

WAAGE Schlussbericht nach NKBF 98

Zuwendungsempfänger:	Förderkennzeichen:
Forschungszentrum Jülich GmbH Institut für Energie- und Klimaforschung - Techno-ökonomische Systemanalyse (ICE-2) 52425 Jülich Ansprechpartner: Dr. Noah Pflugradt / Katharina Rieck Telefon: 0151 2 133 06 83 E-Mail: n.pflugradt@fz-juelich.de / k.rieck@fz-juelich.de	03EI1044
Vorhaben: WAAGE - Zukünftige Rolle von Wasserstoff als Energieträger in Gebäudeenergiesystemen unter Berücksichtigung von Transformationspfaden für Gas-Verteilnetze	
Laufzeit des Vorhabens:	01.01.2022 - 30.06.2025
Datum des Berichts:	24.10.2025
Autoren:	Dr. Noah Pflugradt Katharina Rieck
Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.	

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	2
1. Kurzfassung.....	4
1.1 Aufgabenstellung.....	4
1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde.....	5
1.2.1 Organisatorische und personelle Voraussetzungen.....	5
1.2.2 Zeitliche Rahmenbedingungen.....	5
1.2.3 Technische und methodische Startbedingungen am FZJ.....	5
1.2.3.1 Stand des Gebäudesimulationsmodells ETHOS.HiSim.....	5
1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens.....	6
1.3.1 AP1: Bestandsaufnahme Gebäudebestand und Gebäudetypisierung.....	6
1.3.1.1 Planung des AP1.....	6
1.3.1.2 Ablauf des AP1.....	6
Abbildung 1: Übersicht der Merkmalszuweisung in der Gebäudedatenbank ETHOS.BUILD.A... 7	7
1.3.2 AP2: Analyse von Transformationspfaden auf Einzelgebäudeebene.....	8
1.3.2.1 Planung des AP2.....	8
1.3.2.2 Ablauf des AP2.....	8
1.3.3 AP3: Bewertung von Pfaden zur Umstellung von Erdgas-Verteilnetzen auf den Betrieb mit Wasserstoff.....	10
1.3.3.1 Planung des AP3.....	10
1.3.3.2 Ablauf des AP3.....	10
1.3.4 AP4: Verteilung der Gebäudekonfigurationen und Hochrechnung auf den nationalen Gebäudebestand.....	10
1.3.4.1 Planung des AP4.....	10
1.3.4.2 Ablauf des AP4.....	11
1.3.5 AP5: Auswirkungen auf Versorgungsinfrastrukturen.....	11
1.3.5.1 Planung des AP5.....	11
1.3.5.2 Ablauf des AP5.....	11
1.3.6 AP6: Vergleichende Bewertung von Gebäudeversorgungspfaden aus nationaler Gesamtenergiesystemperspektive.....	11
1.3.6.1 Planung des AP6.....	11
1.3.6.2 Ablauf des AP6.....	12
1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde.....	12
1.4.1 Stand der Wissenschaft und Technik bezüglich der Nutzung von Wasserstoff zur Wärmeversorgung im Wohngebäudesektor.....	12
1.4.1.1 Wasserstoff-Roadmap, Szenarien und Detailstudien.....	12

1.4.1.2 Stand der Technik.....	14
1.4.1.3 Demonstrationsprojekte und Reallabore	16
1.4.1.4 Wasserstoff im Verteilnetz	17
1.4.2 Stand der Wissenschaft und Technik zu Gebäudedaten	18
1.4.3 Stand der Wissenschaft und Technik zu Gebäudesimulationstools	19
1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen	22
2. Eingehende Darstellung	22
2.1 Erzielte Ergebnisse	22
2.1.1 Ergebnisse des AP1	22
2.1.1.1 Gebäudedatenbank ETHOS.BUILD A	22
2.1.1.2 Gebäudeclustering zur Erstellung eines Typgebäudedatensatzes	28
2.1.2 Ergebnisse des AP2.....	34
2.1.2.1 Validierung ETHOS.HiSim	34
2.1.2.2 Untersuchung verschiedener Wärmeversorgungs-technologien auf Einzelgebäudeebene	36
2.1.3 Ergebnisse des AP3.....	44
2.1.3.1 Untersuchung der Nutzung von Wasserstoff zur Gebäudewärmeversorgung	45
Zur Untersuchung und Bewertung des Einsatzes von grünem Wasserstoff als Technologiepfad im deutschen Wohngebäudebestand wurde eine intensive Literaturrecherche durchgeführt. .	45
2.1.3.2 Untersuchung zur Umstellung von Erdgas auf grünem Wasserstoff.....	47
2.1.4 Ergebnisse des AP4.....	51
2.1.4.1 Nach 1900 (Normale Gebäude in Sachsen, die unsaniert sind und vorher fossil geheizt wurden):	51
2.1.4.2 Vor 1900 (Denkmalgeschützte Gebäude in Sachsen, die unsaniert sind und vorher fossil geheizt wurden):.....	53
2.1.4.3 Fazit zu Transformationspfaden Wasserstoff versus Wärmepumpen auf Gebäudeebene am Beispiel Sachsen.....	55
2.1.5 Ergebnisse des AP5.....	57
2.1.5.1 Hochrechnung der Energiebedarfe je nach Versorgungstechnologie	57
2.1.5.2 Auswirkungen auf die Versorgungsinfrastrukturen	60
2.1.6 Ergebnisse des AP6.....	60
2.2 Notwendigkeit der Förderung.....	62
2.3 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse	62
2.4 Bekannt gewordenen Fortschritts seitens Dritter während der Durchführung des Vorhabens ..	62
2.5 Veröffentlichungen der Projektergebnisse nach NKBF Nr. 11	63

1. Kurzfassung

1.1 Aufgabenstellung

In der aktuellen öffentlichen und wissenschaftlichen Diskussion bestehen weitgehende Unsicherheiten und konträre Aussagen ob und falls ja, wo und in welchem Umfang Wasserstoff im Rahmen der Energiewende zur Energieversorgung von Gebäuden eingesetzt werden sollte. Viele Szenariostudien favorisieren für den Gebäudesektor einen umfassenden Einsatz von Wärmepumpen in Kombination mit einer umfassenden energetischen Sanierung von Bestandsgebäuden zur Erreichung der Klimaschutzziele. Hierbei wird jedoch der Gebäudebestand in den meisten Modellen nur vereinfacht und mit einer geringen Detailtiefe abgebildet. Der Diversität des Gebäudebestands wird in den meisten Fällen daher nicht Rechnung getragen. Andere Studien und Roadmaps benennen in dem Kontext Limitierungen beim Einsatz von Wärmepumpen sowie in Bezug auf hohe Sanierungsraten und -tiefen. Im Bereich der haustechnischen Installation bietet klimaneutraler Wasserstoff den großen Vorteil der Kompatibilität mit bestehenden Versorgungsinfrastrukturen (Erdgas Transport- und Verteilnetze) sowie etablierten Technologien und Prozessen. Durch den Einsatz von Brennstoffzellen und Wasserstoff-KWK-Anlagen (Gasmotor, Mikrogasturbine) ergeben sich zudem vielfältige Nutzungsoptionen in der Sektorkopplung. Als Hauptargumente gegen einen Einsatz von Wasserstoff im Gebäudeenergiebereich werden die geringe Effizienz der Umwandlungskette (Strom-zu-H₂-zu-Wärme) – insbesondere im Vergleich zu Wärmepumpen – sowie die hohen Kosten und eine begrenzte Verfügbarkeit von Wasserstoff angeführt.

In diesem Kontext gilt es die Rolle von grünem Wasserstoff als weiteren möglichen Pfad zur Dekarbonisierung der Gebäudeenergieversorgung umfassend zu untersuchen und vergleichend zu bewerten.

An dieser Stelle setzte das Projekt WAAGE an, indem ein detailliertes Bottom-Up-Gebäudesimulationsmodell auf Basis eines Typgebäudeansatzes zur Modellierung von Transformationsprozessen im deutschen Gebäudebestand eingesetzt und weiterentwickelt wurde. Mit Hilfe des Modells wurde eine Struktur- und Betriebsoptimierung von Gebäudeenergiesystemen möglich, unter der Berücksichtigung unterschiedlicher Sanierungsmaßnahmen und -tiefen. Hierbei sollten explizit auch unterschiedliche Versorgungspfade (z.B. Wärmepumpen vs. wasserstoffbasierte Gebäudeenergiesysteme) miteinander verglichen werden. Ein zentraler Einflussfaktor auf die Ergebnisse derartiger Analysen ergab sich aus dem Verhältnis von Strom- zu Gaspreisen für den Endkunden. Um Unsicherheiten bei den zukünftigen Energieträgerpreisen zu berücksichtigen war die Durchführung von Sensitivitätsrechnungen zur Ableitung robuster Handlungsempfehlungen geplant. In allen Analysen wurde dabei grundsätzlich vom Ziel eines treibhausgasneutralen Gebäudebestands bis zum Jahr 2050 ausgegangen.

Neben der rein technologischen Umsetzung auf Gebäudeenergiesystemebene waren auch Wechselwirkungen mit der Gasversorgungsinfrastruktur zu betrachten. Hierbei waren insbesondere sich ergebende Kosten für eine Beimischung oder Umstellung von Gasverteilnetzen von einem Erdgas- auf einen teilweisen oder vollständigen Wasserstoffbetrieb zu berücksichtigen. Diese Umstellungskosten haben auch einen direkten Einfluss auf die Netzentgelte und damit auf die zukünftige Entwicklung der Endkundenpreise für leitungsgebundene Energieträger. Weiterhin war auch die zukünftige Auslastung von Gasverteilnetzen in Abhängigkeit von der Wasserstoffnachfrage zu analysieren. Diese Interdependenzen zwischen der Gebäudeenergienachfrage und dem Verteilnetz waren ebenfalls in Form von Sensitivitätsrechnungen bei der Analyse von Transformationspfaden des Gebäudebestands zu berücksichtigen.

Im Projekt WAAGE sollte ein detailliertes Bottom-Up-Simulationsmodell auf Basis eines Typgebäudeansatzes zur Modellierung von Transformationsprozessen im deutschen Gebäudebestand eingesetzt und weiterentwickelt werden soll. Mit Hilfe des Modells wurde eine Struktur- und Betriebsoptimierung von Gebäudeenergiesystemen durchgeführt unter der Berücksichtigung

unterschiedlicher Sanierungsmaßnahmen, unterschiedlicher Versorgungspfade und der Verteilnetze. Um Unsicherheiten bei den zukünftigen Energieträgerpreisen zu berücksichtigen, war die Durchführung von Sensitivitätsrechnungen zur Ableitung robuster Handlungsempfehlungen geplant. Das Ziel war ein treibhausgasneutraler Gebäudebestands bis zum Jahr 2050.

1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Folgende Voraussetzungen bestanden zur Durchführung des Projektes:

1.2.1 Organisatorische und personelle Voraussetzungen

Zuständig für die Projektkoordination war Dr. Noah Pflugradt, Leiter der Arbeitsgruppe "Regionale Energiesysteme" in der Abteilung "Integrierte Szenarien" am Institut Jülicher Systemanalyse (ICE-2, ehemals IEK-3). Die angestellten Post-Docs, Doktoranden und Masteranden waren in dieser Arbeitsgruppe angestellt.

Insgesamt wurden 36 Personenmonate durch Doktoranden und 6 durch Post-Docs geplant. Diese wurden auf zwei Vollzeit-Doktorandenstellen verteilt, die Post-Doc Stelle wurde für x Monate besetzt. Eine Doktorandenstelle konnte erst zum 01.10.2022 besetzt werden, weshalb sich das Projektvorhaben verzögert und das Projektende statt des 31.12.2024 auf den 30.06.2025 verschoben hat (siehe Verlängerungsantrag). Es wurden 3 Masteranden mit Aufgaben aus dem Projekt beschäftigt.

1.2.2 Zeitliche Rahmenbedingungen

Ursprünglich geplanter Zeitraum für das Projektvorhaben war der 01.01.2022 - 31.12.2024. Dieser Zeitraum wurde bis zum 30.06.2025 kostenneutral verlängert.

1.2.3 Technische und methodische Startbedingungen am FZJ

1.2.3.1 Stand des Gebäudesimulationsmodells ETHOS.HiSim

Zu Beginn des Projektvorhabens bestand die erste Version des Gebäudesimulationsmodells ETHOS.HiSim¹. Darin waren ein vereinfachtes thermisches Gebäudemodell auf Basis der ISO-Norm 13790 und einige Gebäudekonfigurationen enthalten sowie die Grundarchitektur der Software.

Was fehlte und im Zuge des Projekts entwickelt werden musste, waren:

- ein verbessertes thermisches Gebäudemodell
- eine korrekte und funktionale Regelungsstrategie für die Wärmeflüsse zwischen Heizungssystem, Wärmeverteilsystem und Gebäude
- die Erstellung verschiedener Wärmeverteilsysteme mit unterschiedlichen Temperaturspreizungen, wie konventionelle Heizkörper und Fußbodenheizungen
- die Erstellung und Verfeinerung verschiedener Heizungssysteme (eine Luft-Wasser-Wärmepumpe, eine Brenn- und Heizwertheizung mit den Energieträgern Erdgas, Heizöl, Pellets und grünem Wasserstoff, eine Stromdirektheizung, ein Fernwärmeanschluss, eine Solarthermieanlage zur Warmwasserunterstützung)

¹ Noah Pflugradt, „ETHOS.HiSim - House Infrastructure Simulator“, MIT, o. J., <https://github.com/FZJ-IEK3-VSA/HiSim>.

- die Erstellung von Energieverbrauchsoptimierungen auf Basis eines Batteriespeichers, eines Wasserspeichers und auf Basis eines Energiemanagementsystems
- die Anpassung des Gebäudeenergiesystems an die Gebäudeeigenschaften
- die Erstellung und Berechnung verschiedener Bewertungskennzahlen, um die Gebäudesimulationsergebnisse zu evaluieren und zu vergleichen
- die Erstellung einer Schnittstelle zwischen Einzelgebäudesimulation und großflächiger Gebäudebestandsanalysen
- die Validierung des Modells
- die Erstellung von Sensitivitätsanalysen und Szenarioanalysen

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Im Folgenden findet sich eine Darstellung der geplanten Arbeitspakete.

1.3.1 AP1: Bestandsaufnahme Gebäudebestand und Gebäudetypisierung

1.3.1.1 Planung des AP1

Ziel von Arbeitspaket 1 ist es, den Status quo des Gebäudebestands in Deutschland zu erfassen und in einem Modell abzubilden. Anhand von statistischen Daten und 3D-Gebäudedaten im Level-of-Detail 2 (LoD2) wird der komplette Gebäudebestand in Deutschland gebäudescharf erfasst und unter anderem anhand der Parameter: Baujahr, energetischer Standard, derzeitige Versorgungstechnologie (inkl. Alter), Nutzungstyp, Anzahl Wohneinheiten und Bewohner charakterisiert. Darüber hinaus werden, soweit möglich, auch die Versorgungsgebiete mit und ohne Erdgasanschluss identifiziert. Unsicherheiten bei den Eingangsdaten werden mit Hilfe wahrscheinlichkeitstheoretischer Ansätze berücksichtigt. Ausgehend von dem gebäudescharfen Bestandsmodell werden typische Gebäudekonfigurationen abgeleitet, welche den deutschen Gebäudebestand mit einer hohen Genauigkeit abbilden. Hierzu wird eine Anzahl von ca. 200 Konfigurationen betrachtet (Hinweis: Genaue Festlegung der Anzahl erfolgt im Rahmen des Projektes). Der Energieverbrauch der Gebäudekonfigurationen wird anschließend mit dem am FZJ-ICE-2 entwickelten Gebäudesimulationsmodell ETHOS.HiSim bestimmt. Die Einzelverbräuche werden auf die nationale Ebene aggregiert und mit Hilfe von sektoralen Energieverbrauchsdaten validiert.

Geplanter Output:

Typische Gebäudekonfigurationen Deutschland, Energieverbrauch Basisjahr als Zeitreihe in stündlicher Auflösung (auf Typgebäudeebene und aggregiert für Deutschland)

1.3.1.2 Ablauf des AP1

Der Ablauf von AP1 lässt sich in zwei Teile gliedern:

1. die Erstellung einer deutschen Gebäudedatenbank und
- 2).die Erstellung von deutschen Typgebäuden auf Basis der Wohngebäudedatenbank mithilfe eines Clustering.

Für die Erstellung der deutschen Gebäudedatenbank wurden folgende Arbeitsschritte durchgeführt:

- Recherche vorhandener Gebäudedaten in Deutschland, sowohl Basisgebäudedaten zu Grundrissen und Höhen als auch weitergehende Informationen wie Größenklasse, Bewohnerstrukturen, PV, Energiesysteme etc.
- Entwicklung von Pipelines zur Abfrage der Daten aus diversen Portalen/über verschiedene Schnittstellen
- (Prä-)prozessieren der Eingangsdaten, zunächst Gebäudegrundrisse aus 3D-Daten, wo verfügbar, sonst OpenStreetMap-Daten

- Danach iteratives Integrieren weiterer Daten in die Datenbank, z.B.
 - Gebäudehöhe über Meeresspiegel aus DEM durch räumliche Abfrage
 - PV-Kapazitäten aus Risch et al.² durch räumliche Abfrage
 - Gebäudetyp basierend auf Informationen in 3D-Daten oder OpenStreetMap. Hier gab es Datenlücken.
 - Gebäudehöhen aus 3D-Daten und OpenStreetMap wo verfügbar. Hier gab es Datenlücken.
 - Größenklassen und Baualtersklassen aus Zensus. Hier gab es Datenlücken.
 - Haushaltszusammensetzung basierend auf Zensus mithilfe einer Heuristik
- Wenn Datenlücken vorhanden waren (Typ, Höhe, Größenklasse, Baualtersklasse), wurden ML-Methoden zum Füllen der Lücken entwickelt und angewandt. Das XGBoost-Modell verwendete als Features Informationen zur Gebäude- und Nachbarschaftsmorphologie sowie sozioökonomische Daten.
- Daten wurden über API für interne Nutzung (und ein Subset auch für externe Nutzung) verfügbar gemacht und gingen in die nächsten APs des Projektes mit ein
- Validierung der imputierten Daten mit öffentlichen Datenquellen

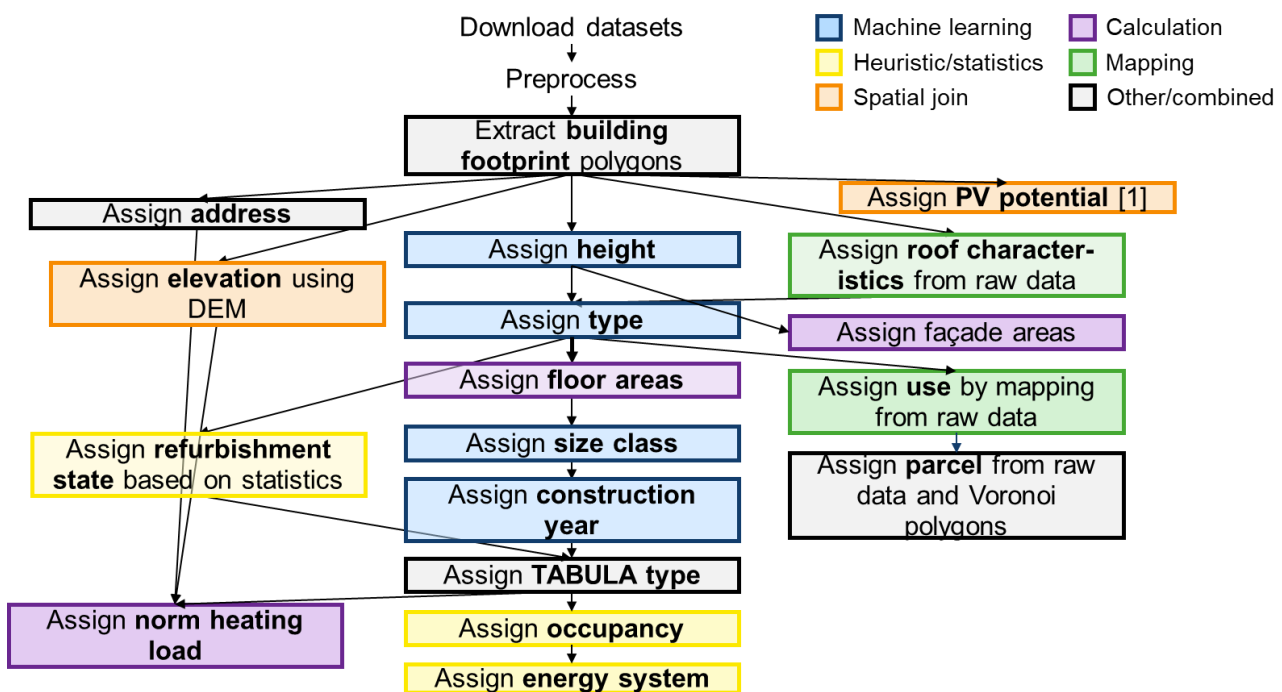


Abbildung 1: Übersicht der Merkmalzuweisung in der Gebäudedatenbank ETHOS.BUILDA.

Der deutsche Wohngebäudebestand umfasst ca. 20 Mio. Wohngebäude. Um diese bezüglich verschiedener Transformationspfade bottom-up mithilfe von Simulationen zu analysieren, muss der Bestand so reduziert werden, dass er mit herkömmlichem Rechenaufwand analysiert werden kann und gleichzeitig hinreichend detailgetreu und repräsentativ bleibt. Zu diesem Zweck wurde eine

² Stanley Risch u. a., „Potentials of Renewable Energy Sources in Germany and the Influence of Land Use Datasets“, *Energies* 15, Nr. 15 (2022): 5536, <https://doi.org/10.3390/en15155536>.

Clustering-Methode entwickelt zur Identifizierung, Validierung und Evaluation deutscher Wohnreferenzgebäude. Die Arbeitsschritte waren:

- Literaturrecherche zu Gebäudeclustering-Methoden
- Untersuchung verschiedener Clustering-Ansätze und Evaluierung mithilfe von sogenannten Cluster-Metriken wie Silhouetten-Koeffizienten, RMSSTD (engl. root mean squared standard deviation) und Davies-Bouldin-Index
- Erstellung eines Workflows zur Prozessierung aller deutscher Wohngebäudedaten aus ETHOS.BUILD³
- Validierung der Cluster-Ergebnisse mit Literaturwerten durch Hochaggregation der Typgebäude auf Bestandsebene
- Erstellung von Gebäudekonfigurationen für die weiteren Simulationsanalysen

1.3.2 AP2: Analyse von Transformationspfaden auf Einzelgebäudeebene

1.3.2.1 Planung des AP2

Basierend auf der in AP1 erstellten Gebäudekonfigurationen werden Transformationspfade für den Gebäudebestand betrachtet und bewertet. Hierbei werden die Ziele der Bundesregierung in Hinblick auf die sektoralen CO₂-Emissionsreduktionsziele für Gebäude und ggf. weitere Ziele (z.B. Effizienzziele) berücksichtigt. Übergeordnetes Ziel ist das Erreichen eines THG-neutralen Gebäudebestands bis zum Jahr 2050. Zusätzlich zu den bestehenden Zielen können auch ambitionierte Pfade betrachtet werden. Die Bestimmung von Transformationspfaden erfolgt mit Hilfe des Optimierungsmodells FINE.Building indem eine Optimierung der Versorgungsstruktur (Auswahl und Dimensionierung von Versorgungstechnologien) und eine anschließende Betriebsoptimierung durchgeführt wird. Hierbei wird der komplette Zeitraum vom Basisjahr bis zum Zieljahr 2050 betrachtet. Diesbezüglich ist das bestehende Modell im Rahmen des Arbeitspaketes zu erweitern.

Um eine Bewertung unterschiedlicher Versorgungspfade zu ermöglichen, werden für alle Gebäudekonfigurationen neben einer freien Systemoptimierung (keine Einschränkungen bezüglich Versorgungs- und Speichertechnologien), ein wasserstoffbasierter Versorgungspfad (keine Wärmepumpen) und ein wärmepumpenbasierter Versorgungspfad (keine H₂-Technologien) betrachtet. Zusätzlich können auch dezentrale Wasserstoffversorgungskonzepte mit gebäudeintegrierter Erzeugung, Speicherung und Nutzung von Wasserstoff im Rahmen der Pfadbetrachtungen berücksichtigt werden. Neben der Betrachtung des Wechsels bzw. der Modernisierung der Versorgungstechnologien werden auch gebäudeseitige Sanierungsmaßnahmen im Rahmen der Optimierung der Versorgungspfade mitberücksichtigt.

Weiterhin sind im Rahmen des Arbeitspaketes umfangreiche Sensitivitätsanalysen vorgesehen, um die Auswirkungen unterschiedlicher Sanierungsraten und Energieträgerpreise (insb. das Verhältnis zwischen Strom- und Wasserstoffpreis) auf die Ergebnisse analysieren zu können.

Geplanter Output:

„Merit-Order“ des Wasserstoffbedarfs nach Gebäudekonfiguration, Bestimmung des Sanierungszeitpunktes, Bestimmung des Zeitpunktes für die Heizungsmodernisierung, zeitlich aufgelöste Energieverbrauchs- und Energieerzeugungszeitreihen

1.3.2.2 Ablauf des AP2

Der Ablauf des AP2 lässt sich in folgende Punkte unterteilen:

1. Weiterentwicklung und Validierung des Gebäudesimulationsmodells ETHOS.HiSim
2. Erstellung von unterschiedlichen Versorgungspfaden und Untersuchung der Versorgungstechnologien in verschiedenen Typgebäuden
3. Untersuchung des Einflusses von Sanierungsmaßnahmen

³ Forschungszentrum Jülich, „ETHOS-BUILD³ API documentation“, 2024, https://ethos-builda.fz-juelich.de/api/v8_20240916/swagger/.

4. Weiterentwicklung eines Optimierungsmodells
5. Entwicklung eines Workflows für Sensitivitätsanalysen

Anders als im Projektantrag beschrieben, wurde nicht ETHOS.FineBuilding, sondern stattdessen ETHOS.HiSim und der HiSim Building Sizer, ein Optimierungsmodell zugeschnitten auf ETHOS.HiSim, genutzt. Der Grund für den Wechsel des Werkzeugs war, dass ETHOS.FineBuilding ein MILP-Optimierungsmodell mit Stundenauflösung ist, während ETHOS.HiSim ein Gebäudesimulationsmodell mit Minutenauflösung darstellt. Damit ist zwar ein höherer Rechenaufwand verbunden, aber die Realität kann sehr viel genauer abgebildet werden. Zum einen ermöglicht die höhere Zeitauflösung auch die Abbildung von kurzen Energieverbräuchen und zum anderen ergaben Vorstudien, dass durch die Stundenauflösung der Eigenverbrauch von PV-Anlagen häufig um >10% überschätzt wurde.

Das Optimierungsmodell wurde weiterentwickelt, jedoch wurde für diese Analysen ein hoher Rechenaufwand festgestellt⁴, weshalb zur Bewertung der optimalen Gebäudeversorgungssysteme stattdessen eine Sensitivitätsanalyse entwickelt und verwendet wurde.

Zur Weiterentwicklung und Validierung von ETHOS.HiSim (1) wurden folgende Arbeitsschritte durchgeführt (siehe auch Abschnitt 1.2.3.1):

- Validierung von ETHOS.HiSim mit den Wärmeverbrauchsdaten von Tabula
- ein verbessertes thermisches Gebäudemodell
- eine korrekte und funktionale Regelungsstrategie für die Wärmeflüsse zwischen Heizungssystem, Wärmeverteilsystem und Gebäude auf Basis einer Heizkurvenmodellierung
- die Erstellung verschiedener Wärmeverteilsysteme mit unterschiedlichen Temperaturspreizungen, wie konventionelle Heizkörper und Fußbodenheizungen
- die Erstellung und Verfeinerung verschiedener Heizungssysteme (eine Luft-Wasser-Wärmepumpe, eine Brenn- und Heizwertheizung mit den Energieträgern Erdgas, Heizöl, Pellets und grünem Wasserstoff, eine Stromdirektheizung, ein Fernwärmeanschluss, eine Solarthermieanlage zur Warmwasserunterstützung)
- die Erstellung von Energieverbrauchsoptimierungen auf Basis eines Batteriespeichers, eines Wasserspeichers und auf Basis eines Energiemanagementsystems
- die Anpassung des Gebäudeenergiesystems, d.h. Größen und Leistungen der Systeme, an die Gebäudeeigenschaften
- die Erstellung und Berechnung verschiedener Bewertungskennzahlen, um die Gebäudesimulationsergebnisse zu evaluieren und zu vergleichen. Diese umfassen beispielsweise die Opex- und Capex-Kosten verschiedener Systeme für aktuelle und zukünftige Jahre, Selbstversorgungsraten, Verbräuche, Netzeinspeisungen, Effizienzen und viele mehr.
- die Erstellung einer Schnittstelle zwischen Einzelgebäudesimulation und großflächiger Gebäudebestandsanalysen
- die Validierung des Modells mit Literaturwerten aus Tabula, Zensus, Dena-Report und anderen
- die Erstellung von Sensitivitätsanalysen und Szenarioanalysen

⁴ Im Optimierungsmodell wird ein genetischer Algorithmus verwendet, um aus einer hinreichend großen Population aus Gebäude- und Energiesystemkonfigurationen iterativ die optimale Versorgungsstrategie zu bestimmen. Hierfür wird eine große Population und eine große Anzahl an Iterationen benötigt, die einen hohen Zeit- und Rechenaufwand ergeben.

1.3.3 AP3: Bewertung von Pfaden zur Umstellung von Erdgas-Verteilnetzen auf den Betrieb mit Wasserstoff

1.3.3.1 Planung des AP3

Bei der Betrachtung von Transformationspfaden für Gebäude stellen die Rahmenbedingungen der örtlich vorhandenen Versorgungsinfrastrukturen eine wesentliche Randbedingung dar. Bei der Umstellung von Erdgas-Verteilnetzen auf einen Betrieb mit Wasserstoff bestehen aktuell noch erhebliche Unsicherheiten in Bezug auf die Kosten und die technischen Anforderungen. Hierbei ist grundsätzlich zu unterscheiden zwischen einer sofortigen Komplettumstellung und einer schrittweisen Beimischung durch stufenweise Erhöhung des Wasserstoffanteils. Im Rahmen des Arbeitspaketes werden daher verschiedene Umstellungspfade von Erdgas-Verteilnetzen auf einen Wasserstoffbetrieb techno-ökonomisch bewertet und Wechselwirkungen mit Maßnahmen und Zeitpunkten im Bereich Heizungsmodernisierung und gebäudeseitigen Sanierungsmaßnahmen bestimmt.

Grundsätzlich kann die Transformation des Gebäudebestands auch zu einer Stilllegung und ggf. Rückbau von Gas-Verteilnetzen führen. Auch dies ist kostenseitig zu bewerten und in der Ergebnisanalyse zu berücksichtigen.

Geplanter Output:

Ableitung einer vereinfachten Kostenfunktion für die Umstellung von Gas-Verteilnetzen auf Wasserstoffbetrieb inkl. Abschätzung von Auswirkungen auf Netzentgelte bei variierender Auslastung

1.3.3.2 Ablauf des AP3

Im AP3 wurde mithilfe der von AP1 bereitgestellten Informationen zur aktuellen Gebäudedatenbank das Tool ETHOS.dgnetz erweitert und geo-referenzierte synthetische Verteilungsnetze entwickelt. Zusätzlich wurde ETHOS.dgnetz eingesetzt, um mehrere synthetische Gasnetze zur weiteren Untersuchung der Transformationspfade zu erstellen.

Da AP1 und AP2 mehr Zeit in Anspruch nahmen als im Projektantrag angenommen, konnte das Modell ETHOS.dgnetz nicht getestet und nicht auf die deutschen Wohngebäudelastprofile angewandt werden. Aus diesem Grund wurden zur Untersuchung von Gasnetzumwidmungskosten Modelle aus anderen Studien untersucht und für die weiteren Analysen verwendet.

1.3.4 AP4: Verteilung der Gebäudekonfigurationen und Hochrechnung auf den nationalen Gebäudebestand

1.3.4.1 Planung des AP4

Basierend auf den Ergebnissen von AP2 wird ein nationales Gebäudebestandsmodell implementiert. Hierzu werden die optimierten Gebäudekonfigurationen regional anhand von Zensusdaten verteilt. Die regionale Auflösung ergibt sich anhand von Gitterzellen (100x100 m Raster) und ist angelehnt an die räumliche Auflösung der Zensusdaten. Mit diesem räumlich hoch aufgelösten Bestandsmodell können regionale Änderungen der Gebäudeenergienachfrage identifiziert werden. Hierbei ist der Einfluss von „Prosumern“ im Gebäudebestand zu berücksichtigen. Anhand der Ergebnisse können regionale Schwerpunkte einer Wasserstoffnachfrage im Gebäudesektor sowie andere Transformationsschwerpunkte identifiziert werden. Basierend auf den Ergebnissen können ausgewählte Regionen für eine weitergehende Detailanalyse identifiziert werden.

Geplanter Output:

Bereitstellung eines Open-Data Datensatzes mit räumlich und zeitlich (Stundenauflösung innerhalb des Jahres und über die Jahre des gesamten Betrachtungszeitraums) aufgelösten Erzeugungs- und Verbrauchszeitreihen des Gebäudebestands für verschiedene Technologiepfade auf Einzelgebäudeebene (typische Gebäudekonfiguration) und auf Gitterzellenebene (aggregiert)

1.3.4.2 Ablauf des AP4

AP4 ist die Erweiterung und die Kombination von AP1 und AP2 wurde im Anschluss an das Gebäudeclustering vollzogen. Die Typgebäude wurden identifiziert und mithilfe einer Sensitivitätsanalyse auf verschiedene Versorgungspfade untersucht. Dafür wurden 51 Energiesystemkombinationen für verschiedene Typgebäude durchsimuliert und anhand der jährlich umgelegten Gesamtkosten (Opex + Capex) verglichen. Die Ergebnisse wurden auf Gesamtbestandsebene hochaggregiert.

1.3.5 AP5: Auswirkungen auf Versorgungsinfrastrukturen

1.3.5.1 Planung des AP5

Basierend auf der in AP4 gewählten räumlichen Auflösung können Kapazitätsanforderungen pro Gitterzelle an die Versorgungsinfrastrukturen (Strom und Gasnetz) für verschiedene gebäudeseitige Versorgungspfade (siehe AP2) abgeleitet werden. Hierzu werden energieflussbasiert Energieerzeugungs- und Energieverbrauchszeitreihen des Gebäudebestands betrachtet und mit den Daten des Basisjahres als Benchmark für die Bewertung der vorhandenen Versorgungskapazitäten verglichen. Anhand der Ergebnisse ergeben sich Hinweise auf mögliche Ausbaus- oder Rückbaubedarfe vorhandener Strom- und Gasnetze. Für eine Umstellung von Gas-Verteilnetzen werden die in AP3 definierten Pfade berücksichtigt. Anhand der Ergebnisse können analog zu AP4 auch infrastrukturseitige Transformationsschwerpunkte identifiziert und für weitergehende Detailanalysen ausgewählt werden.

Im Rahmen der Detailanalysen werden weitergehende Netzberechnungen für exemplarische Gitterzellen durchgeführt. Hierzu ist ein geeigneter Ansatz zu entwickeln, um auf Basis öffentlicher Daten Gebäude- und Netztopologien abzuleiten. Alternativ kann die Betrachtung auch auf Basis von Typnetz- bzw. Typsiedlungsstruktur-Ansätzen erfolgen. Ziel der Detailanalysen ist die techno-ökonomische Bewertung eines Netzausbaubedarfs für ausgewählte Strom- und Gas-Verteilnetze.

Geplanter Output:

Exemplarische Analysen für ausgewählte Netzgebiete zur Umstellung auf einen Betrieb mit Wasserstoff

1.3.5.2 Ablauf des AP5

Im deutschen Wohngebäudebestand wurden Daten zu derzeitigen Energieträgern integriert (Stand 2022, Zensus⁵) und lokal aufgelöst. Mithilfe der Sensitivitätsanalyse und der Modellierung von Energieinfrastrukturen konnten Kosten und Transformationsempfehlungen für jedes Typgebäude erstellt werden. Die Auswirkungen verschiedener Technologien auf Strom-, Fernwärme- oder Gasnetzbedarfe und Ausbauten wurden analysiert.

1.3.6 AP6: Vergleichende Bewertung von Gebäudeversorgungspfaden aus nationaler Gesamtenergiesystemperspektive

1.3.6.1 Planung des AP6

In AP6 wird eine Modellkopplung des Bottom-Up-Gebäudeoptimierungsmodells (FINE.Building) mit dem am FZJ-ICE-2 entwickelten nationalen Gesamtenergiesystemmodell (FINE.Nestor) durchgeführt. Hierzu werden die Ergebnisse der Modellierung des nationalen Gebäudebestands für verschiedene Transformationspfade als sektorale Energieerzeugungs- und Verbrauchszeitreihen an das nationale Gesamtenergiesystemmodell übergeben. Anschließend können Rückkopplungen des mit einem hohen Detailgrad modellierten Gebäudesektor auf das nationale Gesamtenergiesystem untersucht werden. Im Fokus stehen hierbei die in AP2 definierten Transformationspfade und deren Bewertung aus

⁵ Statistische Ämter des Bundes und der Länder, „Zensus 2022“, o. J., zugegriffen 6. Februar 2025, www.zensus2022.de.

volkswirtschaftlicher Perspektive. Im Rahmen der Analyse werden basierend auf AP5 auch Kosten für den Ausbau bzw. die Umstellung von Strom- und Gas-Verteilnetzen mitberücksichtigt. Der Rahmen für die Modellkopplung wird durch ein treibhausgasneutrales Deutschlandszenario für das Jahr 2050 gebildet.

Geplanter Output:

Vergleichende Bewertung von Gebäudeversorgungspfaden aus nationaler Gesamtenergiesystemperspektive hinsichtlich Kosten und Emissionen unter Berücksichtigung der Umstellung von Gas-Verteilnetzen auf einen Betrieb mit Wasserstoff

1.3.6.2 Ablauf des AP6

Für AP6 wurden die Ergebnisse der letzten APs herangezogen und die volkswirtschaftliche Gesamtperspektive für Deutschland evaluiert und mit den Erkenntnissen des Modells ETHOS.NESTOR, welches das Gesamtenergiesystem Deutschland modelliert, verglichen.

1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

1.4.1 Stand der Wissenschaft und Technik bezüglich der Nutzung von Wasserstoff zur Wärmeversorgung im Wohngebäudesektor

1.4.1.1 Wasserstoff-Roadmap, Szenarien und Detailstudien

Die Hydrogen Roadmap Europe⁶ des Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking betrachtet Wasserstoff im ambitionierten Szenario (2050) bei der Wärmeversorgung des Gebäudesektors als entscheidenden Faktor: 579 TWh H₂ bzw. 26% des H₂-Bedarfes entfallen auf die Gebäude. Zur Realisierung des Szenariopfades können zunächst die H₂-Anteile im Erdgasnetz erhöht werden, außerdem kann Synthesegas aus CO₂ und H₂ als Brückentechnologie dienen bevor das Erdgasnetz auf 100%-Wasserstoff umgestellt wird. Dieser Dekarbonisierungspfad wird vorrangig für Ländern mit saisonalem Verbrauch, sowie stark ausgeprägtem Erdgasnetz, zu denen auch Deutschland gehört, gesehen. Der vollelektrische Pfad wird als benachteiligt gesehen, da er die Saisonalität des Stromverbrauchs erhöht, Lock-in Effekte mit sich bringen kann und da viele Bestandsgebäude nicht für die Umrüstung zur Wärmepumpenversorgung geeignet sind. Die Wärmeversorgung von Gebäuden mit Wasserstofflösungen wird als kurzfristige „no-regret“ Maßnahme dargestellt.

Die nationale Wasserstoffstrategie⁷ der Bundesregierung sieht gasförmige Energieträger (Wasserstoff und seine Folgeprodukte) als wichtigen Baustein bei der Dekarbonisierung des Gebäudesektors. Im Maßnahmenpaket findet sich die Förderung von hocheffizienten Brennstoffzellen. Außerdem wird die Förderung von „H₂-ready“-Anlagen im Rahmen des KWKG geprüft.

Die Auswertung verschiedener Szenariostudien, die das nationale Energiesystem untersuchen, ergibt, dass der Anteil des Wasserstoffs bei der zukünftigen Gebäudewärmeversorgung im Gesamtsystem divers betrachtet wird (siehe Abbildung 1). In einer Vielzahl von Szenarien spielt Wasserstoff in der Gebäudeversorgung keine Rolle⁸. Der Einsatz von Wärmepumpen sowie Fernwärme (ohne

⁶ Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint Undertaking, „HYDROGEN ROADMAP EUROPE“, 2019.

⁷ Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), „Die Nationale Wasserstoffstrategie“, 2020.

⁸ Bundesverband der Deutschen Industrie e.V., „Klimapfade 2.0 – Ein Wirtschaftsprogramm für Klima und Zukunft“, 2021, <https://bdi.eu/publikation/news/klimapfade-2-0-ein-wirtschaftsprogramm-fuer-klima-und-zukunft/>; Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), „dena-Leitstudie Integrierte Energiewende“, 2018, https://www.dena.de/fileadmin/dena/Dokumente/Pdf/9261_dena-Leitstudie_Integrierte_Energiewende_lang.pdf; Agora Energiewende, Prognos, „Klimaneutrales Deutschland 2045 (Zusammenfassung)“, 2021,

wasserstoffbasierten Brennstoff) werden in diesen zur Wärmeversorgung von Gebäuden bevorzugt. Der Vergleich des LBST-Szenarios „95% H₂“⁹ mit dem Agora Szenario „Klimaneutrales Deutschland“¹⁰ zeigt die Bandbreite in den Ergebnissen: Während die LBST-Studie die Wasserstoffnutzung auch in der dezentralen Wärmeversorgung (Kessel, Brennstoffzellen) prognostiziert, ist eine Wasserstoffwärmeversorgung in der Agora-Studie lediglich in der Fernwärme zu finden (nicht eindeutig dem Bereich Gebäudewärmeversorgung zugeordnet).

Weitere Studien betrachten ebenfalls wasserstoffbasierte Lösungen in der Gebäudeenergieversorgung¹¹. Im Szenario „Optimiertes System“ einer ENERVIS-Studie¹² kommen erneuerbare Gase (Power-to-Gas und Biogase) hauptsächlich in Haushalts- und GHD-Gebäuden mit zu geringer Dämmung zum Einsatz, sodass gasbasierte Systeme auch im Jahr 2050 ca. 32% des Endenergiebedarfes decken. Die Berücksichtigung von H₂-Brennwertkessel bei der dezentralen Wärmeversorgung, sowie SOFC-Brennstoffzellen zur Nahwärmeversorgung führen im FZJ-ICE-2 Szenario 95¹³ zu einem 7-prozentigen Wasserstoffanteil bei den Energieträgern bei der Wärmeversorgung von Gebäuden.

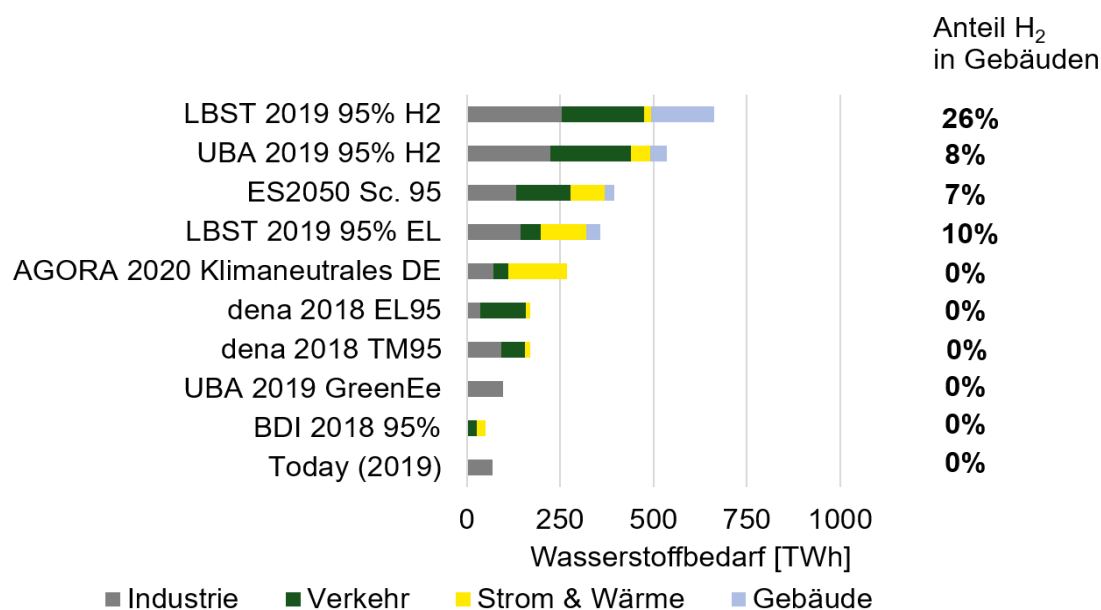


Abbildung 2: Wasserstoff in Gebäuden in deutschen Szenariostudien (Quelle: Forschungszentrum Jülich, ICE-2)

<https://www.agora-energiewende.de/publikationen/klimaneutrales-deutschland-2045-zusammenfassung>; Umweltbundesamt, „Wege in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität – RESCUE: Langfassung“, 2019, <https://www.umweltbundesamt.de/rescue>.

⁹ LBST, „Wasserstoffstudie Nordrhein-Westfalen (NRW)“, 2019, <https://lbst.de/publikationen/wasserstoffstudie-nrw/>.

¹⁰ Agora Energiewende, Prognos, „Klimaneutrales Deutschland 2045 (Zusammenfassung)“.

¹¹ LBST, „Wasserstoffstudie Nordrhein-Westfalen (NRW)“; Umweltbundesamt, „Roadmap Gas für die Energiewende – Nachhaltiger Klimabeitrag des Gassektors“, 2019, https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-04-15_cc_12-2019_roadmap-gas_2.pdf; enervis, „Erneuerbare Gase - ein Systemupdate der Energiewende“, 2017, https://www.wind-energie.de/fileadmin/redaktion/dokumente/publikationen-oeffentlich/themen/03-sektorenkopplung/20171212_studie_erneuerbare_gase.pdf; *Wege für die Energiewende kosteneffiziente und klimagerechte Transformationsstrategien für das deutsche Energiesystem bis zum Jahr 2050*, with Martin Robinius (Forschungszentrum Jülich GmbH Zentralbibliothek, Verlag, 2020).

¹² enervis, „Erneuerbare Gase - ein Systemupdate der Energiewende“.

¹³ *Wege für die Energiewende kosteneffiziente und klimagerechte Transformationsstrategien für das deutsche Energiesystem bis zum Jahr 2050*.

Andere Studien betrachten die detailliertere Gebäudeebene, auf der hauptsächlich die Dekarbonisierungsmöglichkeiten Wärmepumpe, Sanierung und Wasserstoff (bzw. Power-to-Gas) beleuchtet und verglichen werden. Einige Studien kommen zu dem Erkenntnis, dass Wasserstoff eine vernachlässigbare Rolle in der Wärmeversorgung spielen wird¹⁴. Die dena-Studie „Urbane Energiewende“¹⁵ betrachtet keine Wasserstoffnutzung zur Dekarbonisierung des urbanen Wärmesektors, da Wasserstoff im Betrachtungszeitraum keine Rolle eingeräumt wird. Die Gebäudewärmeversorgung in den frei optimierten Szenarien der UBA-Studie „Klimaneutraler Gebäudebestand 2050“¹⁶ basieren ausschließlich auf wasserstofffreien Technologien. Eine weitere Teilmenge der betrachteten Studien kommt andererseits zu dem Erkenntnis, dass Wasserstofftechnologien zur Wärmewende beitragen können. Eine IWU-Studie¹⁷ stellt die geringen Nutzungsgrade von Power-to-Gas-Lösungen heraus, kommt aber zu dem Schluss, dass Zukunftstechnologien (Power-to-Gas, Tiefengeothermie und Langzeitwärmespeicherung) je nach Szenario 19,7 bis 159 TWh/a Wärme bereitstellen. Das SysWärme-Projekt¹⁸ betrachtet verschiedene Wasserstoffmaßnahmen (PtG, „H₂-Readiness“ der Wärmeerzeuger) als „no Lock-in“ Leitplanken und betrachtet diese in der Lösungsmenge.

Die Agora-Studie „Wert der Energieeffizienz im Gebäude“¹⁹ sieht die Wärmewende ohne Trendwende in Gefahr und drängt dementsprechend auf die Mobilisierung aller möglichen Maßnahmen, verweist aber dennoch auf die Bedarfskonkurrenz aus anderen Sektoren. Die Frage von kosteneffektiven Dekarbonisierungspfaden für Bestandsgebäude (Wärmepumpen und/ oder grünes Gas) sieht eine Agora-Studie²⁰ als Fragestellung für zukünftige Arbeiten.

Zusammenfassend gehen die Studienerkenntnisse auf beiden Betrachtungsebenen (Gebäudeebene, Verteilnetzebene, Gesamtsystemebene) auseinander, dementsprechend besteht weiterer Forschungsbedarf, um Aussagen zur weiteren Rolle des Wasserstoffes bei der Wärmeversorgung von Gebäuden zu treffen. Besonders in der Bottom-Up-Modellierung verschiedener Gebäudetypen unter Berücksichtigung der Rahmenbedingung dieser (keine Sanierung möglich, kein Wärmepumpeneinbau möglich, etc.) sind weitere Erkenntnisse zur Maßnahmenfindung erforderlich. Zusätzlich ist die Kopplung der detaillierten Gebäudebetrachtung mit der Gesamtsystemsicht notwendig.

1.4.1.2 Stand der Technik

Abbildung 2 zeigt die Strukturentwicklung der Gasversorgung und -nutzung in Wohngebäuden von 100% Erdgas, wie es aktueller Stand der Technik ist, bis hin zu einem möglichen, zukünftigen Betrieb mit 100% Wasserstoff.

¹⁴ Umweltbundesamt, „Klimaneutraler Gebäudebestand 2050“, 2017, <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/klimaneutraler-gebäudebestand-2050-0>; Deutsche Energie-Agentur, „dena-Projekt Urbane Energiewende“, 2019, <https://files.core.ac.uk/download/555507129.pdf>.

¹⁵ Deutsche Energie-Agentur, „dena-Projekt Urbane Energiewende“.

¹⁶ Umweltbundesamt, „Klimaneutraler Gebäudebestand 2050“.

¹⁷ IWU, „Analyse der Energieversorgungsstruktur für den Wohngebäudesektor zur Erreichung der Klimaschutzziele 2050“, 2019, https://www.iwu.de/fileadmin/publikationen/gebäudebestand/prj/EEGebäudeZukunft_Endbericht_Teil_1.pdf.

¹⁸ Umweltbundesamt, „Systemische Herausforderung der Wärmewende“, 2021, <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/systemische-herausforderung-der-waermewende>.

¹⁹ ifeu u. a., „Wert der Effizienz im Gebäudesektor in Zeiten der Sektorenkopplung“, 2018, https://www.ifeu.de/fileadmin/uploads/2018_Agora_ifeu_Effizienzwert_für_Sektorenkopplung.pdf.

²⁰ Agora Energiewende, Prognos, „Wärmewende 2030“, 2017, <https://www.agora-energiewende.de/publikationen/waermewende-2030>.

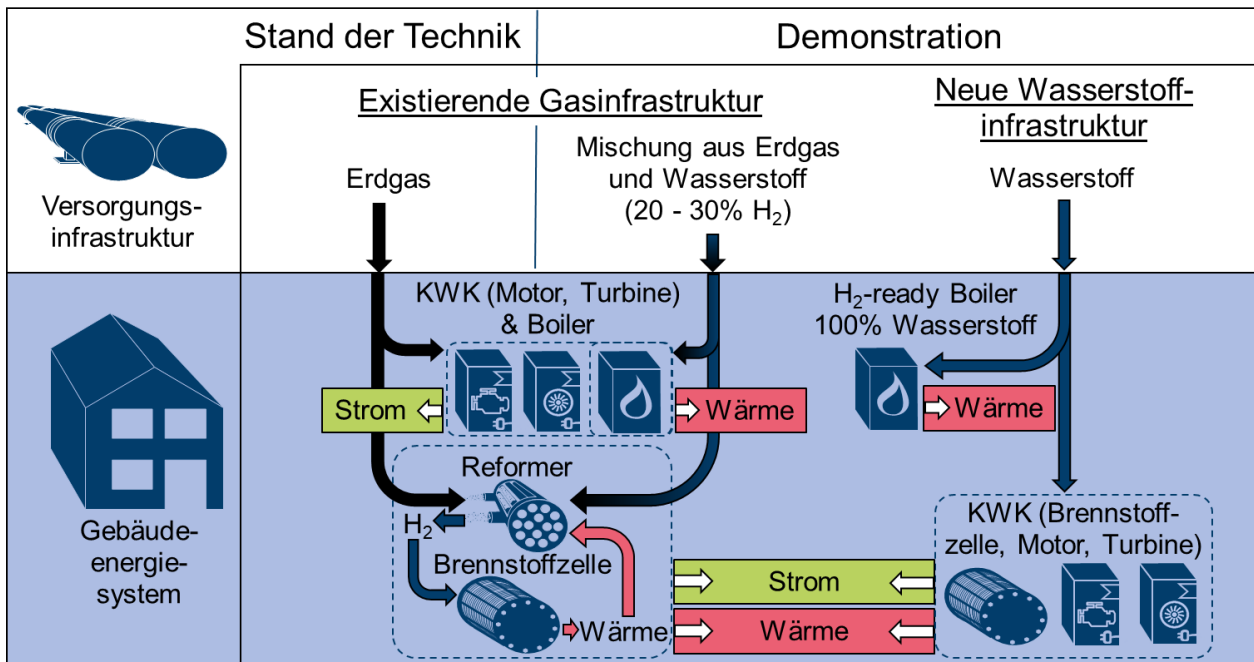


Abbildung 3: Strukturentwicklung der Gasversorgung und -nutzung in Wohngebäuden von 100 % Erdgas hin zu 100 % Wasserstoff (Quelle: Forschungszentrum Jülich, ICE-2)

Im Jahr 2019 erfolgte annähernd 50% der Wärmeerzeugung in Wohngebäuden unter Nutzung von Erdgas sowie in geringen Teilen Bio- und Flüssiggas²¹. Stand der Technik ist die Verbrennung von Erdgas in Brennwertgeräten sowie die Nutzung in Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen (Mikro-KWK Anlagen). Zu diesen Mikro-KWK Anlagen zählen unter anderem Brennstoffzellenheizgeräte (BZHG). Diese nutzen Wasserstoff, welcher vor Ort durch Reformierung aus Erdgas gewonnen werden kann, um sowohl Wärme als auch Strom zu erzeugen. Auf dem deutschen Markt sind derzeit acht unterschiedliche BZHG-Modelle verfügbar²², die Heizleistungen zwischen 0,8 und 1,2 kW_{th} bereitstellen können. BZHG lassen sich ebenfalls in Kombination mit Elektrolyseuren und Wasserstoff-Speichersystemen für einen Betrieb mit 100% Wasserstoff nutzen. Diese Kombisysteme speichern mit 300 bis 1.500 kWh_{el} vergleichsweise große Mengen Energie in Form von Wasserstoff. So wird bspw. mit dem Kombisystem „picea“ des Herstellers Home Power Solutions überschüssiger PV-Strom im Sommer in Form von Wasserstoff gespeichert. Der mittels Elektrolyse vor Ort erzeugte Wasserstoff kann in den Wintermonaten durch eine PEM-Brennstoffzelle in Wärme und Strom umgewandelt werden.

Der mittig dargestellte Entwicklungsschritt in Abbildung 2 betrachtet die Beimischung von Wasserstoff unter Nutzung der existierenden Infrastruktur. Für Brennwertgeräte ist eine Beimischung von 10% Wasserstoff bereits erprobt und gesichert. Laut dem Hersteller Viessmann können dessen moderne Brennwertgeräte bereits mit 30% Wasserstoff arbeiten²³. Aktuelle Feldversuche untersuchen Anteile in Höhe von 20% und 30% für Heizungsgeräte sowie die Netzinfrastruktur²⁴.

²¹ bdew, „Entwicklung des Wärmeverbrauchs in Deutschland“, 2020, https://www.bdew.de/media/documents/20200525_Waermeverbrauchsanalyse_Foliensatz_2020_daQSUCb.pdf

²² Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle, „BAFA - KWK-Anlagen bis 50 kW_{el}“, zugegriffen 1. Juli 2021, https://www.bafa.de/DE/Energie/Energieeffizienz/Kraft_Waerme_Kopplung/Stromverguetung/Stromverguetung_bis_50_KW/stromverguetung_bis_50_kw_node.html.

²³ viessmann.de, „Heizen mit Wasserstoff – Innovative Brennwerttechnik für die klimaneutrale Zukunft.“, 2020, <https://www.viessmann.family/de/newsroom/loesungsangebot/heizen-mit-wasserstoff-innovative-brennwerttechnik-fuer-die-klimaneutrale-zukunft#>.

²⁴ DVGW, „H₂ vor Ort.“, 2020, <https://www.dvgw.de/themen/energiewende/wasserstoff-und-energiewende/h2vorort>.

Eine Wärmeversorgung von Wohngebäuden ausschließlich durch Wasserstoff wird durch den letzten Entwicklungsschritt in Abbildung 2 dargestellt. Hierfür werden H₂-ready Brennwertgeräte vorausgesetzt, die bereits von Herstellern wie Bosch Thermotechnik oder Viessmann entwickelt und erprobt werden. Mit einer Markteinführung ist im Jahr 2024 zu rechnen²⁵.

Für BZHG hat der Betrieb mit 100% Wasserstoff den Vorteil, dass die Reformierung wegfällt und somit höhere Wirkungsgrade und ein flexibler, modulierender Betrieb möglich sind. Darüber hinaus sind durch den Wegfall des Reformers Reduzierungen von Kosten und Baugrößen derartiger Systeme zu erwarten.

1.4.1.3 Demonstrationsprojekte und Reallabore

Akteure aus Wirtschaft, Wissenschaft und Politik erproben in zahlreichen Demonstrationsprojekten die Realisierung einer wasserstoffbasierten Energieversorgung im Gebäudebereich. Versorgungsanlagen mit Wasserstoff auf Gebäude- und Quartiersebene weisen dabei bereits ein hohes Niveau an technologischer Reife auf und werden sowohl in Neubauten als auch Bestandsgebäuden erfolgreich eingesetzt. Oftmals handelt es sich dabei um Lösungen, welche den Wasserstoff durch Reformierung aus Erdgas oder mittels Elektrolyse aus überschüssigem erneuerbarem Strom vor Ort herstellen.

Die Stadt Esslingen errichtet zusammen mit acht Projektpartnern auf einem Areal von 100.000 m² klimaneutrale Wohnhäuser für 400 bis 500 Wohneinheiten, Büro- und Gewerbeflächen. Zentrales Element der Energieversorgung des Quartiers wird ein 1.000 kW_{el} alkalischer Elektrolyseur sein, der Strom aus erneuerbaren Energiequellen in Wasserstoff umwandelt. Die Abwärme der Elektrolyse (55 – 60 °C) wird über ein Nahwärmenetz genutzt, um etwa die Hälfte des Wärmebedarfs der Wohngebäude und der Hochschule zu decken. Die Rückverstromung erfolgt in einem Blockheizkraftwerk (310 kW_{th}, 250 kW_{el}), das mit reinem Wasserstoff und alternativ mit Biogas betrieben werden kann. Zusätzlich wird der produzierte Wasserstoff in das lokale Erdgasnetz der Stadtwerke Esslingen eingespeist²⁶.

Im Rahmen des Forschungsprogramms TRAFIS betreibt die Stadtwerke Augsburg seit 2019 eine von der Firma Exytron entwickelte Power-to-Gas-Anlage mit Methanisierung als teilautarke und emissionsreduzierte Energieversorgung von 70 Wohnungen (5.400 m²) im Bestandswohnungsbau. In einer nach dem KfW100 Standard sanierten Altbau-Wohnanlage von 1974 wird überschüssiger PV-Strom von den Dachflächen genutzt, um in einem alkalischen Elektrolyseur (max. Leistung 62,5 kW_{el}) Wasserstoff und Wärme zu erzeugen. Dieser wird mit Kohlendioxid zu synthetischem, regenerativem Erdgas (SNG) umgewandelt (10 Nm³/h Wasserstoff, 2,5 Nm³/h SNG). Zur Rückverstromung und Wärmeerzeugung dient ein marktübliches Blockheizkraftwerk und Brennwertthermen. Das bei der Verbrennung des Erdgases freiwerdende CO₂ wird im Kreislauf zurückgeführt und als Wertstoff für die Produktion des regenerativen Erdgases eingesetzt. Der Hersteller spricht von einem Nutzungsgrad von 90 Prozent der selbst erzeugten Energie und einer Absenkung des CO₂-Fußabdrucks auf das Niveau des Passivhaus-Plus-Standards²⁷.

Als wichtigen Baustein der Wasserstoffstrategie der Bundesregierung, fördert das BMWi seit 2020 im Rahmen des 7. Energieforschungsprogramm 20 Reallabore der Energiewende mit etwa 100 Millionen Euro jährlich. Sie erproben vor allem neue Wasserstofftechnologien im industriellen Maßstab und realer Umgebung und die systemische Integration des Wasserstoffes in das Energiesystem mit einer Kopplung der Verbrauchssektoren Industrie, Verkehr und Gebäude²⁸. Exemplarisch seien hier vier

²⁵ viessmann.de, „Heizen mit Wasserstoff – Innovative Brennwerttechnik für die klimaneutrale Zukunft.“; Bosch, „Der Energiewende einen Schritt näher“, 2020, <https://www.bosch-presse.de/pressportal/de/de/der-energiewende-einen-schritt-naeher-220800.html>.

²⁶ Tobias Nusser, „Klimaneutrale Stadtquartiere - Wasserstoffnutzung im urbanen Kontext am Beispiel der ‚Neuen Weststadt‘ in Esslingen“, 24. Fachkongress Zukunftsenergien, 2020.

²⁷ energate messenger, „Müller: ‚Wir sind nah an der Wirtschaftlichkeit‘ - 3 Fragen an Alfred Müller“, Stadtwerke Augsburg, 2019.

²⁸ Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, „Gewinner des Ideenwettbewerbs ‚Reallabore der Energiewende‘ - Steckbriefe“, 2019.

Reallabore aufgezeigt, welche eine räumliche und zeitliche Kopplung des Gebäudesektors mit der Wasserstoffherzeugung erproben:

In der Verbandsgemeinde Kaisersesch in Rheinland-Pfalz entwickelt das Projekt „SmartQuart“ ein Wasserstoff-Microgrid zur Deckung des Strombedarfs eines kleinstädtischen Mischgebiets. Strom aus regenerativer Erzeugung soll in einer 1 MW_{el} Power-to-Gas-Anlagen (Elektrolyse: 400 kg_{H₂}/d) Wasserstoff umgewandelt werden. Dabei wird eine Kopplung von Elektrolyse, kommunalem Klärwerk, Wärme- und Stromverbrauchern sowie Mobilitätsanwendung angestrebt²⁹.

Im Rahmen des Norddeutschen Reallabors wird ab 2021 die Herstellung, der Transport, die Speicherung und der wirtschaftliche Einsatz von grünem Wasserstoff für eine ganzheitliche Transformation des Energiesystems in den Modellregionen Hamburg, Schleswig-Holstein und westliches Mecklenburg-Vorpommern erprobt. Die industrielle Umsetzung in der Region soll durch Skalierungseffekte beschleunigt werden (Markhochlauf) und damit Transformationspfade zum Erreichen der übergeordneten Zielstellung des Klimaschutzes erprobt werden. Eine Großelektrolyse-Anlage von bis zu 30 MW_{el} wird unter Einsatz erneuerbaren Stroms im Energiepark Bad Lauchstädt grüner Wasserstoff produzieren. Des Weiteren werden energieeffiziente Quartierslösungen, vorrangig im Wärmebereich, und die Auswirkungen des Beimischens von Wasserstoff auf Erdgas-Brenner erprobt³⁰.

Seit 2019 wird in einem Demonstrationsprojekt in Wyhlen am Hochrhein eine 1 MW_{el} Elektrolyse durch Wasserkraft betrieben. Die erzeugte Abwärme wird in einem Nahwärmenetz genutzt und versorgt ein nahegelegenes Wohngebiet.

1.4.1.4 Wasserstoff im Verteilnetz

Die Beheizungsstruktur im Gebäudebestand hat direkte Auswirkung auf die erforderlichen Gasverteilnetze. Die beginnende Wärmewende mit einer seit dem Jahr 2015 sinkenden Erdgasversorgungsquote im Neubaubereich³¹ wirft folglich Fragen über den Umgang mit einem fallenden fossilen Gasbedarf und einer damit verbundenen geringen Auslastung der Gasverteilnetze auf. Neben begrenzten Potenzialen zur Einbringung von Biogas bzw. Biomethan in die Gasverteilnetze eignet sich insbesondere grüner Wasserstoff als klimafreundliche, gasförmige Alternative zu Erdgas. Die Integration von Wasserstoff kann je nach Kundenstruktur des Verteilnetzes entweder in Form einer Beimischung oder einer vollständigen Umstellung auf Wasserstoff erfolgen. Die Einbringung von Wasserstoff in die Verteilnetze bietet so ein potenziell hohes Maß an Flexibilität, um auch große Mengen Wasserstoff aufzunehmen und eine effektive Sektorkopplung zu ermöglichen. Darüber hinaus können die Verteilnetze den Wasserstoff über angeschlossene Speicher saisonübergreifend lagern und räumlich transportieren. So bieten sie auch die Möglichkeit Engpässe im Stromnetz zu vermeiden und so den Ausbaubedarf im Stromnetz zu reduzieren.

Nach derzeitigem DVGW-Regelwerk ist eine Beimischung von 10 % in die Gasverteilnetze möglich³². Durchgeführte Forschungsvorhaben [28] bestätigen auch die generelle Möglichkeit einer erhöhten Beimischung von 20 % Wasserstoff zum Erdgas. Eine solche Erhöhung der Beimischungsquote kann jedoch technische Anpassungen und Weiterentwicklungen des Netzes und der Kundenanlagen erfordern³³.

²⁹ P Lückmann, „Herausforderungen eines Wasserstoffquartiers im Reallabor“, 24. Fachkongress Zukunftsenergien, 2020.

³⁰ Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, „Gewinner des Ideenwettbewerbs ‚Reallabore der Energiewende‘ - Steckbriefe“.

³¹ bdew, „Entwicklung der Beheizungsstruktur im Wohnungsneubau : 10-Jahre-Rückblick bis heute.“, 2021, <https://www.bdew.de/service/daten-und-grafiken/entwicklung-beheizungsstruktur-wohnungsneubau/>.

³² DVGW, „H₂ vor Ort.“

³³ DVGW, „H₂ vor Ort.“

Aktuelle Forschungsvorhaben wie das Projekt „Wasserstoff-Insel Öhringen“³⁴ untersuchen die Eignung sowohl des Gasverteilnetzes für den Wasserstofftransport als auch der mit Gas betriebenen Heizgeräte in Haushalten für die Wasserstoffnutzung. Hierzu wird in einem örtlich begrenzten und isolierten Bereich des Verteilnetzes der Wasserstoffanteil auf bis zu 30 % angehoben.

Perspektivisch ist die vollständige Umstellung von Erdgas auf reinen Wasserstoff eine Option. Um die Anforderungen einer solchen Umstellung abzuleiten, wird zurzeit eine Roadmap Gas 2050 entwickelt. Im Rahmen der Erstellung der Roadmap sollen Gasgeräte, Komponenten und Materialien auf ihre Verträglichkeitsgrenzen und ihre Eignung zum Betrieb mit beigemischtem oder reinem Wasserstoff hin untersucht werden. Zeitgleich arbeiten auch Prüf- und Zertifizierungsstellen an Prüfgasen und -bedingungen zur Zertifizierung der Geräte. Für die Leitungen im Gasnetz lässt sich festhalten, dass übliche Kunststoff- und Stahlleitungen im Verteilnetz bis zu 100 % Wasserstoff vertragen. Sollte nichtsdestotrotz ein Austausch erforderlich sein, können nach Einschätzung des DVGW-Punktobjekte, wie z. B. Gasgeräte, mit weniger Planungsaufwand ersetzt werden als Leitungsobjekte. Eine vollständige Umstellung bedeutet auch eine Umstellung der Gasgeräte oder die Installation von Neugeräten beim Letztverbraucher³⁵.

Sollte die Beimischung von oder Umstellung auf Wasserstoff für einzelne Netze keine Option sein, kann auch ein Rückbau des Gasverteilnetzes in Frage kommen. Der Verteilernetzbetreiber unterliegt sowohl bei Investition- als auch Rückbauentscheidungen regulatorischen Beschränkungen, so dass ein solcher Schritt mit der Regulierungsbehörde abzustimmen ist³⁶.

1.4.2 Stand der Wissenschaft und Technik zu Gebäudedaten

Basis-Gebäudedaten in Deutschland waren fragmentiert und nicht flächendeckend öffentlich verfügbar.

Es gab 3D-Gebäudedaten für ganz Deutschland vom BKG, aber nicht frei zugänglich und intern für Validierungszwecke nutzbar sind³⁷.

Ein Teil der Bundesländer stellte zu Projektstart 3D-Gebäudedaten unter offenen Lizenzen zur Verfügung im Level of Detail 2 (LoD2), d.h. Klötzchenmodell mit standardisierter Dachform sowie weitere Attribute wie Gebäudenutzung. Die Herausforderung war hier, dass unterschiedliche Zugriffspunkte (kein gemeinsames Datenportal) und Downloadmechanismen den Zugriff und Verarbeitung erschwerten.

OpenStreetMap-Daten waren für ganz DE verfügbar. Die Daten konnten über <https://download.geofabrik.de/> abgerufen werden. Es gab harmonisierte Formate über Regionen hinweg, aber die Qualität von volunteered geographic information war nicht immer gewährleistet. Außerdem fehlten meist selbst grundlegende Informationen wie z.B. Gebäudehöhe.

Weitere Daten zu Gebäuden bzw. mit Relevanz für Gebäude gab es zu:

- PV-Daten aus der Studie von Risch et al.³⁸
- Höhe über NN aus DEMs

³⁴ NetzeBW, „Die Öhringer Wasserstoff-Insel“, 2021, <https://www.netze-bw.de/unsernetz/netzinnovationen/wasserstoff-insel>.

³⁵ DVGW, „H2 vor Ort.“

³⁶ GEODE, „Auf dem Weg in das neue Zeitalter der Gasnetze“, 2020, <https://www.geode-eu.org/auf-dem-weg-in-das-neue-zeitalter-der-gasnetze-uberlegungen-fur-eine-regulierung-der-zukunftigen-wasserstoffinfrastruktur-in-europa/>.

³⁷ Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, „3D-Gebäudemodelle LoD2 Deutschland“, 2021, <https://gdz.bkg.bund.de/index.php/default/3d-gebauedemodelle-lod2-deutschland-lod2-de.html>.

³⁸ Risch u. a., „Potentials of Renewable Energy Sources in Germany and the Influence of Land Use Datasets“.

- Viele Daten z.B. zu Größenklassen, Baualtersklassen, Energiesystem nicht gebäudescharf vorhanden, sondern nur im 100x100 Gitternetz (Zensus³⁹)
- Sanierungszustand gibt es nur Statistiken auf Landesebene
- Information zum Alter von Heizungssystemen nichts gefunden

Insgesamt war kein einheitlicher, öffentlich zugänglicher Datensatz für Deutschland mit Gebäudedaten mit Informationen über Gebäudegeometrie, Größenklasse, Baualtersklasse, energierelevanten Eigenschaften etc. vorhanden. Das heißt, es war die Entwicklung von Methoden zur Datenzusammenführung und -generierung, räumliche Abfragen, Heuristiken und v.a. ML zum Füllen von Datenlücken erforderlich.

Es gibt Studien für z.B. Höhe, Baujahr etc. (siehe Related Work in Dabrock et al.⁴⁰), aber nichts für Deutschland flächendeckend. XGBoost hat sich als vielversprechendes Modell in vielen Studien herausgestellt (siehe auch o.g. Artikel).

1.4.3 Stand der Wissenschaft und Technik zu Gebäudesimulationstools

Der folgende Abschnitt basiert auf Kapitel 2.4 der Dissertation von Rieck (Preprint)⁴¹

Zur Berechnung von Gebäudeenergiebedarfen und Lastprofilen werden in der Wissenschaft drei Arten von Gebäudeenergiemodellen herangezogen: 1) die White-Box-Modelle, die Energieflüsse und das thermodynamische Zusammenspiel von Gebäude, Energiesystem und Umwelt sehr detailliert mithilfe von physikalischen Gleichungen modellieren, 2) die Black-Box-Modelle, die den Energiebedarf eines Gebäudes nicht errechnen, sondern mithilfe von historischen Daten durch Maschinellem Lernen oder Statistik approximieren bzw. zuordnen und 3) die Grey-Box-Modelle, die eine hybride Methode aus White- und Black-Box-Modell darstellen⁴²⁴³ (siehe Abbildung 4). Je nach Berechnungsmethode ergeben sich erhebliche Unterschiede in Komplexität und Berechnungsgeschwindigkeit.⁴⁴

³⁹ Statistische Ämter des Bundes und der Länder, Hrsg., *Zensus 2011: Zensus Kompakt – Endgültige Ergebnisse*, 2014, www.statistik-bw.de; Statistische Ämter des Bundes und der Länder, „Zensus 2022“.

⁴⁰ Kristina Dabrock u. a., „Generating a Nationwide Residential Building Types Dataset Using Machine Learning“, *Building and Environment* 274 (April 2025): 112782, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2025.112782>; Kristina Dabrock u. a., „Leveraging Machine Learning to Generate a Unified and Complete Building Height Dataset for Germany“, *Energy and AI* 17 (September 2024): 100408, <https://doi.org/10.1016/j.egyai.2024.100408>.

⁴¹ Katharina Rieck, „Zukünftige Energieversorgung des deutschen Wohngebäudebestands“ (Preprint, RWTH Aachen, 2025).

⁴² Katharina Rieck, „Zukünftige Energieversorgung des deutschen Wohngebäudebestands“ (Preprint, RWTH Aachen, 2025); M Nadarajan und V Kirubakaran, *SIMULATION TOOLS FOR RESIDENTIAL BUILDINGS-A REVIEW ON CONCEPTS AND TECHNOLOGIES*, 11, Nr. 5 (2016).

⁴³ Gianluca Serale u. a., „Model Predictive Control (MPC) for Enhancing Building and HVAC System Energy Efficiency: Problem Formulation, Applications and Opportunities“, *Energies* 11, Nr. 3 (2018): 631, <https://doi.org/10.3390/en11030631>.

⁴⁴ Katharina Rieck, „Zukünftige Energieversorgung des deutschen Wohngebäudebestands“ (Preprint, RWTH Aachen, 2025).

Methode	Stärken	Schwächen
White-Box	beschreibt Thermodynamik des Gebäudes, benötigt keine historischen Daten, hohe Präzision und Genauigkeit	benötigt detaillierte Angaben über das Gebäude, hohe Komplexität und Rechenaufwand
Black-Box	benötigt keine physikalischen Angaben über das Gebäude, schneller in der Gebäudeanalyse als White-Box-Modelle	benötigt einen großen und vielfältigen Datensatz als Trainingsinput, Algorithmen für Trainingsdaten oft sehr rechenintensiv, schwerer nachvollziehbar
Grey-Box	nutzt die Vorteile von White- und Black-Box-Modellen	benötigt ein robustes Modelldesign

Abbildung 4: Vergleich verschiedener Modellierungsmethoden für Gebäude und deren Energiesysteme. Quelle: Preprint der Dissertation von Rieck⁴⁵

“Grey-Box-Modelle erweisen sich bei der Berechnung von Gebäudeenergiebedarfen als guter Kompromiss zwischen Rechenaufwand und Nachvollziehbarkeit. In dieser Literaturrecherche wurden bislang nur wenige dieser Modelle gefunden, die für wissenschaftliche Zwecke geeignet sind. Für die Analysen dieser Studie wird ein Gebäudesimulationstool benötigt, das einsichtig, open-source, modular erweiterbar, validierbar und akkurat ist, dynamische Wärmeflüsse hochaufgelöst berechnen sowie Energielastprofile verschiedener Gebäude- und Haushaltskomponenten detailliert simulieren kann. Es darf nicht zu komplex oder rechenintensiv sein, da es für großflächige Gebäudebestandsanalysen eingesetzt werden soll. Ein solches Programm wurde im Rahmen dieser Literaturrecherche nicht gefunden, weshalb für die Beantwortung der Fragestellungen in dieser Arbeit ein institutsinternes Grey-Box-Gebäudesimulationstool, ETHOS.HiSim, verwendet wird.”⁴⁶

Beispiele für bekannte Grey-Box-Gebäudeenergiesimulationstools

⁴⁵ Rieck, „Zukünftige Energieversorgung des deutschen Wohngebäudebestands“.

⁴⁶ Rieck, „Zukünftige Energieversorgung des deutschen Wohngebäudebestands“.

Grey-Box-Modelle werden in mehreren Studien verwendet^{47,48}. Bekannte Beispiele für Grey-Box-Modelle im Gebäudebereich sind DALEC⁴⁹, pyBuildingEnergy⁵⁰ oder BuildMe⁵¹.

„DALEC ist ein 2014 von der Universität Innsbruck entwickeltes Onlineprogramm für Architekt:innen zur Planung von Lichtkonzepten und Berechnungen von Heiz-, Kühl- und Lichtbedarfen in Gebäuden. Es basiert auf einem dynamischen Gebäudemodell und verwendet vereinfachte Algorithmen und Berechnungsverfahren sowie tabellarische vorsimulierte Parameter. Das Programm steht frei zur Verfügung, erlaubt aber keinen Einblick in die zugrunde liegende Software.“⁵²

„PyBuildingEnergy ist ein 2024 entwickeltes, open-source Python-Programm zur Simulation von Gebäudeenergiebedarfen auf Grundlage der ISO Norm EN-ISO52016 and EN-ISO52010. Es wurden keine wissenschaftlichen Studien oder Validierungen zu diesem Modell gefunden.“⁵³

„BuildMe ist ein web-basiertes Gebäudeenergiemodell entwickelt für Dekarbonisierungsprojekte in der MENA Region (Mittlerer Osten und Nordafrika), das Energieverbräuche und Kosten auf Basis der ISO-Norm 52016 berechnet. Es ist frei nutzbar, allerdings gibt es keinen Einblick in den Quellcode.“^{54,55}

“Grey-Box-Modelle erweisen sich bei der Berechnung von Gebäudeenergiebedarfen als guter Kompromiss zwischen Rechenaufwand und Nachvollziehbarkeit. In dieser Literaturrecherche wurden bislang nur wenige dieser Modelle gefunden, die für wissenschaftliche Zwecke geeignet sind. Für die Analysen dieser Studie wird ein Gebäudesimulationstool benötigt, das einsichtig, open-source, modular erweiterbar, validierbar und akkurat ist, dynamische Wärmeflüsse hochaufgelöst berechnen sowie Energielastprofile verschiedener Gebäude- und Haushaltskomponenten detailliert simulieren kann. Es darf nicht zu komplex oder rechenintensiv sein, da es für großflächige Gebäudebestandsanalysen eingesetzt werden soll. Ein solches Programm wurde im Rahmen dieser Literaturrecherche nicht gefunden, weshalb für die Beantwortung der Fragestellungen in dieser Arbeit ein institutsinternes Grey-Box-Gebäudesimulationstool, ETHOS.HiSim, verwendet wird.“⁵⁶

⁴⁷ Amir Shahcheraghian u. a., „From White to Black-Box Models: A Review of Simulation Tools for Building Energy Management and Their Application in Consulting Practices“, *Energies* 17, Nr. 2 (2024): 376, <https://doi.org/10.3390/en17020376>; Zhongjiao Ma u. a., „A Review of the Influencing Factors of Building Energy Consumption and the Prediction and Optimization of Energy Consumption“, *AIMS Energy* 13, Nr. 1 (2025): 35–85, <https://doi.org/10.3934/energy.2025003>.

⁴⁸ Yiqun Pan u. a., „Building Energy Simulation and Its Application for Building Performance Optimization: A Review of Methods, Tools, and Case Studies“, *Advances in Applied Energy* 10 (Juni 2023): 100135, <https://doi.org/10.1016/j.adapen.2023.100135>.

⁴⁹ „DALEC - Building Energy under Control“, with Universität Innsbruck, zugegriffen 20. Februar 2025, <https://dalec.zumtobel.com/#room>; „DALEC - Day- and Artificial Light with Energy Calculation“, with Universität Innsbruck, zugegriffen 20. Februar 2025, <https://www.uibk.ac.at/bauphysik/forschung/projects/dalec/index.html.de>.

⁵⁰ Daniele Antonucci u. a., *EURAC-EEBgroup/pyBuildingEnergy: 1.0.5*, o. J., zugegriffen 17. Februar 2025, <https://zenodo.org/records/10887920>.

⁵¹ Guidehouse, „BUILD_ME - Building Energy Performance Tool“, o. J., zugegriffen 17. Februar 2025, <https://www.buildings-mena.com/info/building-energy-performance-tool>.

⁵² Rieck, „Zukünftige Energieversorgung des deutschen Wohngebäudebestands“; „DALEC - Day- and Artificial Light with Energy Calculation“.

⁵³ Rieck, „Zukünftige Energieversorgung des deutschen Wohngebäudebestands“; Antonucci u. a., *EURAC-EEBgroup/pyBuildingEnergy: 1.0.5*.

⁵⁴ Rieck, „Zukünftige Energieversorgung des deutschen Wohngebäudebestands“.

⁵⁵ Guidehouse, „BUILD_ME - Building Energy Performance Tool“.

⁵⁶ Rieck, „Zukünftige Energieversorgung des deutschen Wohngebäudebestands“.

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Im Rahmen dieses Projektes fand keine Zusammenarbeit mit anderen Instituten statt.

2. Eingehende Darstellung

2.1 Erzielte Ergebnisse

2.1.1 Ergebnisse des AP1

Der folgende Abschnitt basiert zum Großteil auf den Kapitel 2.5, 3.1, 4.1 und 4.3 der Dissertation von Rieck (Preprint)⁵⁷. Abbildungs- und Literaturreferenzen sind gegenüber dem Originaltext angepasst.

2.1.1.1 Gebäudedatenbank ETHOS.BUILDA

Als zentrales Ergebnis des AP1 geht die Gebäudedatenbank ^{ETHOS.BUILDA⁵⁸} hervor. Sie umfasst gebäudespezifische Daten zu Typ, Größe, Alter, Renovierungsstandard, Höhe, Standort, Grundriss, Energieträger, Dachflächen-PV-Potential, Neigung und Ausrichtung sowie Haushaltsdaten wie Bewohneranzahl, -alter und -einkommen⁵⁹. Einen Eindruck der Datenbeschaffenheit zeigen die Abbildungen 5-9.

“In Abbildung 5a ist die räumliche Verteilung des Stichprobengebäudedatensatzes dargestellt, aufgeschlüsselt nach den vier Gebäudetypen Einfamilienhaus, Reihenhaushaus, Mehrfamilienhaus und Wohnblock. Es zeigt sich, dass Einfamilienhäuser am häufigsten vertreten sind und sowohl in städtischen als auch in ländlichen Regionen Deutschlands vorkommen. In dicht besiedelten Gebieten, wie im Westen Deutschlands oder in Städten wie Hamburg und Berlin, ist der Anteil anderer Gebäudetypen wie Reihenhäuser, Mehrfamilienhäuser und Wohnblöcke im Vergleich zu ländlichen Regionen höher. Besonders viele Wohnblöcke sind in Berlin vertreten⁶⁰.

Jeder Postleitzahl ist eine TRY-Wetterregion (Testreferenzjahr) mit Klimadaten gemäß der DIN-Norm DIN/TS 12831-1 zugeordnet⁶¹. Abbildung 5b zeigt die räumliche Verteilung des Gebäudebestands in den 15 verschiedenen TRY-Regionen (...). Die TRY-Region 11 (Fichtelberg) weist das kälteste Klima auf, während die Region 12 (Mannheim) die wärmste ist (...). Standorte, denen keine Klimadaten von

⁵⁷ Katharina Rieck, „Zukünftige Energieversorgung des deutschen Wohngebäudebestands“ (Preprint, RWTH Aachen, 2025).

⁵⁸ Forschungszentrum Jülich, „ETHOS-BUILDA API documentation“.

⁵⁹ Rieck, „Zukünftige Energieversorgung des deutschen Wohngebäudebestands“; Katharina Rieck u. a., „Large-Scale Quantification of the Future Self-Covered Heat Demand Using a Nationwide Residential Building Database“, *Energy* 317 (Februar 2025): 134622, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.134622>.

⁶⁰ Rieck u. a., „Large-Scale Quantification of the Future Self-Covered Heat Demand Using a Nationwide Residential Building Database“.

⁶¹ DIN Deutsches Institut für Normung e. V. und DIN-Normenausschuss Heiz- und Raumlufttechnik sowie deren Sicherheit (NHRS), „Method for calculation of the room heat load - Part 1: National addition to DIN EN 12831-1, with CD-ROM“, April 2020, <https://www.dinmedia.de/de/vornorm/din-ts-12831-1/316645651>.

TRY zugeordnet werden konnten, wie einige Inseln, zum Beispiel Insel Poel oder Helgoland, wurden aus dem Datensatz herausgenommen⁶².⁶³

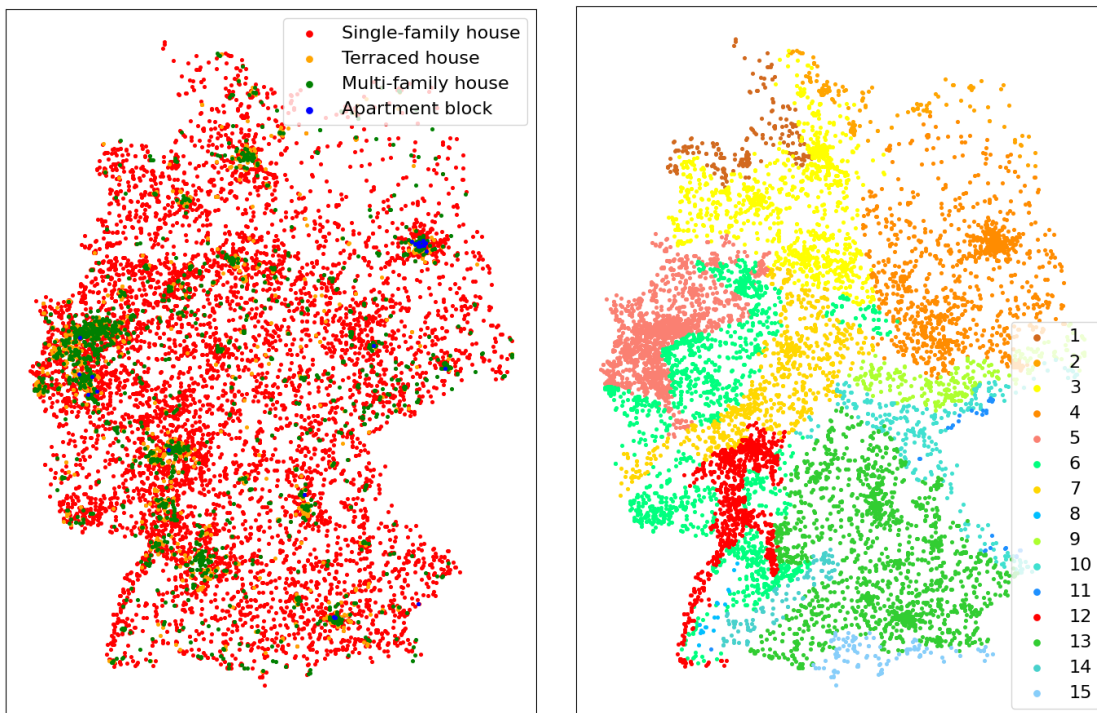


Abbildung 5: Gebäudestandorte im Stichprobendatensatz, aufgeschlüsselt nach Gebäudetyp (links) und TRY-Wetterregionen (rechts): Quellen: Rieck et al.⁶⁴

“Die Berechnung der beheizten Wohnfläche in ETHOS.BUILDA ist in Dabrock et al.⁶⁵ beschrieben. Die Verteilung der beheizten Wohnflächen (...) im Stichprobendatensatz zeigt, dass der Wertebereich der Mehrfamilienhäuser (Multi-family house) deutlich breiter ist und zu größeren Flächen tendiert als der von Einfamilienhäusern (Single-family house) und Reihenhäusern (Terraced house). Dies ist zu erwarten, da Einfamilienhäuser und Reihenhäuser Gebäude mit 1-2 Wohneinheiten darstellen, während Mehrfamilienhäuser ein wesentlich breiteres Spektrum von 3-12 Wohneinheiten abdecken. Wohnblöcke (Apartment block) sind in dieser Abbildung kaum sichtbar, da ihr Anteil am Gebäudebestand lediglich 0,3% beträgt⁶⁶.

Wie in den Abbildungen 6a und 6b gezeigt, besteht eine hohe Übereinstimmung zwischen dem Datensatz und den Referenzdaten für Reihen- und Mehrfamilienhäuser. Die durchschnittlichen beheizten

⁶² Rieck u. a., „Large-Scale Quantification of the Future Self-Covered Heat Demand Using a Nationwide Residential Building Database“.

⁶³ Rieck, „Zukünftige Energieversorgung des deutschen Wohngebäudebestands“; Katharina Rieck u. a., „Large-Scale Quantification of the Future Self-Covered Heat Demand Using a Nationwide Residential Building Database“, *Energy* 317 (Februar 2025): 134622, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.134622>.

⁶⁴ Rieck, „Zukünftige Energieversorgung des deutschen Wohngebäudebestands“; Katharina Rieck u. a., „Large-Scale Quantification of the Future Self-Covered Heat Demand Using a Nationwide Residential Building Database“, *Energy* 317 (Februar 2025): 134622, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.134622>.

⁶⁵ Kristina Dabrock u. a., „Generating a Nationwide Residential Building Types Dataset Using Machine Learning“, *Building and Environment* 274 (April 2025): 112782, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2025.112782>.

⁶⁶ Rieck u. a., „Large-Scale Quantification of the Future Self-Covered Heat Demand Using a Nationwide Residential Building Database“.

Wohnflächen für Reihen- und Mehrfamilienhäuser im Stichprobendatensatz betragen 134 m² bzw. 504 m². Die Referenzwerte für diese Gebäudetypen liegen bei 140 m² und 430 m². Für Einfamilienhäuser und Wohnblöcke liegen die durchschnittlichen beheizten Wohnflächen mit 190 m² und 2419 m² hingegen über den jeweiligen Referenzwerten von 161 m² und 1445 m². Dies konnte darauf zurückzuführen sein, dass die Eingangsdaten aus OpenStreetMap gelegentlich Gebäudeeinträge enthalten, die in Wirklichkeit aus mehreren Gebäuden bestehen, zum Beispiel ein Block von Wohnblöcken oder eine Reihe von Reihenhäusern, die fälschlicherweise als ein einziges großes Gebäude erfasst wurden.“⁶⁷

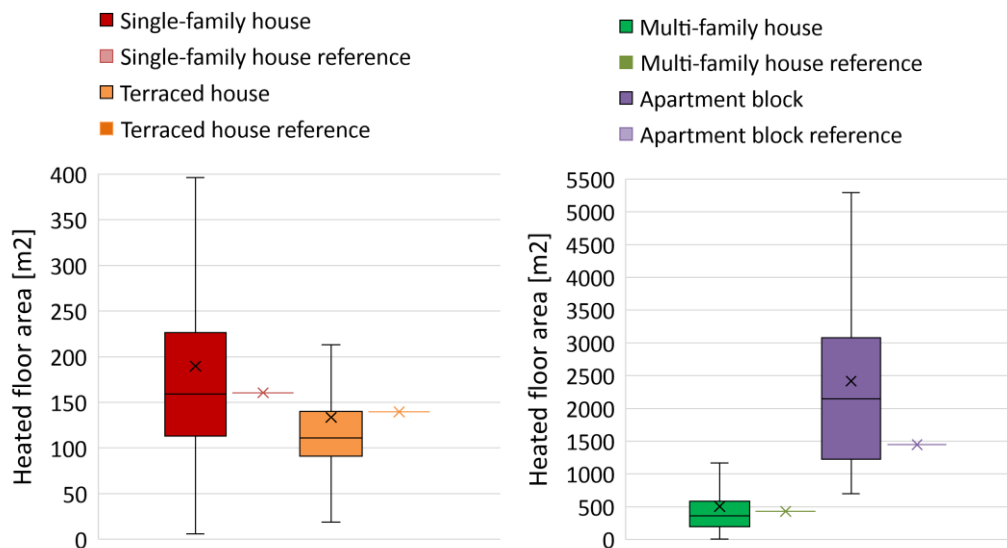


Abbildung 6: Untersuchung der beheizten Wohnflächen [m²] im Stichprobendatensatz und Vergleich mit Literaturwerten. Quellen: Rieck et al.^{68,69}

„Die Verteilungen der Azimut- und Neigungswinkel entsprechen den PV-Potenzialdaten von Risch et al.⁷⁰ (siehe Abbildung 7). Die Azimutwinkel sind symmetrisch verteilt mit den höchsten Anteilen in Süd- und Nordrichtung, gefolgt von Ost- und Westrichtung. Der durchschnittliche Azimutwert liegt bei 183° (Südausrichtung)⁷¹. Die Dachneigungswinkel liegen zwischen 10° und 90°.“⁶⁷

⁶⁷ Rieck, „Zukünftige Energieversorgung des deutschen Wohngebäudebestands“; Rieck u. a., „Large-Scale Quantification of the Future Self-Covered Heat Demand Using a Nationwide Residential Building Database“.

⁶⁸ Rieck, „Zukünftige Energieversorgung des deutschen Wohngebäudebestands“; Rieck u. a., „Large-Scale Quantification of the Future Self-Covered Heat Demand Using a Nationwide Residential Building Database“.

⁶⁹ Episcopo, *Statistics of the German Building Stock*, 2014, <https://episcopo.eu/building-typology/country/de.html>.

⁷⁰ „Risch et al. - 2022 - Potentials of Renewable Energy Sources in Germany .pdf“, o. J.

⁷¹ Rieck u. a., „Large-Scale Quantification of the Future Self-Covered Heat Demand Using a Nationwide Residential Building Database“.

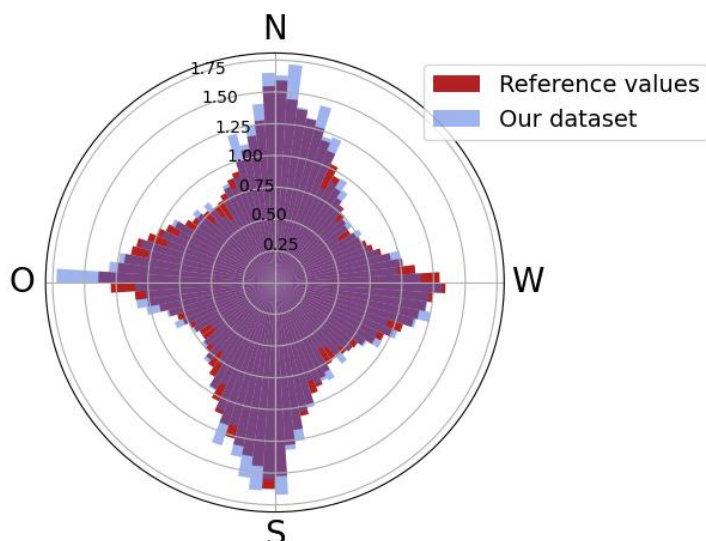


Abbildung 7: Verteilung der Azimut-Winkel der Dachflächen-PV-Anlagen. Der Radius entspricht dem Anteil in [%]. Quellen: Rieck et al.⁷²

„Der Energiebedarf eines Gebäudes hängt vom Verhalten der Bewohner und den Lastprofilen der Haushalte ab⁷⁰. Mithilfe der Software LoadProfileGenerator (LPG, ⁷³) können 64 verschiedene Haushaltstypen mit variierender Anzahl an Bewohner sowie unterschiedlichen Lebensstilen und Tagesabläufen erzeugt werden. Jeder Haushalt liefert spezifische Lastprofile, zum Beispiel für Wasser-, Wärme- und Strombedarf sowie interne Wärmegewinne durch Personen und Geräte⁷⁰.

Auf Grundlage der Bewohnerdaten der Gebäudedatenbank ETHOS.BUILD A wird jeder Wohneinheit im Gebäude das entsprechende LPG-Haushaltsmodell zugewiesen. Wenn dasselbe Profil in einem Gebäude mehrfach vorkommt, wird eine eindeutige Kennung verwendet, um die Bewohnerlastprofile leicht zu variieren und so voneinander abzugrenzen. Abbildung 8 (...) zeigt die unterschiedlichen Haushaltstypen (...) im Stichprobendatensatz im Vergleich zu den Referenzdaten aus dem Zensus⁷⁴. Die Werte weichen weniger als 1% von den Eingabedaten des Zensus ab.“⁷⁰

⁷² Rieck, „Zukünftige Energieversorgung des deutschen Wohngebäudebestands“; Rieck u. a., „Large-Scale Quantification of the Future Self-Covered Heat Demand Using a Nationwide Residential Building Database“.

⁷³ „Pflugradt et al. - 2022 - LoadProfileGenerator An Agent-Based BehaviorSimul.pdf“, o. J.

⁷⁴ „2014 - Zensus 2011 Zensus Kompakt – Endgültige Ergebniss.pdf“, o. J.

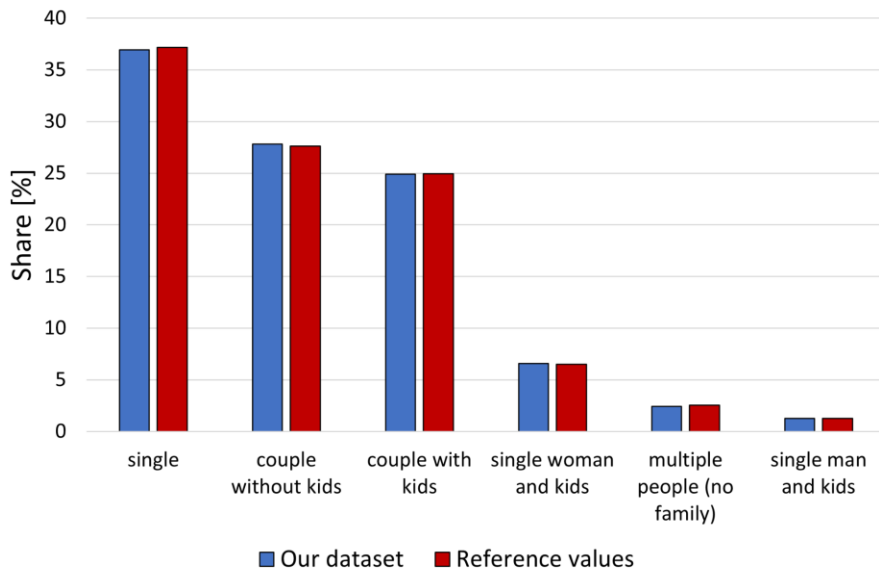


Abbildung 8: Haushaltstypen im Gebäudedatensatz im Vergleich zu Zensusdaten. Quellen: Rieck et al.⁷⁵

⁷⁵ Rieck, „Zukünftige Energieversorgung des deutschen Wohngebäudebestands“; Rieck u. a., „Large-Scale Quantification of the Future Self-Covered Heat Demand Using a Nationwide Residential Building Database“.

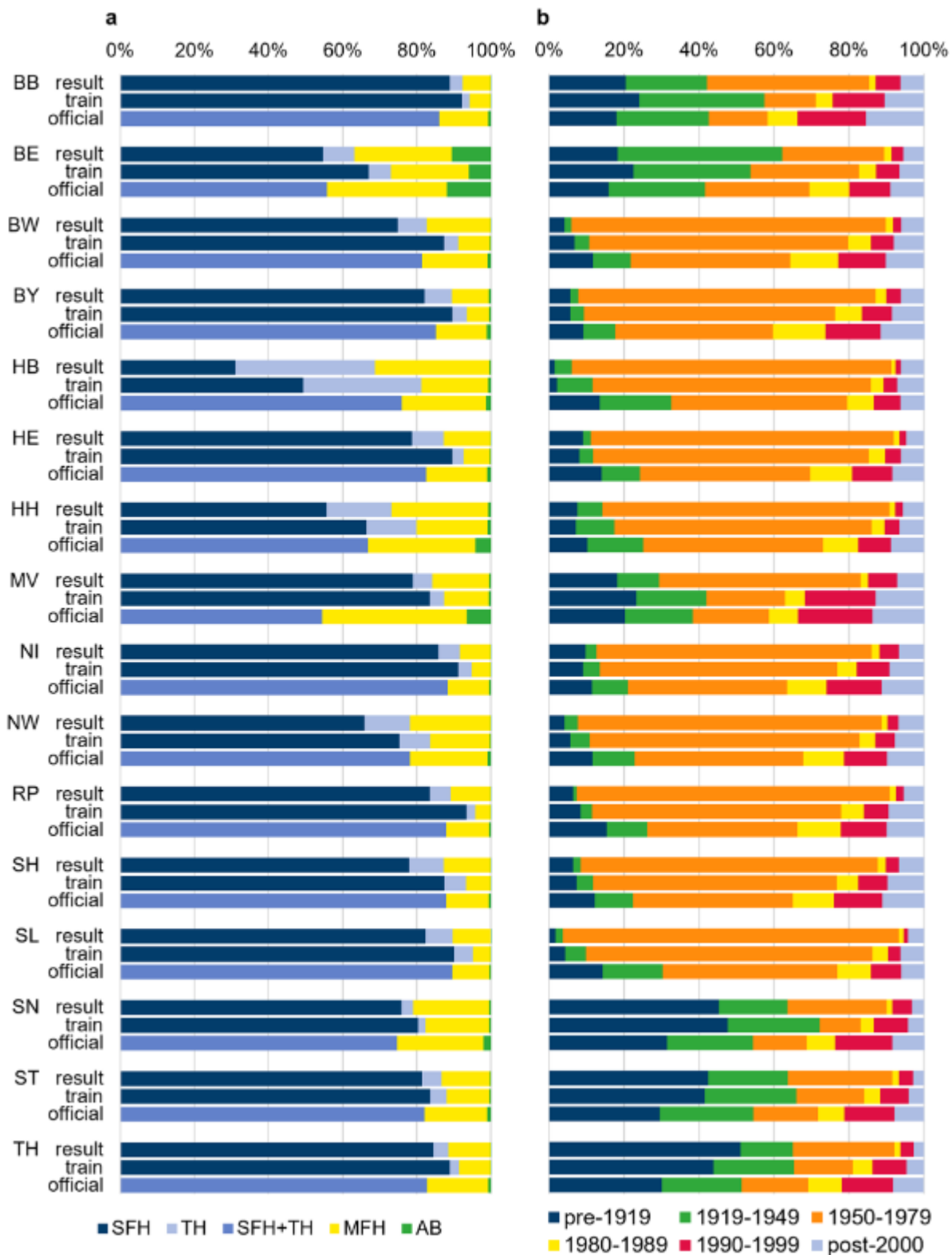


Abbildung 9: Anteil der (a) Größenklassen und (b) Baujahre in den deutschen Bundesländern im Trainingsdatensatz, im daraus resultierenden Datensatz sowie in den amtlichen Statistiken. In den amtlichen Statistiken ist die jüngste Baujahreskategorie der Zeitraum 2000–2011. Quelle: Dabrock et al.⁷⁶

⁷⁶ Kristina Dabrock u. a., „Generating a Nationwide Residential Building Types Dataset Using Machine Learning“, *Building and Environment* 274 (April 2025): 112782, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2025.112782>.

“Ein wichtiges Feature, das für die Berechnung des Energieverbrauch und der Gebäude-Thermodynamik verwendet wird, ist der Tabula-Typ⁷⁷. Mehrere Studien haben das Tabula-Model genutzt und validiert und bestätigen seine Eignung als Instrument zur Bewertung der energetischen Eigenschaften bestehender Gebäudebestände⁷⁸. Die Genauigkeit des Modells hängt jedoch stark von der Verfügbarkeit statistischer Gebäudebestandsdaten und von der Zuweisung der Tabula-Gebäudetyps zu einzelnen Gebäuden ab⁷⁹⁸⁰. In der Studie von Dabrock et al.⁸¹ weist ETHOS.BUILDA den Tabula-Typ basierend auf einer separaten Zuweisung von Größenklasse, Baualtersklasse und Sanierungszustand zu, woraus sich anschließend die Tabula-Gebäudecodes ableiten lassen. Da keine der drei Eigenschaften auf Gebäudeebene direkt verfügbar ist, nutzt ETHOS.BUILDA einen Ansatz des maschinellen Lernens. Die Kennzeichnung der Trainingsdaten basierte hauptsächlich auf dem deutschen Zensus von 2011⁸², wobei eine Vielzahl von gebäude- und nachbarschaftsbezogenen morphologischen Merkmalen sowie sozioökonomische Daten als Merkmale für das Training des Modells dienten. Gemäß der Tabula-Klassifizierung sind die deutschen Wohngebäude in Gebäudetypen unterteilt sowie in Baualtersklassen und Sanierungsstandard⁸³.

Neben dem Tabula-Gebäudecode enthält die Gebäudedatenbank Informationen zur beheizten Wohnfläche, zur Norm-Heizlast, zur Adresse und Grundriss sowie der installierbare Dachflächen-PV-Leistung. Die Datenbank nutzt öffentliche Daten aus Zensus⁸⁴, OpenStreetMap⁸⁵ und LoD2⁸⁶. Diese Datensätze liefern grundlegende Informationen über die Lage und den Grundriss von Gebäuden. Zusätzliche Informationen, wie zum Beispiel die Nutzungsart eines Gebäudes oder dessen Höhe, sind in den 3D-Gebäudedaten und teilweise auch in den OpenStreetMap-Daten verfügbar. In ETHOS.BUILDA werden diese Basisdaten durch weitere Datensätze angereichert und fehlende Informationen werden mithilfe von maschinellem Lernen imputiert.”⁸⁷

Die genaue Methodik und Validierung der Gebäudedatenbank ist in den Studien von Dabrock et al. beschrieben.⁸⁸

2.1.1.2 Gebäudeclustering zur Erstellung eines Typgebäudedatensatzes

⁷⁷ Dabrock u. a., „Generating a Nationwide Residential Building Types Dataset Using Machine Learning“, April 2025.

⁷⁸ „Dascalaki et al. - 2011 - Building typologies as a tool for assessing the en.pdf“, o. J.

⁷⁹ „Ballarini et al. - 2014 - Use of reference buildings to assess the energy sa.pdf“, o. J.

⁸⁰ „Hettinga et al. - 2023 - Large scale energy labelling with models The EU T.pdf“, o. J.

⁸¹ Dabrock u. a., „Generating a Nationwide Residential Building Types Dataset Using Machine Learning“, April 2025.

⁸² „2014 - Zensus 2011 Zensus Kompakt – Endgültige Ergebniss.pdf“.

⁸³ Episcopo, *Statistics of the German Building Stock*, 2014, <https://episcopo.eu/building-typology/country/de.html>.

⁸⁴ „2014 - Zensus 2011 Zensus Kompakt – Endgültige Ergebniss.pdf“.

⁸⁵ „OpenStreetMap“, OpenStreetMap, o. J., zugegriffen 21. Juni 2025, <https://www.openstreetmap.org/#map=7/51.330/10.453>.

⁸⁶ „3d-gebauemodelle-lod2-deutschland-lod2-de.html“, o. J., zugegriffen 27. Juni 2023, <https://gdz.bkg.bund.de/index.php/default/3d-gebauemodelle-lod2-deutschland-lod2-de.html>.

⁸⁷ Rieck, „Zukünftige Energieversorgung des deutschen Wohngebäudebestands“.

⁸⁸ Dabrock u. a., „Generating a Nationwide Residential Building Types Dataset Using Machine Learning“, April 2025; Dabrock u. a., „Leveraging Machine Learning to Generate a Unified and Complete Building Height Dataset for Germany“.

„Um den Datenumfang der 20 Mio. Wohngebäude für Simulationszwecke zu reduzieren, wird ein Clustering durchgeführt. Die Clustering-Methode wurde auf Grundlage früherer Studien entwickelt und validiert⁸⁹.“⁹⁰

„Durch das Gebäudeclustering wurden 7,4 Mio. Wohngebäudedaten erfasst, was knapp 38% des realen deutschen Wohngebäudebestands entspricht. Analysen der lokalen Verteilung zeigen, dass insbesondere in NUTS-2-Regionen der Bundesländer Nordrhein-Westfalen, Hessen, Rheinland-Pfalz, Saarland, Brandenburg, Sachsen-Anhalt, Mecklenburg-Vorpommern und Schleswig-Holstein Datenlücken bestehen (...). Mögliche Ursachen hierfür sind, dass entweder die Datenbank nicht alle Wohngebäudedaten enthält oder dass im Zuge der Datenverarbeitung einzelne Datensätze aus unbekanntem Gründen aussortiert und nicht vollständig verarbeitet wurden. Letzteres erscheint wahrscheinlicher, da die Abfrage und Verarbeitung der Gebäudedaten sehr datenintensiv ist und Datenlücken momentan während der Prozessierung schwer messbar sind. Für künftige Analysen ist geplant, das Clustering mit verbessertem Monitoring zu wiederholen, um die Datenqualität zu erhöhen. Von den 7,4 Mio. übrigen Wohngebäuden konnten durch das Clustering ca. 159 Tausend repräsentative Gebäude ausfindig gemacht werden, das bedeutet der Datensatz wurde um 98% reduziert (siehe Abbildung 10).

Aus den Gruppen, die aus mehr als 20 Gebäuden bestanden (10497 Gruppen), gehen insgesamt 139606 Cluster hervor. Dies sind im Schnitt etwa 13 Cluster pro Gruppe (...).

Wichtige Merkmale zur Identifikation und Abgrenzung der Cluster waren das Gesamthaushaltseinkommen, die Anzahl, das Alter und der Erwerbsstatus der Bewohner sowie die Zahl der Wohneinheiten und Dachflächeneigenschaften wie PV-Kapazität und Dachform. Für jedes Cluster wurde ein repräsentatives Gebäude bestimmt, welches mehrere Wohngebäude repräsentiert. Im Schnitt werden pro Cluster 52 Gebäude abgebildet, im Minimalfall nur ein Gebäude, im Maximalfall 773 (...). Aus den Clustern ergeben sich insgesamt 139.606 repräsentative Gebäude, die 7.293.074 Gebäude repräsentieren. Gruppen mit weniger als 20 Gebäuden (19.139 Gruppen), wurden nicht geclustert, sondern gemittelt. In diesem Fall wurde jeweils das Gebäude ausgewählt, das dem Mittelwert am nächsten lag, und als repräsentatives Gebäude festgelegt, sodass aus jeder nicht geclusterten Gruppe ein repräsentatives Gebäude hervorgeht.

Die am häufigsten repräsentierten Gruppen sind die Einfamilienhäuser (Single-family house, SFH) aus den Wetterregionen 03 (Wetterstation Hamburg), 05 (Wetterstation Essen) und 13 (Wetterstation Mühldorf) mit den Baualtersklassen 04 (Baujahr 1949-1957) bis 06 (Baujahr 1969-1978) mit einem schlechten bis mittelmäßigen Sanierungsstandard (001.001 und 001.002) sowie einer mittelmäßigen Größe (Größenkategorie 2: 50-166 m² und Größenkategorie 3: 167-282 m²) (siehe Abbildung 11). Die Energieträger der am häufigsten vorkommenden Wohngebäuden sind Gas (10) und Öl (3) (...). Die hier präsentierten Gruppen umfassen jeweils 257-458 repräsentative Gebäude und machen zusammen bereits 8,5% des gesamten geclusterten Wohngebäudebestands aus. Jedes Cluster wurde mithilfe vier verschiedener Metriken auf seine Qualität geprüft (...).

Der Silhouetten-Koeffizient gibt an, wie gut separiert und kompakt die Cluster sind⁹¹. Silhouetten-Koeffizienten über 0,5 weisen auf eine gute Cluster-Separierung hin. Für die deutschen Cluster wurde ein mittlerer Silhouetten-Koeffizient von 0,42 +/- 0,7 ermittelt (siehe Abbildung 12). Dies ist ein mittelmäßiges Ergebnis. Es zeigt, dass die Wohngebäude im Durchschnitt recht gut mit ihrem eigenen Cluster übereinstimmen und zu den Gebäuden aus anderen Clustern eher unähnlich sind.

⁸⁹ „Eggimann et al. - 2022 - Spatiotemporal upscaling errors of building stock .pdf“, o. J.

⁹⁰ Rieck, „Zukünftige Energieversorgung des deutschen Wohngebäudebestands“.

⁹¹ Alfonso Cervantes Barragan, „Interpreting and Validating Clustering Results with K-Means“, 2024, <https://medium.com/@a.cervantes2012/interpreting-and-validating-clustering-results-with-k-means-e98227183a4d>.

Die Wurzel der mittleren quadrierten Abweichungen (RMSSTD) gibt an, wie stark die Gebäude mit all ihren Features vom jeweiligen Clusterzentrum abweichen und ist ein Maß für die Cluster-Kompaktheit [259]. Ein niedriger RMSSTD-Wert bedeutet, dass die Gebäude innerhalb des Clusters einander ähnlicher sind und das Cluster somit kompakter und besser definiert ist. In diesem Fall ist der mittlere RMSSTD $1 \pm 0,43$ (siehe Abbildung 12), was zeigt, dass die Clusterkompaktheit im Schnitt nicht allzu groß ist und die Cluster leicht zerstreut sind.

Der Davies-Bouldin-Index sagt aus, wie ähnlich sich die einzelnen Cluster sind⁹². Davies-Bouldin-Indizes unter 1 zeigen, dass Cluster gut separiert und kompakt sind. In dieser Analyse wurde ein mittlerer Davies-Bouldin-Index von $0,76 \pm 0,14$ bestimmt, was ein gutes Ergebnis ist (siehe Abbildung 12). Insgesamt zeigen die Clustermetriken, dass die Analyse stabile und sinnvolle Cluster liefert, auch wenn leichte Überschneidungen bestehen und die Trennung nicht perfekt ist. Angesichts der hohen Komplexität des Datensatzes und der Vielzahl an Merkmalen ist das Ergebnis jedoch plausibel und das Clustering erweist sich als gelungen.“⁹³

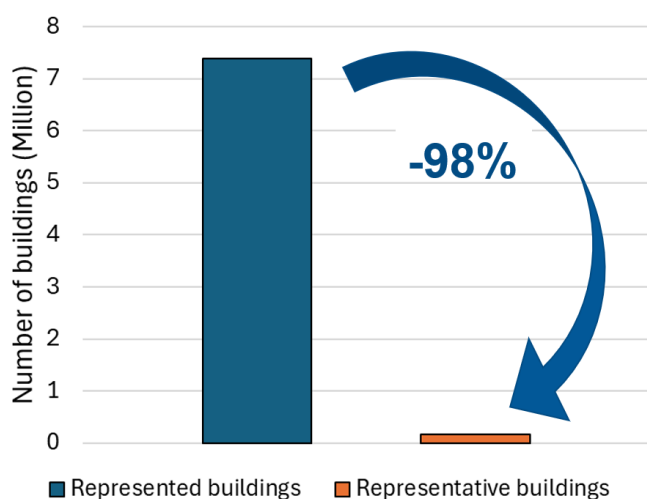


Abbildung 10: Anzahl der Wohngebäude im Gesamtdatenbestand im Vergleich zum repräsentativen Datensatz. Quellen: Rieck et al.⁹⁴

⁹² Barragan, „Interpreting and Validating Clustering Results with K-Means“.

⁹³ Rieck, „Zukünftige Energieversorgung des deutschen Wohngebäudebestands“.

⁹⁴ Rieck, „Zukünftige Energieversorgung des deutschen Wohngebäudebestands“; Rieck u. a., „Large-Scale Quantification of the Future Self-Covered Heat Demand Using a Nationwide Residential Building Database“.

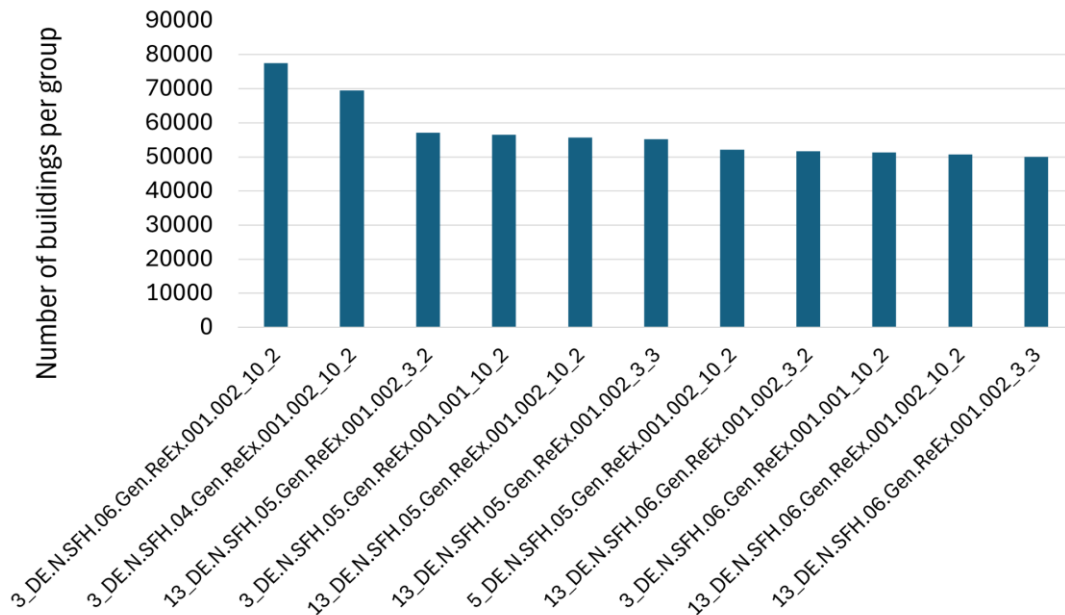


Abbildung 11: Gruppen des geclusterten deutschen Wohngebäudebestands, die mehr als 50.000 Wohngebäude umfassen. Die Gruppen werden durch folgende Merkmale beschrieben: 1. Deutsche Wetterregion, 2. Tabula-Gebäudetyp, 3. Heizungsenergieträger und 4. Größenkategorie. Quellen: Rieck et al.⁹⁵

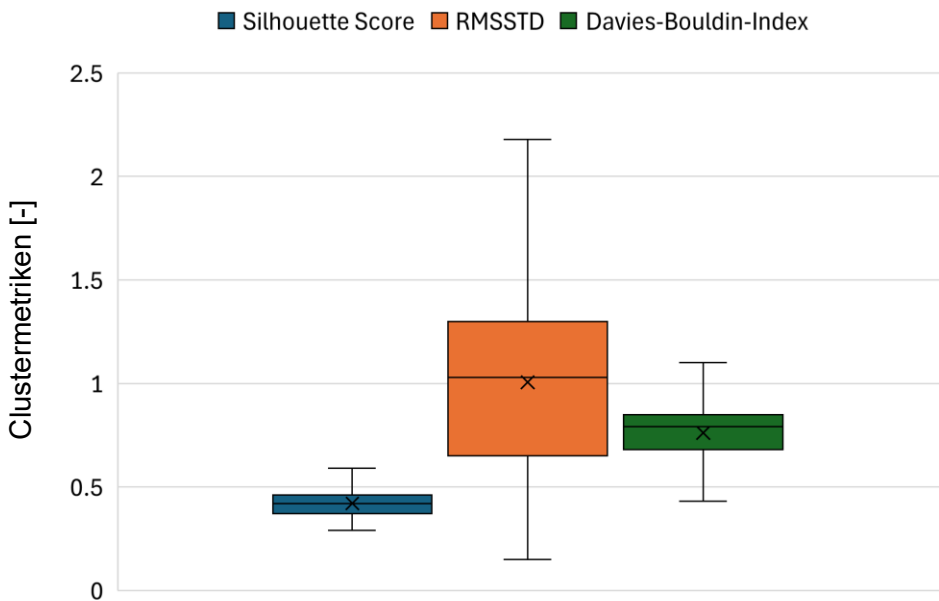


Abbildung 12: Clustermetriken des geclusterten deutschen Wohngebäudebestands. Silhouette-Koeffizienten (blau), Wurzel der mittleren quadrierten Abweichungen (RMSSTD, orange) und Davies-Bouldin-Index (grün) für die einzelnen Wohngebäudecluster. Die Ausreißer wurden mit der IQR-Methode entfernt. Quellen: Rieck et al.⁹⁶

⁹⁵ Rieck, „Zukünftige Energieversorgung des deutschen Wohngebäudebestands“; Rieck u. a., „Large-Scale Quantification of the Future Self-Covered Heat Demand Using a Nationwide Residential Building Database“.

⁹⁶ Rieck, „Zukünftige Energieversorgung des deutschen Wohngebäudebestands“; Rieck u. a., „Large-Scale Quantification of the Future Self-Covered Heat Demand Using a Nationwide Residential Building Database“.

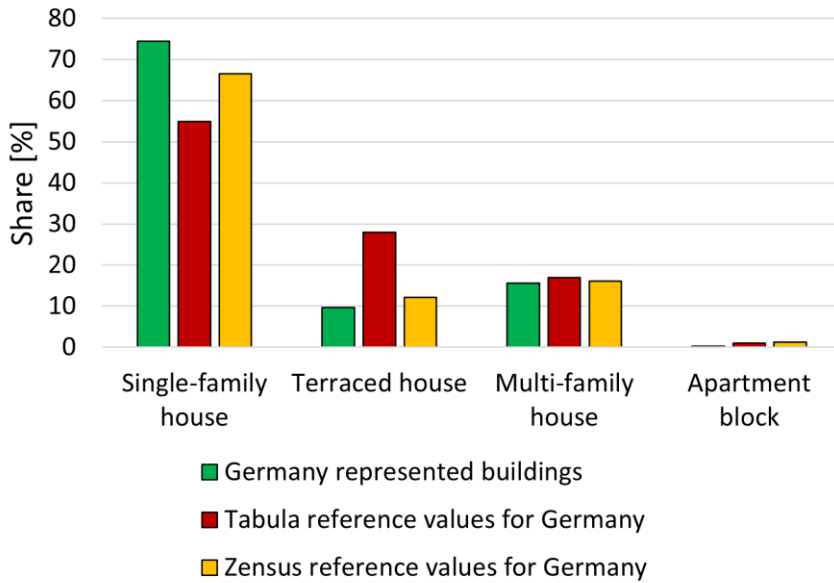


Abbildung 13: Anteile der Wohngebäudetypen (Einfamilienhaus, Reihenhaus, Mehrfamilienhaus, Wohnblock) im geclusterten deutschen Wohngebäudedatensatz (grün), den Referenzwerten von Tabula (rot) und den Referenzwerten von Zensus (gelb). Quellen: Rieck et al.⁹⁷

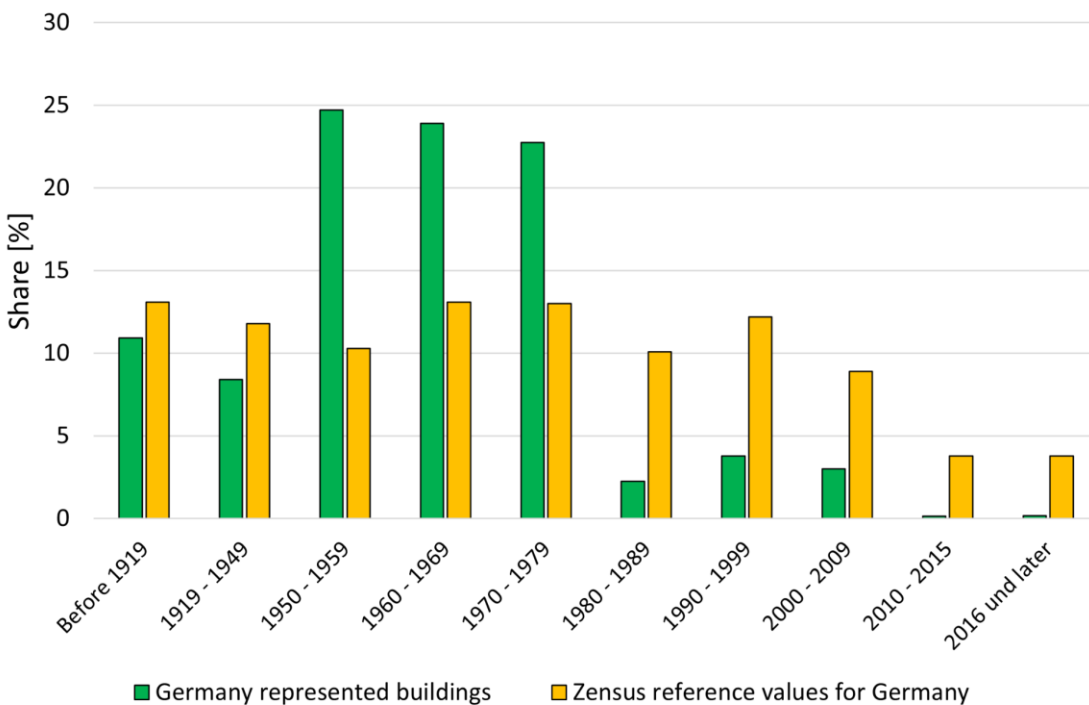


Abbildung 14: Anteile der Baujahre im geclusterten deutschen Wohngebäudedatensatz (grün) und den Referenzwerten von Zensus (gelb). Quellen: Rieck et al.⁹⁸

⁹⁷ Rieck, „Zukünftige Energieversorgung des deutschen Wohngebäudebestands“; Rieck u. a., „Large-Scale Quantification of the Future Self-Covered Heat Demand Using a Nationwide Residential Building Database“.

⁹⁸ Rieck, „Zukünftige Energieversorgung des deutschen Wohngebäudebestands“; Rieck u. a., „Large-Scale Quantification of the Future Self-Covered Heat Demand Using a Nationwide Residential Building Database“.

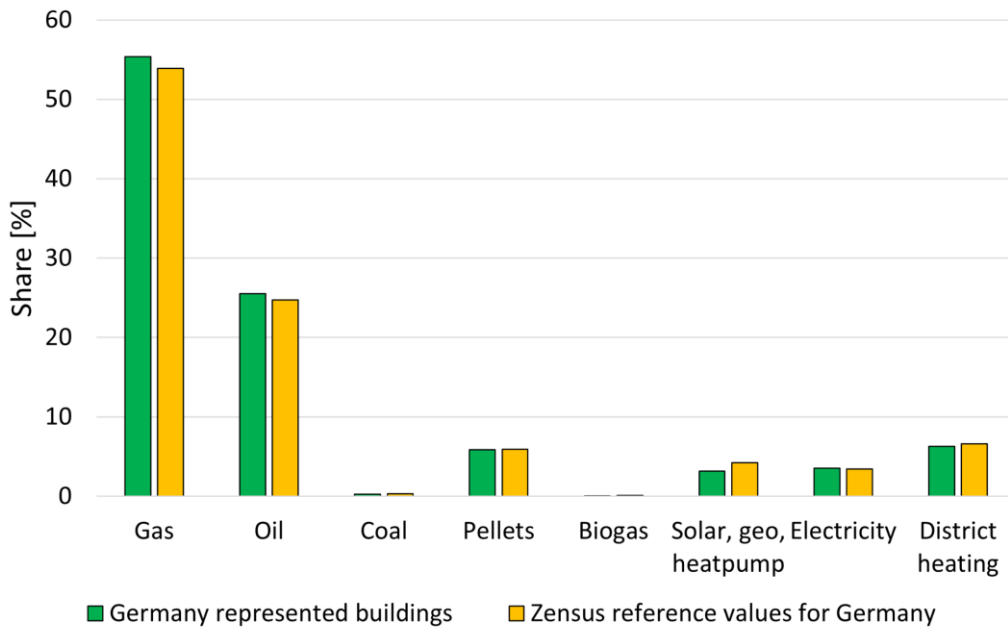


Abbildung 15: Anteile der Heizungsenergeträger im geclusterten deutschen Wohngebäudebestand (grün) und den Referenzwerten von Zensus (gelb). Quellen: Rieck et al.⁹⁹

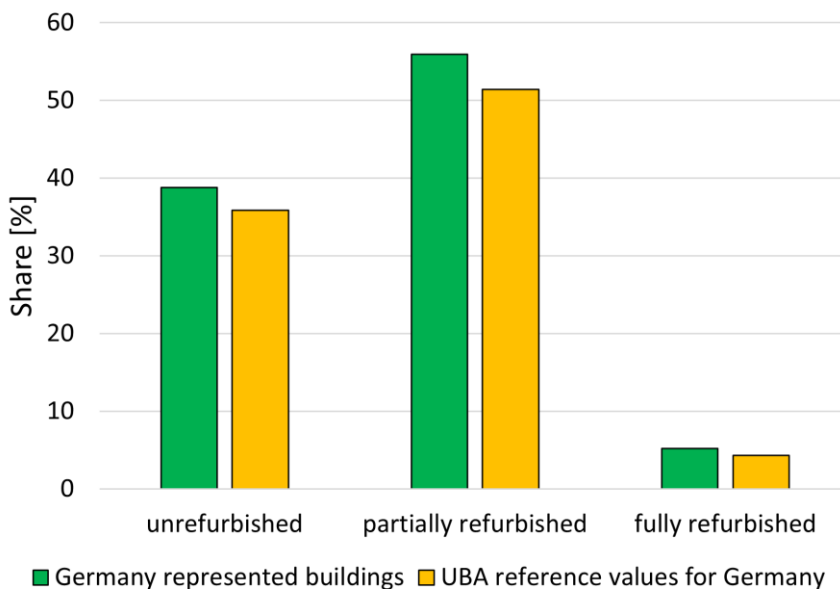


Abbildung 16: Anteile der Sanierungsstandards (unsaniert, teilsaniert, vollsaniert) im geclusterten deutschen Wohngebäudedatensatz (grün) und den Referenzwerten von Umweltbundesamt (gelb). Quellen: Rieck et al.¹⁰⁰

“Das Clustering des deutschen Wohngebäudebestands erwies sich als zuverlässige Methode, um den Datenumfang zu reduzieren, ohne wesentliche Informationsverluste oder eine deutliche Einschränkung der Merkmalsvielfalt zu verursachen. Im Vergleich zur Stichprobenanalyse bietet

⁹⁹ Rieck, „Zukünftige Energieversorgung des deutschen Wohngebäudebestands“; Rieck u. a., „Large-Scale Quantification of the Future Self-Covered Heat Demand Using a Nationwide Residential Building Database“.

¹⁰⁰ Rieck, „Zukünftige Energieversorgung des deutschen Wohngebäudebestands“; Rieck u. a., „Large-Scale Quantification of the Future Self-Covered Heat Demand Using a Nationwide Residential Building Database“.

dieser Ansatz den Vorteil, dass Gebäudetypen und -gruppen systematisch charakterisiert werden und damit zusätzliche Einblicke in die Struktur und Eigenschaften des umfangreichen Datenbestands gewonnen werden können. Die Evaluation der Metriken zeigte, dass die Gebäude in überwiegend sinnvolle Cluster eingeordnet wurden, auch wenn leichte Überschneidungen weiterhin bestehen – ein Umstand, der angesichts der Größe und Heterogenität des Datensatzes nicht ungewöhnlich ist. Die Validierung mit Literaturwerten bestätigte die Robustheit des geclusterten Bestands, wenngleich kleinere Abweichungen bei einzelnen Größen auftraten. Besonders deutlich waren diese bei den Baujahren, da der zugrunde liegende Datensatz auf dem Zensus von 2011 basiert und Klassifikationsartefakte im maschinellen Lernen der Gebäudedatenbank ETHOS.BUILD A zu einer Überrepräsentation bestimmter Gebäudetypen führten¹⁰¹. Eine weitere Einschränkung liegt in der Behandlung bestimmter Merkmale wie des Sanierungsstands, der trotz seiner hohen Relevanz für Gebäudeenergieanalysen lediglich grob statistisch verteilt wurde und so auf Einzelgebäudeebene zu Abweichungen führen kann. Verbesserungsbedarf besteht außerdem in der Datenaufbereitung und im Monitoring, um die Datenqualität zu erhöhen und Verluste bei der Verarbeitung zu vermeiden.“¹⁰²

2.1.2 Ergebnisse des AP2

Der folgende Abschnitt basiert zum Großteil auf den Kapitel 3.1, 3.3 4.1 und 4.2 der Dissertation von Rieck (Preprint)¹⁰³. Abbildungs- und Literaturreferenzen sind gegenüber dem Originaltext angepasst.

2.1.2.1 Validierung ETHOS.HiSim

„Zunächst soll ETHOS.HiSim anhand des Stichprobendatensatzes validiert werden. Die Grundlage hierfür bilden die simulierten Wärmebedarfsprofile (...).

Der durchschnittliche Heizwärmebedarf für Raumwärme und Warmwasser im vorgestellten Modell beträgt 21,6 MWh bzw. 6,2 MWh, was zu einem gesamten Heizwärmebedarf von 27,8 MWh pro Gebäude und Jahr führt. Dieser theoretische Absolutwert stimmt eng mit dem Referenzwert der deutschen DENA-Gebäudestatistik aus dem Jahr 2024 überein, die einen durchschnittlichen Heizwärmebedarf von 27,4 MWh pro Wohngebäude und Jahr für Raumwärme und Warmwasser angibt (siehe Abbildung 17)¹⁰⁴. Zur Validierung der Zeitreihendaten unseres Modells wurde der tägliche durchschnittliche Heizwärmebedarf pro Gebäude in Abhängigkeit von der täglichen durchschnittlichen Außentemperatur ausgewertet. Der theoretische Heizwärmebedarf konnte erfolgreich mit einer Sigmoidfunktion angenähert werden, die üblicherweise zur Modellierung und Prognose des Erdgasverbrauchs in Wohngebäuden verwendet wird (siehe Abbildung 18)¹⁰⁵.“¹⁰⁶

¹⁰¹ Dabrock u. a., „Generating a Nationwide Residential Building Types Dataset Using Machine Learning“, April 2025.

¹⁰² Rieck, „Zukünftige Energieversorgung des deutschen Wohngebäudebestands“.

¹⁰³ Katharina Rieck, „Zukünftige Energieversorgung des deutschen Wohngebäudebestands“ (Preprint, RWTH Aachen, 2025).

¹⁰⁴ Deutsche Energie-Agentur, *DENA-GEBÄUDEREPORT 2025. Zahlen, Daten, Fakten zum Klimaschutz im Gebäudebestand*, 2024.

¹⁰⁵ „Lentner et al. - Short-term forecasting of gas consumption by stand.pdf“, o. J.

¹⁰⁶ Rieck, „Zukünftige Energieversorgung des deutschen Wohngebäudebestands“.

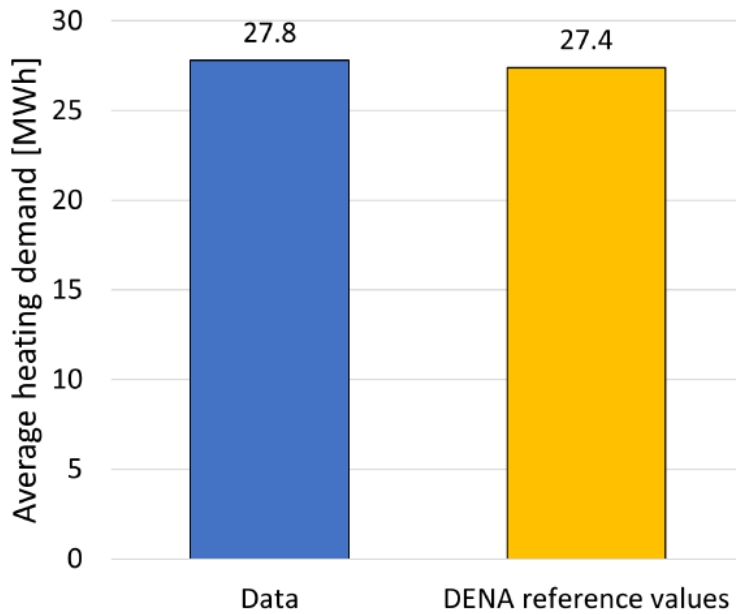


Abbildung 17: Vergleich berechneter durchschnittlicher Wärmebedarf für deutsche Wohngebäude für Raumwärme und Warmwasser mit Referenzwerten der DENA-Studie. Quellen: Rieck et al.¹⁰⁷

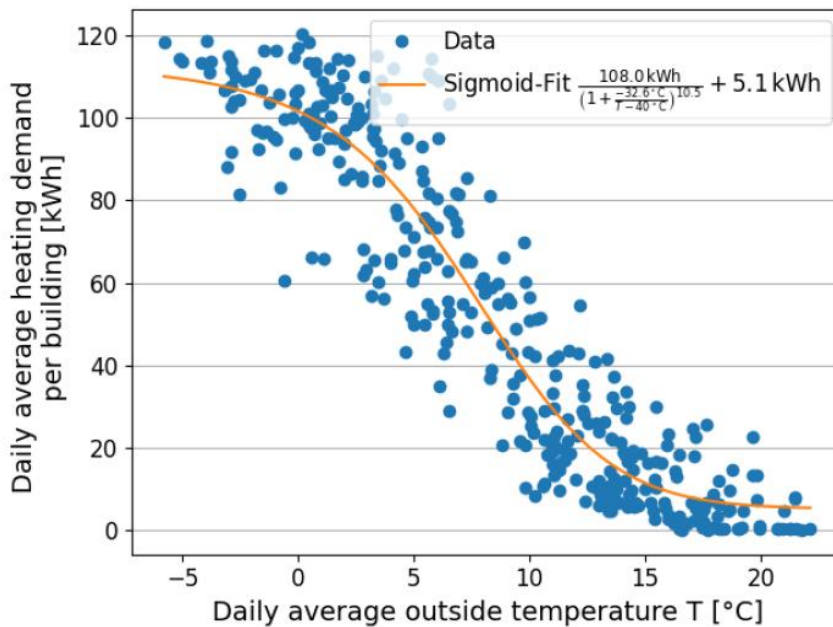


Abbildung 18: Tagesdurchschnittswärmebedarf nach Tagesdurchschnittsaußentemperaturen sowie Sigmoid-Fitfunktion. Quellen: Rieck et al.¹⁰⁸

“Es fällt auf, dass die Sigmoid-Kurve für niedrige Außentemperaturen stark abflacht, was darauf hinweist, dass der Wärmebedarf einiger Gebäude nicht ausreichend gedeckt wird. Dies wurde in der

¹⁰⁷ Rieck, „Zukünftige Energieversorgung des deutschen Wohngebäudebestands“; Rieck u. a., „Large-Scale Quantification of the Future Self-Covered Heat Demand Using a Nationwide Residential Building Database“.

¹⁰⁸ Rieck, „Zukünftige Energieversorgung des deutschen Wohngebäudebestands“; Rieck u. a., „Large-Scale Quantification of the Future Self-Covered Heat Demand Using a Nationwide Residential Building Database“.

Dimensionierung der Energiesysteme berücksichtigt und korrigiert (...).¹⁰⁹

2.1.2.2 Untersuchung verschiedener Wärmeversorgungstechnologien auf Einzelgebäudeebene

Im AP2 wurde das Gebäudesimulationsmodell ETHOS.HiSim mit detaillierten Wärmeversorgungsmodellen und Kosten- und Emissionsbetrachtung erweitert. 51 verschiedene Energiesystemkombinationen (Kombinationen aus denTabelle A3-A6) wurden an 12 Typgebäuden (4 Größenklassen x 3 Sanierungsstandards) getestet bezüglich der Kosten, Verbräuche und Emissionen verglichen.

Heizsystem	Kürzel
OilHeating	Oil
GasHeating	Gas
GasSolarThermal	GasSolar
PelletHeating	Pellet
HydrogenHeating	Hydrogen
DistrictHeating	District
ElectricHeating	Electric
HeatPump	HeatPump
HeatPumpSolarThermal	HeatPumpSolar

Tabelle A3: Kürzel für Heizsystem. Quelle: Preprint der Dissertation von Rieck¹¹⁰

Wärmeverteilungssystem	Kürzel
Conventional Radiator	R
Floorheating	F
No HDS (no distribution system)	-

Tabelle A4: Kürzel für Wärmeverteilssystem. Quelle: Preprint der Dissertation von Rieck¹¹¹

PV-Nutzung	Kürzel
PV 0% (no rooftop PV)	PV0
PV 100% (full rooftop PV potential)	PV1

Tabelle A5: Kürzel für PV-Nutzung. Quelle: Preprint der Dissertation von Rieck¹¹²

Batterie- und EMS-Nutzung	Kürzel
No battery and EMS	-
With battery and EMS	B

Tabelle A6: Kürzel für Batterie- und Energiemanagementnutzung. Quelle: Preprint der Dissertation von Rieck¹¹³

¹⁰⁹ Rieck, „Zukünftige Energieversorgung des deutschen Wohngebäudebestands“.

¹¹⁰ Rieck, „Zukünftige Energieversorgung des deutschen Wohngebäudebestands“.

¹¹¹ Rieck, „Zukünftige Energieversorgung des deutschen Wohngebäudebestands“.

¹¹² Rieck, „Zukünftige Energieversorgung des deutschen Wohngebäudebestands“.

¹¹³ Rieck, „Zukünftige Energieversorgung des deutschen Wohngebäudebestands“.

„In den jährlich umgelegten Gesamtkosten sind die Investitionskosten abzgl. Förderung, Energiekosten sowie jährliche Wartungs- und Instandhaltungskosten und sonstige Gebühren enthalten. Die Kosten und CO₂-Emissionen sind pro Quadratmeter beheizte Wohnfläche berechnet.“

114

„Unter Systemkosten und -emissionen werden gerätespezifische Angaben wie Investitionskosten, Förderungen, Wartungs- und Instandhaltungskosten sowie sonstige Gebühren, die technische Lebensdauer und der CO₂-Fußabdruck bei der Systemherstellung gefasst. Die in Abbildung 19 aufgeführten Werte basieren größtenteils auf Literaturwerten. Dort, wo keine Daten gefunden wurden, wurden die Werte auf eigenen Annahmen basiert (gekennzeichnet durch ***). Für Heizungssysteme auf Basis erneuerbarer Energien wurde die BAFA-Grundförderung von 30% angenommen und für Maßnahmen der Heizungsoptimierung 15% (siehe Abbildung 19,¹¹⁵). Wartungs- und Instandhaltungskosten sowie zusätzliche Gebühren, wie zum Beispiel Zählergebühren, wurden anteilig an den Investitionskosten in Prozent pro Jahr berechnet. Betrachtet man die Investitionskosten abzgl. der Förderung der BAFA¹¹⁶ von den einzelnen Heizungstechnologien, stellt sich heraus, dass pro Kilowatt Leistungseinheit Pelletheizungen inklusive Kessel und Lager mit 1280 €₂₀₂₄/kW am teuersten in der Anschaffung sind, gefolgt von Wärmepumpen mit 1120 €₂₀₂₄/kW und Ölkessel inklusive Kessel und Tank 778 €₂₀₂₄/kW (siehe Abbildung 3.15). Am günstigsten ist die Stromdirektheizung mit 314 €₂₀₂₄/kW, gefolgt von der Wasserstoff-Heizung mit 403 €₂₀₂₄/kW und der Gasheizung mit 576 €₂₀₂₄/kW. Für die Wasserstoff-Heizung wurden in der Anschaffung die gleichen Investitionskosten angenommen wie für die Gasheizung, da von einer "H₂-ready" Gasheizung ausgegangen wurde. Da nur grüner Wasserstoff betrachtet wird, besteht auch hier eine Grundförderung von 30%. Fernwärme liegt mit 712 €₂₀₂₄/kW im Mittelfeld. Für die Szenarienanalysen 2025 und 2050 wurden die gleichen Systemkosten und -emissionen angenommen, da keine zuverlässigen Angaben zu 2050 gefunden wurden und andere Studien auch konstante Investitionskosten in konventionellen Marktszenarien angenommen haben¹¹⁷. Auch ist zu berücksichtigen, dass alle Kosten in €₂₀₂₄ berechnet sind.“¹¹⁸

¹¹⁴ Rieck, „Zukünftige Energieversorgung des deutschen Wohngebäudebestands“.

¹¹⁵ Gebäudeforum Klimaneutral, „Wärmeerzeugung im Bestand mit EE“, 2024, <https://www.gebaeudeforum.de/service/downloads/>; Nina Grimmeiß, „Förderung für Fußbodenheizung: alle Optionen im Überblick“, o. J., zugegriffen 14. August 2025, <https://renewa.de/sanierung/gewerke/heizung/fussbodenheizung/foerderung>.

¹¹⁶ Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle, „Bundesförderung für effiziente Gebäude“, o. J., zugegriffen 13. Februar 2025, https://www.bafa.de/DE/Energie/Effiziente_Gebaeude/effiziente_gebaeude_node.html.

¹¹⁷ Portia Murray u. a., „A Comparison of Storage Systems in Neighbourhood Decentralized Energy System Applications from 2015 to 2050“, *Applied Energy* 231 (Dezember 2018): 1285–306, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.08.106>.

¹¹⁸ Rieck, „Zukünftige Energieversorgung des deutschen Wohngebäudebestands“.

System	Investitionskosten	Einheit Investitionskosten	Förderung [%]	Rest- Investitionskosten	Wartung/Instandhaltung/Ge- bühren [%Invest/Jahr]	Lebensdauer [Jahre]
Wärmepumpe	1600.00	€_2024/kW	30	1120.00	1.5	18
Gasheizung	576.00	€_2024/kW	0	576.00	3.2	18
Ölheizung (Kessel + Tank)	777.60	€_2024/kW	0	777.60	5	18
Fernwärme	1017.60	€_2024/kW	30	712.32	2.6	20
Wasserstoffheizung	576.00	€_2024/kW	30	403.20	3.2	18
Pelletheizung (Kessel + Lager)	1827.84	€_2024/kW	30	1279.49	4.7	18
Stromdirektheizung	313.60	€_2024/kW	0	313.60	1	22
Dachflächen-PV*	794.41	€_2024/kW	0	794.41	1	25
Batteriespeicher*, **	546.00	€_2024/kWh	0	546.00	3.2	10
Solarthermie	797.00	€_2024/m2	30	557.90	1	20
Heizkörper (konventionell)	56.25	€_2024/m2	0	56.25	1	30
Fußbodenheizung	75.00	€_2024/m2	15	63.75	1	50
Wasserspeicher	14.51	€_2024/l	15	12.33	1	20
Stromzähler	100.00	€_2024	0	100.00	2.4	20
Gaszähler	200.00	€_2024	0	200.00	1.8	20
Energiemanagementsystem	3500.00	€_2024	15	2975.00	2.8	20

Abbildung 19: Kosten und Lebensdauern für verschiedene Gebäudeenergiesysteme. Angaben basieren auf diesen Quellen:¹¹⁹ und sind in ETHOS.HiSim in diesem Modul zu finden:¹²⁰. *: Für PV und Batteriespeicher gibt es als Förderung den

¹¹⁹ flexiheatuk.com, „Buffer Vessel Sizing for Hydronic Heating Systems“, o. J., zugegriffen 14. August 2025, <https://www.flexiheatuk.com/buffer-vessel-sizing-for-hydronic-heating-systems/>; Gebäudeforum Klimaneutral, „Wärmeerzeugung im Bestand mit EE“; Johanna Ganglbauer, „Emission factors and costs“, 3. Mai 2023, https://github.com/FZJ-IEK3-VSA/HiSim/tree/main/hisim/modular_household; Giulia Mancò u. a., „Innovative Renewable Technology Integration for Nearly Zero-Energy Buildings within the Re-COGNITION Project“, *Sustainability* 13, Nr. 4 (2021): 1938, <https://doi.org/10.3390/su13041938>; Deutsche Umwelthilfe e.V., „Faktenpapier Wärmepumpe“, 2023, https://www.duh.de/fileadmin/user_upload/download/Projektinformation/Energieeffizienz/Waermepumpen/300623_Waermepumpen_Faktenpapier_Neuaufgabe_Digital.pdf; VDI-Gesellschaft Bauen und Gebäudetechnik, „VDI 2067 Blatt 1 - Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen - Grundlagen und Kostenberechnung“, 2012, <https://www.vdi.de/richtlinien/details/vdi-2067-blatt-1-wirtschaftlichkeit-gebaeudetechnischer-anlagen-grundlagen-und-kostenberechnung-1>; Alyssa R. Pfadt-Trilling u. a., „Life Cycle Greenhouse Gas Emissions of Low-Temperature Process Heat Generation by External Compound Parabolic Concentrator (XCPC) Solar Thermal Array“, *Renewable Energy* 205 (März 2023): 992–98, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.01.117>; Ulrich Bemann, „Was kosten Stromspeicher? Preise und Vergleiche.“, 1. März 2023, <https://www.solarenergie.de/stromspeicher/preise>; Lisa Schmid, „How Much Does a Smart Meter Cost in 2025?“, 6. Februar 2025, <https://www.ostrom.de/en/post/how-much-does-a-smart-meter-cost-in-2025>; mscmeters.com, „Gas Meters“, 2025, <https://mcsimeters.com/collections/gas-meters>; GASAG AG, „Energiemanagementsystem im Privathaushalt: Ist es die Investition wert?“, 17. September 2024, <https://www.gasag.de/magazin/energiesparen/energiemanagementsystem-privathaushalt/>; ADAC, „Energiemanagementsystem für zu Hause (HEMS): Strom schlau nutzen“, 7. Juli 2025, <https://www.adac.de/rund-ums-haus/energie/spartipps/energiemanagementsystem-zuhause/>; André Uhl, „Solarthermie: Kosten, Preise & Amortisation – mit Rechner“, hg. von co2online, 29. Dezember 2023, [https://www.co2online.de/modernisieren-und-bauen/solarthermie/solarthermie-preise-kosten-amortisation/#:~:text=Wie%20viel%20Solarthermie%20kostet%2C%20h%C3%A4ngt,Euro%20f%C3%BCr%20Heizung%20und%20Warmwasser.](https://www.co2online.de/modernisieren-und-bauen/solarthermie/solarthermie-preise-kosten-amortisation/#:~:text=Wie%20viel%20Solarthermie%20kostet%2C%20h%C3%A4ngt,Euro%20f%C3%BCr%20Heizung%20und%20Warmwasser.;); Grimmeiß, „Förderung für Fußbodenheizung: alle Optionen im Überblick“; vattenfall, „Fußbodenheizung: Kosten für Einbau & Betrieb“, o. J., zugegriffen 14. August 2025, <https://www.vattenfall.de/infowelt-energie/nachhaltig-heizen/fussbodenheizung-kosten-fuer-einbau-und-betrieb#>; Philipp Hüttner, „Was ist besser: Fußbodenheizung oder Heizkörper?“, o. J., zugegriffen 14. August 2025, <https://www.dein-heizungsbauer.de/ratgeber/bauen-sanieren/fussbodenheizung-oder-heizkoerper/#c3851>; Heinz Kerp, „Fußbodenheizung oder Heizkörper“, 21. Februar 2025, <https://www.heizsparer.de/heizung/heizkoerper/fussbodenheizung/fussbodenheizung-oder-heizkoerper/>; Lea Wrobel, „Ölheizung austauschen: Preise & Kosten im Überblick“, 23. Oktober 2024, <https://www.co2online.de/modernisieren-und-bauen/heizung/oelheizung-laufende-kosten/>.

¹²⁰ „HiSim opex and capex values“, 2025, <https://github.com/FZJ-IEK3-VSA/HiSim/blob/main/hisim/components/configuration.py>.

sogenannten KfW-Kredit, der jedoch nicht berücksichtigt wurde, da die Konditionen sehr haushaltsspezifisch sind¹²¹. **: Die wirksame Lebensdauer des Batteriespeichers wird in Zyklen gerechnet, das heißt wie oft die Batterie geladen und entladen wird. Die Wärmepumpe ist eine Luft-Wasser-Wärmepumpe. Quellen: Rieck et al.¹²²

System	Geräte-emissionen	Einheit Geräteemissionen
Wärmepumpe	165.84	kgCO2/kW
Gasheizung	49.47	kgCO2/kW
Ölheizung (Kessel + Tank)	19.40	kgCO2/kW
Fernwärme	49.47	kgCO2/kW
Wasserstoffheizung	49.47	kgCO2/kW
Pelletheizung (Kessel + Lager)	49.47	kgCO2/kW
Stromdirektheizung	1.21	kgCO2/kW
Dachflächen-PV	330.51	kgCO2/kW
Batteriespeicher	130.70	kgCO2/kWh
Solarthermie	92.40	kgCO2/m2
Heizkörper (konventionell) ^{***}	0.00	kgCO2/m2
Fußbodenheizung ^{***}	0.00	kgCO2/m2
Wasserspeicher	0.60	kgCO2/l
Stromzähler ^{***}	0.00	kgCO2
Gaszähler ^{***}	0.00	kgCO2
Energiemanagementsystem ^{***}	0.00	kgCO2

Abbildung 20: Herstellungsemissionen für verschiedene Gebäudeenergiesysteme. Angaben basieren auf diesen Quellen: ¹²³ und sind in ETHOS.HiSim in diesem Modul zu finden: ¹²⁴. **: Für diese Werte wurden keine Daten gefunden, daher wurden die Herstellungsemissionen dieser Komponenten nicht betrachtet. Die Wärmepumpe ist eine Luft-Wasser-Wärmepumpe. Quellen: Rieck et al. ¹²⁵

Jahr	2024	2030	2040	2050
CO2-Preis [€_2024/tCO2]	40	116	300	462.5
CO2-Preis [€_2024/kgCO2]	0.04	0.116	0.3	0.4625

Abbildung 21: CO2-Preisprognosen in €_2024/tCO2 und €_2024/kgCO2¹²⁶. Quellen: Rieck et al. ¹²⁷

¹²¹ Benjamin Weigl, „KfW 270 & mehr: Lohnt sich ein Kredit für die Solaranlage?“, 24. Juli 2025, <https://www.finanztip.de/photovoltaik/pv-anlage-finanzieren/>; KfW, „Erneuerbare Energien – Standard - Kredit Nr.270“, o. J., zugegriffen 14. August 2025, [https://www.kfw.de/inlandsfoerderung/Unternehmen/Energie-Umwelt/F%C3%B6rderprodukte/Erneuerbare-Energien-Standard-\(270\)/](https://www.kfw.de/inlandsfoerderung/Unternehmen/Energie-Umwelt/F%C3%B6rderprodukte/Erneuerbare-Energien-Standard-(270)/).

¹²² Rieck, „Zukünftige Energieversorgung des deutschen Wohngebäudebestands“.

¹²³ Ganglbauer, „Emission factors and costs“; Pfadt-Trilling u. a., „Life Cycle Greenhouse Gas Emissions of Low-Temperature Process Heat Generation by External Compound Parabolic Concentrator (XCPC) Solar Thermal Array“.

¹²⁴ „HiSim opex and capex values“.

¹²⁵ Rieck, „Zukünftige Energieversorgung des deutschen Wohngebäudebestands“.

¹²⁶ Robert Meyer u. a., *Heizkosten und Treibhausgasemissionen in Bestandswohngebäuden: Aktualisierung auf Basis der GEG-Novelle 2024* (Potsdam Institute for Climate Impact Research, 2024), 44 pages, 800 KB, 44 pages, 800 KB, <https://doi.org/10.48485/PIK.2023.028>.

¹²⁷ Rieck, „Zukünftige Energieversorgung des deutschen Wohngebäudebestands“.

Emissionsfaktoren [kgCO ₂ /kWh]	2024	2030	2040	2050
Erdgas	0.24	0.24	0.24	0.24
Strommix (Klimaneutralität 2045)	0.338	0.141	0.013	0
Nah-/ und Fernwärme	0.169	0.126	0.047	0
Heizöl (schwer)*	0.288	0.288	0.288	0.288
Pellets*	0.036	0.028	0.014	0

Abbildung 22: CO₂-Emissionsfaktorprognosen in kgCO₂/kWh¹²⁸. Quellen: Rieck et al. ¹²⁹

CO ₂ -Preise [€_2024/kWh]	2024	2030	2040	2050
Erdgas	0.010	0.028	0.072	0.111
Strommix (Klimaneutralität 2045)	0.014	0.016	0.004	0.000
Nah-/ und Fernwärme	0.007	0.015	0.014	0.000
Heizöl (schwer)*	0.012	0.033	0.086	0.133
Pellets*	0.001	0.003	0.004	0.000

Abbildung 23: CO₂-Preisprognosen in €_2024/kWh. Quellen: Rieck et al. ¹³⁰

Endkundenenergiepreis (ohne CO ₂ -Preis) [€_2024/kWh]	2025	2030	2040	2050
Strom	0.299	0.318	0.297	0.281
Strom-WP	0.257	0.29	0.297	0.281
Erdgas	0.107	0.123	0.173	0.189
Heizöl	0.092	0.121	0.161	0.173
Fernwärme	0.114	0.137	0.164	0.141
Wasserstoff*	0.25	0.25	0.194	0.179
Pellets	0.067	0.086	0.086	0.09

Abbildung 24: Endkundenenergiepreis (ohne CO₂-Preis) in €_2024/kWh¹³¹. Quellen: Rieck et al. ¹³²

Endkundenenergiepreis (mit CO ₂ -Preis) [€_2024/kWh]	2025	2030	2040	2050
Strom	0.3125	0.3344	0.3009	0.2810
Strom-WP	0.2705	0.3064	0.3009	0.2810
Erdgas	0.1166	0.1508	0.2450	0.3000
Heizöl	0.1035	0.1544	0.2474	0.3062
Fernwärme	0.1208	0.1516	0.1781	0.1410
Wasserstoff*	0.2500	0.2500	0.1940	0.1790
Pellets	0.0684	0.0892	0.0902	0.0900

¹²⁸ Meyer u. a., *Heizkosten und Treibhausgasemissionen in Bestandswohngebäuden*.

¹²⁹ Rieck, „Zukünftige Energieversorgung des deutschen Wohngebäudebestands“.

¹³⁰ Rieck, „Zukünftige Energieversorgung des deutschen Wohngebäudebestands“.

¹³¹ Meyer u. a., *Heizkosten und Treibhausgasemissionen in Bestandswohngebäuden*.

¹³² Rieck, „Zukünftige Energieversorgung des deutschen Wohngebäudebestands“.

Abbildung 25: Endkundenenergiepreis (mit CO₂-Preis) in €₂₀₂₄/kWh. Quellen: Rieck et al. ¹³³

Endkundenenergiepreissteigerung zu 2025 [%]	2025	2030	2040	2050
Strom	4.52	11.82	0.64	-6.02
Strom-WP	5.26	19.20	17.08	9.34
Erdgas	8.97	40.97	128.97	180.37
Heizöl	12.52	67.83	168.91	232.83
Fernwärme	5.93	33.00	56.23	23.68
Wasserstoff	0.00	0.00	-22.40	-28.40
Pellets	2.15	33.21	34.63	34.33

Abbildung 26: Preissteigerung des Endkundenenergiepreises durch CO₂-Preis in %. Quellen: Rieck et al. ¹³⁴

„Berücksichtigt man die zunehmende CO₂-Besteuerung und die gleichzeitig steigende Klimafreundlichkeit von Strom, Fernwärme und Pellets, werden bis 2050 Erdgas und Heizöl eine Preissteigerung von ca. 180-233% (in €₂₀₂₄ gemessen) gegenüber der unbesteuerten Energiepreise in 2025 erfahren und werden damit in Zukunft teurer als die anderen Energieträger. Der konventionelle Strompreis wird bis 2050 schätzungsweise um ca. 6% sinken, der Wasserstoffpreis wird um knapp 28% sinken und Fernwärme- und Pelletenergie wird in den Annahmen von ¹³⁵um 24-34% steigen.“ ¹³⁶

Im Folgenden sind die verschiedenen Versorgungspfade für das **Jahr 2025** dargestellt:

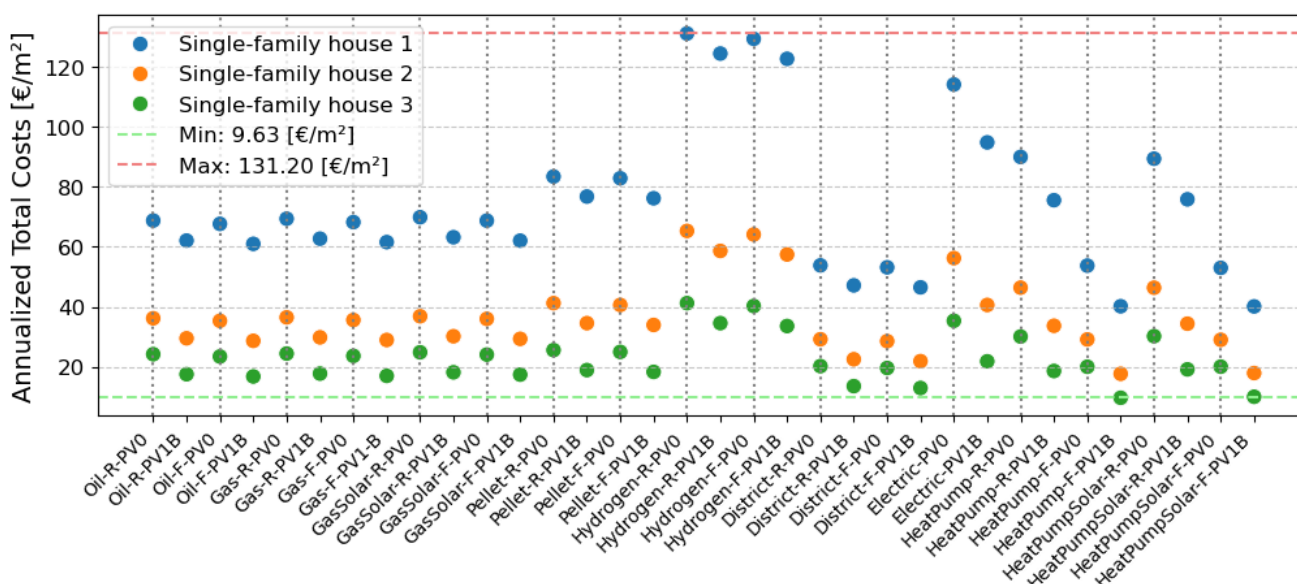


Abbildung 27: Vergleich der jährlich umgelegten Gesamtkosten [€₂₀₂₄/m²] verschiedener Energiesystemkombinationen für ein Durchschnittseinfamilienhaus. Die folgenden Sanierungsstandards wurden betrachtet: 1=unsaniert, 2=teilsaniert, 3=vollsanert. Auf der x-Achse sind die verschiedenen Energiesystemkombinationen aufgezeigt (siehe Tabelle A3 bis A6).

¹³³ Rieck, „Zukünftige Energieversorgung des deutschen Wohngebäudebestands“.

¹³⁴ Rieck, „Zukünftige Energieversorgung des deutschen Wohngebäudebestands“.

¹³⁵ Meyer u. a., *Heizkosten und Treibhausgasemissionen in Bestandswohngebäuden*.

¹³⁶ Rieck, „Zukünftige Energieversorgung des deutschen Wohngebäudebestands“.

Auf der y-Achse befindet sich die jeweilige Bewertungskennzahl. Die Bewertungskennzahlen sind das Ergebnis einer Ganzjahressimulation für das Jahr 2025. Quelle: Preprint der Dissertation von Rieck¹³⁷

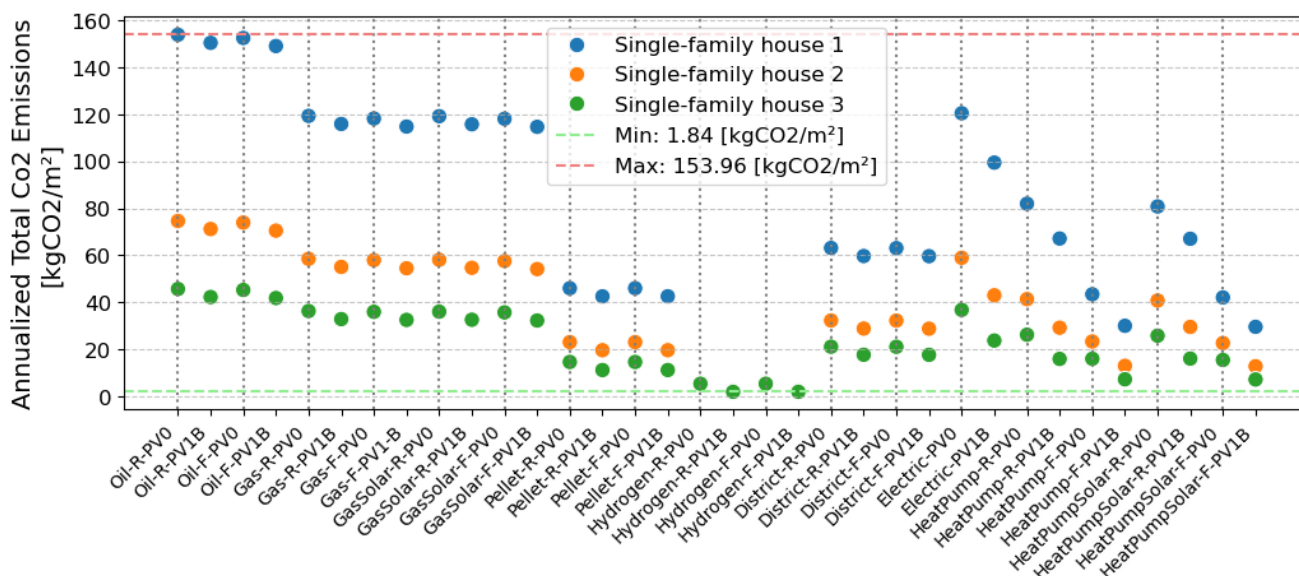


Abbildung 28: Vergleich der jährlich umgelegten CO₂-Emissionen [kgCO₂/m²] verschiedener Energiesystemkombinationen für ein Durchschnittseinfamilienhaus. Die folgenden Sanierungsstandards wurden betrachtet: 1=unsaniert, 2=teilsaniert, 3=vollsanert. Auf der x-Achse sind die verschiedenen Energiesystemkombinationen aufgezeigt (siehe Tabelle A3 bis A6). Auf der y-Achse befindet sich die jeweilige Bewertungskennzahl. Die Bewertungskennzahlen sind das Ergebnis einer Ganzjahressimulation für das Jahr 2025. Quelle: Preprint der Dissertation von Rieck¹³⁸

“Solarunterstützte, heizungsoptimierte Wärmepumpen sind trotz deutlich höherer Investitionskosten hinsichtlich der Gesamtkosten das günstigste und zugleich netzunabhängigste Energiesystem (siehe Abbildung 27). In Kombination mit Niedertemperatur-Flächenheizungen arbeiten sie besonders effizient. Die Analyse zeigt jedoch, dass dieses System nicht in allen Gebäuden technisch machbar ist: Gebäude mit schlechter Energieeffizienz (Klasse D oder schlechter bzw. mit mehr als 120 kWh/m² Wärmebedarf pro Jahr) können mit Wärmepumpen und den hier betrachteten Fußbodenheizungen nicht ausreichend beheizt werden, da Fußbodenheizungen nur 50-80W/m² übertragen können. Ein Raum mit 20 m² kann daher mit einer Fußbodenheizung mit normalen Temperaturen maximal 1000-1600W versorgt werden. Bei alten Gebäuden reicht dies nicht aus, um die gewünschte Raumtemperatur zu erreichen. Für diese Gebäude eignen sich andere Heizsysteme besser. Als nächstgünstigste, technisch machbare Lösung erweist sich Fernwärme mit PV-Unterstützung. Das günstigste System in der Anschaffung ist die Stromdirektheizung. Aufgrund der aktuellen Strompreise verursacht sie jedoch sehr hohe Energiekosten.

Bezogen auf die Gesamt- CO₂-Emissionen sind grüne Wasserstoffheizungen das klimafreundlichste System, sowohl in der Herstellung als auch im Betrieb (siehe Abbildung 28). Sie sind zudem vergleichsweise günstig in der Anschaffung (H2-ready-Gaskessel). Allerdings führen die hohen Energiekosten für grünen Wasserstoff derzeit zu einem deutlichen Nachteil im laufenden Betrieb. Fossile Heizungen sowie Fernwärme- und Pelletheizungen liegen gesamtkostentechnisch im Mittelfeld. Die Pelletheizung ist in der Anschaffung jedoch fast so teuer wie eine Wärmepumpe. In Gebäuden mit schlechter Energieeffizienz zählen Ölheizungen, Stromdirektheizungen und Gasheizungen zu den größten CO₂-Verursachern. Wärmepumpen mit konventionellen Heizkörpern

¹³⁷ Rieck, „Zukünftige Energieversorgung des deutschen Wohngebäudebestands“.

¹³⁸ Rieck, „Zukünftige Energieversorgung des deutschen Wohngebäudebestands“.

schneiden emissionsseitig schlechter ab als Fernwärme oder Pelletheizungen. Dass strombasierte Heizungen wie Stromdirektheizungen und Wärmepumpen hier relativ schlecht abschneiden, liegt einerseits am noch teilweise fossilen Strommix und andererseits am sehr hohen Verbrauch unsanierter Gebäude. Bei Vollsanierung lassen sich jedoch bereits bis zu 70% der Emissionen einsparen (zum Beispiel im Fall der Ölheizung).

Sanierungsmaßnahmen haben generell einen sehr positiven Einfluss auf die Gesamtkosten, da der Energieverbrauch deutlich gesenkt werden kann. In dieser Analyse konnten Einsparungen von bis zu 76% beobachtet werden.“¹³⁹

Auch für das **Jahr 2050** wurden die verschiedenen Versorgungspfade berechnet unter Berücksichtigung der zukünftigen CO₂-Preise wie in der Ariadne-Studie dargestellt^{140,141}:

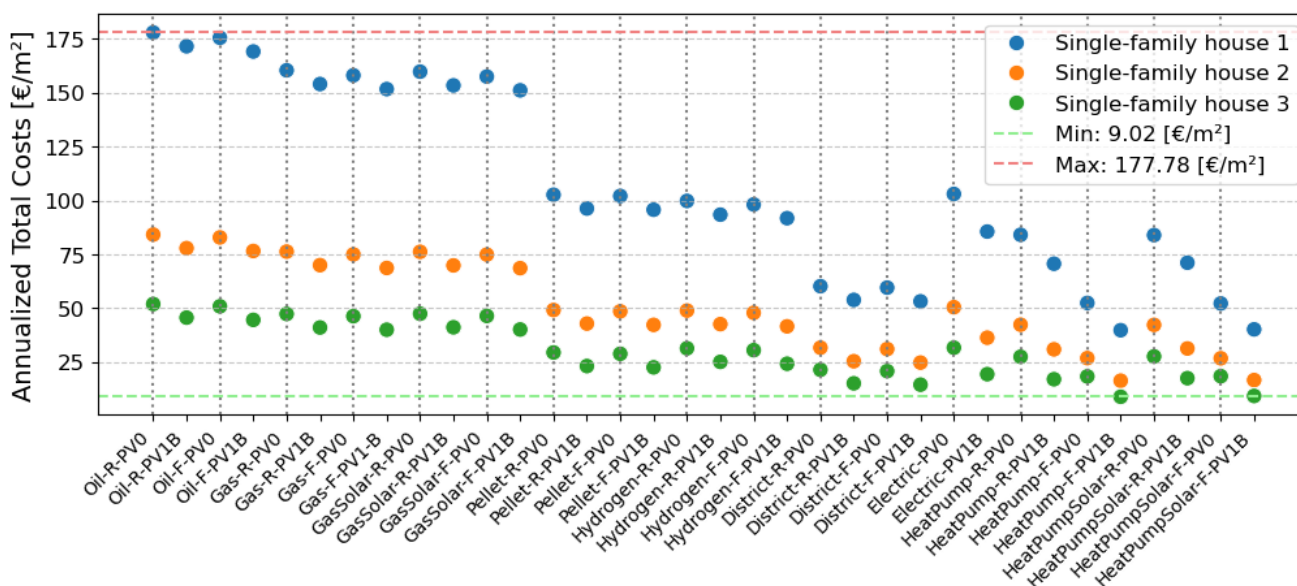


Abbildung 29: Vergleich der jährlich umgelegten Gesamtkosten [€₂₀₂₄/m²] verschiedener Energiesystemkombinationen für ein Durchschnittseinfamilienhaus. Die folgenden Sanierungsstandards wurden betrachtet: 1=unsaniert, 2=teilsaniert, 3=vollsaniert. Auf der x-Achse sind die verschiedenen Energiesystemkombinationen aufgezeigt (siehe Tabelle A3 bis A6). Auf der y-Achse befindet sich die jeweilige Bewertungskennzahl. Die Bewertungskennzahlen sind das Ergebnis einer Ganzjahressimulation für das Jahr 2050. Quelle: Preprint der Dissertation von Rieck¹⁴²

“Da die Investitionskosten der Energiesysteme als zeitlich konstant angenommen wurden, sind die Resultate für die Jahre 2025 und 2050 hinsichtlich der Investitionskosten identisch.

Auf Gesamtkostenebene zeigt sich ein ähnliches Bild wie bei den reinen Energiekosten (siehe Abbildung 29): Öl- und Gasheizungen sind am teuersten, während Wärmepumpen und Fernwärme am günstigsten abschneiden. Besonders bei unsanierten Gebäuden ist Fernwärme, mit oder ohne PV-Unterstützung, die zuverlässigste und kostengünstigste Option mit Gesamtkosten von etwa 50 - 60 €₂₀₂₄/m² (District, siehe Abbildung 29).

Für teil- oder vollsanierte Gebäude ist die PV-unterstützte Stromdirektheizung das drittgünstigste

¹³⁹ Rieck, „Zukünftige Energieversorgung des deutschen Wohngebäudebestands“.

¹⁴⁰ Meyer u. a., *Heizkosten und Treibhausgasemissionen in Bestandswohngebäuden*.

¹⁴¹ Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle, „Informationsblatt CO₂-Faktoren“, 2023, https://www.bafa.de/SharedDocs/Downloads/DE/Energie/eew_infoblatt_co2_faktoren_2023.pdf?__blob=publicationFile&v=2.

¹⁴² Rieck, „Zukünftige Energieversorgung des deutschen Wohngebäudebestands“.

System mit etwa 20 - 35 €₂₀₂₄/m² (Electric-PV1B). Sie weist zwar höhere Energiekosten als die Wasserstoffheizung (Hydrogen-F-PV1B) auf, punktet jedoch durch geringere Investitionskosten. Die Gesamtkosten für Pellet- und Wasserstoffheizungen liegen im Jahr 2050 auf einem sehr ähnlichen Niveau. Pelletheizungen (Pellet) verzeichnen eine Kostensteigerung von 25% von rund 40 auf 50 €₂₀₂₄/m² für ein teilsaniertes Durchschnittseinfamilienhaus. Im Gegensatz dazu sinken die Gesamtkosten für Wasserstoffheizungen von 65 auf 50 €₂₀₂₄/m² für ein teilsaniertes Durchschnittseinfamilienhaus, was einer Preisreduktion von ca. 23% entspricht.”¹⁴³

Das Fazit der Untersuchung zukünftiger Wärmeversorgungspfade im deutschen Wohngebäudesektor lautet somit: “Fossile Heizungen werden in der Zukunft deutlich teurer und unattraktiv, bedingt durch höhere Energie- und CO₂-Preise. Dies entspricht den Zielen der EU¹⁴⁴. Das günstigste System bleibt die solarunterstützte Wärmepumpe, gefolgt von Fernwärme. Darauf folgen die solarunterstützte Stromdirektheizung, die Wasserstoffheizung und die Pelletheizung.

Die Annahmen der Energiekosten beziehen sich jedoch ausschließlich auf den Netzbezug. Zukünftige Einspeisevergütungen oder mögliche Steigerungen der Netzentgelte für Stromeinspeiser wurden hier nicht berücksichtigt. Die realen Energiekosten für PV-unterstützte Strom- und Wärmepumpensysteme mit unterschiedlichen Netzentgeltsystematiken könnten in zukünftigen Szenarienanalysen untersucht werden.

Für unsanierte Gebäude erweist sich Fernwärme als die wirtschaftlich günstigste Option mit den gegebenen Annahmen für Fernwärmepreise [von 12 ct₂₀₂₄/kWh in 2025 und 14 ct₂₀₂₄/kWh in 2050¹⁴⁵¹⁴⁶]. Die Wirtschaftlichkeit von Stromdirektheizungen und Wärmepumpen steigt deutlich durch PV-Unterstützung. Unter den hier betrachteten Annahmen wäre die Stromdirektheizung mit PV in der Zukunft leicht günstiger als Pellet- und Wasserstoffheizungen. Pellet- und Wasserstoffheizungen liegen im Jahr 2050 auf einem vergleichbaren Kostenniveau.”¹⁴⁷

2.1.3 Ergebnisse des AP3

Der folgende Abschnitt basiert zum Teil auf den Kapitel 2.2 der Dissertation von Rieck (Preprint)¹⁴⁸. Abbildungs- und Literaturreferenzen sind gegenüber dem Originaltext angepasst.

¹⁴³ Rieck, „Zukünftige Energieversorgung des deutschen Wohngebäudebestands“.

¹⁴⁴ Europäische Kommission, „Richtlinie über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden“, o. J., zugegriffen 13. Februar 2025, https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/energy-performance-buildings-directive_en?prefLang=de&etrans=de.

¹⁴⁵ Meyer u. a., *Heizkosten und Treibhausgasemissionen in Bestandswohngebäuden*.

¹⁴⁶ Rieck, „Zukünftige Energieversorgung des deutschen Wohngebäudebestands“.

¹⁴⁷ Rieck, „Zukünftige Energieversorgung des deutschen Wohngebäudebestands“.

¹⁴⁸ Katharina Rieck, „Zukünftige Energieversorgung des deutschen Wohngebäudebestands“ (Preprint, RWTH Aachen, 2025).

2.1.3.1 Untersuchung der Nutzung von Wasserstoff zur Gebäudewärmeversorgung

Zur Untersuchung und Bewertung des Einsatzes von grünem Wasserstoff als Technologiepfad im deutschen Wohngebäudebestand wurde eine intensive Literaturrecherche durchgeführt.

“Yaici et al.¹⁴⁹ untersuchen die technische Machbarkeit wasserstoffbetriebener Gaskessel mit unterschiedlichen Wasserstoffanteilen. Sie zeigen, dass die höchste Effizienz mit reinem Wasserstoffbetrieb (100% H₂) unter stöchiometrischen Bedingungen erreicht wird, da dabei der Wasserdampfgehalt und die zurückgewonnene Energie maximiert werden. Als optimale Konfiguration empfehlen sie jedoch eine leichte Verbrennung mit Sauerstoffüberschuss, um Schadstoffemissionen zu minimieren. Insgesamt bewerten sie Wasserstoff als geeignete, effiziente und ökologische Alternative zur Erdgasverbrennung.

Kritische Stimmen verweisen auf die Nachfragekonkurrenz mit der Industrie sowie auf die hohen Wasserstoffpreise und den großen Strombedarf bei der Herstellung¹⁵⁰. In den meisten Energieszenarien wird der Einsatz von Wasserstoff in der Gebäudewärme kaum oder gar nicht berücksichtigt¹⁵¹. Das Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung geht zudem nicht davon aus, dass grüner oder blauer Wasserstoff vor 2030 in großen Mengen in Deutschland verfügbar sein wird¹⁵². Die Herstellung von grünem Wasserstoff durch Elektrolyse erfordert erhebliche Mengen an erneuerbarem Strom, während blauer Wasserstoff nur bei gleichzeitiger CO₂-Speicherung möglich ist. Laut dem Bundesamt wird nachhaltiges Heizen mit grünem und blauem Wasserstoff daher eine Nischenanwendung bleiben und nur in dicht besiedelten Gebieten mit entsprechender Infrastruktur realisierbar sein¹⁵³.

Weidner et al.¹⁵⁴ kommen zu dem Ergebnis, dass Wärmepumpen und erneuerbarer Strom gegenüber wasserstoffbasierten Technologien priorisiert werden sollten. Der Einsatz von grünem Wasserstoff zur Deckung des europäischen Gebäudewärmebedarfs sei mindestens zwei- bis dreimal so teuer wie eine Elektrifizierung. Hauptgrund ist die geringere Effizienz von Wasserstoffkesseln (ca. 75% auf Basis des Heizwerts inklusive Produktion) im Vergleich zu Wärmepumpen (ca. 200–400%). Netzstabilität und Speicheroptionen müssten weiter untersucht werden. Zusätzlich seien politische Rahmenbedingungen nötig, um steigende Kosten für Verbraucher abzufedern. Knosala et al.¹⁵⁵

¹⁴⁹ Wahiba Yaïci und Michela Longo, „Performance Analysis of Domestic Boilers Fuelled with Hydrogen-Enriched Natural Gas Blends and Pure Hydrogen“, *Energy* 322 (Mai 2025): 135536, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.135536>.

¹⁵⁰ Till Weidner und Gonzalo Guillén-Gonsálbez, „Planetary boundaries assessment of deep decarbonisation options for building heating in the European Union“, *Energy Conversion and Management* Vol. 278, Nr. 116602 (2023): 1–14, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890422013802>; Jan Rosenow, „Is heating homes with hydrogen all but a pipe dream? An evidence review“, *Joule* Vol. 6, Nr. 10 (2022): 2225–28; Jan Rosenow, „A Meta-Review of 54 Studies on Hydrogen Heating“, *Cell Reports Sustainability* 1, Nr. 1 (2024): 100010, <https://doi.org/10.1016/j.crsus.2023.100010>.

¹⁵¹ Britta Kleinertz u. a., „Analysis of the Cost-Optimal Heat Supply Strategy for Munich Following a Clean Energy Transformation Pathway“, *Energy Policy* 188 (Mai 2024): 113968, <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2023.113968>; Weidner und Guillén-Gonsálbez, „Planetary boundaries assessment of deep decarbonisation options for building heating in the European Union“; Rosenow, „Is heating homes with hydrogen all but a pipe dream? An evidence review“; Rosenow, „A Meta-Review of 54 Studies on Hydrogen Heating“.

¹⁵² Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung, „Gasheizung“, with GEG Infoportal, zugegriffen 17. Februar 2025, <https://www.bbsr-geg.bund.de/GEGPortal/DE/Praxishilfen/Heizungswahl/Heiztechnik/Gas-Brennwert/Gas-Brennwert-node.html>.

¹⁵³ Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung, „Gasheizung“.

¹⁵⁴ Weidner und Guillén-Gonsálbez, „Planetary boundaries assessment of deep decarbonisation options for building heating in the European Union“.

¹⁵⁵ Kevin Knosala u. a., „The Role of Hydrogen in German Residential Buildings“, *Energy and Buildings* 276 (Dezember 2022): 112480, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112480>.

vertreten die Auffassung, dass Wasserstoffheizungen erst dann wirtschaftlich werden, wenn der Wasserstoffpreis unter 34–61% des Strompreises liegt. Ob diese Bedingung erfüllt werden kann, sei jedoch sehr unsicher. Die Fraunhofer-Studie¹⁵⁶ bewertet den Einsatz von Wasserstoff zum Heizen in Wohngebäuden ebenfalls kritisch und nicht wettbewerbsfähig – aufgrund der geringeren Effizienz im Vergleich zu Wärmepumpen sowie der hohen Kosten für die Umstellung von Gasnetzen und Gaskesseln. Blauer Wasserstoff und die Beimischung von Wasserstoff zu Erdgas seien nicht treibhausgasneutral und bestenfalls als Übergangslösung sinnvoll.“¹⁵⁷

Kosten zu Wasserstoffheizung:

“Gas-Brennwertkessel, die mit Wasserstoff betrieben werden, kosten ungefähr so viel wie eine mit Erdgas betriebene Heizung: Der Kessel inklusive Abgabesystem kostet im Schnitt 9.000 € ein Warmwasserspeicher etwa 2.500 €¹⁵⁸. Die Lebensdauer beider Systeme beträgt rund 18 Jahre.

Anwendungen von Elektrolyseuren und Brennstoffzellen-Heizungen

Neben der H₂-Brennwertheizung, die wie eine herkömmliche Gasheizung Wasserstoff verbrennt¹⁵⁹, existiert eine weitere Wasserstoffheizung: die Brennstoffzellenheizung, bei der durch eine

elektrochemische Reaktion von Wasserstoff und Sauerstoff Wärme, Strom und Wasser entsteht

¹⁶⁰. In der Literatur werden Brennstoffzellenheizungen häufig mit einem vorangestellten Elektrolyseur, der Wasserstoff und Sauerstoff aus Strom produziert, sowie einem Wasserstofftank kombiniert¹⁶¹.

Elaouzy et al.¹⁶² untersuchen ein System aus Elektrolyseur, Wasserstofftank und nachgeschalteter Brennstoffzelle als Wärmeversorgung für ein marokkanisches Wohngebäude, ergänzt durch PV-

Module und eine Windturbine. Aufgrund der hohen Investitionskosten ist dieses System derzeit jedoch nicht konkurrenzfähig mit einer Stromdirektheizung (inklusive PV und Wind). Höhere Effizienz,

Förderungen und CO₂-Preise könnten in Zukunft die Nutzung von Wasserstoffspeichern attraktiver machen. Maleki et al.¹⁶³ analysieren das technische und ökologische Potenzial eines

Versorgungssystems aus Elektrolyseur, Wasserstofftank, Brennstoffzelle, PV und Batteriespeicher für ein 100 m²-Wohnhaus in Phoenix, Arizona, das autark und netzunabhängig betrieben wird. Das System erreicht eine Vermeidung von 19,7 t CO₂. Die ökonomische Umsetzbarkeit wird in der Studie

¹⁵⁶ Norman Gerhardt u. a., „Wasserstoff im zukünftigen Energiesystem: Fokus Gebäudewärme Wasserstoff im zukünftigen Energiesystem: Fokus Gebäudewärme“, Fraunhofer-Institut für Energiewirtschaft und Energiesystemtechnik IEE, Mai 2020.

¹⁵⁷ Rieck, „Zukünftige Energieversorgung des deutschen Wohngebäudebestands“.

¹⁵⁸ Gebäudeforum Klimaneutral, „Gas-Brennwertkessel“, 2024, https://www.gebaeudeforum.de/fileadmin/gebaeudeforum/Downloads/Factsheet/Factsheet_65ProzentEE_14_GasBrennwert.pdf.

¹⁵⁹ Gebäudeforum Klimaneutral, „Gas-Brennwertkessel“.

¹⁶⁰ Gebäudeforum Klimaneutral, „Brennstoffzellenheizung“, 2024, file:///C:/Users/k.riec/Documents/Literatur/Hydrogen%20heating/Factsheet_65ProzentEE_11_Brennstoffzelle.pdf.

¹⁶¹ Y. Elaouzy u. a., „Assessing the 3E Performance of Multiple Energy Supply Scenarios Based on Photovoltaic, Wind Turbine, Battery and Hydrogen Systems“, *Journal of Energy Storage* 99 (Oktober 2024): 113378, <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.113378>; Sajad Maleki Dastjerdi u. a., „Comprehensive Design and Transient Analysis of Novel Off-Grid Zero Energy and Nearly Zero Emission Building with Hydrogen-Integrated Storage System“, *Energy Technology* 12, Nr. 3 (2024): 2300827, <https://doi.org/10.1002/ente.202300827>.

¹⁶² Elaouzy u. a., „Assessing the 3E Performance of Multiple Energy Supply Scenarios Based on Photovoltaic, Wind Turbine, Battery and Hydrogen Systems“.

¹⁶³ Maleki Dastjerdi u. a., „Comprehensive Design and Transient Analysis of Novel Off-Grid Zero Energy and Nearly Zero Emission Building with Hydrogen-Integrated Storage System“.

nicht betrachtet. Yilanci et al.¹⁶⁴ betonen das Kraft-Wärme-Kopplungspotenzial von Brennstoffzellen, da Wasserstoff nicht nur zur Wärmeproduktion, sondern auch zur Stromerzeugung genutzt werden kann.“¹⁶⁵

Kosten von Brennstoffzellen-Heizungen

„Brennstoffzellenheizungen zeichnen sich durch sehr hohe Investitionskosten aus: Brennstoffzelle und Kessel inklusive Abgabesystem und Speicher kosten in der Regel etwa 37.000 €, ein notwendiger Heizflächentausch weitere 6.000 €¹⁶⁶. Ökonomisch sind sie laut dem Gebäudeforum Klimaneutral vor allem für Gebäude mit hohem und möglichst konstantem Energieverbrauch interessant, da sich so die Amortisationszeit verkürzen und der Eigenverbrauch erhöhen lässt¹⁶⁷. Ein praktisches Beispiel für ein Ganzjahreswasserstoffspeichersystem ist Picea von der Firma HPS (Home Power Solutions AG)¹⁶⁸. Die Anlage kombiniert Elektrolyseur, Brennstoffzelle und Batteriespeicher und kostet in der Anschaffung zwischen 60.000 und 90.000 €¹⁶⁹. HPS warb mit hohen Autarkieraten, intelligentem Energiemanagement und langen Speicherzeiten für Wasserstoff. Das Unternehmen konnte sich jedoch nicht am Markt behaupten und musste im April 2025 aufgrund von Zahlungsunfähigkeit und Überschuldung Insolvenz anmelden¹⁷⁰. In dieser Arbeit werden Brennstoffzellensysteme daher aufgrund ihrer hohen Kosten und der umstrittenen Praxistauglichkeit nicht weiter betrachtet.“¹⁷¹

2.1.3.2 Untersuchung zur Umstellung von Erdgas auf grünem Wasserstoff

Positive Stimmen:

„Im Rahmen der Wärmeplanung soll ermittelt werden, wo zukünftig Gasnetze mit Wasserstoff betrieben werden sollen¹⁷². Projekte wie H2Direkt haben gezeigt, dass die Umwidmung von Gasnetzen auf 100% Wasserstoff gut möglich ist, eine Erkenntnis, die lange Zeit umstritten war¹⁷³. Im Juli 2023 haben die deutschen Fernleitungsnetzbetreiber FNB Gas den Plan eines bundesweiten Wasserstoff- Kernnetzes an die Bundesnetzagentur übergeben, welches geprüft und im Oktober 2024 genehmigt wurde¹⁷⁴ (siehe Abbildung 30). Das geplante Kernnetz soll bis 2032 sukzessiv in Betrieb gehen und über 9.040 km an Leitungen verfügen, wovon 60% auf bestehenden Erdgasnetzen

¹⁶⁴ A. Yilanci u. a., „A Review on Solar-Hydrogen/Fuel Cell Hybrid Energy Systems for Stationary Applications“, *Progress in Energy and Combustion Science* 35, Nr. 3 (2009): 231–44, <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2008.07.004>.

¹⁶⁵ Rieck, „Zukünftige Energieversorgung des deutschen Wohngebäudebestands“.

¹⁶⁶ Gebäudeforum Klimaneutral, „Brennstoffzellenheizung“.

¹⁶⁷ Gebäudeforum Klimaneutral, „Brennstoffzellenheizung“.

¹⁶⁸ solar.red, „PICEA Wasserstoff-Speicher Preis & Erfahrungen 2025 (einfach!)“, o. J., zugegriffen 18. September 2025, <https://solar.red/picea-wasserstoff/>.

¹⁶⁹ solar.red, „PICEA Wasserstoff-Speicher Preis & Erfahrungen 2025 (einfach!)“.

¹⁷⁰ Sandra Enkhardt, „Insolvenzverfahren von HPS eröffnet – Geschäftsbetrieb eingestellt“, April 2025, <https://www.pv-magazine.de/2025/04/07/insolvenzverfahren-von-hps-eroeffnet-geschaeftsbetrieb-eingestellt/>.

¹⁷¹ Rieck, „Zukünftige Energieversorgung des deutschen Wohngebäudebestands“.

¹⁷² Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung, „Gasheizung“.

¹⁷³ Bundesministerium für Bildung und Forschung, „H2Direkt erfolgreich: Seit sieben Monaten 100 Prozent Wasserstoff im Gasnetz“, 24. Mai 2024, https://www.wasserstoff-leitprojekte.de/aktuelles/news/transhyde/umstellung_gasnetz_bayern_test_erfolgreich.

¹⁷⁴ FNBGas, „Wasserstoff-Kernnetz“, o. J., zugegriffen 17. Februar 2025, <https://fnb-gas.de/wasserstoffnetz-wasserstoff-kernnetz/>; Bundesnetzagentur, „Bundesnetzagentur genehmigt Wasserstoff-Kernnetz“, 22. Oktober 2024,

https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/DE/2024/20241022_H2Kernnetz.html#:~:text=Die%20Bundesnetzagentur%20hat%20das%20von,und%2040%20Prozent%20neu%20gebaut.

basieren, die auf Wasserstoff umgewidmet werden, und 40% auf neu installierten Netzen¹⁷⁵. Der Wasserstoff-Kernnetzplan von FNB Gas wurde auf Basis von Großprojekten wie H2ercules von Open Grid Europe und Flow von Gascade, Ontras und terranets bw erstellt¹⁷⁶. Insgesamt rechnet die Bundesnetzagentur mit Investitionskosten von 18,9 Milliarden Euro¹⁷⁷.¹⁷⁸

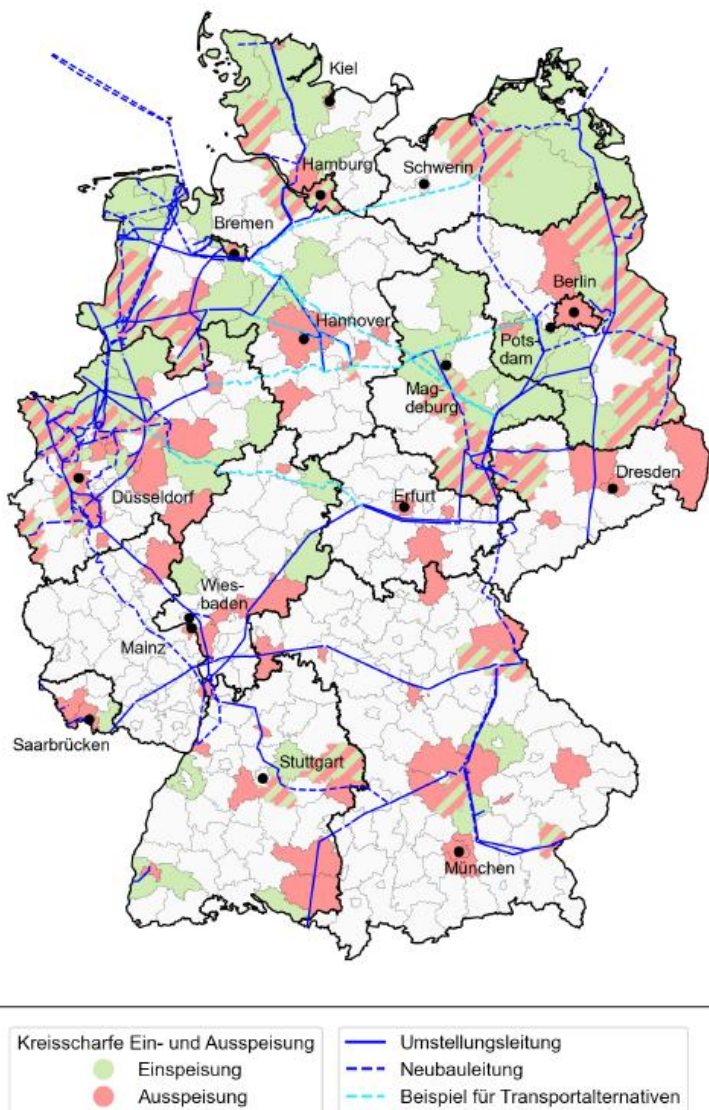


Abbildung 30: Geplantes Wasserstoff-Kernnetz. Stand 12.07.23. Quellen: Rieck et al.¹⁷⁹¹⁸⁰

¹⁷⁵ Bundesnetzagentur, „Bundesnetzagentur ge-neh-migt Was-ser-stoff-Kern-netz“.

¹⁷⁶ DVGW Deutscher Verein des Gas- und Wasserfachs e. V., Hrsg., „Der Gasnetzgebietstransformationsplan - Ergebnisbericht“, September 2023, <https://www.h2vorort.de/fileadmin/Redaktion/Bilder/Publikationen/Ergebnisbericht-2023-des-GTP.pdf>.

¹⁷⁷ Bundesnetzagentur, „Bundesnetzagentur ge-neh-migt Was-ser-stoff-Kern-netz“.

¹⁷⁸ Rieck, „Zukünftige Energieversorgung des deutschen Wohngebäudebestands“.

¹⁷⁹ Rieck, „Zukünftige Energieversorgung des deutschen Wohngebäudebestands“; Rieck u. a., „Large-Scale Quantification of the Future Self-Covered Heat Demand Using a Nationwide Residential Building Database“.

¹⁸⁰ FNB Gas, „Wasserstoff-Kernnetz“, o. J., zugegriffen 17. Februar 2025, <https://fnb-gas.de/wasserstoffnetz-wasserstoff-kernnetz/>; Bundesnetzagentur, „Bundesnetzagentur ge-neh-migt Was-ser-stoff-Kern-netz“, 22. Oktober 2024,

https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/DE/2024/20241022_H2Kernnetz.html#:~:text=Die%20Bundesnetzagentur%20hat%20das%20von,und%2040%20Prozent%20neu%20gebaut.

“ Positive Stimmen verweisen vor allem darauf, dass durch die Einspeisung von Wasserstoff die bestehenden Gasnetze weitergenutzt werden können, anstatt sie mit teuren und aufwendigen Mitteln zurückzubauen¹⁸¹. Deutschland verfügt derzeit über rund 500.000 Kilometer Gasnetz¹⁸². In der Agora-Studie von 2024¹⁸³ wird die Stadt Großberg als Beispiel für die Umwidmung von Erdgasnetzen auf Wasserstoff genannt. Da dort Industrie vorhanden ist und derzeit erdgasbetriebene KWK2-Anlagen genutzt werden, erscheint ein künftiger Einsatz von Wasserstoff möglich.”¹⁸⁴

“ Quarton et al.¹⁸⁵ und Schedler et al.¹⁸⁶ gehen davon aus, dass grüner Wasserstoff eine zentrale Rolle in der Energiewende spielen wird. Sie halten es für möglich, Wasserstoff in lokale Gasnetze einzuspeisen, um Haushalte zu versorgen. Für Gebäude ohne Gasanschluss schlagen sie Metal-Hydrid-Speicher-Systeme vor, die bislang zwar selten eingesetzt werden, aber ein hohes Potenzial für eine sichere und langfristige Speicherung ohne große Energieverluste besitzen¹⁸⁷.“¹⁸⁸

Negative Stimmen:

Der Einsatz von Wasserstoff in der zukünftigen Wärmeversorgung im Gebäudesektor ist in der Literatur sehr umstritten.

Giehl et al.¹⁸⁹ untersuchten den Einfluss der deutschen Energiewende auf die bestehende Gasinfrastruktur. Die techno-ökonomische Analyse zeigt, dass das Gasverteilnetz im Wasserstoffszenario bis 2050 um rund 130.000 km zurückgebaut werden müsste. Zwar sinken die gesamten Betriebskosten in allen Szenarien aufgrund der rückläufigen Gasnachfrage und der verkleinerten Infrastruktur, jedoch liegen die jährlichen Gesamtkosten im Wasserstoffszenario etwa viermal höher als im Elektrifizierungsszenario. Vor diesem Hintergrund bewertet Giehl die Weiterverwendung des heutigen Gasnetzes für Wasserstoff oder synthetische Gase als fragwürdig.¹⁹⁰

¹⁸¹ Thomas Hübener und Alexander Martin, „Gasleitungen: Schnellstraßen für Wasserstoff?“, Dezember 2021, <https://www.iis.fraunhofer.de/de/magazin/serien/serie-wasserstoff/wasserstoff-gasleitungen.html>.

¹⁸² bdew, „Wärmewende“, September 2021, <https://www.bdew.de/presse/pressemappen/waermewende/>.

¹⁸³ „Wärmenetze – klimaneutral, wirtschaftlich und bezahlbar. Wie kann ein zukunftssicherer Business Case aussehen?“, with Agora Energiewende, Prognos, und GEF, 2024, https://www.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2023/2023-18_DE_Business_Case_Waermenetze/A-EW_335_Businesscase_Waermenetze_WEB.pdf.

¹⁸⁴ Rieck, „Zukünftige Energieversorgung des deutschen Wohngebäudebestands“.

¹⁸⁵ Christopher J. Quarton und Sheila Samsatli, „Should We Inject Hydrogen into Gas Grids? Practicalities and Whole-System Value Chain Optimisation“, *Applied Energy* 275 (Oktober 2020): 115172, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115172>.

¹⁸⁶ Steffen Schedler u. a., „A New Bottom-up Method for Classifying a Building Portfolio by Building Type, Self-Sufficiency Rate, and Access to Local Grid Infrastructure for Storage Demand Analysis“, *Applied Energy* 371 (Oktober 2024): 123502, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.123502>.

¹⁸⁷ Schedler u. a., „A New Bottom-up Method for Classifying a Building Portfolio by Building Type, Self-Sufficiency Rate, and Access to Local Grid Infrastructure for Storage Demand Analysis“; Yilanci u. a., „A Review on Solar-Hydrogen/Fuel Cell Hybrid Energy Systems for Stationary Applications“.

¹⁸⁸ Rieck, „Zukünftige Energieversorgung des deutschen Wohngebäudebestands“.

¹⁸⁹ Johannes Giehl u. a., „Assessment of Using Hydrogen in Gas Distribution Grids“, *International Journal of Hydrogen Energy* 48, Nr. 42 (2023): 16037–47, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.01.060>.

¹⁹⁰ Johannes Giehl u. a., „Assessment of Using Hydrogen in Gas Distribution Grids“, *International Journal of Hydrogen Energy* 48, Nr. 42 (2023): 16037–47, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.01.060>.

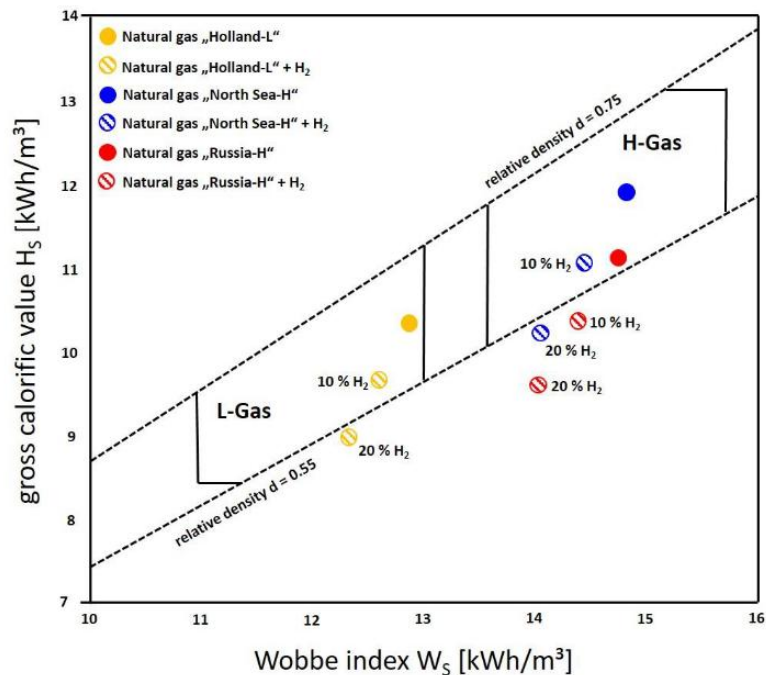


Abbildung 31: Gasqualität-Charakteristika (H_s , W_s , d) als Funktion der Wasserstoffkonzentration in drei verschiedenen Erdgasen „Holland-L“, „North-Sea-H“, „Russia-H“ unter Berücksichtigung des Schwellenwertes G260.¹⁹¹

Laut dem Fraunhofer IEE kann der Wasserstoffanteil in bestehenden Erdgasnetzen maximal 10–20 % betragen¹⁹². Bei höheren Beimischungen würden die Anforderungen an relative Dichte, Heizwert und Wobbe-Index gemäß dem DVGW-Arbeitsblatt G 260, der zentralen Regelung für Brenngase in öffentlichen Gasnetzen, nicht mehr erfüllt (siehe Abbildung 31)¹⁹³. Für eine vollumfängliche Treibhausgasneutralität müssten die Gasnetze komplett auf 100% Wasserstoff umgewidmet werden. Stahlrohre müssen undurchlässiger gemacht oder durch PVC ersetzt werden. Die Kosten hierfür werden auf 10-19€ pro MWh Wasserstoffenergie geschätzt. Beim Neubau von Wasserstoffnetzen wären die Kosten doppelt so hoch.¹⁹⁴

Laut der Review-Studie von Rosenow zeigen 32 unabhängige Studien, dass Wasserstoff in der großflächigen Nutzung zur Gebäudewärmeversorgung im Vergleich zu anderen erneuerbaren Energieträgern deutlich unattraktiver ist und sein wird, hauptsächlich durch die geringere Effizienz, die sich durch die vorgeschaltete Elektrolyse und den Transport ergibt¹⁹⁵.

In einer Metastudie von 54 unabhängigen Studien zeigt Rosenow, dass ein Transformationspfad hin zu grünem Wasserstoff im Vergleich zur Elektrifizierung zu 0–400 % (Median: 24 %) höheren

¹⁹¹ Norman Gerhardt u. a., „HYDROGEN IN THE ENERGY SYSTEM OF THE FUTURE: FOCUS ON HEAT IN BUILDINGS“, Fraunhofer Institute for Energy Economics and Energy System Technology (IEE), 2020.

¹⁹² Norman Gerhardt u. a., „HYDROGEN IN THE ENERGY SYSTEM OF THE FUTURE: FOCUS ON HEAT IN BUILDINGS“, Fraunhofer Institute for Energy Economics and Energy System Technology (IEE), 2020.

¹⁹³ Gerhardt u. a., „HYDROGEN IN THE ENERGY SYSTEM OF THE FUTURE: FOCUS ON HEAT IN BUILDINGS“.

¹⁹⁴ Gerhardt u. a., „HYDROGEN IN THE ENERGY SYSTEM OF THE FUTURE: FOCUS ON HEAT IN BUILDINGS“.

¹⁹⁵ Jan Rosenow, „Is Heating Homes with Hydrogen All but a Pipe Dream? An Evidence Review“, *Joule* 6, Nr. 10 (2022): 2225–28, <https://doi.org/10.1016/j.joule.2022.08.015>.

Energiesystemkosten und zu 27–650 % (Median: 86 %) höheren Endkundenenergiepreisen führen wird.¹⁹⁶

Hoseinpoori et al.¹⁹⁷ untersuchen die Systemkosten verschiedener Versorgungsszenarien im Vereinigten Königreich und berichten nur von geringen Kostenunterschieden zwischen einem reinen Wasserstoff- und einem Elektrifizierungsszenario. Gleichzeitig weisen sie darauf hin, dass Wasserstoff vorzugsweise in Sektoren eingesetzt werden sollte, in denen eine Umstellung auf Strom schwer möglich ist, wie z. B. in der Stahlindustrie, der Zementproduktion, im Langstreckenflugverkehr oder im Schiffsverkehr. Im Gebäudesektor sei grüner Wasserstoff hingegen aufgrund des deutlich höheren Strombedarfs im Vergleich zu Wärmepumpen unattraktiv.¹⁹⁸

Auch Stolten et al. zeigen in der KSG45 Studie, dass die Kosten für den Umbau, Ausbau oder Rückbau von Energieinfrastrukturen aus Gesamtenergieperspektive nur 15-20% ausmachen. Mit diesem Hintergrund sind die Kosten für die Umwidmung oder den Rückbau der Gasnetze nicht entscheidend im Vergleich zu den Energiekosten von grünem Wasserstoff.¹⁹⁹

2.1.4 Ergebnisse des AP4

Der folgende Abschnitt basiert zum Großteil auf den Kapitel 3.5 und 4.4 der Dissertation von Rieck (Preprint)²⁰⁰. Abbildungs- und Literaturreferenzen sind gegenüber dem Originaltext angepasst.

Hier folgt eine detaillierte bottom-up Analyse verschiedener Transformationspfade der identifizierten Typgebäude. Die Ergebnisse sind am Beispiel Sachsen dargestellt. Es wird zwischen denkmalgeschützten und nicht-denkmalgeschützten Gebäuden unterschieden, die bis 2050 mindestens teilsaniert werden können und keinen Auflagen bzgl. Dachflächen-PV oder Solarthermie unterliegen. Da keine zentrale Datenbank für Denkmalgeschützte Gebäude vorliegt, wurde entschieden, eine Worst-Case-Abschätzung durchzuführen, um herauszufinden, wie groß die Auswirkungen des Denkmalschutzes im extremsten Falle sind. Dafür wurde angenommen, dass alle Gebäude mit einem Baujahr vor 1900 denkmalgeschützt sind. Als „Denkmalschutz“ wurde definiert, dass die Gebäude weder saniert noch mit PV oder Solarthermie ausgestattet werden können.²⁰¹

2.1.4.1 Nach 1900 (Normale Gebäude in Sachsen, die unsaniert sind und vorher fossil geheizt wurden):

“Die folgenden Analysen beziehen sich auf Gebäude mit Baujahren nach 1900. Diese Gebäude sind alle teilsaniert. [Die Kosten und CO₂-Emissionen basieren auf den Annahmen aus Abschnitt 2.1.2.2]. Die jährlichen Gesamtkosten sind für Fernwärmeheizungen im Mittel am geringsten

¹⁹⁶ Jan Rosenow, „A Meta-Review of 54 Studies on Hydrogen Heating“, *Cell Reports Sustainability* 1, Nr. 1 (2024): 100010, <https://doi.org/10.1016/j.crsus.2023.100010>.

¹⁹⁷ Pooya Hoseinpoori u. a., „Comparing Alternative Pathways for the Future Role of the Gas Grid in a Low-Carbon Heating System“, *Energy Strategy Reviews* 49 (September 2023): 101142, <https://doi.org/10.1016/j.esr.2023.101142>.

¹⁹⁸ Pooya Hoseinpoori u. a., „Comparing Alternative Pathways for the Future Role of the Gas Grid in a Low-Carbon Heating System“, *Energy Strategy Reviews* 49 (September 2023): 101142, <https://doi.org/10.1016/j.esr.2023.101142>.

¹⁹⁹ *Neue Ziele auf alten Wegen? Strategien für eine treibhausgasneutrale Energieversorgung bis zum Jahr 2045*, with Detlef Stolten (Forschungszentrum Jülich GmbH, Zentralbibliothek, Verlag, 2022).

²⁰⁰ Katharina Rieck, „Zukünftige Energieversorgung des deutschen Wohngebäudebestands“ (Preprint, RWTH Aachen, 2025).

²⁰¹ Rieck, „Zukünftige Energieversorgung des deutschen Wohngebäudebestands“.

mit 27 - 28 €₂₀₂₄/m² (District-F-PV1B und District-R-PV1B, siehe Abbildung 34). Aber auch andere Systeme wie Wärmepumpen mit und ohne Solarthermie in Kombination mit Fußbodenheizungen und die Stromdirektheizungen sind gute Alternativen (29 €₂₀₂₄/m² für HeatPump-F-PV1B, 30 €₂₀₂₄/m² für HeatPumpSolar-F-PV1B und 34 €₂₀₂₄/m² für Electric-PV1B). Wasserstoffheizungen sind mit 45 €₂₀₂₄/m² (Hydrogen-F-PV1B) und 47 €₂₀₂₄/m² (Hydrogen-R-PV1B) im Schnitt etwas teurer.

Am teuersten und preislich variabelsten sind allerdings die Pelletheizungen (Mittelwert (\emptyset) ist 89 €₂₀₂₄/m² für Pellet-F-PV1B und Pellet-R-PV1B).

Da nur klimaneutrale Systeme betrachtet werden, ergeben sich die Gesamt-CO₂-Emissionen nahezu ausschließlich aus der Geräteproduktion. Der Fußabdruck ist für Stromdirektheizungen mit 1,2 kgCO₂/m² im Mittel am geringsten und für die Wärmepumpen am höchsten (2,8 kgCO₂/m²). Die Geräteemissionen sind anteilmäßig im Vergleich zu den heutigen Energieemissionen allerdings sehr gering (...).²⁰²

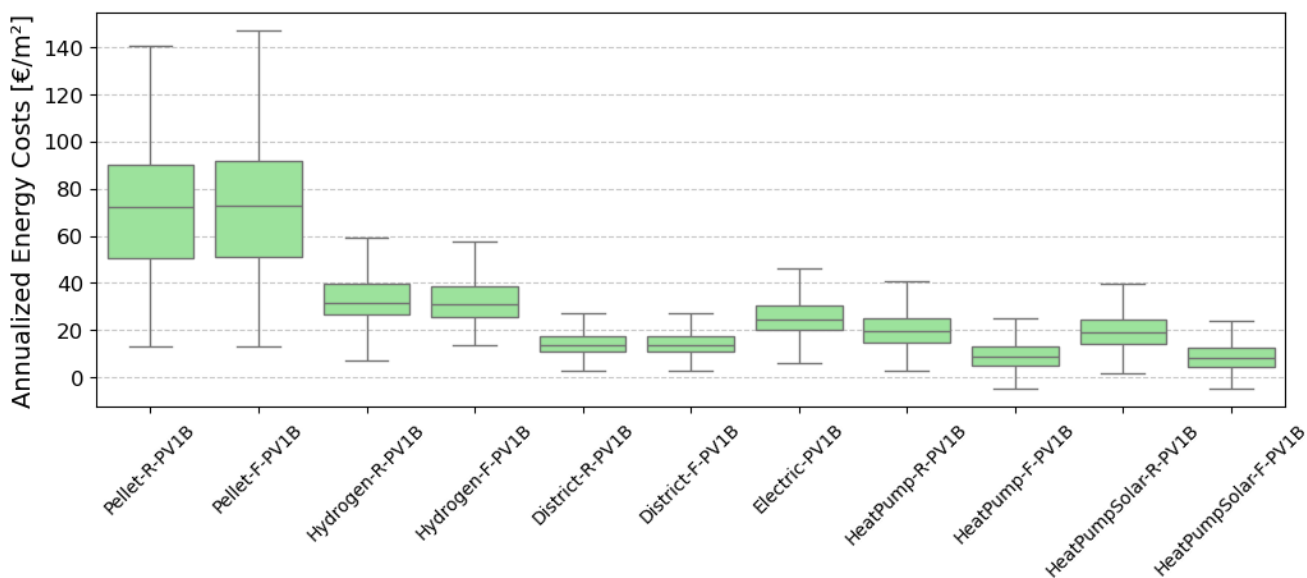


Abbildung 32: Energiekosten für sächsische Wohngebäude mit Baujahren nach 1900 jährlich umgelegt in €₂₀₂₄/m². Betrachtetes Jahr ist 2050. Quelle: Preprint der Dissertation von Rieck²⁰³

²⁰² Rieck, „Zukünftige Energieversorgung des deutschen Wohngebäudebestands“.

²⁰³ Rieck, „Zukünftige Energieversorgung des deutschen Wohngebäudebestands“.

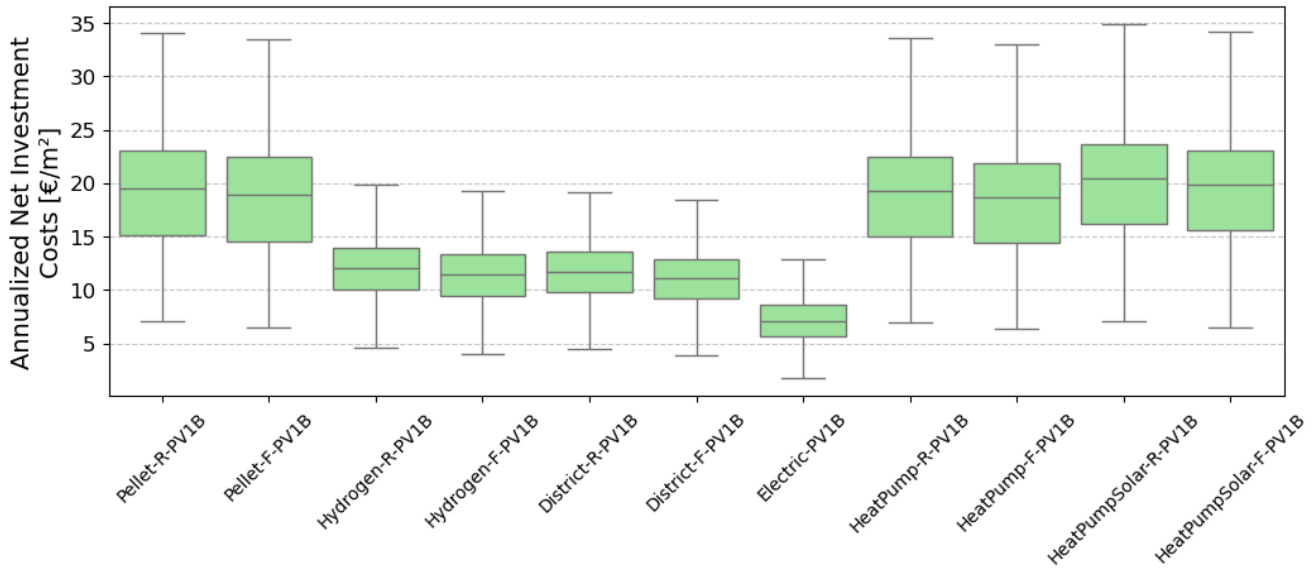


Abbildung 33: Nettoinvestitionskosten (Förderungen mit eingerechnet) der gebäudenahen Energiesysteme für sächsische Wohngebäude mit Baujahren nach 1900 jährlich umgelegt in €2024/m². Betrachtetes Jahr ist 2050. Quelle: Preprint der Dissertation von Rieck²⁰⁴

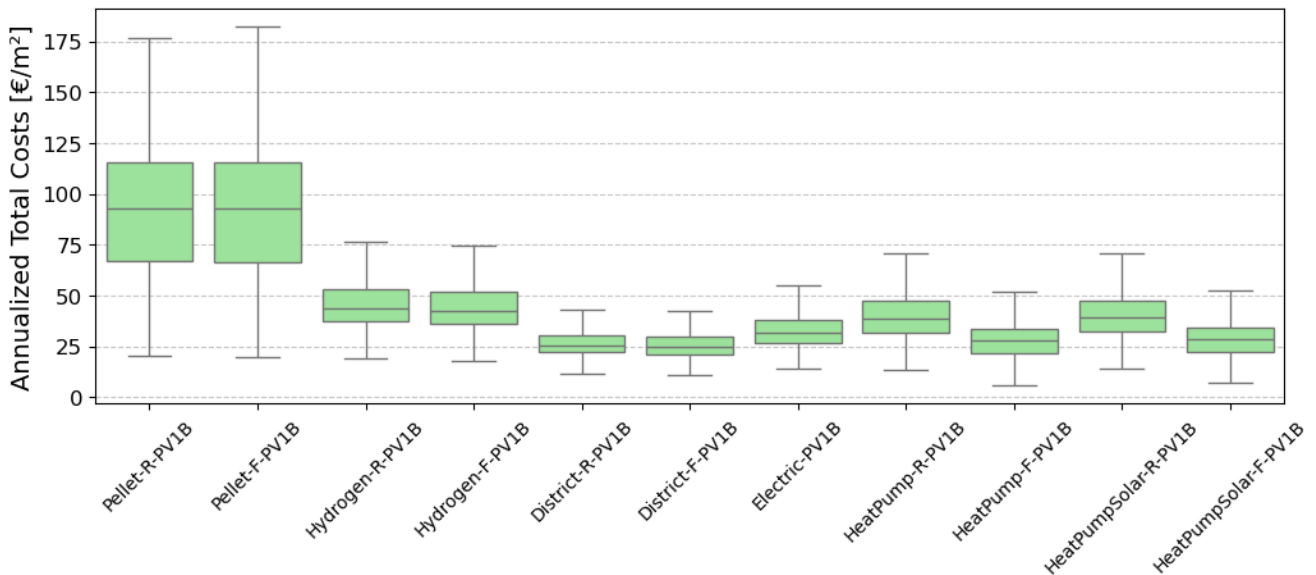


Abbildung 34: Jährlich umgelegte Gesamtkosten für sächsische Wohngebäude mit Baujahren nach 1900 jährlich umgelegt in €2024/m². Betrachtetes Jahr ist 2050. Quelle: Preprint der Dissertation von Rieck²⁰⁵

2.1.4.2 Vor 1900 (Denkmalgeschützte Gebäude in Sachsen, die unsaniert sind und vorher fossil geheizt wurden):

„Die denkmalgeschützten, unsanierten und fossil beheizten Gebäude in Sachsen umfassen 30.743 repräsentierte Gebäudedaten. Sie machen damit 28% des unsanierten fossilen Bestands in Sachsen

²⁰⁴ Rieck, „Zukünftige Energieversorgung des deutschen Wohngebäudebestands“.

²⁰⁵ Rieck, „Zukünftige Energieversorgung des deutschen Wohngebäudebestands“.

164 und rund 8% des gesamten fossilen Bestands aus. Betrachtet man die Normheizlast, so entfallen auf die fossilen Denkmäler 46 GW, was 16% der gesamten fossilen Heizlast in Sachsen entspricht. Am sächsischen Gesamtbestand haben die fossilen Denkmäler einen Anteil von 6% und einen Anteil von 10% an der Gesamtnormheizlast. Die fossilen, unsanierten Gebäude aus der Zeit nach 1900 stellen 16% des gesamten Gebäudebestands in Sachsen dar und verursachen 32% der Gesamtnormheizlast. Dies verdeutlicht, dass Denkmäler eine nicht vordergründige, aber dennoch relevante Herausforderung für die Dekarbonisierung des Bestandes darstellen. Die Tatsache, dass unsanierte Gebäude nur 28% des Bestandes, aber 42% der Gesamtheizlast ausmachen, unterstreicht die Relevanz von energetischen Sanierungsmaßnahmen.“²⁰⁶

“Die folgenden Analysen beziehen sich auf Gebäude mit Baujahren vor 1900. Bei Betrachtung der jährlich umgelegten Gesamtkosten ist das jährlich günstigste Energiesystem die Heizung durch Fernwärme (siehe Abbildung 37). Es hat für alle denkmalgeschützten Gebäude die niedrigste Kostenspreizung ($\bar{\varnothing} = 60 \pm 14 \text{ €}_{2024}/\text{m}^2$). Nach Fernwärme sind Wärmepumpen mit Heizkörpern am günstigsten ($\bar{\varnothing} = 84 \pm 21 \text{ €}_{2024}/\text{m}^2$), gefolgt von der Wasserstoffheizung ($\bar{\varnothing} = 97 \pm 23 \text{ €}_{2024}/\text{m}^2$), der Stromdirektheizung ($\bar{\varnothing} = 98 \pm 21 \text{ €}_{2024}/\text{m}^2$) und zuletzt der Pelletheizung ($\bar{\varnothing} = 116 \pm 25 \text{ €}_{2024}/\text{m}^2$). Diese hat die größte Kostenspreizung.

Die niedrigsten Gesamtemissionen liefert die Stromdirektheizung mit $0,1 \text{ kgCO}_2/\text{m}^2$ im Jahr (...). Die Wärmepumpe hat im Vergleich den höchsten CO_2 -Fußabdruck in der Herstellung ($1,8 \text{ kgCO}_2/\text{m}^2$). Nach den Annahmen in Abschnitt 3.3.4 sind diese Energiesysteme im Verbrauch allerdings klimaneutral und erzeugen durch den Energieverbrauch keine Emissionen.“²⁰⁷

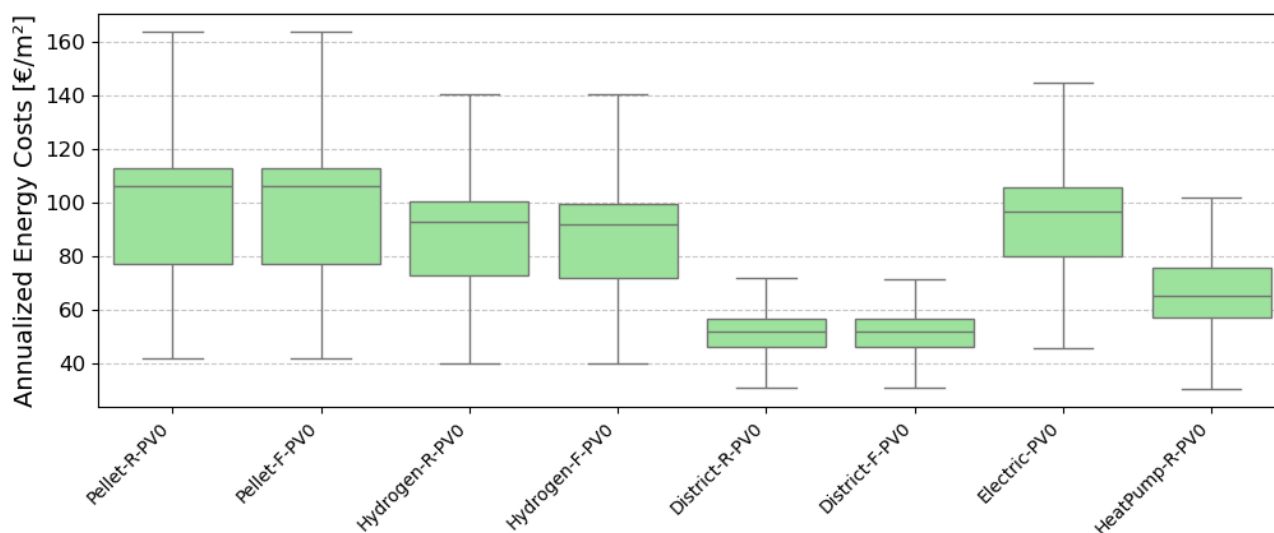


Abbildung 35: Energiekosten für sächsische Wohngebäude mit Baujahren vor 1900 jährlich umgelegt in €2024/m². Betrachtetes Jahr ist 2050. Quelle: Preprint der Dissertation von Rieck²⁰⁸

²⁰⁶ Rieck, „Zukünftige Energieversorgung des deutschen Wohngebäudebestands“.

²⁰⁷ Rieck, „Zukünftige Energieversorgung des deutschen Wohngebäudebestands“.

²⁰⁸ Rieck, „Zukünftige Energieversorgung des deutschen Wohngebäudebestands“.

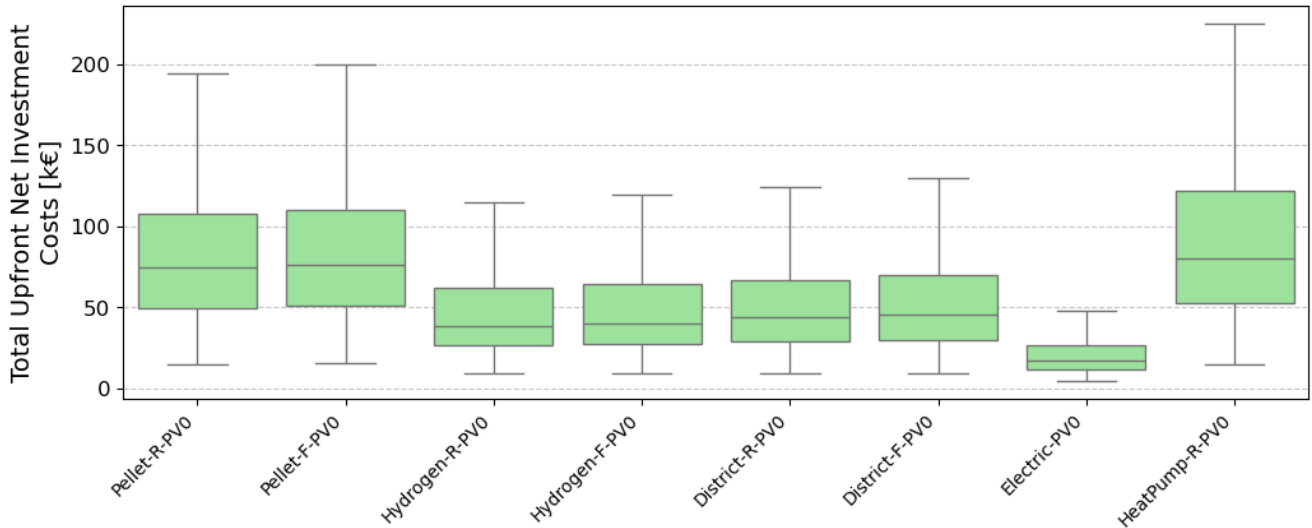


Abbildung 36: Nettoinvestitionskosten (Förderungen mit eingerechnet) der gebäudenahen Energiesysteme für sächsische Wohngebäude mit Baujahren vor 1900 jährlich umgelegt in €2024/m². Betrachtetes Jahr ist 2050. Quelle: Preprint der Dissertation von Rieck²⁰⁹

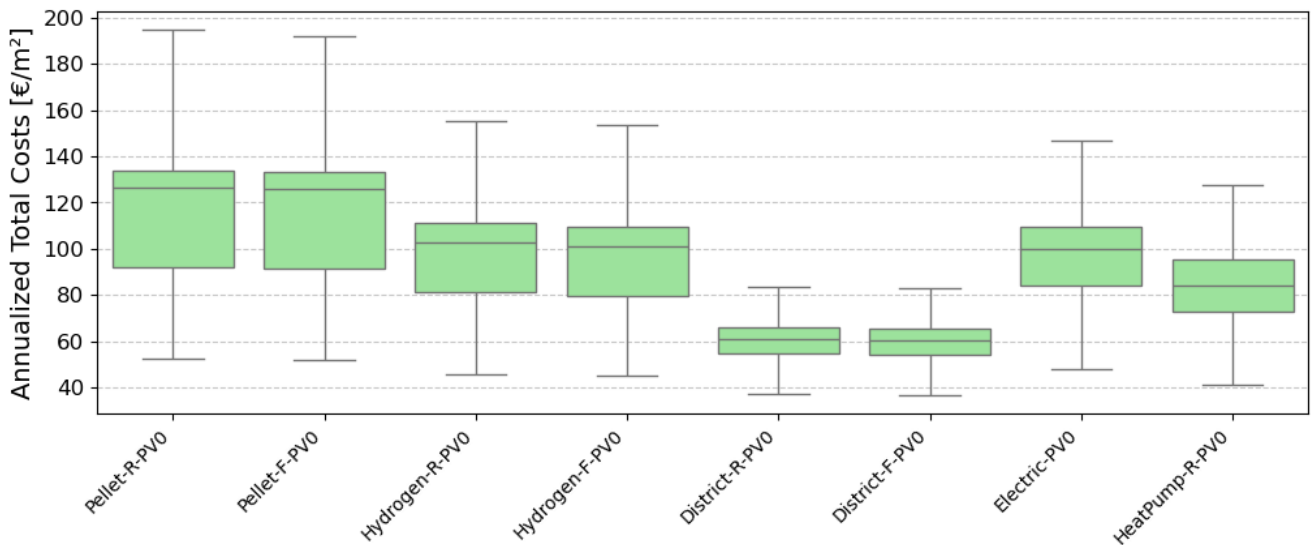


Abbildung 37: Jährlich umgelegte Gesamtkosten für sächsische Wohngebäude mit Baujahren vor 1900 jährlich umgelegt in €2024/m². Betrachtetes Jahr ist 2050. Quelle: Preprint der Dissertation von Rieck²¹⁰

2.1.4.3 Fazit zu Transformationspfaden Wasserstoff versus Wärmepumpen auf Gebäudeebene am Beispiel Sachsen

Für unsanierte, denkmalgeschützte Gebäude mit Baujahr vor 1900, die ihre fossilen Heizsysteme ersetzen müssen und keine PV- oder Solarthermieanlagen nutzen dürfen, ergeben sich im Jahr 2050 folgende Kosten:

²⁰⁹ Rieck, „Zukünftige Energieversorgung des deutschen Wohngebäudebestands“.

²¹⁰ Rieck, „Zukünftige Energieversorgung des deutschen Wohngebäudebestands“.

System	Energiekosten €/m2a	Nettoinvestitionskosten €/m2a	Gesamtkosten €/m2a	Unterschied prozentual zu Wärmepumpe
Fernwärme	52	9	61	-27%
Wärmepumpe	66	18	84	0%
Wasserstoff	89	9	99	+15%
Stromdirekt	94	4	98	+14%
Pellet	98	18	117	+28%

Tabelle 2: Überblick über die mittleren Kosten verschiedener Versorgungspfade im derzeit fossil beheizten sächsischen Wohngebäudebestand mit Baujahren vor 1900.

Für Gebäude mit Baujahr ab 1900 ohne Denkmalschutz und ohne Einschränkungen bei Sanierung, Photovoltaik oder Solarthermie ergeben sich im Jahr 2050 die folgenden Kosten:

System	Energiekosten €/m2a	Nettoinvestitionskosten €/m2a	Gesamtkosten €/m2a	Unterschied prozentual zu Wärmepumpe
Fernwärme mit PV+ Batterie	15	11	27	-7%
Wärmepumpe mit PV+ Batterie	11	18	29	0%
Wärmepumpe mit PV+ Batterie + Solarthermie	9	20	30	+3%
Wasserstoff mit PV+ Batterie	33	12	45	+36%
Stromdirekt mit PV+ Batterie	27	7	34	+15%
Pellet mit PV+ Batterie	69	19	89	+67%

Tabelle 3: Überblick über die mittleren Kosten verschiedener Versorgungspfade im derzeit fossil beheizten sächsischen Wohngebäudebestand mit Baujahren ab 1900.

Fazit:

Im Schnitt betrachtet schneiden Wärmepumpen aus Sicht der jährlich umgelegten Gesamtkosten des Gebäudeenergiesystems im Jahr 2050 in einem Wohngebäudebestand wie Sachsen ca. 15% besser ab im Falle von Denkmälern und 36% besser im Falle von normalen, unregulierten Gebäuden.

In dem Teil des sächsischen Gebäudebestand, der zurzeit unsaniert und fossil beheizt ist, ist die günstigste Option bis 2050 die Fernwärme, dicht gefolgt von Wärmepumpen, und die teuerste die Pelletheizung. Wasserstoffheizungen schneiden insgesamt schlechter als Fernwärme und

Wärmepumpen ab, allerdings sind sie 2050 trotzdem deutlich günstiger als Pelletheizungen. Stromdirektheizungen sind mit PV und Batteriespeicher um 24% günstiger als Wasserstoffheizungen, ansonsten sind sie von den jährlich umgelegten Gesamtkosten vergleichbar.

2.1.5 Ergebnisse des AP5

Im Rahmen des AP5 sollten die Auswirkungen verschiedener Versorgungspfade auf die Energieinfrastrukturen untersucht werden. Im deutschen Wohngebäudebestand wurden Daten zu derzeitigen Energieträgern integriert (Stand 2022, Zensus²¹¹) und lokal aufgelöst. Mithilfe der Sensitivitätsanalyse und der Modellierung von Energieinfrastrukturen konnten Kosten und Transformationsempfehlungen für jedes Typgebäude erstellt werden. Die Auswirkungen verschiedener Technologien auf Strom-, Fernwärme- oder Gasnetzbedarfe und Ausbauten wurden analysiert.

2.1.5.1 Hochrechnung der Energiebedarfe je nach Versorgungstechnologie

2050

- Durch das Gebäudeclustering wurden 155.673 in Deutschland identifiziert. Diese repräsentieren zusammen 7.389.240, das heißt etwas weniger als die Hälfte aller deutschen Wohngebäude wurde erfasst (siehe Details im Preprint der Dissertation von Rieck²¹²). Um das Gesamtbild für den deutschen Wohngebäudebestand zu erhalten, werden die Ergebnisse entsprechend auf den Gesamtwohnbestand von 19,95 Mio. Gebäuden²¹³ hochskaliert.
- Es konnte für diese hohe Anzahl an Typgebäude keine Sensitivitätsrechnung durchgeführt werden aufgrund des hohen Zeit- und Rechenaufwandes (155673 Typgebäude * 51 Energiesystem-Optionen * 5min Simulationszeit). Deshalb wurden für 12 Gebäudetypen (4 Gebäudetypen * 3 Renovierungsstandards) die Sensitivitätsrechnungen durchgeführt, in denen Kosten, Verbräuche und Emissionen und Zeitreihen für jeweils 51 Energiesystemoptionen bottom-up bestimmt wurden. Diese Ergebnisse sind auf die Wohnfläche normiert und wurden auf die deutschen Typgebäude gemappt. Auf dieser Basis wurden für den deutschen Wohngebäudebestand die optimalen Energiesysteme (nach den jährlich umgelegten Gesamtkosten) und die Verbräuche und Emissionen approximiert.

Szenario 1: Status Quo (alle Gebäude ersetzen ihre Heizsysteme durch aktuelle Modelle desselben Systemtyps, ohne Sanierungs- oder Effizienzmaßnahmen)

- Wenn nichts geändert würde (kein anders System, kein PV, keine Renovierung), dann wäre der Gesamtenergieverbrauch des deutschen Wohngebäudebestands von 19,95 Mio.

²¹¹ Statistische Ämter des Bundes und der Länder, „Zensus 2022“.

²¹² Rieck, „Zukünftige Energieversorgung des deutschen Wohngebäudebestands“.

²¹³ Deutsche Energie-Agentur, *DENA-GEBÄUDEREPORT 2025. Zahlen, Daten, Fakten zum Klimaschutz im Gebäudebestand*.

Wohngebäuden bei ca. 1,21 PWh²¹⁴. Das entspräche einem Endenergiebedarf von ca. 61 MWh pro Gebäude pro Jahr.

- Davon Wärmepumpen 16 TWh (1,3%)
- Stromdirekt: 33 TWh (2,7%)
- Fernwärme: 68 TWh (5,6%)
- Gas: 594 TWh (49,2%)
- Oil: 311 TWh (25,8%)
- Pellet: 184 TWh (15,3%)

Szenario 2: No refurbishment but cost optimal system (es werden keine Sanierungsmaßnahmen durchgeführt, aber die Gebäude wählen das kostengünstigste Energiesystem²¹⁵):

- Wenn alle Gebäude aus Gesamtkostensicht das kostenoptimalste System benutzen, ist der Gesamtendenergiebedarf²¹⁶ ca. 223 TWh, d.h. ca. 82% weniger als im Szenario 1. Das entspräche einem Endenergiebedarf von ca. 11 MWh pro Gebäude pro Jahr.
- Davon entfallen
 - Ca. 185 TWh aus Wärmepumpenstrom aus dem Netz, dies sind ca. 18,9 Mio. Gebäude, welche für 83% des Gesamtendenergiebedarfs des deutschen Wohngebäudebestands verantwortlich sind.
 - Ca. 16 TWh aus Fernwärmebedarfen, dies sind ca. 307 Tsd. Gebäude, welche für 7% des Gesamtendenergiebedarfs des deutschen Wohngebäudebestands verantwortlich sind. Alle Gebäude, bei denen Fernwärme als günstigstes System identifiziert wurde, befinden sich im unsanierten Zustand.
 - Ca. 22 TWh durch Stromdirektheizungen, dies sind ca. 716 Tsd. Gebäude, welche für 10% des Gesamtendenergiebedarfs des deutschen Wohngebäudebestands verantwortlich sind.
 - Wasserstoffheizungen und Pelletheizungen sowie fossile Heizungen wurden im deutschen Wohngebäudebestand nicht als kostoptimale Wärmeversorgungssysteme identifiziert

Szenario 3: Advanced refurbished and cost optimal system (die Gebäude werden umfänglich saniert und wählen zusätzlich das kostengünstigste Energiesystem¹²⁵)

- Wenn alle Gebäude bis 2050 umfänglich saniert werden und das aus Gesamtkostensicht kostenoptimalste System benutzen, ist der Gesamtendenergiebedarf¹²⁶ ca. 85 TWh, d.h. ca. 93% weniger als im Szenario 1 und nochmal 62% weniger im Vergleich zu Szenario 2. Dies entspräche einem Jahresendenergieverbrauch von 4,3 MWh pro Gebäude.
- Davon entfallen

²¹⁴ Für 7,39 Mio. Wohngebäude wurde ein Gesamtenergiebedarf von 445 TWh errechnet. Hochskaliert auf 19,95 Mio. Gebäude entspräche dies ca. 1,17 PWh.

²¹⁵ Kostengünstigstes System meint das System mit den niedrigsten jährlich umgelegten Gesamtkosten aus Opex- und Capex-Kosten für das jeweilige Energiesystem

²¹⁶ aus dem Netz oder eingekaufte Netto-Energie abzüglich des selbstproduzierten und selbstverbrauchten Stroms aus PV

- Ca. 77 TWh aus Wärmepumpenstrom aus dem Netz, dies sind ca. 19,13 Mio. Gebäude, welche für 90% des Gesamtenergiebedarfs des deutschen Wohngebäudebestands verantwortlich sind.
- Ca. 9 TWh durch Stromdirektheizungen, dies sind ca. 818 Tsd. Gebäude, welche für 10% des Gesamtenergiebedarfs des deutschen Wohngebäudebestands verantwortlich sind.
- Wasserstoffheizungen, Fernwärme und Pelletheizungen sowie fossile Heizungen wurden im deutschen Wohngebäudebestand nicht als kostoptimale Wärmeversorgungssysteme identifiziert

Berücksichtigt man die Tatsache, dass ca. 7,4 Mio. deutsche Wohngebäude analysiert wurden und skaliert das hoch auf den gesamten Wohngebäudebestand, ergeben sich die folgenden Zahlen (siehe Tabelle 4):

Szenario	Energieverbrauch auf Gebäudeebene	CO ₂ -Emissionen auf Gebäudeebene	Jährlich umgelegte Systemgesamtkosten auf Gebäudeebene ²¹⁷
1: Status Quo	1207 TWh	226 Mt CO ₂ (davon 99% durch Energieverbrauch, 1% durch Geräteherstellung)	350 Mrd. € (davon 92% durch Opex, 8% durch Capex)
2: Cost-optimal system	223 TWh	7 Mt CO ₂ (allein durch Geräteherstellung)	99 Mrd. € (davon 49% durch Opex, 51% durch Capex)
3: Advanced refurbishment and cost-optimal system	85 TWh	5 Mt CO ₂ (allein durch Geräteherstellung)	44 Mrd. € (davon 21% durch Opex, 79% durch Capex)

Tabelle 4: Überblick der drei Szenarien (Energieverbrauch, CO₂-Emissionen und jährlich umgelegte Systemgesamtkosten).

Für das Szenario 3, in dem alle Wohngebäude eine umfängliche Sanierung erhalten, werden die jährlich umgelegten Sanierungskosten miteingerechnet. Laut dem Bericht des BPIE von 2025 können ambitionierte Sanierungsmaßnahmen mit 432€/m² Netto-Wohnfläche überschlagen werden²¹⁸. Nimmt man für die Sanierungsmaßnahmen eine Durchschnittslebensdauer von 50 Jahren an, wie in der Studie von Kirschbaum et al.²¹⁹ beschrieben, dann ergeben sich jährlich umgelegte Sanierungskosten von 8,6 €/m²a. Für das Szenario 3 erhält man dadurch jährlich umgelegte Sanierungskosten von 37,5 Mrd. € für den gesamten deutschen Wohngebäudebestand (siehe Tabelle 5). Trotz der vorangehenden Sanierungskosten ist das Szenario 3 der günstigste Fall.

²¹⁷ Systemgesamtkosten sind hier die Investitionskosten abzgl. Förderungen für das Gebäudeenergiesystem, die Wartungskosten des Energiesystems und die Energiekosten. Sanierungskosten sind hier nicht inbegriffen.

²¹⁸ Dan Staniaszek u. a., Hrsg., *Die Sanierung Des Deutschen Gebäudebestandes: Eine Wirtschaftliche Bewertung Aus Investorensicht* (Buildings Performance Institute Europe (BPIE), 2015).

²¹⁹ Julia Kirschbaum u. a., „From Demand to Action: Analysing Building Emissions and Refurbishment Scenarios Towards Climate Neutrality“, preprint, SSRN, 2024, <https://doi.org/10.2139/ssrn.5066607>.

Szenario	Jährlich umgelegte Sanierungskosten auf Gebäudeebene	Jährlich umgelegte Systemgesamtkosten auf Gebäudeebene	Jährlich umgelegte Gesamtkosten auf Gebäudeebene
1: Status Quo	0€	350 Mrd. €	350 Mrd. €
2: Cost-optimal system	0€	99 Mrd. €	99 Mrd. €
3: Advanced refurbishment and cost-optimal system	37,5 Mrd. €	44 Mrd. €	81,5 Mrd. €

Tabelle 5: Überblick der drei Szenarien (Jährlich umgelegte Sanierungskosten, Systemgesamtkosten und die Summe dessen, die Gesamtkosten).

2.1.5.2 Auswirkungen auf die Versorgungsinfrastrukturen

Die Auswirkungen auf die Versorgungsinfrastrukturen lassen sich näherungsweise bestimmen. Im Szenario 1, in dem jedes Gebäude bis 2050 sein bestehendes Heizungssystem beibehält, sind keine zusätzlichen Energieinfrastrukturen von Nöten, da die Netze bereits bestehen. Nachteile ergeben sich für den Endkunden aufgrund der hohen Energiepreise, die auf die CO₂-Preise zurückzuführen sind.

Im Szenario 2, in dem jedes Haus sein Energiesystem durch ein kosten-optimales ersetzt, zeigt sich, dass ca. 83% des Gesamtenergiebedarfs durch Wärmepumpen, 10% durch Stromdirektheizungen und 7% durch Fernwärme gedeckt werden. Der Endenergiebedarf (vom Netz) wird dadurch zwar um 82% reduziert, aber der Strombedarf wird durch dieses Szenario von 49 TWh auf 207 TWh erhöht. Der Fernwärmebedarf würde etwas sinken. Gasheizungen würden sich nicht rechnen, ebenso wenig Wasserstoffheizungen. Hier zeigt sich ein hoher Stromnetzausbaubedarf, allerdings bräuchte man für die konkrete Kostenanalyse die Leistungen und Einspeiseleistungen der Gebäude, nicht nur den Netzenergiebedarf.

Im Szenario 3 wird Endenergiebedarf (vom Netz) um 93% gegenüber Szenario 1 reduziert. Für alle Gebäude, die eine umfängliche Sanierung erhalten haben, zeigen sich Wärmepumpen in 96% der Wohngebäude als kosten-optimales Heizungssystem (in Kombination mit PV, Batterie und Energiemanagementsystem). Die restlichen 4% der Wohngebäude nutzen vorzugsweise Stromdirektheizungen, welche durch geringe Installations- und Anschaffungskosten einen Vorteil erhalten. Der Gesamtstrombedarf für den deutschen Wohngebäudebestand läge in diesem Szenario bei 85 TWh pro Jahr. Das zeigt, dass energetische Sanierungen die Netzenergiebedarfe um mehr als die Hälfte reduzieren können und dadurch Netze entlasten können. Trotz der zusätzlichen Investitionskosten von ca. 38 Mrd. €, die durch energetische Sanierungen entstehen, ist das Szenario 3 aus Gebäudegesamtkostenperspektive am günstigsten. Daher sollten energetische Sanierungen bei der Planung bis 2050 mit eingebunden werden, um den Ausbau unnötiger Netzkapazitäten zu vermeiden und Kosten für das Gebäudeenergiesystem und die Infrastruktur zu sparen.

2.1.6 Ergebnisse des AP6

Die Gebäudeversorgungspfade wurden aus nationaler Gesamtenergiesystemperspektive betrachtet und mit den Ergebnissen aus ETHOS.NESTOR verglichen.

Laut der Studie von Schöb ²²⁰ wird im Gebäudesektor zwischen 2020 und 2045 mit einer Zunahme der Energienachfrage durch mehr Wohnfläche gerechnet (10% Steigerung gegenüber 2020). Allerdings wird dieser durch Sanierungsmaßnahmen und effizientere Energieversorgung überkompensiert, was zu einer Reduktion des Gebäudeenergiebedarfs von 60% im Vergleich zu 2020 führt. Im Jahr 2020 werden ca. 960 TWh für Raumheizung und Warmwasser im Gebäudesektor verwendet, wovon der Großteil mit 416 TWh auf Erdgas fällt. Im Jahr 2045 liegt der Endenergieverbrauch im Gebäudesektor bei ca. 210 TWh, wovon 70-75% (153 TWh) für Wärmepumpenstrom verwendet wird. Die Wärmepumpen stellen ca. 522 TWh an Wärme für Raumheizung und Warmwasserbereitung bereitstellen. Etwa 25% der Gebäudeenergie werden durch Biomasse erzeugt. ²²¹

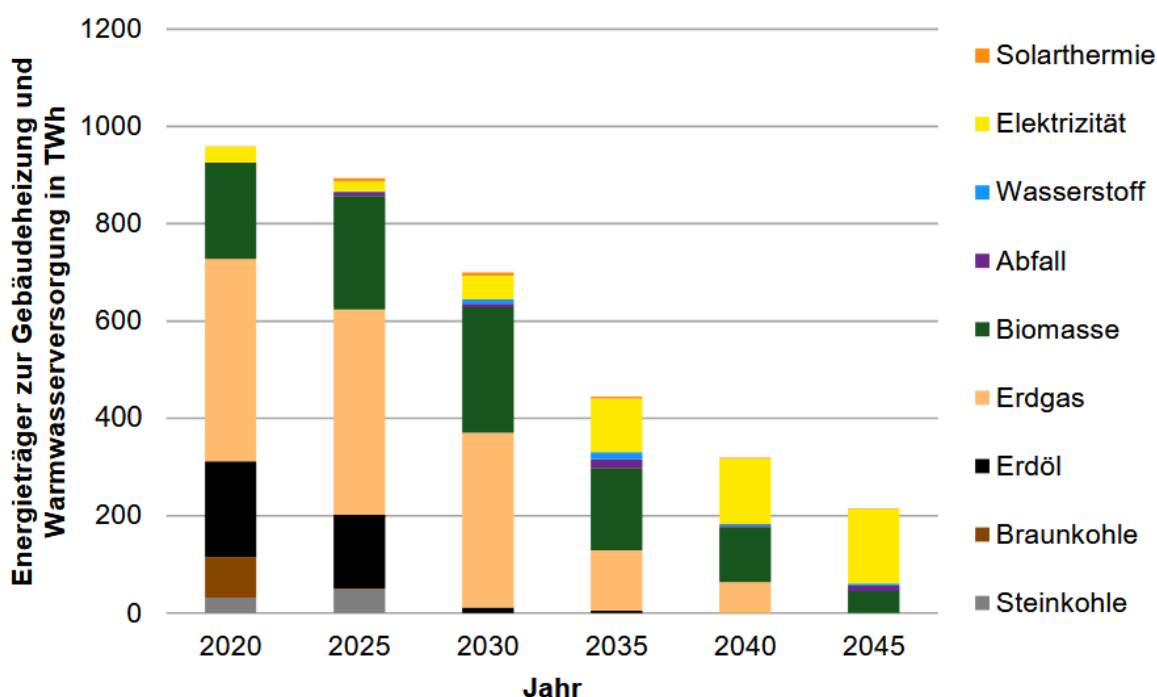


Abbildung 38: Entwicklung der eingesetzten Energieträger zur Raumwärme- und Warmwasserversorgung Entwicklung der eingesetzten Energieträger zur Raumwärme- und Warmwasserversorgung Quelle: ²²²

Laut der Dena machen Raumwärme und Warmwasserbedarf 83% des Gesamtenergiebedarfs von Gebäuden aus ²²³. Demnach wäre der Gesamtenergiebedarf nach Schöb bei 1156 TWh, was sehr nahe an unseren Ergebnissen liegt (Szenario 1). Der Gesamtenergiebedarf nach Schöb im Jahr 2045 ist mit ca. 250 TWh eher im Bereich der Ergebnisse unseres Szenarios 2. Dies zeigt, dass unsere Ergebnisse durchaus vergleichbar mit anderen Studien sind. Die Werte von Szenario 3 zeigen, dass durch ambitionierte Sanierungsmaßnahmen bis 2050 und die Wahl effizienter und strombasierter Technologien, die durch die Unterstützung von Wärmespeichern, Dachflächen-PV, Batteriespeichern

²²⁰ Thomas Franz Schöb, *Modellgestützte Analyse treibhausgasneutraler Transformationsstrategien für Deutschland*, o. J.

²²¹ Schöb, *Modellgestützte Analyse treibhausgasneutraler Transformationsstrategien für Deutschland*.

²²² Schöb, *Modellgestützte Analyse treibhausgasneutraler Transformationsstrategien für Deutschland*; Detlef Stolten u. a., „Neue Ziele auf alten Wegen? Strategien für eine treibhausgasneutrale Energieversorgung bis zum Jahr 2045“, *Schriften des Forschungszentrums Jülich, Energie & Umwelt / Energy & Environment* 577 (2022).

²²³ Deutsche Energie-Agentur, *DENA-GEBÄUDEREPORT 2025. Zahlen, Daten, Fakten zum Klimaschutz im Gebäudebestand*.

und Energiemanagement den Netzenergiebedarf um 93% und die CO₂-Emissionen um 98% und die Gebäudeenergiesystemkosten (Opex und Capex) um 87% reduziert werden können.

2.2 Notwendigkeit der Förderung

Im Diskurs über Wasserstoffstrategien in Deutschland baute dieses Projekt bestehende Unsicherheiten in Bezug auf die zukünftige Rolle von Wasserstoff im Gebäudesektor ab. Die Ergebnisse zeigten unmittelbar auf, in welchen Gebäudetypen und unter welchen Rahmenbedingungen ein Wasserstoffeinsatz im Gebäude zukünftig eine sinnvolle Versorgungsoption darstellen kann.

Die Ergebnisse des Projektes liefern weiterhin eine Basis für detaillierte Netzplanungen insb. im Bereich der Gasverteilnetze und tragen damit dazu bei, möglichst optimale Lösungen für die umfangreichen Herausforderungen der Energiewende zu finden. Hieraus ergeben sich Handlungsempfehlungen für die langfristige Netzplanung von Verteilnetzbetreibern.

Für die Politik lassen sich mögliche Handlungsempfehlungen für die Anpassung von Fördermaßnahmen im Bereich Heizungsmodernisierung und Gebäudesanierung ableiten.

2.3 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Folgender voraussichtlicher Nutzen ergibt sich aus den Ergebnissen dieses Projektes:

- Weiterverwertung der Gebäudedatenbank in anderen Projekten, die Erweiterung auf andere EU-Länder und die Nutzung der Datenbank für großflächige Gebäudebestandsanalysen
- Erkenntnisse aus Gebäudedatenbank-Erstellung relevant für AI4CarbonFreeHeating <https://www.4wardenergy.at/de/referenzen/ai4carbonfreeheating>
- Forschungscommunity kann Gebäudedatensätze als Basis verwenden, da über API und Zenodo öffentlich zugänglich gemacht, was die Arbeit mit Daten signifikant erleichtert
- Geclusterter Gebäudebestand kann zu weiteren Simulationszwecken genutzt werden, reduziert Rechenaufwand für deutschen Wohngebäudebestand signifikant
- Die offene Gebäudesimulation „HiSim“ kann öffentlich eingesetzt werden und wird bereits z.B. am ISFH im Rahmen eines anderen Projekts verwendet.
- Bewertung von zukünftigen Dekarbonisierungs- und Wärmeversorgungsstrategien, Szenarienrechnungen möglich ohne großen Aufwand und mit belastbarem Bottom-Up Tool

2.4 Bekannt gewordenen Fortschritts seitens Dritter während der Durchführung des Vorhabens

- EUBUCCO: Harmonisierte Gebäudedatensatz für die ganze EU, mit Gebäudegrundrissen, Typen, Höhen, Baualtersklassen; in DE waren aber, als ich das letzte Mal geschaut habe, waren neben den Grundrissen allerdings nur Typ und Höhe (und die auch nur teilweise) vorhanden
- Datensatz GHS-AGE vom JRC <https://data.jrc.ec.europa.eu/dataset/d503bb56-9884-4e4d-bb8f-d86711d9f749#dataaccess> mit Informationen zu Gebäudealtersklassen von 1975-2020 basierend auf Satellitenbildern
- Immer mehr Studien zur Nutzung von LLMs und ML/AI, u.a. in Kombination mit Street-View-Bildern, für die Ableitung von Gebäudeinformationen z.B. Baujahren, Höhe etc. siehe z.B.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924271625004022#sec5> (wenn mehr benötigt wird, hier noch mehr Referenzen v.a. zu Baujahren: <https://arxiv.org/abs/2508.11486>)

- Studien zu Wasserstoff (siehe Abschnitt 2.1.3): H₂ wird zunehmend als unattraktiv herausgestellt aufgrund der geringen Effizienz, welche hauptsächlich durch die Herstellung von grünem H₂ herrührt
- Studien Wärmepumpen im Bestand Fraunhofer: Wärmepumpen werden sehr befürwortet, auch im Bestand, zunehmende technische Machbarkeit²²⁴
- Studie von Schöb: Der Ausbau oder Umbau von Energieinfrastrukturen ist nicht maßgeblich für die Gesamtkosten eines Energiesystems (nur 15-20%)²²⁵

2.5 Veröffentlichungen der Projektergebnisse nach NKBF Nr. 11

- DOI:[10.1016/j.energy.2025.134622](https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.134622)
- In enger Zusammenarbeit mit dem WAAGE Projekt: DOI:[10.1016/j.buildenv.2025.112782](https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2025.112782)
- In enger Zusammenarbeit mit dem WAAGE Projekt: DOI:[10.1016/j.egyai.2024.100408](https://doi.org/10.1016/j.egyai.2024.100408)
- Folgende Veröffentlichungen sind 2025/2026 geplant:
 - Die Ergebnisse des Gebäudeclustering und der Typgebäudebestand zu Simulationszwecken (aus AP1)
 - Die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse der verschiedenen Wärmeversorgungsstrategien und der Szenarienanalysen (aus AP2, AP4, AP5 und AP6)

²²⁴ Fraunhofer Ise, *Wärmepumpen heizen auch im Altbau klimafreundlich*, 1949; Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, *Wärmepumpen in Bestandsgebäuden - Ergebnisse aus dem Forschungsprojekt „WPSmart im Bestand“ - Abschlussbericht*, Version 2.1 Auflage, 23. Juli 2020, Version 2.1 Auflage, https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/downloads/pdf/Forschungsprojekte/BMWi-03ET1272A-WPsmart_im_Bestand-Schlussbericht.pdf.

²²⁵ Schöb, *Modellgestützte Analyse treibhausgasneutraler Transformationsstrategien für Deutschland*.