeigt einen Ausschnitt dieser Gebiete, sowie Anlagen zur Gewinnung von Strom aus dem Marktstammdatenregister. Der Gesamtwärmebedarf für die Prüfgebiete in Gesamt Nordenham beträgt 138.364.000 kWh/a. Die punkthaft dargestellten Kartenelemente repräsentieren Windeinheiten (blau, A.), Solareinheiten (gelb, B. & C.) und Verbrennungseinheiten (rot, D.). Die Größe der Darstellung richtet sich nach der Nettonennleistung der Anlagen. Im Detail lassen sich diese Informationen in dem Tool auslesen und für die Planung berücksichtigen.

Tab. 4: Verteilung der für Nordenham ermittelten Eignungsoptionen auf Rasterebene

Eignungsoption	Anzahl Abnehmer
District Heating++	2
LowEx	10
LowEx+	2472
LowEx++	2940

Tab. 4 zeigt hier die Verteilung der Abnehmer auf die dargestellten voraussichtlichen Eignungsklassen. Diese wurden wie bereits erwähnt auf die am besten für Nahwärme geeigneten Klassen gefiltert.

Die Standorte von Anlagen zur Gewinnung von Strom können wie eingangs erwähnt einen Anhaltspunkt für mögliche Standorte für Elektrolyseure liefern. Kombiniert mit der Bedarfssituation, dargestellt in Form von Eignungsgebieten, lassen sich so außerdem Potenziale zur Abwärmenutzung erschließen. Für die in Abb. 6 dargestellte Größe des für Nordenham ermittelten Elektrolyseurs mit ca. 150 MW elektrischer Leistung lässt sich somit bedarfsseitig die Dimension möglicher Anlagen anhand der Wärmebedarfsmenge ableiten. So können z. B. einer oder mehrere Elektrolyseure an verschiedenen Standorten die in Abb. 9 mit A., B. und C. markiert wurden mit in der Nähe befindlichen Eignungsgebieten strategisch geplant werden um eine optimale Ausnutzung der

Erzeugungspotenziale für Wasserstoff sowie die Nutzung der Abwärmepotenziale zu erhalten. Die Markierung D. zeigt bereits bestehende Verbrennungsanlagen mit eventuell vorhandenen Abwärmepotenzialen. Hier sollte in der weiteren Planung zunächst herausgefunden werden ob in der Nähe liegende Prüfgebiete bereits mit vorhandener Abwärme versorgt werden können und die Elektrolyseure somit an einem anderen Standort geplant werden sollten oder die Abwärme eines Elektrolyseurs zusätzlich genutzt werden könnte, um ein potenzielles Wärmenetz zu versorgen. Dies ist im Rahmen der Auswertung der Ergebnisse als Teil der strategischen Planung zu behandeln.

4 Diskussion

Die bedarfsseitige Prüfung von Gebieten für klimaneutrale Wärmeversorgungsoptionen bietet Landkreisen eine strukturierte Grundlage, um strategisch über die künftige Energieversorgung zu entscheiden. Sie lässt sich aus Wärmebedarfsdaten ableiten und liefert erste Erkenntnisse zu möglichen Planungsgebieten. So soll nach WPG das Potenzial zur Reduktion von CO₂-Emissionen frühzeitig festgestellt werden und kommunale Akteure mit einer Datengrundlage für die Wärmeplanung versorgt werden [19]. Durch die Analyse spezifischer Versorgungsoptionen können die Akteure frühzeitig festlegen, welche Gebiete am wahrscheinlichsten für welche Wärmeversorgungsoption geeignet sind. Wasserstoffproduktion und Wärmeversorgung dabei als gekoppelt in einem System zu betrachten, ermöglicht es zudem, die Gesamtemissionen zu reduzieren, indem Potenziale für die Substitution von Kraftstoffen durch grünen Wasserstoff und das damit verbundene Abwärmepotenzial, aufgedeckt werden. Für die zukünftige kontinuierliche Planung der Wärmeversorgung liefern diese Ergebnisse einen Einblick in mögliche strategische Handlungsoptionen für die Wärmeplanung [20]. Der Landkreis kann bei diesen strategischen Entscheidungen eine unterstützende Position einnehmen, welche den kommunalen Akteuren hilft, ihre Rolle als planungsverantwortlicher Stelle nachkommen zu können [21]. Die dargestellten Ergebnisse können als Entscheidungsgrundlage für die Frage dienen, wo bevorzugt mit der Planung von Wärmenetzen begonnen werden sollte und geplante Anlagen mit ihrer Abwärme einen Nutzen für die Wärmeplanung bieten können. Für die Akteure in der Wärmeplanung ist zudem die räumliche Aufbereitung besonders relevant da diese gesetzlich gefordert wird [19]. Zu den großen Limitierungen der vorgestellten Methodik zählen vereinfachende Annahmen wie der verlustfreie Abwärmetransport oder die Vernachlässigung von Temperaturniveaus der Wärmenachfrager. Hierzu kommt ebenfalls, dass durch die begrenzte Datenverfügbarkeit keine Aussagen über tatsächliche Verbräuche getroffen werden, sondern mithilfe von Wärmebedarfen nur strategische Aussagen getroffen

werden sollen, welche z. B. in der Wärmeplanung genutzt werden können. Diese Limitierungen lassen sich nur durch ausführliche Machbarkeitsstudien umgehen, welche daher im Anschluss der strategischen Planung notwendig werden.

5 Zusammenfassung

Die Sektor übergreifende strategische Energieplanung ist eine Herausforderung für lokale Entscheidungsträger. Die zu berücksichtigenden Daten und Wirkzusammenhänge sind ohne technische Hilfsmittel nicht einfach überblickbar bzw. beurteilbar. Die vorliegende Arbeit zeigt einen Weg auf mittels interaktiver Darstellungen Entscheidungsprozesse zu erleichtern oder auf zukünftige Änderungen wie Bedarfsschwankungen oder infrastrukturelle Anforderungen wie den Netzausbaubedarf zu reagieren. Hierfür wurde basierend auf Potenzialanalysen für die erneuerbare Stromerzeugung und Daten zur bedarfsseitigen Eignungsprüfung eine Modellinstanz entwickelt, mit deren Hilfe Szenarien der zukünftigen Energieversorgung in der Wesermarsch untersucht werden können. Beispielhaft wurde die Abwärmenutzung zukünftiger Elektrolyse-Standorte untersucht. Erste Ergebnisse haben gezeigt, dass allein deren Nutzung die Möglichkeit bietet, die Bereitstellung erneuerbarer Wärme in der Wesermarsch, um ca. 20 Prozentpunkte zu steigern. Aus diesen Daten wird zusammen mit im BI-Tool dargestellten Prüfgebieten für Versorgungsoptionen ein Informations-Cockpit gespeist. Dieses bietet verschiedenen Akteuren die Möglichkeit mittels interaktiver Dashboards selbstständig Analysen durchzuführen. Zum Beispiel lassen sich damit die Standorte zur Platzierung von Elektrolyseuren oder Potenziale zur CO₂-Reduktion bewerten. Der gezeigte Ansatz macht deutlich, dass ein hohes Potenzial für die Verschneidung von Analyseergebnissen und Szenarien in der strategischen Planung vorhanden ist, welche von großem Wert für regionale Akteure ist. Um aus Szenarien für das zukünftige Energiesystem konkrete Maßnahmen ableiten zu können benötigt es eine Entscheidungsunterstützung, welche diese Ergebnisse in zugänglicher Form auf zum Beispiel Dashboards aufbereitet und einfach verständlich zur Verfügung stellt. Die entwickelte Methodik lässt sich so Fachplanern zur Verfügung stellen um den strategischen Prozess der Energieplanung zu unterstützen und die Ergebnisse aus geodatenbasierter Energieleitplanung und Energiesystemoptimierung für die Planung zusammenzuführen und aufbereitet darzustellen.

Gefördert durch:



**Niedersächsisches Ministerium
für Wissenschaft und Kultur**

6 References

- [1] L. Cioccolanti, M. Renzi, G. Comodi, and M. Rossi, "District heating potential in the case of low-grade waste heat recovery from energy intensive industries," *Applied Thermal Engineering*, vol. 191, p. 116851, 2021, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2021.116851.
- [2] M. Wetzel *et al.*, "REMIX: A GAMS-based framework for optimizing energy system models," *JOSS*, vol. 9, no. 99, p. 6330, 2024, doi: 10.21105/joss.06330.
- [3] Wietschel *et al.*, *Integration erneuerbarer Energien durch Sektorkopplung: Analyse zu technischen Sektorkopplungsoptionen*. [Online]. Available: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-03-12_cc_03-2019_sektorkopplung.pdf (accessed: Nov. 12 2024).
- [4] M. Schnabel, M. Elbeshausen, S. Koch, and S. Erdmann, "8 Participatory Processes in Geodata-Based Thermal Energy Planning," in *Innovations and challenges of the energy transition in smart city districts*, S. Leonhardt, T. Nusser, J. Görres, S. Rosinger, G. Stryi-Hipp, and M. Eckhard, Eds., Berlin, Boston: De Gruyter, 2024, pp. 119–132. doi: 10.1515/9783110777567-008
- [5] F. Mauthner, I. Leusbrock, P. Nageler, R. Heimrath, I. Schardinger, and M. Biberacher, "Räumliche Energieplanung in Städten und Kommunen," *Transforming Cities*, vol. 2018, no. 1, pp. 44–48, 2018. Available: https://www.researchgate.net/publication/329060175_Raumliche_Energieplanung_in_Staeden_und_Kommunen (accessed: Nov 12 2024)
- [6] M. Elbeshausen, S. Koch, K.-K. Cao, R. Steinberger-Wilckens, and J. Buschmann, "Energieversorgung regional und strategisch planen," (in de), *ti-Magazin (Technologie-Informationen)*, „ti“ 2/2023: Energiesysteme im Wandel, 2023, doi: 10.60479/XYNE-2C19.
- [7] H. Baars and H.-G. Kemper, *Business Intelligence & Analytics – Grundlagen und praktische Anwendungen*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2021.
- [8] J. Knies, "Modellentwicklung für die kommunale Wärmeplanung," 2023. doi: 10.26092/elib/2086
- [9] S. Erdmann, T. Belkot, and F. Friebe, GIS-Analysen für eine kleinräumige multikriterielle Wärmeleitplanung: Wichmann Verlag, 2021. doi: 10.14627/537707024
- [10] P. Heinrich, "DBI-Ansatz zur Modellierung von Wärmebedarfen," 2024. [Online]. Available: https://www.dbi-gruppe.de/wp-content/uploads/2024/02/waermebedarf_zukunft.pdf
- [11] M. Schnabel, T. Gravenhorst, T. Belkot, F. Friebe, S. Erdmann, and S. Koch, "Visual Data Discovery im Kontext der geodatenbasierten Wärmeleitplanung," *gis.Science*, no. 2, pp. 63–74, 2022.
- [12] R. Riechel and J. Walter, "Kurzgutachten Kommunale Wärmeplanung," 2022. Available: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/kurzgutachten-kommunale-waermeplanung> (accessed: Mar 07 2025)
- [13] openego, *eGon-data: Open data for energy system modeling*. [Online]. Available: <https://github.com/openego/eGon-data>
- [14] EnergieSynergie und Wirtschaftsförderung Wesermarsch GmbH, *Strategiekonzept zur Neuausrichtung der zukünftigen grünen Energiewirtschaft im Landkreis Wesermarsch*. Brake, Germany. [Online]. Available: <https://www.wf-wesermarsch.de/files/Downloads/Strategiekonzept%20Energiewirtschaft%20Wesermarsch.pdf>
- [15] N. Wulff, F. Miorelli, H. C. Gils, and P. Jochem, "Vehicle Energy Consumption in Python (VencoPy): Presenting and Demonstrating an Open-Source Tool to Calculate Electric Vehicle Charging Flexibility," *Energies*, vol. 14, no. 14, p. 4349, 2021, doi: 10.3390/en14144349.
- [16] Simon, S., & Xiao, M. (2022). A multi-perspective approach for exploring the scenario space of future power systems: Input Data [Dataset]. <https://b2share.eudat.eu>. <https://doi.org/10.23728/B2SHARE.4E5E2D11B8224FB8809CDC2D07EEFF04>
- [17] N. Fisch, T. Nusser, and S. Marx, "10 Climate Impact of Green Hydrogen in an Urban Context," in *Innovations and challenges of the energy transition in smart city districts*, S. Leonhardt, T. Nusser, J. Görres, S. Rosinger, G. Stryi-Hipp, and M. Eckhard, Eds., Berlin, Boston: De Gruyter, 2024, pp. 145–160. doi: 10.1515/9783110777567-010
- [18] J. Knies, P. Heinrich, N. Steyer, Y. E. Gerling, and T. Schwarz, Ein ArcGIS-Pro-Modell zur Ermittlung von Eignungsbereichen für Wärmeverversorgungsoptionen (Version 1). Zenodo. 2024. doi: 10.5281/zenodo.10675339
- [19] Bundesregierung, "Wärmeplanungsgesetz (WPG)," 2024. [Online]. Available: <https://www.gesetze-im-internet.de/wpg/WPG.pdf>
- [20] Niedersächsisches Gesetz zur Förderung des Klimaschutzes und zur Minderung der Folgen des Klimawandels (Niedersächsisches Klimagesetz - NKlimaG): NKlimaG, 2024. [Online]. Available: <https://voris.wolterskluwer-online.de/browse/document/d083c42e-5da3-3833-baba-23cde5d8b2b5> (accessed: Mar 7 2025)
- [21] I. Ahlhelm *et al.*, "Klimaschutz in der räumlichen Planung: Gestaltungsmöglichkeiten der Raumordnung und Bauleitplanung," 2012. Available: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/klimaschutz-in-raeumlichen-planung-0>

Bildnachweise für das Cover:

Foto von Ingo Weidlich, Mit-Herausgeber.

Karte © Landesbetrieb Geoinformation und Vermessung, Geoportal Hamburg. Abgerufen von: <https://geoportal-hamburg.de/geo-online/>. Verwendung gemäß Lizenzbedingungen. Zugriff am 15.08.2024.

