

Gefördert durch:



Schlussbericht zu Nr. 8.2 BMBF – NKBF 98
für das Verbundvorhaben

Wärmewende Nordwest: Digitalisierung zur Umsetzung von Wärmewende- und Mehrwertanwendungen für Gebäude, Campus, Quartiere und Kommunen im Nordwesten

Teilvorhaben

Klimaneutrale Wärme für Quartierslösungen -
Bewertungstool für die Auslegung und den Betrieb von
sektorengkoppelten Wärmenergiesystemen inkl. neuer
Wärmetechnologien

Projektlaufzeit: 16.4.2021 - 15.11.2025

Förderkennzeichen: 03SF0624L

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt

Autoren: Patrik Schönfeldt, Jan Buschmann, Thomas Poppinga

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den
Autoren.

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Einleitung | 2 |
| 1.1 | Aufgabenstellung | 2 |
| 1.2 | Ablauf des Vorhabens | 2 |
| 1.3 | Wissenschaftlicher und technischer Stand an dem angeknüpft wurde | 3 |
| 1.4 | Zusammenarbeit mit anderen Stellen | 3 |
| 2 | Eingehende Darstellung | 4 |
| 2.1 | Rahmenbedingungen des Vorhabens | 4 |
| 2.2 | Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele | 5 |
| 2.2.1 | Multi-kriterielles Optimierungstool | 6 |
| 2.2.2 | Technisches Energiesystemmodell | 7 |
| 2.2.3 | Eingangsdaten | 8 |
| 2.2.4 | Datenaggregation | 11 |
| 2.2.5 | Exemplarische Ergebnisse der Methode | 11 |
| 2.3 | Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises | 12 |
| 2.4 | Notwendigkeit und Angemessenheit der Arbeiten | 12 |
| 2.5 | Voraussichtliche Nutzen, Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans | 13 |
| 2.6 | Bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen | 14 |
| 3 | Erfolgte Veröffentlichungen | 15 |
| 4 | Externe Literatur | 17 |

1 Einleitung

Der Begriff Wärmewende bezeichnet die Umstellung der Wärmeversorgung auf erneuerbare Energien. Auch wenn Wärme streng genommen auch in Industrie- prozessen von Bedeutung ist, wird in der Regel – so auch im vorliegenden Projekt – der Gebäudesektor in den Fokus genommen. Der Gebäudesektor ist weiterhin neben dem Verkehr der einzige Sektor, der seine Emissionsziele nicht erreicht [22, S. 10]. Trotz positiver Einflüsse durch die bestehende Förderkulisse [22, S. 77] ist ein Durchbruch weiterhin nicht zu erkennen. Neben Verunsicherung ist auch der Fachkräftemangel ein limitierender Faktor [23]. Zuletzt spielen bei der Wärmewende auch in Konflikt stehende Stakeholder-Interessen eine Rolle, insbesondere das Vermieter-Mieter-Dilemma [24].

1.1 Aufgabenstellung

Neben der Effizienzsteigerung durch Digitalisierung stand im Verbundprojekt “Wärmewende Nordwest” (Laufzeit: 2021 - vsl. 2026) auch die Befähigung weiterer Personenkreise im Zentrum. Entsprechend haben die 21 Partner folgenden gemeinsamen Leitsatz formuliert:

“Wir ermöglichen Menschen und Organisationen die Wärmewende, durch unsere Entwicklung von digitalen Unterstützungslösungen, aktiv mitzugestalten.”

Die Befähigung kann und soll den entsprechenden Personen dabei auch Sicherheit geben, wodurch beide bremsende Faktoren angegangen werden. Der vorliegende Abschlussbericht beschreibt einen Teil des genannt Verbundprojekts, bei dem in sechs Forschungsfeldern und zwei Querschnittsaktivitäten an der Digitalisierung auf Ebenen der Wärmewende – von der Sanierung von Einzelgebäuden bis hin zur kommunalen Wärmeplanung – geforscht wurde.

Im Forschungsfeld 5 (Klimaneutrale Wärme für Quartierslösungen) wurden Methoden und Werkzeuge für eine Vereinfachung der Wärmewende entwickelt. Ziel ist es, möglichst breit anwendbare Ansätze herauszuarbeiten und individuelle Planungsleistungen auf ein Mindestmaß zu reduzieren. Betrachtet wird der Prozess von der Akquise sowie der Qualitätsabschätzung von Datenquellen über die Auslegung und Aufbereitung möglicher Versorgungslösungen bis hin zur Bewertung der Optionen inklusive möglicher Geschäftsmodelle. Dieser Bericht liegt hierbei einen Schwerpunkt auf die automatisierte Bewertung von Versorgungslösungen, mithilfe der im Rahmen von Planungsprozessen möglicherweise in Konflikt stehende Stakeholderinteressen abgebildet werden können. Weiter wird dargestellt, wie auf dieser Basis eine multikriterielle Optimierung erfolgen kann, um die Wärmetransformation auf der Ebene von Quartieren voranzutreiben.

1.2 Ablauf des Vorhabens

Das Forschungsfeld ‘Klimaneutrale Wärme für Quartierslösungen’ hat die kompletten Kette von Datengewinnung über Modellerstellung hin zu Vorstudien für ein Umsetzungskonzept abgedeckt. Gerade der Blick auf die Umsetzung ist hierbei stark von der öffentlichen Meinung geprägt, da die Umsetzung von Maßnahmen schlussendlich Gebäudeeigentümer*innen obliegt.

In den grundlegenden Arbeiten, der Definition von Quartieren, sowie der Feststellung von Wärmeverbänden und Erzeugungspotentialen wurde seitens des DLR unterstützt. Zudem wurden Anforderungen kommuniziert, wie Daten und Schnittstellen aussehen müssten, um die so geschaffenen Daten später berücksichtigen zu können. Technisch haben wir uns auf das breit unterstützte Format ‘GeoJSON’ geeinigt.

Im Bereich der Resilienzbeurteilung wurde zusätzlich bei der Indikatordefinition zwecks Berücksichtigung der Resilienz bei der Systemauslegung zusammengearbeitet. Hierbei stellt sich die Schwierigkeit, dass Modelle naturgemäß keine überraschenden Ereignisse abbilden oder berücksichtigen können. Weiterhin wurde die Softwareauswahl so abgestimmt, dass als Teil des Gesamtprojekts auf Basis der auch vom DLR genutzten und gepflegten Software eine Arbeit zur Erzeugung von alternativen, nahezu optimalen Versorgungslösungen (MGA, Modelling to generate alternatives) mit dem Blick auf resiliente Versorgung [25] entstehen konnte.

Bei der Gestaltung des ‘Bewertungstools’ haben wir zunächst Indikatoren definiert und ein technisches Gerüst geschaffen. Hierbei wurde auch die Perspektive möglicher späterer Betreiber samt möglicher Geschäftsmodelle berücksichtigt. Mit der Verfügbarkeit von Eingangsdaten konnten im Projektverlauf beispielhafte Untersuchungen durchgeführt werden, die wir mit klassischen Ansätzen verglichen haben.

Die im Projekt erstellte Software wurde unter Open-Source-Lizenz veröffentlicht. Zuletzt erfolgte eine zusammenfassende Dokumentation der im Rahmen des Projektes geschaffenen Werkzeuge zur Technologieauswahl und Dimensionierung von sektorenkoppelnden Quartiersenergiesystemen.

1.3 Wissenschaftlicher und technischer Stand an dem angeknüpft wurde

Zu den wesentlichen Ergebnissen des Vorhabens sind wissenschaftliche Veröffentlichungen in Form von Abschlussarbeiten, Konferenzbeiträgen, Journalveröffentlichungen oder Preprints veröffentlicht worden. Diese gehen jeweils auf den jeweiligen wissenschaftlichen und technischen Stand ein, an den angeknüpft wurde. Die Publikationen aus dem Projekt sind in Abschnitt 3 gelistet.

1.4 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Im Bereich der Softwareentwicklung wurde mit Blick auf eine bestmögliche Anwendbarkeit und Übertragbarkeit der Ergebnisse eng mit anderen am ‘Open Energy Modelling Framework’ (oemof) beteiligten Instituten zusammengearbeitet. Neben den auch im Verbundprojekt beteiligten Einrichtungen, Fraunhofer IFAM und Universität Bremen, sind hier insbesondere das Reiner-Lemoine-Institut (RLI), Fraunhofer UMSICHT und die Hochschule Flensburg zu nennen.

2 Eingehende Darstellung

2.1 Rahmenbedingungen des Vorhabens

Durch die starke Orientierung des Projekts an der Wärmewende außerhalb des Forschungskontexts wurde im Projektlauf (siehe Abschnitt 1.2) immer wieder auf sich verändernde Rahmenbedingungen reagiert und Bezug genommen. Die wichtigsten Entwicklungen sind hier dargestellt.

Zu Beginn des Projekts ging der Blick bezüglich Datengewinnung oft ins Ausland, was in der EU (rechtlich) möglich wäre. Beispielhaft ist hier zu nennen, dass in den Niederlanden Daten zum Wärmeverbrauch Ebene von Baublöcken durch das ‘Centraal Bureau voor de Statistiek’ (entspricht etwa dem statistischen Bundesamt) veröffentlicht werden (vgl. [26]), während entsprechende Daten in Deutschland nur viel stärker aggregiert zur Verfügung stehen (vgl. [27]). Aus diesem Grund wurde sogar erwogen statt auf eigentlich vorhandene, aber im Projekt nicht verfügbare, Messwerte auf Daten aus Fernerkundung [28] zu setzen.

Insbesondere durch Wärmeplanungsgesetze der Länder und des Bundes hat sich die Datenverfügbarkeit im Laufe des Projekts zumindest für Kommunen deutlich verbessert (vgl. [29]). Zudem erfolgte eine vermehrte Datenbereitstellung von Gebäudedaten als Open Data (für Bremen seit 9. Juni 2024 [30]). Da auf diese Weise einige anfängliche Hürden gesenkt waren, konnte nach einigen Verhandlungen ein unter Berücksichtigung einer Vertraulichkeitserklärung ein Datensatz zum Wärmeverbrauch für das Projekt bereitgestellt werden, der vergleichbar mit der Qualität der Datensätze der Kommunen und der z.B. in den Niederlanden öffentlichen Daten ist.

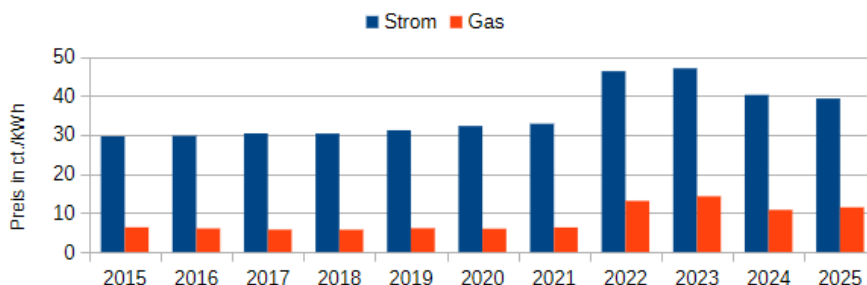


Abbildung 1: Mittlere Energiepreise für Haushalte, Daten: [31]

Einen großen Einfluss auf das Projekt hatte auch die Völlinvasion Russlands in der Ukraine seit dem Jahr 2022. Bereits im Vorfeld hatte Russland begonnen Gaslieferungen zu reduzieren, später fielen zusätzlich die Pipelines aus und die EU reduzierte die Importe aus Russland. In der Folge ist auch eine dauerhafte Veränderung der Energiepreise (siehe Abb. 1) zu beobachten [31]. Als Reaktion auf veränderte Verfügbarkeit von Erdgas sollte das Gebäudeenergiegesetz so geändert werden, dass ab 2024 alle neu verbauten Heizungen zu mindestens 65 % mit erneuerbaren Energien betrieben werden müssen. Nachdem Entwürfe zunächst noch sehr sachlich auch öffentlich diskutiert wurden, entfachte sich ab Frühjahr 2023 eine mediale Debatte, in dem Schlagwort ‘Heizhammer’ zu einer großen Verunsicherung [32, 33, 34] führte. Die Emotionalisierung eher

technischer Themen setzt sich im Vorfeld der Bundestagswahl im Februar 2025 fort [35]. In der Folge war ein Einbruch bei der Heizungserneuerung zu beobachten (siehe Abb. 2), wobei in 2023 und 2024 gegen den Trend signifikant mehr neue Ölheizungen verbaut wurden als in den Jahren zuvor. Mittlerweile werden

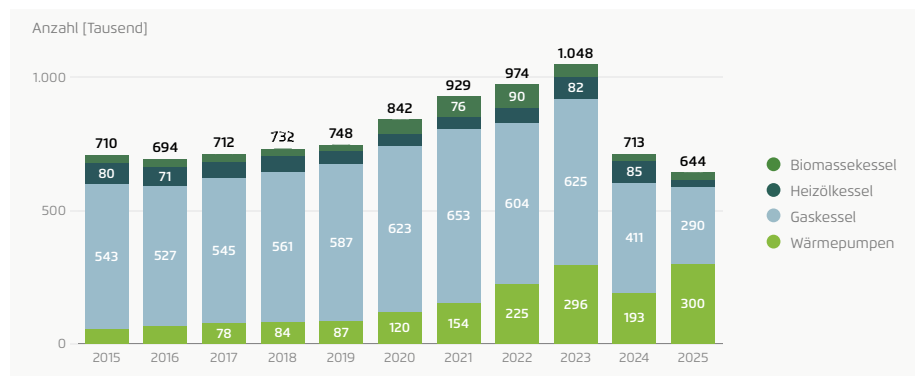


Abbildung 2: Verkaufte Wärmeerzeuger, Quelle: [22]

aber mehr Wärmepumpen als Gasheizungen eingebaut [22, S. 71], selbst wenn die ursprünglich geplante Vorgabe nach Gebäudeenergiegesetz weiterhin nicht (bzw. nur in Neubaugebieten) in Kraft ist.

Sehr relevant ist aus Projektperspektive auch die Gründung des Kompetenzzentrums Kommunale Wärmewende (KWW) im Jahr 2022, welches Kommunen in Fragen der Wärmeplanung als Austauschplattform bereitsteht und Orientierung bietet. Im Bereich der Wärmeplanung nach dem Stand der Technik hat sich der durch das KWW jährlich aktualisierte Technikkatalog (vgl. [36]) als übliche Referenzwerk etabliert.

2.2 Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

Spezifizierend zur Kurzdarstellung in Abschnitt 1.1 war das DLR in folgende Arbeitspakete involviert. Zudem koordinierte das DLR das Forschungsfeld 5.

- Forschungsfeld 5: Klimaneutrale Wärme für Quartierslösungen
 - AP FF5.1: Definition von Quartieren
 - AP FF5.2: Potentiale für eine stadtweite und quartiersbezogene Transformation der Wärmeversorgung
 - AP FF5.3: Resiliente Systemarchitektur
 - AP FF5.4: Bewertungstool für die Auslegung und den Betrieb von sektorengerkoppelten Wärmenergiesystemen inkl. neuer Wärmetechnologien
 - AP FF5.5: Ausgestaltung von Quartierswärmeversorgungssystemen
 - AP FF5.6: Transformationswerkzeug Wärmeplanung Quartiere
- Querschnittaktivität 1: Aufbau und Betrieb einer digitalen Wärmewende-Plattform für die Integration der Forschungsfelder

- QA1.1: Anforderungsanalyse für digitale Wärmewende-Plattform
- QA1.4: Funktionsbaustein 2 – Open Data Plattform
- Querschnittaktivität 2: Transfer und Innovation, Qualifikation und Ausbildung
 - QA2.1: Bildungsformate für nachhaltige Entwicklung
 - QA2.3: Wissens- und Technologietransfer

Der inhaltliche Schwerpunkt lässt sich klar in den Aspekten der Digitalisierung der Wärmeplanung mit Blick auf mögliche Quartierskonzepte benennen, die in den Arbeitspaketen FF5.4 (Bewertungstool) und FF5.6 (Transformationswerkzeug) Berücksichtigung finden; bei den übrigen Themen ging es oft um inhaltliche Abhängigkeiten. So dürfte beispielsweise klar sein, dass ohne entsprechend vorbereitete Eingangsdaten kein Versorgungskonzept gerechnet werden kann. Eine Einordnung der Aktivitäten in das Gesamtprojekt ist in der Veröffentlichung ‘Applied Digital Twin Concepts Contributing to Heat Transition in Building, Campus, Neighborhood, and Urban Scale’ [1] nachzulesen.

2.2.1 Multi-kriterielles Optimierungstool

Das erarbeitete Werkzeug setzt auf eine gekoppelte Betriebs- und Auslegungsoptimierung der Energieversorgung des betrachteten Gebiets. Es verzichtet dabei auf übliche Vereinfachungen in der Planung (u.a. Wärmelinien-dichte), die gerade in Hinblick auf den Einsatz von erneuerbaren Energien und (Ab-) Wärmequellen mit unterschiedlichen Temperaturen an ihre Grenzen kommen können. Hierbei erfolgt die Betriebsoptimierung nach betriebswirtschaftlichen Aspekten, während die Auslegung weitere Ziele verfolgt. Durch dieses Verfahren soll abgebildet werden, dass Bau- und Sanierungsmaßnahmen eher von gesellschaftlichen Abwägungsprozessen begleitet werden, die sich zum Beispiel in Form von Auflagen oder Zuschüssen äußern. Technisch gesehen handelt es sich um einen Workflow mit austauschbaren Einzelkomponenten, die jeweils im Leitfaden ‘Anregungen zum effizienten Umgang mit niederschwellig verfügbaren Software-Tools für die kommunale Wärmeplanung’ [2] beschrieben werden. Mit Blick auf die bereits beschriebene Verunsicherung ist auch ein FAQ zu Wärmewende-Themen mit Fokus auf die allgemeine Öffentlichkeit Teil des Leitfadens.

Der implementierte Workflow des Bewertungstools mit seinem Zusammenspiel aus Betriebs- und Auslegungsoptimierung knüpft an am Institut vorhandene Vorarbeiten [37] an. Im Ablauf (dargestellt in Abb. 3) Zunächst werden Szenarien und damit verknüpfte Zielgrößen definiert (dargestellt durch Temperaturverläufe in verschiedenen Jahren) definiert. Zusätzlich findet eine Übersetzung von geo-referenzierte Energiedaten in ein Energiesystemmodell statt. Um hier eine schnelle und möglichst genaue Parametrierung zu ermöglichen, haben wir MTRESS [3] geschaffen, das das abstrakte Framework oemof.solph [38] konkretisiert. Szenarien und Energiedaten werden von MTRESS genutzt, um (zunächst zufällig) von PyGMO [39] ausgewählte Systemauslegungen entsprechen der Zielgrößen zu bewerten. Die resultierenden KPI nutzt PyGMO dann, um die Auslegungen mittels Heuristiken zu verbessern. Dieser Ablauf wird solange fortgesetzt bis die Ergebnisse zufriedenstellen.

Um die benötigten Szenarien und Indikatoren sinnvoll effizient auswählen zu können, haben wir einen Indikatorenkatalog veröffentlicht [4]. Dieser umfasst

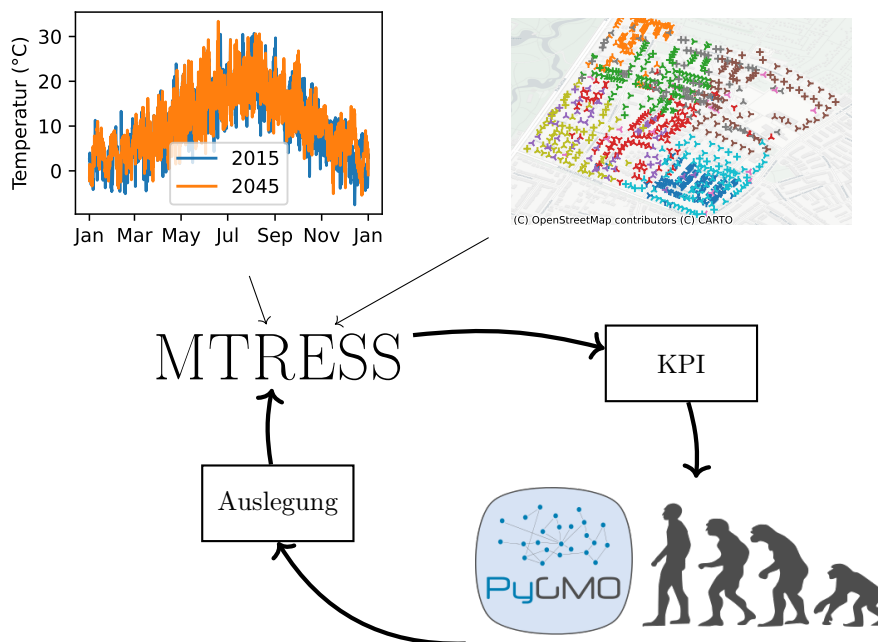


Abbildung 3: Ablauf der Pareto-Optimierung (siehe Text für Erklärung)

Erwägungen, wie Zielvorgaben quantifiziert oder zumindest objektiv bewertet werden können. Da er für die multikriterielle Optimierung herangezogen wurde, muss in jedem Fall datenbasiert zu ermitteln sein, ob ein System besser oder schlechter als ein anderes System ist. Unterschiedliche Ziele können aus der Sicht verschiedener Stakeholder verschiedene Relevanz besitzen. Der Katalog macht überdies klar, dass ein Teil der Ziele bereits heute, ein anderer Teil erst in der Zukunft definiert ist. In diesem Kontext haben wir die Methode basierend auf einer Studie zu regionaler Übertragbarkeit [5] hin zu Übertragbarkeit auch zwischen verschiedenen Zukunftsszenarien weiterentwickelt [6]. Das Anwendungsbeispiel waren mögliche Entwicklungen der Energiepreise. Ergänzend hierzu wurde mittels Markov-Kette modelliert, welchen Verlauf ungesteuerte Sanierung [7] (insbesondere auch ohne Subventionen) nehmen könnte.

2.2.2 Technisches Energiesystemmodell

Eine erste Version des Software-Modells zur Abbildung von Wärmeversorgungssystemen wurde bereits früh veröffentlicht [8] und inkrementell verbessert. Neben der Berücksichtigung von diskreten Temperaturniveaus, wie wir sie zuletzt umgesetzt haben, ist auch die direkte Nutzung als Optimierungsvariable möglich. Auch diesen Ansatz haben wir evaluiert [9], aus Performance-Gründen aber nicht weiter verfolgt.

Ein besonderer Fokus in der technischen Modellierung lag auf der Abbildung des Wärmesektors. Dieser bildet die Effizienz von erneuerbaren Quellen samt ihrer Temperaturabhängigkeit mit einem im Projekt entwickelten Formalismus deutlich besser ab als bisherige lineare Optimierungsansätze (vgl. [10,

11]). Diese Betrachtung ist insbesondere dann wichtig, wenn verschiedene erneuerbare Wärmequellen kombiniert werden können oder müssen. Neben üblichen Quellen wie Erde, Luft und solarer Strahlung, wurden im Projekt das Potential von Abwasserwärme [40] und sogar die Möglichkeit dynamischer Raumbelagung zur Reduzierung von Wärmebedarf durch effizientere Nutzung von Körperwärme [12] untersucht.

Ebenfalls in den Bereich der technischen Modellierung fällt eine Studie zur Transformation von Wärmenetzen hin zu niedrigeren Temperaturen [13]. Hierbei wurde untersucht, welche Potentiale sich bezogen auf ein bestehendes Wärmenetz ergeben, wenn der Gebäudebestand besser gedämmt wird. Durch die reduzierte Heizlast kann die bestehende Infrastruktur zur Wärmeverteilung mit niedrigeren Temperaturen betrieben werden, wodurch eine effizientere Versorgung mit erneuerbaren Energien ermöglicht wird. Eine Besonderheit der Untersuchung war, dass sie sich auf eine Kalibrierung mit Messdaten statt auf eine detaillierte Modellierung der physikalischen Parameter des Wärmenetzes setzte [41, 42].

Überdies haben wir Möglichkeiten beschrieben, Unsicherheiten direkt im Energiesystemmodell abzubilden [14]. Dieser Aspekt ist insbesondere für die Einsatzplanung unter Berücksichtigung von Flexibilitätsmärkten relevant: Wird ein Wärmeerzeuger auf einem entsprechenden Markt angeboten, muss die Wärmeversorgung auch ohne den genannten Erzeuger gewährleistet sein. Gleichzeitig muss erzeugte Wärme abgenommen werden (können), wenn die Flexibilitätsoption gezogen wird. In Modellen, die unter perfekter Voraussicht optimieren, bildet die Ungewissheit über den (exogen gesteuerten) Einsatz einen Widerspruch zum eigentlichen Ansatz, der sich aber durch geschickte Wahl von Modellparametern auflösen lässt. In der selben Publikation beschreiben wir die Möglichkeit, auf der Basis von Vorhersagen automatisch konsistente, kontinuierliche Szenarien zu erzeugen.

2.2.3 Eingangsdaten

Wie in Abschnitt 1.2 erwähnt, war die Datenverfügbarkeit – nicht nur innerhalb des Projekts sondern für jedwede Wärmeplanung – anfangs eine entscheidende Herausforderung [15]. Hieraus ergab sich anfangs im Bereich der Datenerhebung ein Fokus, der später auch dank der bereits beschriebenen Gesetzesänderungen glücklicherweise obsolet wurde. Ohne diese regulatorisch bedingten Startschwierigkeiten wäre die Betrachtung möglicher Wärmequellen vermutlich breiter ausgefallen.

Ein untersuchter Ansatz zur Abschätzung von Wärmebedarfen setzt auf Tool FlexiGIS [43]. Diesen haben wir anhand der vorliegenden Verbrauchsdaten von 83.395 Wohngebäuden in Bremen validiert. FlexiGIS berechnet den Wärmebedarf als Produkt aus spezifischem Wärmebedarf (TABULA [44], abhängig von Gebäudetyp) und beheizter Geschossfläche.

Aufgrund eines Matching-Fehlers zwischen den Gebäude-IDs der Datenquellen ETHOS.BUILD A [45] (Machine Learning (ML) klassifizierte Typologie, OSM-Geometrie für Bremen) und LOD2 [30] (offizielle 3D-Geometrie, keine Typologie) erzeugt FlexiGIS aktuell zwei parallele Vorhersagedatensätze: ETHOS und LOD2. Für LOD2-Gebäude wird die Gebäudeklasse heuristisch über die Größe der Grundfläche bestimmt und pauschal der Neubaustatus angenommen. Die beheizte Fläche wird berechnet als Gebäudegrundfläche \times (Höhe/3 m) \times

0,8. Dabei wird eine Integer-Division der Geschosszahl genutzt. Zusätzlich zu beiden Varianten wurde eine integrierte Variante (LOD2-Geometrie + ETHOS-Typologie) als Vorgriff auf eine geplante Anpassung des Tools aufgrund des beschriebenen Matching-Problems untersucht.

Die LOD2-Variante zeigt eine moderate systematische Unterschätzung mit der engsten Verteilung (siehe Abbildung 4). ETHOS zeigt nahezu keinen NMBE-Bias¹, aber breite Streuung mit langen Ausläufern und extremer Überschätzung einzelner Gebäude (7,8% der Gebäude mit Abweichungen über 100%). Zudem werden 65% der Gebäude unterschätzt (Fehler < 0). Die integrierte Variante zeigt dagegen eine deutliche Überschätzung (+36% NMBE) und zeigt die breiteste Verteilung aller drei Varianten (alle Metriken in Tabelle 1).

Tabelle 1: Validierungsmetriken der drei Varianten (n=83.395). NMBE: Normalized Mean Bias Error. CV-RMSE: Coefficient of Variation of the Root Mean Square Error. Q1, Median und Q3 in % beziehen sich auf die Fehlerverteilung (Konvention: positiv = FlexiGIS überschätzt Wärmebedarf). Interquartilsabstand (IQR) als Differenz Q3-Q1 in Prozentpunkten.

| Variante | ETHOS | LOD2 | Integriert |
|----------------|--------|--------|------------|
| NMBE | -4,0% | -13,1% | +36,0% |
| CV-RMSE | 107,5% | 44,6% | 134,7% |
| Q1 | -49,6% | -37,5% | -15,9% |
| Median | -22,8% | -19,3% | +12,5% |
| Q3 | +20,9% | -4,6% | +69,0% |
| IQR (pp) | 70,4 | 32,9 | 84,9 |
| innerhalb ±30% | 34,0% | 55,8% | 48,2% |

Die FlexiGIS-Prognose ist das Produkt aus zugewiesener Typologie (über spezifischen Wärmebedarf aus TABULA) und beheizter Fläche. Beide Faktoren sind in jeder Variante potenzielle Fehlerquellen: Die ETHOS-Klassifizierung hat berichtete Genauigkeiten von 97% (Größenklasse) bzw. 74% (Baujahr), wobei die TABULA-Werte zwischen den Gebäudekategorien um den Faktor 5–8 variieren können. Die Flächenberechnung aus den LOD2 Daten nutzt eine vereinfachende Heuristik mit abrundender Integer-Division der Geschosszahl, was ebenfalls systematische Fehler erzeugen kann.

Die Verteilungsbreiten geben Hinweise auf die Fehlerstruktur: Die einheitliche Behandlung in der LOD2-Variante (Neubau-Annahme) erzeugt eine geringe Fehlerstreuung (IQR 33%). Die Einführung differenzierter ETHOS-Typologien in der integrierten Variante verbreitert die Verteilung deutlich (IQR 85%) und führt insgesamt zu einer systematischen Überschätzung. Eine plausible Erklärung dafür ist die Kombination aus Klassifikationsfehlern in ETHOS sowie Ungenauigkeiten bei der Flächenberechnung. Beides trägt vermutlich gemeinsam zur schlechten Vorhersagegüte bei. Eine eindeutige Identifikation einzelner Fehlerquellen bedarf weiterer Untersuchungen.

¹Der NMBE wird hier als (Prognose - Messung) / Durchschnitt(Messung) berechnet. Positive Werte bedeuten systematische Überschätzung durch FlexiGIS, negative Werte Unterschätzung.

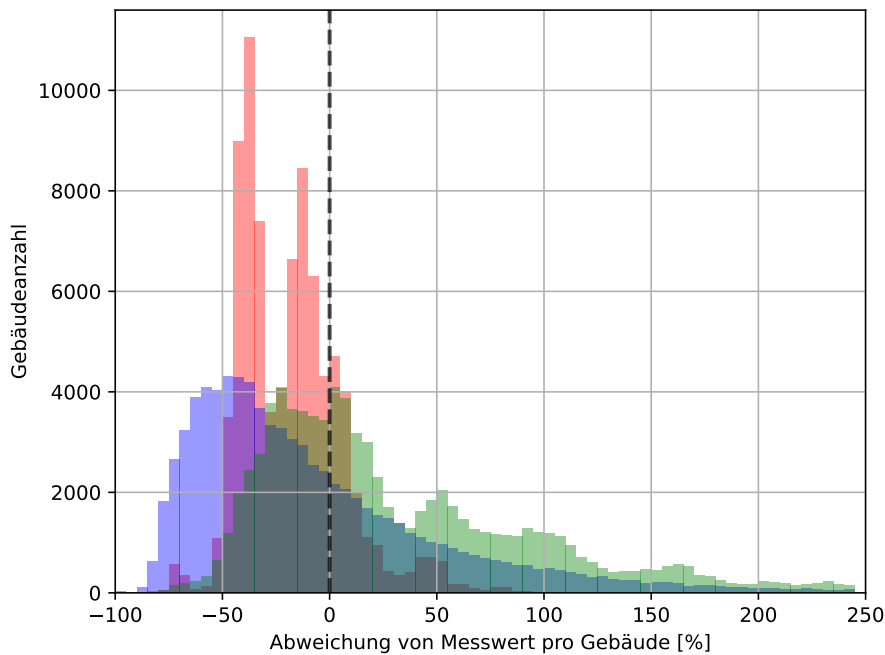


Abbildung 4: Fehlerverteilungen. Positive Werte = Überschätzung. LOD2 (rot) zeigt eine enge Verteilung. ETHOS (blau) zeigt eine breite, rechtsschiefe Verteilung. Die integrierte Variante (grün) zeigt die breiteste Verteilung, die im Vergleich zur ähnlich verlaufenden ETHOS Verteilung nach rechts verschoben ist.

Die möglichen nächsten Schritte sind:

1. Stichprobenartige Verifikation sowohl der Flächenberechnung aus LOD2 Daten als auch der ETHOS-Typologizuweisung gegen Referenzdaten
2. Behebung des ID-Matching-Problems in FlexiGIS durch räumliches Matching
3. Anpassung der Flächenheuristik
4. Erneute Validierung des neuen integrierten Datensatzes.

Einschränkend ist zu beachten, dass das Betrachtungsjahr der gemessenen Verbrauchsdaten nicht bekannt ist, sodass Wetterjahr-Effekte (milde vs. kalte Heizperiode) nicht klar von Tool-Problemen hinsichtlich der Prognoseabweichungen getrennt werden können. Außerdem liegen für die Messdaten weder Informationen zum tatsächlichen Sanierungsstatus noch zu Heizungssystem oder Nutzerverhalten vor, was zusätzliche Unsicherheit auf der Messeite bedeutet, die sich toolseitig nicht beheben lässt.

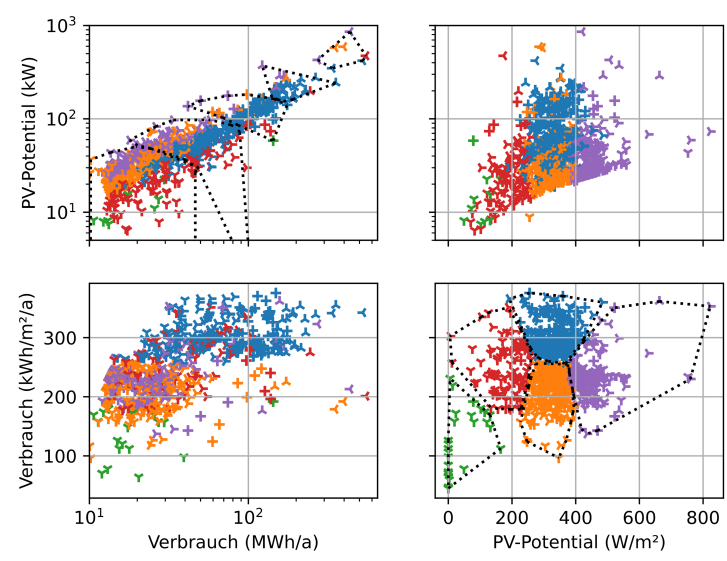


Abbildung 5: Beispielhafte Ermittlung ‘repräsentativer Gebäude’ aus Energiedaten. Die umschlossenen Flächen oben links sind Gruppen, die auf der Basis absoluter Energiewerte gebildet wurden. Die umschlossenen Flächen unten rechts sowie die Farben stehen für Gruppen, die auf der Basis von durch die Gebäudegrundfläche geteilten Energiewerte gebildet wurden. [16]

2.2.4 Datenaggregation

Da mit zunehmender Datenverfügbarkeit auch mehr Informationen über Einzelgebäude bereit standen, haben wir uns zuletzt der Frage gewidmet, wie Datenaggregation gelingen kann, ohne Informationen zu Dynamik und Volatilität von Einzelgebäuden zu verlieren [17, 16]. Das gewählte Verfahren setzt auf die datenbasierte Ermittlung repräsentativer Gebäude, die in einem zweiten Schritt zu geografischen Gruppen zusammengefasst werden. Hierbei kann jedes Gebäudetyp prinzipiell in jeder Gruppe vorkommen, wobei die Ziehung der Gebietsgrenzen sowohl direkt die grundlegenden Energiewerte als auch die Zuordnung zu den repräsentativen Gebäuden berücksichtigen kann. In der Karte in Abbildung 3 repräsentieren die Farben die gewählten geografischen Gruppen, während die für die Gebäude verwendeten Icons den entsprechenden Gebäudetypen kennzeichnen. Eine gut zu übertragende Erkenntnis ist hier, repräsentative Gebäude bevorzugt auf die Gebäudegrundfläche normierte Energiegrößen zu wählen (siehe Abb. 5). Auf diese Weise können mehr ähnlich große Gruppen gebildet werden. So wird die Gesamtheit besser abgebildet.

2.2.5 Exemplarische Ergebnisse der Methode

Die Ergebnisse des Verfahrens (siehe Abb. 6) bestehen aus der Pareto-Front optimaler Lösungen im durch die Indikatoren bestimmten Zielkonflikt sowie für eine Versorgungslösung zu jedem der Punkte auf der Pareto-Front. In dem Rahmen haben wir auch den Einfluss der Aggregation auf das Ergebnis der Systemoptimierung untersucht [18]. Die Ergebnisse lassen den Schluss zu, dass

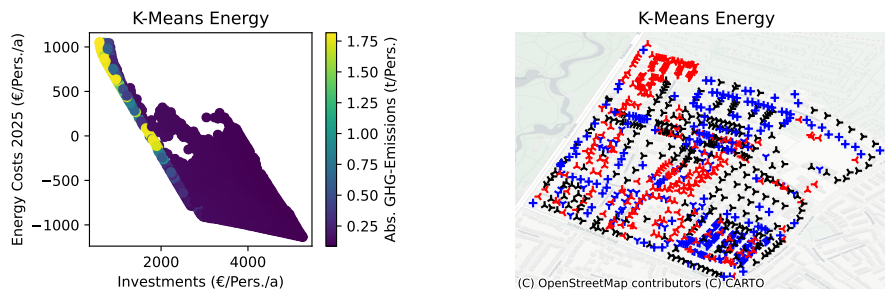


Abbildung 6: Links: Darstellung des Zielkonflikts zwischen drei möglichen Indikatoren. Jeder Punkt entspricht dabei einer möglichen Systemauslegung. Rechts: Beispielhafte Systemauslegung, die Farbe markiert die Präferenz für eine Wärmeversorgungslösung in einem Fall, in dem jede der drei Lösungen gleich oft vertreten ist (rot: Wärmenetz, blau: Wärmepumpe, schwarz: Gaskessel). [18]

mit Hinblick auf mindestens ein Ziel klar zu bevorzugende Versorgungslösungen relativ zuverlässig identifiziert werden. Es ist jedoch möglich, dass eigentlich technisch mögliche Lösungen durch die Reduktion der Variablen im Modell nicht mehr abgebildet werden können.

Auf Basis dieser automatisierten Erkundung des Raumes möglicher und im Zielkonflikt sinnvoller Lösungen kann nun durch die involvierten Stakeholder eine informierte Abwägung der Ziele vorgenommen werden.

Mit Blick auf die Relevanz des Themas für die Öffentlichkeit und den möglichst breiten Transfer von Projekterkenntnissen wurden neben wissenschaftlichen Konferenzen (siehe Abschnitt 3) und Workshops auch weitere Veranstaltungen zur Kommunikation genutzt. Hierzu zählen beispielsweise eine Präsentation bei der Dialogplattform Power-to-Heat, die Teilnahme an einer Podiumsdiskussion bei der Tagung ‘Forschung-Entwicklung-Innovation’ der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, eine Teilnahme am Workshop ‘Helmholtz codes!’ zur Perspektive langfristiger Pflege von Softwareartefakten aus Forschungsprojekten sowie die regelmäßige Teilnahme an ‘oemof user meetings’ mit Fokus auf Transfer der entwickelten Software.

2.3 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Im Gesamtzeitraum wurden Ausgaben in Höhe von 98 % der beantragten und bewilligten Mittel getätigt. Die Ausgaben umfassten mit 99,3 % überwiegend Personalkosten (Pos. 837), darüber hinaus fielen Reisekosten (Pos. 838) an. Planmäßig konnten durch den Fokus auf Open-Source-Software konnten Kosten für Lizenzgebühren vermieden werden.

2.4 Notwendigkeit und Angemessenheit der Arbeiten

Die durchgeführten Arbeiten waren notwendig, ausreichend und angemessen für die Erfüllung der Aufgaben. Ohne die bereitgestellte Förderung hätten die durch das DLR durchgeführten Arbeiten nicht durchgeführt werden können. Die erzielten Ergebnisse des Vorhabens, die bei der Projektbearbeitung gewonne-

nen Methoden- und Fachkenntnisse, sowie des entwickelten und veröffentlichten Werkzeuge bieten dem DLR einen unmittelbaren Mehrwert.

2.5 Voraussichtliche Nutzen, Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Seitens des DLR war als Forschungsinstitut in der Form eines gemeinnützigen Vereins **keine wirtschaftliche Verwertung geplant**. Das DLR formulierte folglich auch keine wirtschaftliche Verwertungsaussicht. Gegen Ende des Projekts fiel jedoch Interesse seitens der Industrie auf, MTRESS insbesondere für ‘Model Predictive Control’ anzuwenden. Um eine entsprechende Nutzung zu erleichtern und perspektivisch feste Ansprechpartner für einen dann gefragten Service anbieten zu können, wurde im März 2026 innerhalb des DLR unter dem Titel ‘MaaCS’ begonnen, MTRESS als Cloud-Service zu implementieren.

Aus dem Projekt erfolgte wissenschaftliche Publikationen sind in Abschnitt 3 gelistet. Die Liste umfasst auch drei Abschlussarbeiten. Anknüpfend an Untersuchungen zum Umgang mit Unsicherheit in langfristigen Transformationsprozessen ist überdies die Idee für ein Promotionsthema entstanden.

Für die Studiengänge Physik und ‘Sustainable Renewable Energies’ wurden Tutorials entwickelt, um den Einstieg in die Energiesystemmodellierung und -optimierung zu vereinfachen. Diese wurden zum Teil der Dokumentation der beschriebenen Software hinzugefügt, um einen möglichst breiten Personenkreis zu erreichen. Die Software wurde als unter Open-Source-Lizenz veröffentlicht. Insbesondere Beiträge zum Framework “oemof” [19] werden sehr aktiv genutzt. Hierzu zählt das vom ‘Model Template for Renewable Energy Supply Systems’ (MTRESS) [3] inspirierte Verfahren zur Abbildung geschachtelter Strukturen [20] sowie Verbesserungen bei der Ergebnisauswertung (in [21]).

Auch die ebenfalls veröffentlichte Software MTRESS wurde bereits in mehreren Publikationen außerhalb des Projekts genutzt. Alle haben gemein, dass jeweils Strom- und Wärmesektor in der Form betrachtet wurden, wie sie in Wärmewende Nordwest implementiert wurde. Durch den modularen Aufbau konnten jedoch spezifische weitere Sektoren ergänzt werden. So wurde die gekoppelte Versorgung mit Wärme und Strom unter Berücksichtigung des Mobilitätssektors [46, 47] betrachtet, Eine weitere Untersuchung beschäftigte sich mit der Frage, wie Flughäfen unter Berücksichtigung unklarer zukünftiger Preise insbesondere um Wasserstoff-Infrastruktur erweitert werden können, um zukünftige Flugzeugtypen kostengünstig abfertigen zu können [48]. MTRESS diente zudem als Grundlage für eine Studie zur Modellierung von Eisspeichern [49] und wurde zur Anlagensteuerung mittels ‘Model Predictive Control’ [50] verwendet. Darüber hinaus wurde MTRESS um den Gassektor erweitert, dessen Abbildung analog zum Formalismus für Wärme implementiert ist [51].

Noch ohne Publikation sind Anschlussarbeiten aus den Projekten ‘Coole Wärme’, in dem Solarthermie als Wärmequelle für Wärmepumpen genauer betrachtet wird. Dieses Projekt greift den Formalismus zur Wärmemodellierung in MTRESS auf, die eine detaillierte Optimierung auch bei sehr variablen Temperaturhuben zwischen Wärmequelle und -senke ermöglicht.

2.6 Bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

In den vergangenen Jahren war mit Blick auf die Energiesystemoptimierung die Aggregation von Zeitreihen ein sehr aktives Thema. Hierbei ist eine Abwägung zwischen Genauigkeit und Rechenzeit zu treffen. Es wurde eine Methodik entwickelt, eine entsprechende Pareto-Optimale Aggregation von Zeitreihen [52] bewusst auszuwählen. Mit dem beschriebenen Verfahren wurde in der Folge auch im vorliegenden Projekt gearbeitet. In einem Review verschiedener Aggregationsmethoden für Zeitreihen [53] empfahlen Teichgraber und Brandt fünf Best-Practice-Schritte, unter anderem die Einbeziehung extremer Tage zusätzlich zu den auf übliche Weise aggregierten Tagen. Ein Review verschiedener Methoden von Zeitreihenaggregation in Bezug auf saisonale Speicherung [54] hat eine Schwäche der von uns gewählten Abbildung von saisonalen Speichern [55] bestätigt: Bei schneller Ladung oder Entladung des Speichers können in der Realität unmögliche Füllstände in der Simulation erreicht werden. Dieser Fehler kommt jedoch nur selten zum Tragen und beeinflusst das Gesamtergebnis kaum. Nichtsdestotrotz besitzt die von uns veröffentlichte Software auch ebendiese Schwäche.

In einer vorgestellten Methode zur ‘verbesserten räumlichen und zeitlichen Aggregation’ [56] beschreiben Patil, Kotzur und Stolten, weiterhin ein sequenzielles Vorgehen, räumliche Aggregation vor Technologie-Aggregation vor zeitlicher Aggregation. Das später von uns entwickelte und vorgestellte Verfahren [16] hebt traditionelle Trennung zugunsten besserer Ergebnisse auf. Wogrin regt an, dass (Zeitreihen-) Aggregation für den Zweck der Optimierung von sich am Effekt der Aggregation auf das Ergebnis und nicht auf die Ähnlichkeit der Eingangsdaten messen lassen müsste [57]. Während dieser Einwurf inhaltlich gerechtfertigt ist, stößt er in der Praxis auf das Problem, dass ohne Aggregation aufgrund langer Rechenzeiten oftmals keine Ergebnisse gefunden werden können. Ein direkter Vergleich der Ergebnisse mit dem ‘korrekten’ Ergebnis ist also in der Regel nicht möglich. Wir sind diesem Problem begegnet, indem wir Ergebnisse unter Anwendung verschiedene Aggregationsmethoden verglichen haben [18].

Hachez, Latiers, Berger und Bram haben unabhängig von uns die bereits durch uns implementierte und vorgestellte Methode zur Optimierung von Wärmeversorgungssystemen [9] formeller mathematisch hergeleitet und motiviert [58]. Ein allgemeiner Überblick zu linearer Optimierung [59] verweist bereits auf unsere eignen Vorarbeiten zu dem Thema [60]. Verwand mit dem erwähnten Überblick zu Methoden waren Energiesystemmodelle und -frameworks kontinuierlich Objekt vergleichender Reviews (z.B. [61, 62, 63]). Diese Reviews erwecken teilweise den Eindruck, Ansätze von monolithischen Universallösungen seien spezialisierteren Tools mit klarem Fokus überlegen, können aber auch gute Orientierung zu Neuerungen im Gebiet bieten.

In Bezug auf die Wärmenetze etablierte sich in der Wissenschaft zunehmend der Blick auf die ‘Fünfte Generation’. Ein Hintergrund ist, dass durch den Klimawandel zunehmend auf Kühlung in Form von Klimaanlage gesetzt wird [64, 65, 66]. Wärmenetze der fünften Generation zeichnen sich dadurch aus, dass diese auch für Kühlzwecke ausgelegt sind [67]. Ebenfalls wurde – wie auch bei uns – eine kombinierte techno-ökonomische Betrachtung von kalten Wärmenetzen (umfasst die vierte Generation) vorgenommen. Nennenswert ist hier eine Stu-

die zu langfristigen Perspektiven unter der Berücksichtigung von langfristigen, langsamen Veränderungen der Anschlussquoten über viele Jahre [68].

Als international vorbildlich gilt die Ausgestaltung der Fernwärme in Dänemark, die auf großflächige Planung und gemeinnützigen Betrieb setzt. Eine aktuelle Zusammenfassung [69] hat nun gezeigt, dass Anstrengungen zur Reduktion von Treibhausgasemissionen dort zu einer Abhängigkeit von Importen von Biomasse geführt haben. Unterstrichen wurde in den vergangenen Jahren auch die Rolle der Flexibilität des Wärmesektors, erreichbar insbesondere durch große Wärmespeicher [70].

Wie das bereits erwähnte aufkommende Bewusstsein für vermehrten Kühlbedarf andeutet, ist eine engere Verknüpfung von Klima- und Energiesystemmodellierung sinnvoll. In einer Problemanalyse [71] stellten Craig und Kollegen fest, dass gerade langfristige Energie-Szenarien eigentlich klimatische Veränderungen mit einbeziehen müssten. Allerdings enthalten Klimamodelle meist nicht die benötigten physikalischen Größen (z.B. Wind und Strahlung im für Photovoltaik relevanten Spektrum). Nun erschienen ebenfalls im Projektzeitraum erste offen verfügbare Datensätze für die nähere Zukunft [72], und auch Studien mit Blick bis in die zweite Hälfte des Jahrhunderts [73] wurden veröffentlicht. Die von uns entwickelte Methodik ist in der Lage, entsprechende zeitabhängige Klimabedingungen zu berücksichtigen, wobei wir im Projektablauf noch verschiedene Wetterregionen als Proxy verwendeten [5, 6].

3 Erfolgte Veröffentlichungen

- [1] Ekaterina Lesnyak u. a. „Applied Digital Twin Concepts Contributing to Heat Transition in Building, Campus, Neighborhood, and Urban Scale“. In: *Big Data and Cognitive Computing* 7.3 (2023). ISSN: 2504-2289. DOI: 10.3390/bdcc7030145.
- [2] Svenja Baer u. a. *Software-basierte Wärmeplanung - Anregungen zum effizienten Umgang mit niederschwellig verfügbaren Software-Tools für die kommunale Wärmeplanung*. Dez. 2025. DOI: 10.5281/zenodo.17750024.
- [3] Patrik Schönfeldt, Sunke Schlüters, Ajay Upadhya und Keno Oltmanns. *Model Template for Renewable Energy Supply Systems (MTRESS)*. Version v3.0.0a4. Modellierung des Wärmesektors aus dem Projekt. Nov. 2025. DOI: 10.5281/zenodo.17511554.
- [4] Patrik Schönfeldt. *Indikatoren für Klimaneutrale Quartierslösungen*. Dez. 2025. DOI: 10.5281/zenodo.17876749.
- [5] Patrik Schönfeldt, Sunke Schlüters und Esmail Ansari. „Wirtschaftlichkeitsanalyse zur Identifizierung eines pareto-optimalen Wärmeversorgungssystems in verschiedenen Wetterregionen in Deutschland“. In: *1. Konferenz zur Norddeutschen Wärmeforschung*. Juni 2023. URL: <https://elib.dlr.de/195340/>.
- [6] Hans Christian Gils und Patrik Schönfeldt. „Handlungsempfehlungen zur Umsetzung der flexiblen Sektorenkopplung aus Sicht der Energiesystemanalyse“. In: *„Energie: Wende, Krise, Zukunft?“*, 46. Tagung Forschung-Entwicklung-Innovation. Beitrag P. Schönfeldt aus dem Projekt. Nov. 2023. URL: <https://elib.dlr.de/202961/>.

- [7] Carlos Munoz Robinson. „Development Paths for Decentralized Energy Systems in the Context of the Energy Transition - Identification of Interdependencies and Technology Lock-Ins“. Masterarb. University of Oldenburg, Nov. 2022. URL: <https://elib.dlr.de/190821/>.
- [8] Patrik Schönfeldt, Sunke Schlüters und Keno Oltmanns. *MTRESS 3.0 – Modell Template for Residential Energy Supply Systems*. 2022. arXiv: 2211.14080 (math.OC).
- [9] Patrik Schönfeldt, Geert Kristian Petrin und Sunke Schlüters. „Combining Temperature and Mass Flow as Variables in Linear Optimisation Models“. In: *2. Konferenz der Norddeutschen Wärmeforschung*. Hrsg. von Ingo Weidlich, Petrit Vuthi und Constantin Lange. Konferenz der Norddeutschen Wärmeforschung. Juni 2025, S. 80–86. DOI: 10.34712/142.68.
- [10] Francesco Witte und Patrik Schönfeldt. „Modeling Heat Pumps using oemof.solph and TESPpy“. In: *2023 2nd International Workshop on Open Source Modelling and Simulation of Energy Systems, OSMSES 2023*. März 2023. DOI: 10.1109/OSMSES58477.2023.10089750.
- [11] Francesco Witte und Patrik Schönfeldt. *oemof Workshop on Modelling Heat Pumps*. 2023. URL: <https://oemof.github.io/heat-pump-tutorial/>.
- [12] Patrik Schönfeldt, Diana Teresa Maldonado Castro und Maximilian Hillen. „Waste heat from mobile groups of people in energy system optimisation“. In: *Tagungsband RET.Con 2024*. Beitrag P. Schönfeldt aus dem Projekt. 2024. ISBN: 978-3-940820-23-5. URL: <https://elib.dlr.de/210206/>.
- [13] Nachiket Gaikwad. „Transformation Scenarios for High Temperature District Heating Networks with Different Levels of Retrofitted Building Stock: Potential and System Performance Analysis“. Masterarb. Carl von Ossietzky University of Oldenburg, Apr. 2023. URL: <https://elib.dlr.de/195795/>.
- [14] Patrik Schönfeldt, Carlos Munoz Robinson und Elif Turhan. „Considering Uncertainty in Energy System Optimisation“. In: *8. RET.Con 2025*. Beitrag P. Schönfeldt aus dem Projekt. Feb. 2025. URL: <https://elib.dlr.de/212741/>.
- [15] Patrik Schönfeldt. „Datenqualität und -Verfügbarkeit: Einblick in Erfahrungen aus dem Projekt Wärmewende Nordwest“. In: *Symposium zur kommunalen Wärmeplanung*. Apr. 2024. URL: <https://elib.dlr.de/204083/>.
- [16] Patrik Schönfeldt und Elif Turhan. „Energy-Aware Aggregation of Input Data for the Optimisation of Heat Supply of Municipal Districts“. In: *3. Konferenz der Norddeutschen Wärmeforschung*. 2025. URL: <https://elib.dlr.de/217661/>.
- [17] Parth Umeshbhai Vachhani. „Influence of spatial clustering on the result of heat supply system optimization“. Masterarb. Hochschule Nordhausen, 2025. URL: <https://elib.dlr.de/212738/>.
- [18] Patrik Schönfeldt und Elif Turhan. *Energy-Aware Aggregation of Input Data for the Optimisation of Heat Supply of Municipal Districts*. 2025. arXiv: 2512.07646 (math.OC).

- [19] Uwe Krien u. a. *oemof.solph*. Version v0.6.1. Beitrag P. Schönfeldt aus dem Projekt. Nov. 2025. DOI: 10.5281/zenodo.17633236.
- [20] Patrik Schönfeldt u. a. „Model Template for Renewable Energy Supply Systems (MTRESS)“. In: *oemof user meeting*. Nov. 2024. URL: <https://elib.dlr.de/210680/>.
- [21] Uwe Krien u. a. *oemof.solph*. Version v0.6.0. Beitrag P. Schönfeldt aus dem Projekt. Juni 2025. DOI: 10.5281/zenodo.15607673.

4 Externe Literatur

- [22] Max Ostermayer u. a. *Die Energiewende in Deutschland - Stand der Dinge 2025*. Techn. Ber. Agora Energiewende, 2026. URL: <https://www.agora-energiewende.de/publikationen/die-energiewende-in-deutschland-stand-der-dinge-2025>.
- [23] *Fortschrittsmonitor 2025 Energiewende*. bdew. 2025. URL: <https://www.bdew.de/energie/fortschrittsmonitor-energiewende-2025/>.
- [24] Luca Castellazzi, Paolo Bertoldi und Marina Economidou. „Overcoming the split incentive barrier in the building sector“. In: *Publications Office of the European Union, Luxembourg* 10 (2017), S. 912494.
- [25] Tino Mitzinger, Simon Hilpert und Uwe Krien. „Exploring Near-Optimal Solutions of Energy-System Models to Increase Energy-System Resilience“. In: *Applied Sciences* 15.23 (2025). ISSN: 2076-3417. DOI: 10.3390/app152312417.
- [26] BJ Pijnenburg. „Assessment of heating energy use on postal code level 6: Influence of the local climate“. Magisterarb. Utrecht University, 2021.
- [27] Alexander Jüstel u. a. „Unveiling the Spatial Distribution of Heat Demand in North-West-Europe Compiled with National Heat Consumption Data“. In: *Energies* 17.2 (2024). ISSN: 1996-1073. DOI: 10.3390/en17020481.
- [28] Philip Groesdonk. „Interpretation of Remote Sensing Data for Energy Performance Assessments of Existing Buildings“. Diss. RWTH Aachen, 2024. DOI: 10.18154/RWTH-2024-11518.
- [29] Hannes Seidl u. a. *Daten für die kommunale Wärmeplanung*. Deutscher Städtetag, 2024. ISBN: 978-3-88082-393-8. URL: <https://www.staedtetag.de/publikationen/weitere-publikationen/2024/leitfaden-daten-fuer-die-kommunale-waermeplanung>.
- [30] *3D-Gebäudemodelle des Landes Bremen*. 2024. URL: <https://www.geo.bremen.de/produkte/3d-produkte/3d-gebaeudemodelle-11892>.
- [31] *Gas- und Strompreise aktuell*. bdew. 2026. URL: <https://www.bdew.de/service/daten-und-grafiken/gaspreis-strompreis-aktuell/>.
- [32] Pablo Jost, Matthias Mack und Johannes Hillje. *Aufgeheizte Debatte? Eine Analyse der Berichterstattung über das Heizungsgesetz–und was wir politisch daraus lernen können*. Das progressive Zentrum. Berlin. 2024.
- [33] Rebecca Clemens. „Von Wärmewende bis Heizungshammer: Politisches und mediales Framing in Zeiten der Klimakrise“. Diss. Rheinland-Pfälzische Technische Universität Kaiserslautern-Landau, 2024.

- [34] Jan Rosenow. „Heizungsgesetz: Stabilität statt Dauerdebatte“. In: *Wirtschaftsdienst* 105.12 (2025), S. 860–860. DOI: 10.2478/wd-2026-0220.
- [35] Markus Dertwinkel-Kalt und Max R. P. Grossmann. „Analysen Klimapolitik; Ideologie schlägt Information: Über die Grenzen von Kommunikation in der Klimapolitik“. In: *Wirtschaftsdienst* 105.7 (2025), S. 495–498. DOI: 10.2478/wd-2025-0129.
- [36] Aana Bosse u. a. *Begleitdokument KWW-Technikkatalog Wärmeplanung*. Techn. Ber. Deutsche Energie-Agentur, 2025.
- [37] Lucas Schmeling u. a. „A generalised optimal design methodology for distributed energy systems“. In: *Renewable Energy* 200 (2022), S. 1223–1239. ISSN: 0960-1481. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.10.029>.
- [38] Uwe Krien u. a. „oemof.solph—A model generator for linear and mixed-integer linear optimisation of energy systems“. In: *Software Impacts* 6 (2020), S. 100028. ISSN: 2665-9638. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.simpa.2020.100028>.
- [39] Francesco Biscani und Dario Izzo. „A parallel global multiobjective framework for optimization: pagmo“. In: *Journal of Open Source Software* 5.53 (2020), S. 2338. DOI: 10.21105/joss.02338.
- [40] Novi Pujianto u. a. *Potentialermittlung erneuerbarer Energien in der Vorderen Neustadt (Bremen) und Ansätze zur Integration in ein zukünftiges Wärmenetz*. Techn. Ber. Hochschule Bremen, Aug. 2023. DOI: 10.26092/elib/2406.
- [41] Diana Maldonado, Patrik Schönfeldt und Michael Fütting. *Temperature, water velocity and heat consumption of a heat network in southern Germany*. Zenodo, Okt. 2023. DOI: 10.5281/zenodo.10036105.
- [42] Diana Maldonado u. a. „Validation of a calibrated steady-state heat network model using measured data“. In: *Applied Thermal Engineering* 248 (2024), S. 123267. ISSN: 1359-4311. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2024.123267.
- [43] Alaa Alhamwi, Wided Medjroubi, Thomas Vogt und Carsten Agert. „FlexiGIS: an open source GIS-based platform for the optimisation of flexibility options in urban energy systems“. In: *Energy Procedia* 152 (2018). Cleaner Energy for Cleaner Cities, S. 941–946. ISSN: 1876-6102. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.09.097>.
- [44] Tobias Loga, Britta Stein und Nikolaus Diefenbach. „TABULA building typologies in 20 European countries—Making energy-related features of residential building stocks comparable“. en. In: *Energy and Buildings* 132 (Nov. 2016), S. 4–12. ISSN: 03787788. DOI: 10.1016/j.enbuild.2016.06.094.
- [45] Kristina Dabrock u. a. *ETHOS.BUILD: Residential Building TABULA Archetype Dataset Germany*. en. Juni 2024. DOI: 10.5281/ZENODO.12069755.
- [46] Nies Reininghaus u. a. „SekQuaSens3: sector integration heat, electricity and mobility demand in a district“. In: *IET Conference Proceedings 2024* (15 2025), S. 130–136. DOI: 10.1049/icp.2024.3744.

- [47] Nachiket Gaikwad u. a. „Simulative evaluation of high temperature versus low temperature heating networks to utilise waste heat from large fuel cells for powering districts“. In: *IET Conference Proceedings 2024* (15 2025), S. 123–129. DOI: 10.1049/icp.2024.3743.
- [48] Diana Maldonado Castro u. a. *Assessing the impact of emerging aircraft concepts on airport energy infrastructure*. Dez. 2025. DOI: 10.36227/techrxiv.176618650.07790253.
- [49] Maximilian Hillen, Patrik Schönfeldt, Philip Groesdonk und Bernhard Hoffschmidt. „Operational Optimization of Seasonal Ice-Storage Systems with Time-Series Aggregation“. In: *Energies* 18.22 (2025). ISSN: 1996-1073. DOI: 10.3390/en18225988.
- [50] Alexander Hill u. a. „district energy management simulation framework with rolling horizon approach“. In: *12th DACH+ Conference on Energy Informatics 2023*. Energy Informatics. SpringerOpen, Okt. 2023. DOI: 10.1186/s42162-023-00272-5.
- [51] Ajay Upadhaya und Rabea Weil. „Optimization of integrated hydrogen-based energy systems“. In: *Von Modellen in die Anwendung Ergebnisse aus den Wasserstoffleitprojekten - Part 1*. Sep. 2025. URL: <https://elib.dlr.de/217744/>.
- [52] Maximilian Hoffmann, Leander Kotzur und Detlef Stolten. „The Pareto-optimal temporal aggregation of energy system models“. In: *Applied Energy* 315 (2022), S. 119029. ISSN: 0306-2619. DOI: 10.1016/j.apenergy.2022.119029.
- [53] Holger Teichgraeber und Adam R. Brandt. „Time-series aggregation for the optimization of energy systems: Goals, challenges, approaches, and opportunities“. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 157 (2022), S. 111984. ISSN: 1364-0321. DOI: 10.1016/j.rser.2021.111984.
- [54] Tobias Blanke u. a. „Time series aggregation for energy system design: review and extension of modelling seasonal storages“. In: *Energy Informatics* 5.1 (Sep. 2022), S. 17. ISSN: 2520-8942. DOI: 10.1186/s42162-022-00208-5.
- [55] Leander Kotzur, Peter Markewitz, Martin Robinius und Detlef Stolten. „Time series aggregation for energy system design: Modeling seasonal storage“. In: *Applied Energy* 213 (2018), S. 123–135. ISSN: 0306-2619. DOI: 10.1016/j.apenergy.2018.01.023.
- [56] Shruthi Patil, Leander Kotzur und Detlef Stolten. „Advanced Spatial and Technological Aggregation Scheme for Energy System Models“. In: *Energies* 15.24 (2022). ISSN: 1996-1073. DOI: 10.3390/en15249517.
- [57] Sonja Wogrin. „Time Series Aggregation for Optimization: One-Size-Fits-All?“ In: *IEEE Transactions on Smart Grid* 14.3 (2023), S. 2489–2492. DOI: 10.1109/TSG.2023.3242467.
- [58] Jonathan Hachez, Arnaud Latiers, Benjamin Berger und Svend Bram. „Multi-energy systems fast optimization: A new formulation in linear programming for temperatures and magnitudes of thermal power flows in heating systems“. In: *Energy and Buildings* 336 (2025), S. 115618. ISSN: 0378-7788. DOI: 10.1016/j.enbuild.2025.115618.

- [59] Maximilian Hoffmann u. a. „A review of mixed-integer linear formulations for framework-based energy system models“. In: *Advances in Applied Energy* 16 (2024), S. 100190. ISSN: 2666-7924. DOI: 10.1016/j.adapen.2024.100190.
- [60] Patrik Schönfeldt u. a. „Simultaneous optimization of temperature and energy in linear energy system models“. In: *2022 Open Source Modelling and Simulation of Energy Systems (OSMSES)*. 2022, S. 1–6. DOI: 10.1109/OSMSES54027.2022.9768967.
- [61] Soner Candas u. a. „Code exposed: Review of five open-source frameworks for modeling renewable energy systems“. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 161 (2022), S. 112272. ISSN: 1364-0321. DOI: 10.1016/j.rser.2022.112272.
- [62] Beneharo Reveron Baecker u. a. „Comprehensive and open model structure for the design of future energy systems with sector coupling“. In: *Renewable and Sustainable Energy Transition* 6 (2025), S. 100094. ISSN: 2667-095X. DOI: 10.1016/j.rset.2024.100094.
- [63] Babajide E. Shari u. a. „Open-source tools for modelling energy transitions paradigm in developing countries: a compatibility assessment study“. In: *Discover Sustainability* 6.1 (Nov. 2025), S. 1335. ISSN: 2662-9984. DOI: 10.1007/s43621-025-02236-z.
- [64] Francesco Pietro Colelli, Ian Sue Wing und Enrica De Cian. „Air-conditioning adoption and electricity demand highlight climate change mitigation–adaptation tradeoffs“. In: *Scientific Reports* 13.1 (März 2023), S. 4413. ISSN: 2045-2322. DOI: 10.1038/s41598-023-31469-z.
- [65] Delia D’Agostino u. a. „Impact of climate change on the energy performance of building envelopes and implications on energy regulations across Europe“. In: *Energy* 288 (2024), S. 129886. ISSN: 0360-5442. DOI: 10.1016/j.energy.2023.129886.
- [66] Daryna Grechyna. „Climate change and air conditioner: Heat wave effects across countries“. en. In: *SSRN Electron. J.* (2025).
- [67] Kristian Gjoka, Behzad Rismanchi und Robert H. Crawford. „Fifth-generation district heating and cooling systems: A review of recent advancements and implementation barriers“. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 171 (2023), S. 112997. ISSN: 1364-0321. DOI: 10.1016/j.rser.2022.112997.
- [68] Sini Huhtinen u. a. „Combining economic and energy system modelling for assessing long-term energy transition strategies“. In: *Cleaner Engineering and Technology* 26 (2025), S. 100941. ISSN: 2666-7908. DOI: 10.1016/j.clet.2025.100941.
- [69] Katinka Johansen und Sven Werner. „Something is sustainable in the state of Denmark: A review of the Danish district heating sector“. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 158 (2022), S. 112117. ISSN: 1364-0321. DOI: 10.1016/j.rser.2022.112117.
- [70] Ioannis Sifnaios u. a. „The impact of large-scale thermal energy storage in the energy system“. In: *Applied Energy* 349 (2023), S. 121663. ISSN: 0306-2619. DOI: 10.1016/j.apenergy.2023.121663.

- [71] Michael T. Craig u. a. „Overcoming the disconnect between energy system and climate modeling“. In: *Joule* 6.7 (Juli 2022), S. 1405–1417. ISSN: 2542-4785. DOI: 10.1016/j.joule.2022.05.010.
- [72] H. C. Bloomfield, D. J. Brayshaw, M. Deakin und D. Greenwood. „Hourly historical and near-future weather and climate variables for energy system modelling“. In: *Earth System Science Data* 14.6 (2022), S. 2749–2766. DOI: 10.5194/essd-14-2749-2022.
- [73] Laibao Liu u. a. „Climate change impacts on planned supply–demand match in global wind and solar energy systems“. In: *Nature Energy* 8.8 (Aug. 2023), S. 870–880. ISSN: 2058-7546. DOI: 10.1038/s41560-023-01304-w.