



Analyse der Einsparpotenziale an Energie und CO₂-Emissionen im deutschen Gebäudebestand unter verschiedenen Szenarien

Autorinnen und Autoren:

Şirin Alibaş, Mahsa Bagheri, Songmin Yu

No. S09/2024

Impressum

Analyse der Einsparpotenziale an Energie und CO₂-Emissionen im deutschen Gebäudebestand unter verschiedenen Szenarien

Autorinnen und Autoren

Şirin Alibaş, sirin.alibas@isi.fraunhofer.de;
Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI

Mahsa Bagheri, mahsa.bagheri@isi.fraunhofer.de;
Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI

Songmin Yu, songmin.yu@isi.fraunhofer.de;
Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI

Bildnachweis

Deckblatt: Shutterstock.com/TechSolution

Zitierempfehlung

Alibaş, Ş.; Bagheri, M.; Yu, S. (2024): Analyse der Einsparpotenziale an Energie und CO₂-Emissionen im deutschen Gebäudebestand unter verschiedenen Szenarien. Karlsruhe: Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI. Working Paper Sustainability and Innovation No S09/2024.
DOI: [10.24406/publica-4021](https://doi.org/10.24406/publica-4021).

Veröffentlicht

Dezember 2024

Kontakt

Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI

Breslauer Straße 48, 76139 Karlsruhe
Mahsa Bagheri, mahsa.bagheri@isi.fraunhofer.de

Hinweise

Dieser Bericht einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Die Informationen wurden nach bestem Wissen und Gewissen unter Beachtung der Grundsätze guter wissenschaftlicher Praxis zusammengestellt. Die Autorinnen und Autoren gehen davon aus, dass die Angaben in diesem Bericht korrekt, vollständig und aktuell sind, übernehmen jedoch für etwaige Fehler, ausdrücklich oder implizit, keine Gewähr. Die Darstellungen in diesem Dokument spiegeln nicht notwendigerweise die Meinung des Auftraggebers wider.

Zusammenfassung

Der Gebäudesektor in Deutschland verursacht 16 % der Treibhausgasemissionen und um diese Emissionen zu beseitigen, ist eine weitreichende Umstellung des Energiebedarfs und der Energienutzung von Gebäuden erforderlich. Modellbasierte Szenarioanalysen sind wichtig für die Bewertung der Transformationspfade und die Unterstützung der Politikgestaltung. In dieser Studie wurden die Entwicklung des Energie- und Energieträgerbedarfs in diesem Sektor, der direkten CO₂-Emissionen, der Sanierungsraten und Effizienzgewinne bis 2050 in drei verschiedenen Szenarien mit einem agentenbasierten Modell untersucht. Eine Erhöhung der Sanierungsrate auf mindestens 1,8 % ist notwendig, um den Raumwärmebedarf deutlich zu senken. Zusammen mit anderen Effizienzsteigerungen kann die Energieeinsparung bis zu 35 % im Vergleich zu 2020 betragen. Die Szenarien der Studie führen zu einer Reduzierung der direkten CO₂-Emissionen um 55 % bis 85 % im Vergleich zu 2020. Weitere Untersuchungen zu zusätzlichen Maßnahmen sind erforderlich, um die Szenarien zu einer Dekarbonisierung zu führen, wie z. B. breiterer Einsatz von Bio- oder E-basierten Brennstoffen und Verhaltensanreize für einen frühzeitigen Ersatz fossiler Heizsysteme. Dennoch besteht die Gefahr, dass die mittel- und langfristigen Emissionsminderungsziele verfehlt werden, wenn es nicht gelingt, eine deutlich höhere Umsatzrate und Dekarbonisierung der zentralen Energieträger zu erreichen. Der Bedarf an Arbeitskräften und Material entlang der Transformationspfade sollte auch weiter thematisiert werden.

Keywords: Gebäudesektor, Szenarien, Agentenbasierte Modellierung, Energieverbrauch, CO₂-Emissionen

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	3
1 Einleitung	5
2 Methodik	6
2.1 Szenarien	6
2.2 Modell	8
2.2.1 Gebäude-Agenten	9
2.2.2 Ablauf der Simulation.....	9
2.3 Quantifizierung der Szenarien	10
3 Ergebnisse und Diskussion	12
3.1 Endenergiebedarf.....	12
3.2 Sanierungsrate	13
3.3 CO ₂ -Emissionen	13
4 Schlussfolgerungen	15
5 Abbildungsverzeichnis	16
6 Tabellenverzeichnis	17
7 Abkürzungsverzeichnis	18
8 Bibliografie	19

1 Einleitung

Der Gebäudesektor in Deutschland ist verantwortlich für 16 % der Treibhausgasemissionen (THG). Da mehr als 70 % der Wärme aus fossilen Brennstoffen stammt, ist der Gebäudesektor eine wichtige Säule der grünen Energiewende in Deutschland. Das Klimaschutzgesetz (KSG) legt die sektoralen Emissionsreduktionsziele für das Jahr 2030 fest. Die THG des Gebäudesektors sollten auf 67 Mio. t CO₂-äq. gesenkt werden, was fast der Hälfte des heutigen Niveaus entspricht (KSG 2021).

Modellbasierte Szenarioanalysen sind entscheidend für die Bewertung der Transformationspfade und die Unterstützung der Politikgestaltung. Es wurden bereits Modellierungsstudien mit Szenarioanalyse für die Entwicklung des Gebäudesektors auf verschiedenen Ebenen durchgeführt. Einige haben den Energiebedarf und die sektoralen Emissionen „bottom-up“ berechnet (Thamling und Rau 2022; Elsland 2015), während andere den Energiebedarf und die sektoralen Emissionen unter Berücksichtigung der Akteur:innen-Perspektive berechnet haben (Stengel 2014; Steinbach 2015). Auch wenn diese Studien die Energieeinsparpotenziale quantifizieren und die Zielszenarien unter Berücksichtigung der sektoralen Emissionsreduktionsziele definieren, haben wir festgestellt, dass noch weitere Szenarien betrachtet werden müssen, in denen Herausforderungen der Transformation aufgrund von Unterbrechungen der Lieferkette, gesellschaftlichen Trends und Widerständen, der Einhaltung von Vorschriften und finanziellen Schwierigkeiten bestehen könnten.

In dieser Studie untersuchen wir Pfade bis 2050 für den Gebäudesektor mit Hilfe eines agentenbasierten Gebäudebestandsmodells. Das agentenbasierte Modell berücksichtigt die Heterogenität des Gebäudebestands, modelliert den Entscheidungsprozess auf der Grundlage von Prinzipien der „bounded rationality“ (begrenzte Rationalität) und erfasst die Systemperspektive durch die Handlungen der einzelnen Akteure. In drei verschiedenen Szenarien untersuchen wir die Entwicklung des Energie- und Energieträgerbedarfs des Sektors, der direkten CO₂-Emissionen, der Sanierungsraten und Effizienzgewinne. Versorgungsunterbrechungen, technologischer Fortschritt und Geschwindigkeit der Transformation werden in den Szenarien durch mehrere Hebel variiert. Die daraus resultierende Transformation des Sektors wird in den Ergebnissen analysiert und die Highlights diskutiert. Abschließend werden die wichtigsten Schlussfolgerungen aufgeführt.

2 Methodik

Die Methodik dieser Studie besteht aus zwei Bausteinen: den für diese Studie entwickelten Szenarien, und dem Modell, das für die Simulation dieser Szenarien verwendet wird. In den folgenden Abschnitten wird der Kern der Methodik beschrieben.

2.1 Szenarien

In dieser Studie analysieren wir drei Szenarien für den deutschen Gebäudesektor, die im Projekt Roadmap für einen klimaneutralen Gebäudebestand 2050 (RokiG2050) entwickelt wurden, und zwar in einem partizipativen Workshop-basierten Prozess. Die Daten für diesen Prozess wurden in den Workshops gesammelt, durch Literatur erweitert und in den Workshops erneut validiert. Die detaillierte Erläuterung des Entwicklungsprozesses und die qualitative Beschreibung der Szenarien finden Sie in Bagheri et. al. (2024). Die Szenarienentwicklung und die Szenariennarrative sind im Folgenden zusammengefasst.

Als erster Schritt zur Entwicklung der Szenarien wurde der STEEP-Ansatz (Kozłowska 2020) angewendet, um die relevanten sozialen, technologischen, wirtschaftlichen, ökologischen und politischen Faktoren zu identifizieren, die einen Einfluss auf die zukünftige Entwicklung des Gebäudebestands haben könnten. Die identifizierten STEEP-Aspekte wurden anschließend in Schlüsselfaktoren des Szenarios umgewandelt. Dabei wurden die Faktoren neu formuliert oder verwandte Aspekte unter einem Begriff zusammengefasst. Daraus ergaben sich 16 Szenariofaktoren, die in fünf thematische Kategorien eingeteilt wurden (wie in Tabelle 1 dargestellt).

Im nächsten Schritt wurden der Ist-Stand dieser Szenariofaktoren beschrieben und Annahmen über ihre mögliche zukünftige Entwicklung bis 2030 und 2045 getroffen (Zeiträumen, der in Anlehnung an die von der Bundesregierung gesetzten Ziele für die Klimaneutralität des Gebäudebestands gewählt wurde). Die formulierten Annahmen reichen von optimistischen bis hin zu pessimistischen Zuständen. Diese Zukunftsannahmen wurden in drei plausiblen Szenarien – positive, neutrale und negative Entwicklung - konsolidiert:

- Das *Szenario der nachhaltigen Transformation (sustainable transformation scenario: STS)* skizziert eine optimistische Vision für den deutschen Gebäudesektor im Jahr 2030, in der umfassende Maßnahmen ergriffen wurden, um den Gebäudebestand nachhaltiger zu gestalten. Dies betrifft sowohl technologische Umsetzungen und Regulierungen als auch wirtschaftliche und soziale Aspekte. In diesem Szenario wird das Potenzial zur Effizienzsteigerung von Gebäuden voll ausgeschöpft und diese positive Entwicklung setzt sich bis 2045 fort.
- Das *Szenario der herausfordernden Transformation (challenged transformation scenario: CTS)* ist geprägt von partiellen Herausforderungen und begrenzten Fortschritten. Dieses Szenario ist eine hybride Variante zwischen den beiden Extremszenarien und geht in den meisten Szenarioaspekten von einem mittleren Entwicklungspfad aus. Aufgrund der Herausforderungen bei der technologischen oder regulatorischen Umsetzung wird das Potenzial zur Effizienzsteigerung von Gebäuden in diesem Szenario nur teilweise ausgeschöpft.
- Das *Szenario der begrenzten Transformation (limited transformation scenario: LTS)*, das fast eine Fortsetzung des Status quo darstellt, skizziert eine pessimistische Vision für den deutschen Gebäudebestand mit nur begrenzter oder keiner Verbesserung der Gebäudeeffizienz bis 2030. Dieses Szenario berücksichtigt die Schwierigkeiten aufgrund des Fachkräftemangels und der Unterbrechungen in der globalen Lieferkette. Hinzu kommt, dass

die technologischen Potenziale aufgrund der geringen Investitionsbereitschaft in der Branche ungenutzt bleiben.

Tabelle 1: Beschreibung der Szenarien nach den thematischen Kategorien

	<u>STS</u> Nachhaltige Transformation im Gebäudesektor	<u>CTS</u> Herausforderungen im Übergang und unterschiedliche Fortschritte	<u>LTS</u> Fachkräftemangel und Unsicherheiten in der Entwicklung des Gebäudebestands
Kategorie 1 Energetische Gebäudesanierung als Kernbaustein der Energiewende	<ul style="list-style-type: none"> Die serielle Sanierung wird ab 2030 weitgehend übernommen. Niedertemperatur-Fernwärme ist weit verbreitet. Digitalisierung der Sanierungsfahrpläne für das gesamte Gebäude ist gelungen. Die Gebäude fungieren als Prosumenten. 	<ul style="list-style-type: none"> Die serielle Sanierung wird ab 2045 weitgehend übernommen. Teilweise wird Niedertemperatur-Fernwärme genutzt. Digitalisierung von Zeitplänen für bestimmte Komponenten ist gelungen. Gebäude bevorzugen Wärmepumpe. 	<ul style="list-style-type: none"> Im Jahr 2045 nimmt die serielle Sanierung Gestalt an. Auf Niedertemperatur-Fernwärme wird verzichtet. Digitalisierung der Fahrpläne wird nicht entwickelt. Gebäude bevorzugen fossile Energieträger.
Kategorie 2 Integration des einzelnen Gebäudes in das Gesamtsystem	<ul style="list-style-type: none"> DSM¹-Technologien werden von den meisten großen Stromverbrauchern eingesetzt. Smart Meter² sind weit verbreitet. 	<ul style="list-style-type: none"> Keine Flexibilität in den Gebäuden vorhanden, sondern nur in großen zentralen Speicherungen. Smart Meter werden teilweise von Neubauten übernommen. 	<ul style="list-style-type: none"> Keine Flexibilität ist vorhanden. Smart Meter werden selbst in Neubauten nicht eingesetzt.
Kategorie 3 Neubau als Innovationstreiber	<ul style="list-style-type: none"> Hohe Effizienzsteigerung im technologischen Fortschritt. Ein klimaneutraler Betrieb ist bei Neubauten verpflichtend und wird bei Bestandsgebäuden teilweise umgesetzt. Solarpflicht wird für alle Neubauten (80% der Dachfläche) umgesetzt. 	<ul style="list-style-type: none"> Mittlere Effizienzsteigerung im technologischen Fortschritt. Bei Neubauten ist ein klimaneutraler Betrieb verpflichtend. Solarpflicht wird für alle Neubauten (60 % der Dachfläche) umgesetzt. 	<ul style="list-style-type: none"> Geringe Effizienzsteigerung im technologischen Fortschritt. Ein klimaneutraler Betrieb ist nicht zwingend erforderlich. Solarverpflichtung wird nicht durchgesetzt.

¹ Demand Side Management

² Intelligente Messsysteme

	<u>STS</u> Nachhaltige Transformation im Gebäudesektor	<u>CTS</u> Herausforderungen im Übergang und unterschiedliche Fortschritte	<u>LTS</u> Fachkräftemangel und Unsicherheiten in der Entwicklung des Gebäudebestands
Kategorie 4 Regulierungsrahmen	<ul style="list-style-type: none"> Die Finanzierungsmittel für die Förderung des klimaneutralen Bauens und der Wärmeerzeuger sind gut verteilt. Mindestens 80 % EE³ in jedem neu installierten Heizsystem. Anforderungen nach KfW EH 100. 	<ul style="list-style-type: none"> Die Finanzierungsmittel sind nicht gut verteilt und es fehlt an langfristiger Orientierung. Mindestens 65 % EE in jeder neu installierten Heizungsanlage. Anforderungen der KfW EH 75. 	<ul style="list-style-type: none"> Die Finanzierungsmittel sind begrenzt und dienen nur spezifischen Zielen. Keine Verschärfung der aktuellen EE-Anforderungen. Keine Anforderungen an die Gebäudeeffizienz.
Kategorie 5 Gesellschaft und Wirtschaft	<ul style="list-style-type: none"> Genügend Fachkräfte. Lieferkette sind gut gemanagt. Ungleichheiten werden verringert und Subventionen werden für die richtigen Zielgruppen gewährt. Die Idee des gemeinschaftlichen Wohnens wird immer beliebter. 	<ul style="list-style-type: none"> Das Angebot an Fachkräften liegt hinter dem Zielniveau. Die Lieferkette wird teilweise gemanagt. Die Ungleichheiten haben nicht abgenommen. Die Zahl der Senioren-Haushalte steigt, während die übrigen Haushalte stabil bleiben. 	<ul style="list-style-type: none"> Deutlicher Mangel an Fachkräften. Die Lieferkette wird nicht gut gemanagt. Die Ungleichheiten sind deutlich größer. Die Zahl der Einpersonenhaushalte nimmt zu, was zu einem höheren Bedarf an Wohnraum führt.

2.2 Modell

Das agentenbasierte Modell RENDER-Building⁴ wurde entwickelt, um die Transformationspfade des Gebäudesektors in Form von Szenarien zu erforschen. Die Energiewende des Gebäudesektors wird grundlegend von den verschiedenen Entscheidungsträger:innen vorangetrieben. Das Verhalten der Entscheidungsträger:innen sowie die Eigenschaften der Gebäude, die sie besitzen oder nutzen, sind sehr heterogen. Das agentenbasierte Framework wird verwendet, um diese Heterogenität zu erfassen.

Entsprechend der von Yu und Hou (2023) vorgeschlagenen allgemeinen Struktur besteht das Modell aus zwei Hauptkomponenten: Die erste ist "*Building Agents*", eine Liste von Agenten, die den Gebäudebestand repräsentieren, und die zweite Komponente ist "*Environment*", die die Interaktion und Entscheidungsprozesse der Agenten koordiniert und die Ergebnisse auf Makroebene speichert.

³ Erneuerbare Energien

⁴ RENDER ist ein Open-Source agentenbasiertes Modellierungsframework (eneRgy dEmaNd moDEling framEwoRk), das mit den beiden Python-Paketten Melodie (Yu und Hou 2023) und tab2dict entwickelt wurde. In diesem Framework ist RENDER-Building ein Open-Source-Gebäudebestandsmodell, das sich unter <https://github.com/SongminYu/render> befindet.

2.2.1 Gebäude-Agenten

Jedem Agenten werden zunächst vier grundlegende IDs zugewiesen und dann für die weitere Initialisierung verwendet: Region, Sektor, Subsektor und Gebäudetyp. Jede Kombination dieser vier Basis-IDs entspricht einem Segment des Gebäudebestands, für das wir die Anzahl der Gebäude (*N_{real}*) schätzen. 10 % der Gebäude in Deutschland werden im Modell durch Gebäude-Agenten repräsentiert, was bedeutet, dass wir $N_{model} = 10\% \times N_{real}$ -Agenten für die Repräsentation generieren. Diesen Gebäude-Agenten werden weiterhin die heterogenen Eigenschaften über Bauzeit, Standorttyp, Gebäudegröße (Gebäudehöhe und Anzahl der Einheiten) und Bauteilwirkungsgrade zugeordnet. Basierend auf den Eigenschaften des Gebäudes wird der Heiz- und Kältebedarf für das Gebäude in stündlicher Auflösung nach dem 5R1C-Ansatz nach DIN ISO 13790 berechnet. Der berechnete Heizwärmebedarf entscheidet über die Effizienzklasse des Gebäudes. Jeder Wohn- oder Arbeitseinheit innerhalb des Gebäudes ist die Anzahl der Personen zugeordnet, die jeweils mit ihrem Energiebedarf für Geräte und Warmwasserbedarf konfiguriert sind.

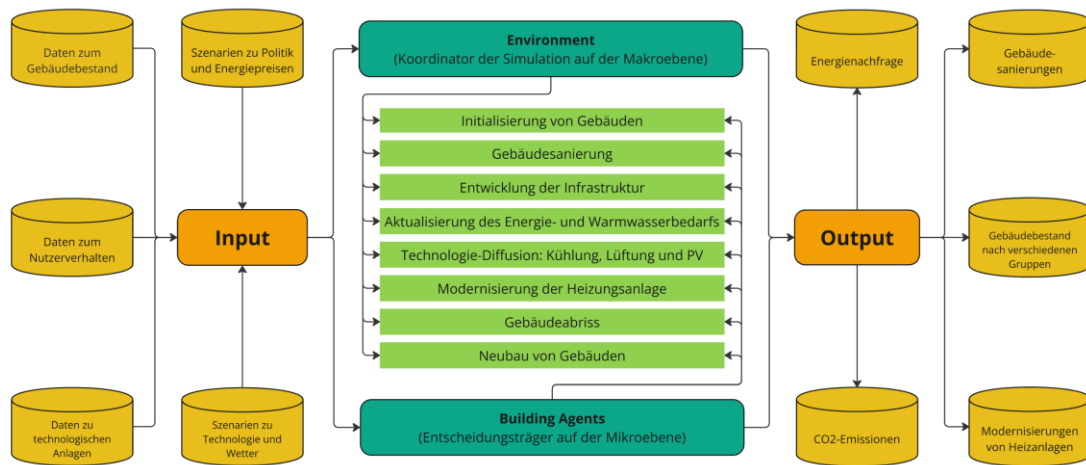
Die Inputdaten wurden einheitlich anhand verschiedener Statistiken und empirischer Datensätze zum Gebäudebestand entwickelt. Zu den verwendeten Datenquellen gehören der Zensus (Statistische Ämter des Bundes und der Länder 2016), der Global Human Settlement Layer (GHSL) (Pesaresi 2023; Pesaresi und Politis 2023; Schiavina et al. 2023), die öffentlich zugänglichen Berichte des Instituts für Wohnen und Umwelt (IWU) (Cischinsky und Diefenbach 2018; Hörner et al. 2022) sowie der Deutschen Energie-Agentur (dena) (Deutsche Energie-Agentur GmbH 2016). Die Methodik ist in Alibaş und Yu (2024) ausführlich erläutert.

2.2.2 Ablauf der Simulation

Wie bereits erwähnt, wird das Modell mit einer Datenbank eingeführt, die aus Daten über die folgenden Themen besteht: Gebäude- und Technologiebestand, Nutzungsverhalten sowie Entwicklung von Richtlinien, Vorschriften, Preisen für Energieträger, Technologiekosten und -subventionen, Technologieeffizienzen und Wetterprofilen. Den Gebäude-Agenten sind Eigenschaften zugeordnet und sie unterliegen den Bedingungen, die durch diese Inputdaten bestimmt werden. Das „Environment“ koordiniert die Gebäude-Agenten, die in jedem Simulationsjahr eine Reihe von Prozessen durchlaufen. Nach der Initialisierung werden die Gebäude-Agenten mit Informationen über den Renovierungsstatus, die Heizungssysteme, den Energie- und Warmwasserbedarf der Geräte, die Einführung anderer Technologien sowie die Verfügbarkeit der Infrastruktur an ihrem Standort aktualisiert. Danach werden Altbauten abgerissen und Neubauten entsprechend der soziodemografischen Entwicklung errichtet. Schließlich werden auf der Grundlage aller Daten sowohl der Gebäude-Agenten als auch des „Environments“ die Output-Dateien erstellt. Diese umfassen den Endenergiebedarf nach Energieträger und Endverbrauch, die CO₂-Emissionen, die historischen Sanierungen von Gebäuden und deren Heizungsanlagen sowie detaillierte Informationen zu jedem Gebäude-Agenten in jedem Simulationsjahr. Die Gesamtstruktur des Modells ist in Abbildung 1 dargestellt.

Für die Kalibrierung und Validierung des Modells wurden mehrere Datenquellen herangezogen, darunter empirische Studien zu technischen und verhaltensbezogenen Parametern (Goulouti et al. 2021; Sunikka-Blank und Galvin 2012), zum Endenergieverbrauch in Wohn- und Nichtwohngebäuden (BMWK 20.01.2022; Rohde und Arnold-Keifer 2023), Hochrechnungen von Destatis zum Wohngebäudebestand (Statistisches Bundesamt 2022), Daten aus Studien und öffentlich zugänglichen Berichten des Instituts für Wohnen und Umwelt (IWU) (Cischinsky und Diefenbach 2018) und der Deutschen Energie-Agentur (dena) (Deutsche Energie-Agentur GmbH 2016).

Abbildung 1: Arbeitsablauf von RENDER-Building



2.3 Quantifizierung der Szenarien

Die qualitative Beschreibung der Szenarienpfade, entsprechend den in Tabelle 1 dargestellten thematischen Kategorien, wurde dann in quantitative Annahmen umgewandelt, die als Szenarioannahmen in das Modell einfließen. Tabelle 2 fasst die Szenarioannahmen unter relevanten Aspekten und deren Behandlung durch die entsprechenden Modellmerkmale zusammen.

Tabelle 2: Szenarioannahmen unter relevanten Aspekten und Umgang im Modell (Merkmal)

Aspekt	STS	CTS	LTS	Merkmal des Modells
Mindestanforderungen für die Gebäudesanierung ab 2025	Nur niedriger U-Wert	Niedriger bis mittlerer U-Wert	Niedriger bis mittelhoher U-Wert	Marktverfügbarkeit von Dämmmaßnahmen in Abhängigkeit von ihrem Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Wert)
Handwerkliche Kapazität und Rentabilität von Handwerksunternehmen	Ausreichendes Angebot an Fachkräften	Ausreichendes Angebot an Fachkräften in den meisten Regionen	Unzureichendes Angebot an Fachkräften in den Regionen	Erfassung des Bedarfs von Handwerkern an Renovierungsarbeiten
Serielle Sanierung – Kosten	30 % höher	40 % höher	50 % höher	Investitionskosten im Verhältnis zur konventionellen Sanierung
Serielle Sanierung – Dauer	50 % niedriger	35 % niedriger	20 % niedriger	Realisierungszeiten und handwerkliche Ansprüche in Bezug auf konventionelle Renovierungen
Regulatorische Beschränkungen für neue Heizungsanlagen	80 %	65 %	n.a.	Mindestbedarf an erneuerbarer Energie aus dem Heizungssystem
Nutzung von Fernwärme (FW)	30 % FW-Ausbau	20 % FW-Ausbau	10 % FW-Ausbau	Verfügbarkeit der Infrastruktur (bis 2035)

Analyse der Einsparpotenziale an Energie und CO₂-Emissionen im deutschen Gebäudebestand unter verschiedenen Szenarien

Aspekt	STS	CTS	LTS	Merkmal des Modells
Förderprogramme – Sanierung	Bis zu 75 %	Bis zu 50 %	Bis zu 30 %	Höhe der Zuschüsse zu den Investitionskosten von Renovierungsmaßnahmen
Förderprogramme – Modernisierung	Bis zu 60 %	Bis zu 45 %	Bis zu 30 %	Höhe der Zuschüsse zu den Investitionskosten von Heizungsmodernisierungsmaßnahmen
Emissionshandelssystem (ETS) II	230 EUR/tCO ₂	175 EUR/tCO ₂	115 EUR/tCO ₂	CO ₂ -Preis bis 2050
Einsatz von Photovoltaik (PV)	80 %	50 %	20 %	Durchdringungsrate von PV-Modulen im Gebäudebestand
	Verpflichtend nach 2025	Verpflichtend nach 2025	Nicht obligatorisch	Einführung von PV-Modulen im Neubau
Eigenverbrauch von PV	50 %	30 %	15 %	Eigenverbrauchsquote von PV-Strom
Effizienzgewinne	Hoch (40 %)	Mittel (25 %)	Niedrig (15 %)	Effizienzsteigerungen bei Geräten bis 2050 (im Durchschnitt im Vergleich zu 2020)
Haushaltsgröße	Rückgang um 25 %	Bleibt gleich	Steigerung um 12 %	Anteil der Einpersonenhaushalte im Jahr 2050 im Vergleich zu 2020

3 Ergebnisse und Diskussion

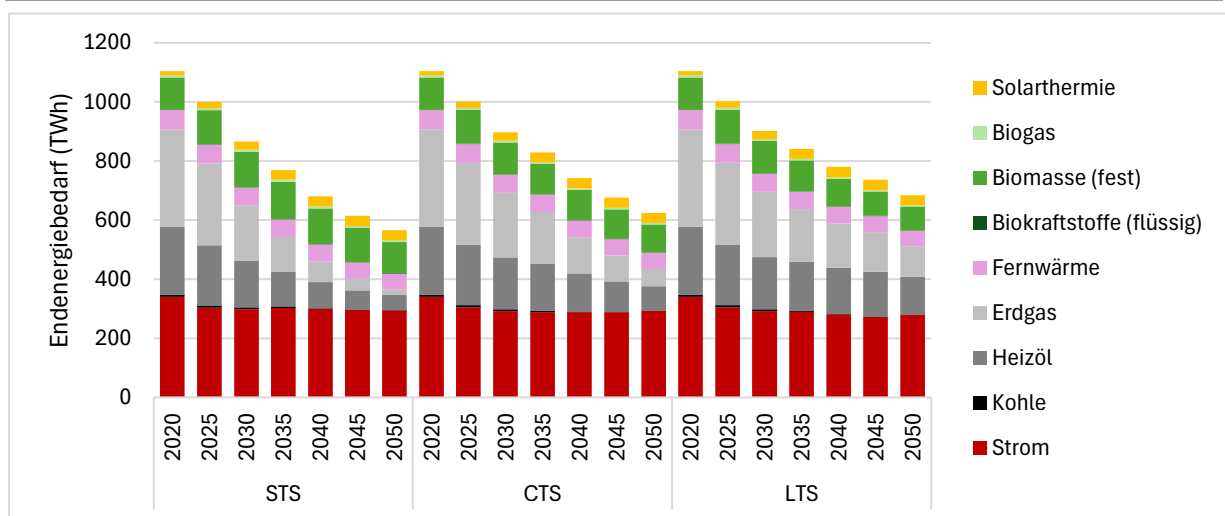
Der aus der Modellierung resultierende Endenergiebedarf, die Sanierungsquote und die CO₂-Emissionen des Gebäudesektors bei jedem Transformationspfad werden in den folgenden Abschnitten zusammengefasst und diskutiert.

3.1 Endenergiebedarf

Der Endenergiebedarf des Sektors sinkt von rund 1.140 TWh im Jahr 2020 auf etwa 740 (STS), 780 (CTS) bzw. 810 (LTS) TWh im Jahr 2050. Dies entspricht einer Reduktion von 35 % unter STS und rund 30 % unter CTS und LTS. Der größte Teil des Rückgangs ist auf die Verbesserung der thermischen Leistung von Gebäuden zurückzuführen. Der Raumwärmebedarf wird bis 2050 im Vergleich zu 2020 unter STS, CTS und LTS um rund 45, 40 bzw. 35 % gesenkt. Abbildung 2 zeigt die Entwicklung des Endenergiebedarfs von Gebäuden anhand von Szenarien bis 2050.

Die Zunahme der Elektrifizierung ist in allen Szenarien offensichtlich, wobei ihr Anteil von 30 % im Jahr 2020 auf 52 % bei STS, 47 % bei CTS und 40 % bei LTS bis 2050 steigen wird. Wir sehen auch einen Anstieg des Anteils der Fernwärme. Er beträgt 10 % des Gesamtbedarfs unter STS, rund 9 % unter CTS und rund 8 % unter LTS. Der Hauptunterschied zwischen den Szenarien wird sichtbar, wenn man die verbleibenden fossilen Brennstoffe betrachtet. Der Gesamtbedarf an fossilen Brennstoffen im Jahr 2050 beläuft sich auf etwa 70 TWh unter STS, rund 140 TWh unter CTS und rund 230 TWh unter LTS. Mit den optimistischen Trends und der Einhaltung der Vorschriften in STS werden rund 12 % der heutigen fossilen Brennstoffe in diesem Sektor weiterhin verwendet. Dies ist auf einen begrenzten Einfluss auf den Austausch der Heizungsanlage zurückzuführen, wenn die Heizungsanlage das Ende ihrer Lebensdauer noch nicht erreicht hat. Zusätzliche Herausforderungen und Störungen bei der Umstellung führen dazu, dass mehr fossile Heizsysteme verbleiben und sich somit der verbleibende Bedarf an fossilen Brennstoffen im Jahr 2050 von STS auf CTS und von CTS auf LTS verdoppelt.

Abbildung 2: Entwicklung des Endenergiebedarfs des deutschen Gebäudesektors



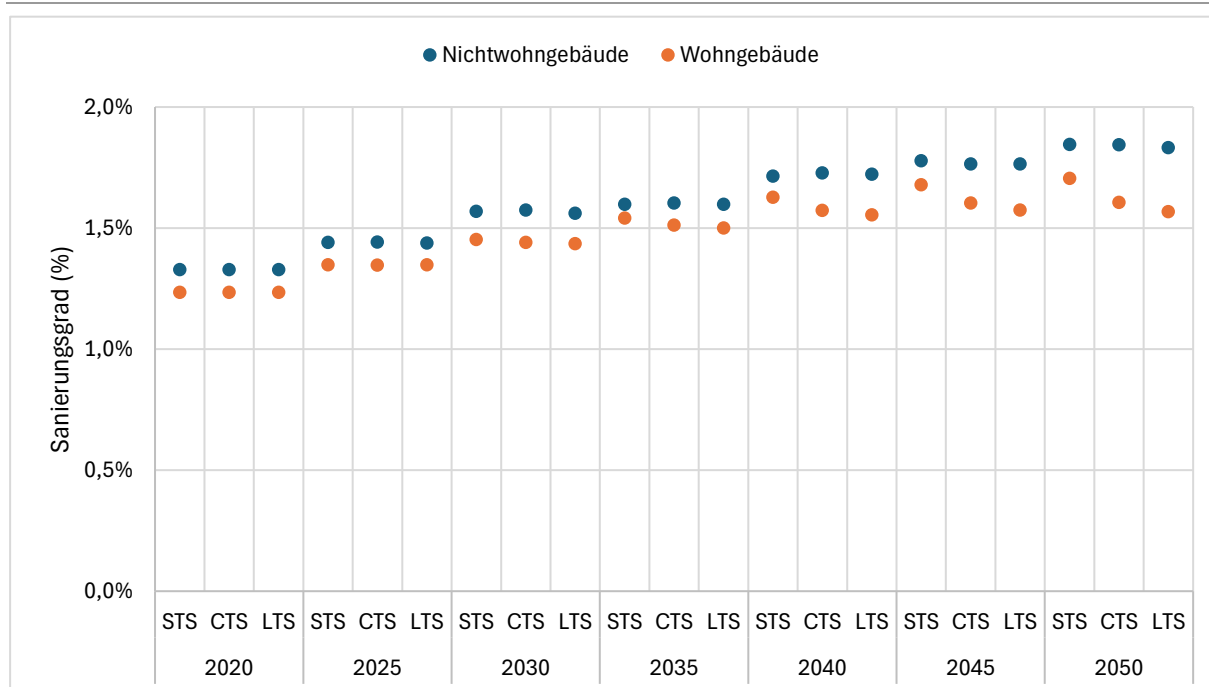
3.2 Sanierungsrate

Die Sanierungsrate gibt den Grad der thermischen Sanierungen an, die in der Gebäudehülle durchgeführt werden. Die in Abschnitt 3.1 beschriebene Reduzierung des Raumwärmebedarfs ergibt sich aus einer Kombination von dynamischen Bedingungen, wie beispielsweise der Verringerung der Heizgradtage, der Steigerung der Effizienz von Heizungssystemen, der Steigerung der Effizienz der Gebäudehülle und der Änderung der Nutzungsentscheidungen. Die Sanierungsrate zeigt hingegen den reinen Aufwand für die Sanierung der Gebäudehülle.

Abbildung 3 stellt die durchschnittliche bauteilflächenbezogene Sanierungsrate von Gebäuden dar. Dieser Indikator wird berechnet, indem das Verhältnis der Fläche der sanierten Bauteile zur Gesamtfläche des Bauteils im Bestand genommen wird. Szenarien zeigen leicht höhere Sanierungsraten bei Nichtwohngebäuden und einen stetig steigenden Trend bis 2050. Während der Unterschied zwischen den Szenarien bis 2030 gering ist, sind bis 2050 bis zu 0,15 % Unterschied bei der Sanierungsrate sichtbar.

Obwohl die Sanierungsmaßnahmen in der Vergangenheit nicht immer zu großen Effizienzsteigerungen geführt haben, sehen die Szenarien Sanierungen vor, die die thermische Performance der Gebäudehülle auch in Zukunft weiter verbessern. Daher trägt eine höhere Sanierungsrate bis 2050 wesentlich zur stärkeren Reduzierung des Wärmebedarfs im STS bei. Die Höhe der Subventionen und strengere Vorschriften für die Gebäudeenergieeffizienz sind die Haupttreiber, die die Höhe der Einsparungen beim Energiebedarf (auch als Sanierungstiefe bezeichnet) steuern.

Abbildung 3: Durchschnittliche bauteilflächenbezogene Sanierungsrate von Gebäuden



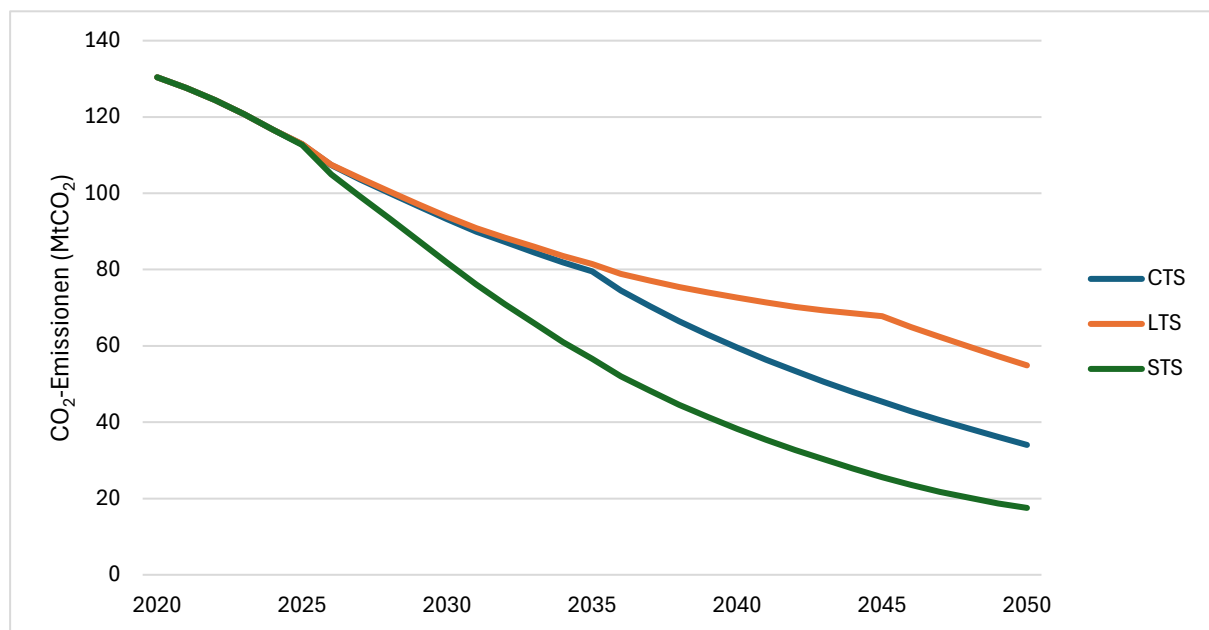
3.3 CO₂-Emissionen

Infolge der in Abschnitt 3.1 gezeigten verbleibenden fossilen Brennstoffe wird in keinem Szenario bis 2045 oder 2050 eine vollständige Dekarbonisierung des Energiebedarfs erreicht. Darüber hinaus belaufen sich die gesamten direkten Emissionen im Jahr 2030 im Rahmen von STS auf 82 MtCO₂-äq., was immer noch 15 MtCO₂-äq. über dem sektoralen Ziel liegt, das sich das KSG gesetzt hat. Im

begrenztsten Szenario (LTS) wird der Gebäudesektor im Jahr 2050 immer noch 55 MtCO₂-äq. ausstoßen. Abbildung 4 zeigt die Entwicklung der direkten CO₂-Emissionen in jedem Szenario.

Es ist wichtig zu erwähnen, dass die indirekten CO₂-Emissionen, also die in die zentrale Strom- und Wärmeversorgung eingebetteten Emissionen, nicht im Rahmen der analysierten Emissionen betrachtet werden. Daher wird angenommen, dass eine schrittweise Dekarbonisierung des Mixes dieser zentralen Energieträger bis 2045 durch den Versorgungssektor sichergestellt wird.

Abbildung 4: Entwicklung der direkten CO₂-Emissionen des deutschen Gebäudesektors



4 Schlussfolgerungen

In dieser Studie wurde eine szenariobasierte Analyse durchgeführt, um die Reduktion des Energiebedarfs und der direkten CO₂-Emissionen zu quantifizieren, die im Gebäudesektor in Deutschland erreicht werden könnte. Aus der Analyse werden folgende Schlussfolgerungen gezogen:

- Bis 2050 ist eine Reduzierung des Endenergiebedarfs um 30 bis 35 % im Vergleich zu 2020 möglich.
- Der Raumwärmebedarf kann bis 2050 um 35-45 % im Vergleich zu 2020 gesenkt werden.
- Eine Erhöhung der Sanierungsrate von zuletzt 1,2 % auf mindestens 1,8 % ist notwendig, um die Transformation des Gebäudebestands zu erreichen. Förderungen von bis zu 75 % auf die Kosten für die Sanierung der Gebäudehülle führen dazu, dass das Szenario der nachhaltigen Transformation (STS) den niedrigsten Energiebedarf unter den Szenarien aufweist.
- Die Zunahme der Elektrifizierung ist in allen Szenarien offensichtlich, ihr Anteil wird bis 2050 zwischen 40 und 52 % liegen. Die Elektrifizierung der Wärme durch Wärmepumpen wird bis 2050 voraussichtlich zwischen 35 und 55 % des gesamten Wärmebedarfs ausmachen. Förderungen von bis zu 60 % auf die Investitionskosten von Modernisierungen für erneuerbare Heizungsanlagen führen dazu, dass das STS die niedrigsten Emissionen unter den Szenarien aufweist.
- Eine vollständige Dekarbonisierung des Energiebedarfs wird in keinem Szenario bis 2045 oder 2050 erreicht. Darüber hinaus liegen die gesamten direkten Emissionen im Jahr 2030 im Rahmen des STS immer noch 15 Mio. t CO₂-äq. über dem sektoralen Ziel, das sich das KSG gesetzt hat. Im begrenztesten Szenario (LTS) wird der Sektor im Jahr 2050 immer noch 55 Mio. t CO₂-äq. ausstoßen.
- Die Umsatzrate des Heizungsbestands wird als wichtigstes Hindernis für das Erreichen des Dekarbonisierungsziels im Gebäudesektor identifiziert. Wenn die Szenarien allein auf das technische Ende der Lebensdauer setzen, um fossile Heizungen zu ersetzen, reicht der Zeitraum bis 2045 oder 2050 nicht aus, um alle fossilen Heizsysteme auf erneuerbare Heizsysteme umzustellen.
- Weitere Untersuchungen zu zusätzlichen Maßnahmen sind erforderlich, um die Szenarien zu einer Dekarbonisierung zu führen, wie z. B. breiterer Einsatz von Bio- oder E-basierten Brennstoffen, die fossile Brennstoffe ersetzen, Verhaltensanreize für einen frühzeitigen Ersatz fossiler Heizsysteme. Die politischen Auswirkungen dieser Maßnahmen sollten ebenfalls erörtert werden.
- Auch der Bedarf an Arbeitskräften und Material entlang der Transformationspfade sollte thematisiert werden, idealerweise im Vergleich zu den vorhandenen und geplanten Kapazitäten.

5 **Abbildungsverzeichnis**

Abbildung 1: Arbeitsablauf von RENDER-Building.....	10
Abbildung 2: Entwicklung des Endenergiebedarfs des deutschen Gebäudesektors	12
Abbildung 3: Durchschnittliche bauteilflächenbezogene Sanierungsrate von Gebäuden.....	13
Abbildung 4: Entwicklung der direkten CO ₂ -Emissionen des deutschen Gebäudesektors	14

6 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Beschreibung der Szenarien nach den thematischen Kategorien.....	7
Tabelle 2:	Szenarioannahmen unter relevanten Aspekten und Umgang im Modell (Merkmal)	10

7 Abkürzungsverzeichnis

CTS	Challenged Transformation Scenario
DSM	Demand Side Management
EE	Erneuerbare Energien
ETS	Emissionshandelssystem
KSG	Klimaschutzgesetz
LTS	Limited Transformation Scenario
MtCO ₂ -äq.	Megatonne CO ₂ -Äquivalent
PV	Photovoltaik
STS	Sustainable Transformation Scenario
THG	Treibhausgasemissionen
TWh	Terawattstunden

8 Bibliografie

- Alibaş, Şirin; Yu, Songmin (2024): Developing a Regionalized Representative Building Stock Model for Germany. In Therese Lindström, Ylva Blume, Nina Hampus, Linnea Hampus (Eds.): eceee Summer Study Proceedings. Sustainable, safe and secure through demand reduction. eceee 2024 Summer Study. Center Parcs Lac d'Ailette in Chamouille, France, 10 – 15 June. eceee, pp. 1107–1118.
- Bagheri, Mahsa; Dönitz, Ewa; Yu, Songmin; Brugger, Heike (2024): Exploration of qualitative scenarios towards climate neutrality of the German building sector. In Therese Lindström, Ylva Blume, Nina Hampus, Linnea Hampus (Eds.): eceee Summer Study Proceedings. Sustainable, safe and secure through demand reduction. eceee 2024 Summer Study. Center Parcs Lac d'Ailette in Chamouille, France, 10 – 15 June. eceee, pp. 1053–1063.
- BMWK (1/20/2022): Zahlen und Fakten: Energiedaten. Nationale und internationale Entwicklung. Microsoft Excel sheet.
- KSG (2021): Bundes-Klimaschutzgesetz. Source: <https://www.gesetze-im-internet.de/ksg/>.
- Cischinsky, Holger; Diefenbach, Nikolaus (2018): Datenerhebung Wohngebäudebestand 2016. Datenerhebung zu den energetischen Merkmalen und Modernisierungsraten im deutschen und hessischen Wohngebäudebestand. IWU Institut Wohnen und Umwelt / Institute for Housing and Environment. Darmstadt, Germany.
- Deutsche Energie-Agentur GmbH (2016): Der dena-Gebäudereport 2016. Statistiken und Analysen zur Energieeffizienz im Gebäudebestand. dena. Berlin.
- Elsland, Rainer (2015): Development of an integrated modelling concept to capture technological myopia. Analysing long-term energy demand in the German residential sector. Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe. Fakultät für Wirtschaftswissenschaften.
- Goulouti, Kyriaki; Favre, Didier; Giorgi, Morgane; Padey, Pierryves; Galimshina, Alina; Habert, Guillaume; Lasvaux, Sébastien (2021): Dataset of service life data for 100 building elements and technical systems including their descriptive statistics and fitting to lognormal distribution. In Data in brief 36, p. 107062. DOI: [10.1016/j.dib.2021.107062](https://doi.org/10.1016/j.dib.2021.107062).
- Hörner, Michael; Cischinsky, Holger; Bischof, Julian; Schwarz, Steffen; Behnisch, Martin; Meinel, Gotthard et al. (2022): Forschungsdatenbank NichtWohnGebäude. Repräsentative Primärdatenerhebung zur statistisch validen Erfassung und Auswertung der Struktur und der energetischen Qualität des Nichtwohngebäudebestands in Deutschland. ENOB: dataNWG. IWU Institut Wohnen und Umwelt.
- Kozłowska, Justyna (2020): Metodyka analizy strategicznej przedsiębiorstwa na potrzeby integracji produktowo-usługowej. Białystok: Oficyna Wydawnicza Politechniki Białostockiej.
- Pesaresi, Martino (2023): GHS-BUILT-S R2023A - GHS built-up surface grid, derived from Sentinel2 composite and Landsat, multitemporal (1975-2030).
- Pesaresi, Martino; Politis, Panagiotis (2023): GHS-BUILT-C R2023A - GHS Settlement Characteristics, derived from Sentinel2 composite (2018) and other GHS R2023A data.

- Rohde, Clemens; Arnold-Keifer, Sonja (2023): Erstellung von Anwendungsbilanzen für die Jahre 2021 bis 2023 für die Sektoren Industrie und GHD. Studie für die Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V. (AGEB). Available online at https://ag-energiebilanzen.de/wp-content/uploads/2024/01/Anwendungsbilanz_Industrie_2022_vorlaeufig-update_20231030.pdf.
- Schiavina, Marcello; Melchiorri, Michele; Pesaresi, Martino (2023): GHS-SMOD R2023A - GHS settlement layers, application of the Degree of Urbanisation methodology (stage I) to GHS-POP R2023A and GHS-BUILT-S R2023A, multitemporal (1975-2030).
- Statistische Ämter des Bundes und der Länder (2016): Zensus 2011: Vielfältiges Deutschland. Zensus 2011: Endgültige Ergebnisse.
- Statistisches Bundesamt (2022): Gebäude und Wohnungen. Bestand an Wohnungen und Wohngebäuden - Bauabgang von Wohnungen und Wohngebäuden - Lange Reihen ab 1969 - 2021. DESTATIS.
- Steinbach, Jan (2015): Modellbasierte Untersuchung von Politikinstrumenten zur Förderung erneuerbarer Energien und Energieeffizienz im Gebäudebereich. Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe. Fakultät für Wirtschaftswissenschaften.
- Stengel, Julian (2014): Akteursbasierte Simulation der energetischen Modernisierung des Wohngebäudebestands in Deutschland. Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe. Fakultät für Wirtschaftswissenschaften.
- Sunikka-Blank, Minna; Galvin, Ray (2012): Introducing the prebound effect: the gap between performance and actual energy consumption. In *Building Research & Information* 40 (3), pp. 260–273. DOI: [10.1080/09613218.2012.690952](https://doi.org/10.1080/09613218.2012.690952).
- Thamling, Nils; Rau, Dominik (2022): Hintergrundpapier zur Gebäudestrategie Klimaneutralität 2045. Prognos AG.
- Yu, Songmin; Hou, Zhanyi (2023): Melodie: Agent-based Modeling in Python. In *JOSS* 8 (83), p. 5100. DOI: [10.21105/joss.05100](https://doi.org/10.21105/joss.05100).