



WPKS

AUFTRAGSSTUDIE

Auftragsstudie zur Dekarbonisierung des Gebäudebestands

Energetische Ertüchtigung
der Gebäudehülle, Wechsel zu
klimaneutraler Wärmeversorgung und
Auswirkungen auf das Energiesystem

Studie des IREES GmbH – Institut für
Ressourceneffizienz und Energiestrategien
im Auftrag der Wissenschaftsplattform Klimaschutz

IREES
research for future.

Impressum

AUFTRAGGEBER

Wissenschaftsplattform Klimaschutz

AUFTRAGNEHMER

IREES GmbH - Institut für Ressourceneffizienz und Energiestrategien

AUTOR:INNEN

Dr. Jan Steinbach, Jana Deurer Oppen, Johannes Haller, Jan Kellershohn

HAUPTANSPRECHPARTNER

Dr. Jan Steinbach

j.steinbach@irees.de

ZITIERHINWEIS

IREES GmbH – Institut für Ressourceneffizienz und Energiestrategien, 2026: Auftragsstudie zur Dekarbonisierung des Gebäudebestands: Energetische Ertüchtigung der Gebäudehülle, Wechsel zu klimaneutraler Wärmeversorgung und Auswirkungen auf das Energiesystem. Auftragsstudie im Rahmen der Wissenschaftsplattform Klimaschutz. Potsdam.

DOI: 10.48485/pik.2026.13

DISCLAIMER

Dieses Rechtsgutachten wurde beauftragt und finanziert von der Wissenschaftsplattform Klimaschutz mit Mitteln des Bundesministeriums für Forschung, Technologie und Raumfahrt. Die Ergebnisse und Aussagen in dieser Publikation liegen in der alleinigen Verantwortung der Autor:innen und reflektieren nicht notwendigerweise die Sichtweise der Wissenschaftsplattform Klimaschutz.

PROJEKTKOORDINATION

WISSENSCHAFTSPLATTFORM KLIMASCHUTZ

Tel: +49 331 288 2519

E-Mail: wpks@pik-potsdam.de

www.wissenschaftsplattform-klimaschutz.de

Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung e.V.

Telegraphenberg A31

Postfach 60 12 03

D-14412 Potsdam

www.pik-potsdam.de

STAND

Juni 2026

Inhaltsverzeichnis

1 Zusammenfassung.....	1
2 Hintergrund und Zielsetzung.....	4
2.1 Ausgangslage Treibhausgasemissionen im Gebäudesektor	4
2.2 Zielsetzung und Vorgehen.....	6
3 Stand der Forschung und Rahmenbedingungen	7
3.2 Zentrale Instrumente im Gebäudesektor.....	10
3.3 Rahmendaten zur Bewertung der Entwicklung im Gebäudesektor	12
4 Wirtschaftlichkeitsanalyse von Effizienzstandards im Wohngebäudebestand.....	16
4.1 Zielsetzung	16
4.2 Vorgehen und Methodik	16
4.3 Typologische Beschreibung des deutschen Gebäudebestandes über Referenzgebäude und Effizienzstandards.....	21
4.4 Analyse auf Einzelgebäudeebene	24
4.5 Zwischenfazit aus der Analyse auf Einzelgebäudeebene.....	57
5 Modellierung von Zielszenarien für den Gebäudesektor in Deutschland.....	59
5.1 Zielsetzung	59
5.2 Vorgehen	59
5.3 Zentrale Ergebnisse der Szenarienmodellierung.....	64
5.4 Zwischenfazit aus der Szenarienmodellierung	71
6 Auswirkung auf das Energiesystem	73
6.1 Zielsetzung	73
6.2 Vorgehen und Methodik	74
6.3 Stromspitzenlast aus Wärmepumpenversorgung	76
6.4 Auswirkungen auf Gesamtsystemebene.....	90
6.5 Auswirkungen auf Verteilnetzebene.....	95
6.6 Schätzung der Energiesystemkosten	98
6.7 Flexibler Wärmepumpenbetrieb	100
6.8 Einfluss der Vorlauftemperatur	102
6.9 Zwischenfazit aus der Analyse der systemischen Auswirkungen	104
7 Umsetzungshürden, Lösungsansätze und Handlungsempfehlungen.....	106
7.1 Fazit mit Relevanz für die Handlungsempfehlungen.....	106

7.2 Umsetzungshürden.....	107
7.3 Handlungsempfehlungen	110
Literaturverzeichnis.....	117
Abbildungsverzeichnis.....	124
Tabellenverzeichnis	129
Anhang.....	130

Abkürzungen

CO ₂	Kohlendioxid
CO ₂ äq.	Kohlendioxid - Äquivalent
COP	Coefficient of Performance
CF	Capacity Factor
BEHG	Brennstoffemissionshandelsgesetz
EE	Erneuerbare Energien
EED	Energy Efficiency Directive
EEWärmeG	Erneuerbare-Energien-Wärmegesetzes
EH	Effizienzhaus
EFH	Einfamilienhaus
EFZH	Ein- und Zweifamilienhäuser
EnEV	Energieeinsparverordnung
EnEG	Energieeinsparungsgesetzes
EPBD	Energy Performance of Buildings Directive
ESRS	Effort Sharing Regulation System
GMH	Großes Mehrfamilienhaus
GEG	Gebäudeenergiegesetz
GZF	Gleichzeitigkeitsfaktor
kWh	Kilowattstunde
iSFP	Individueller Sanierungsfahrplan
JAZ	Jahresarbeitszahl
KSG	Klimaschutzgesetz
kVa	Kilovoltampere
MFH	Mehrfamilienhaus
MMH	Mittleres Mehrfamilienhaus
MWh	Megawattstunde
NAP	Netzausbaupläne
PV	Photovoltaik
THG	Treibhausgas
TWh	Terawattstunde
WP	Wärmepumpe
WPKS	Wissenschaftsplattform Klimaschutz
WSV	Wärmeschutzverglasung

Glossar

Effizienzstandard

Im Rahmen dieser Studie wird der Begriff Effizienzstandard für die energetische Qualität der Gebäude verwendet. Dieser umfasst im Sinne dieser Analyse nicht die Umstellung der Wärmeversorgung. Die untersuchten Effizienzstandards werden dabei über den erreichten spezifischen Transmissionswärmetransferkoeffizient definiert, mit dem die Wärmeübertrag durch die Gebäudehülle beschrieben wird und damit als Maß für Effizienz eines Gebäudes steht.

Effizienzhaus

Das Effizienzhaus ist ein energetischer Standard, der durch die Förderprogramme des Bundes definiert wird. Je nach Effizienzhausstufe (EH-40, EH-55, EH-70 etc.) muss ein entsprechendes Gebäude einen niedrigeren nicht-erneuerbaren Primärenergiebedarf und geringere Transmissionswärmeverluste als der regulatorisch vergebene Effizienzstandard, der im Gebäudeenergiegesetz (GEG) definiert ist, aufweisen. Im Rahmen dieser Studie werden die Effizienzhausstandards mit Bezug auf die Gebäudehüllenanforderungen (Zielwert für Transmissionswärmeverlust) als Effizienzstandard untersucht und verglichen.

Effizienzstandard GEG „Bestand“

Im Rahmen dieser Studie wird der in der Modelluntersuchung abgebildete Mindesteffizienzstandard nach GEG für Bestandsgebäude im Falle einer umfangreichen Sanierung definiert. Der Zielwert des erreichten spezifischen Transmissionswärmetransferkoeffizient ergibt sich aus den U-Werten des GEG-Referenzgebäudes und der daraus resultierenden Anforderungen an einen Neubau, der um das 1,4-fache überschritten werden darf.

Referenzgebäudeverfahren nach GEG

Das GEG bewertet die energetische Qualität eines Gebäudes über das sogenannte *Referenzgebäudeverfahren*. Dabei wird das geplante oder bestehende Gebäude mit einem virtuellen Referenzgebäude gleicher Geometrie, Nutzung, Ausrichtung und Fläche verglichen. Das Referenzgebäude besitzt festgelegte energetische Eigenschaften für Gebäudehülle und Anlagentechnik gemäß den Vorgaben des GEG.

Referenzgebäudeklassen

Referenzgebäudeklassen beschreiben im Rahmen dieser Studie die Differenzierung des deutschen Gebäudebestandes nach Gebäudetyp und -nutzung sowie bauphysikalischen Eigenschaften. Letztere werden durch die Baualtersklassen und den Anteil bereits nachträglich sanierter Bauteile differenziert. Die Unterscheidung in Referenzgebäudeklassen stellt die typologische Differenzierung des Gebäudebestandes dar, der im Modell Invert/ee-lab implementiert wird, um, Wirtschaftlichkeitsanalysen von Effizienzmaßnahmen in Abhängigkeit des Ausgangs- und Zielzustandes auf Einzelgebäudeebene durchzuführen und bildet die Grundlage für die Szenarienmodellierung.

Referenzgebäudesegmente

Eine weitere gebäudetypologische Aufgliederung der Referenzgebäudeklassen erfolgt im Modell entsprechend des installierten Wärmeversorgungssystems, der Wärmeverteilung sowie gebietsspezifischer Voraussetzungen bezüglich vorhandener und zukünftiger Wärmenetzinfrastruktur. Diese Differenzierung bildet die Grundlage für die Szenarienmodellierung. Jedes Gebäude des deutschen Wohn- und Nichtwohngebäudebestandes wird im Modell einem Referenzgebäudesegment zugewiesen.

Sanierungsrate

Die Sanierungsrate beschreibt im Rahmen dieser Studie die äquivalente Vollsanierungsrate. Teilsanierungen gehen nur anteilig der sanierten Bauteilfläche in die ausgewiesene Sanierungsrate der Szenarien ein. Mit der Sanierungsrate sind nur Effizienzmaßnahmen an der Gebäudehülle gemeint. Die Umstellung der Wärmeversorgungssysteme ist darin nicht enthalten. Dies wird über die Heizungstauschrate beschrieben.

Sanierungsaktivität

Die Sanierungsaktivität beschreibt die grundsätzliche Aktivitätsrate energetischer Sanierungsmaßnahmen im Gebäudebestand, unabhängig von den sanierten Bauteilen. Teilsanierungen sind darin genauso erfasst wie umfangreiche Vollsanierungen. Für den Vergleich der Szenarien wird die Sanierungsaktivitätsrate entsprechend der anteilig sanierten Flächen in die äquivalente Vollsanierungsrate umgerechnet. Die Umstellung der Wärmeversorgungssysteme ist darin nicht enthalten.

Sanierungstiefe

Die Sanierungstiefe beschreibt den durchschnittlichen Effizienzstandard im Gebäudebestand. Eine hohe Sanierungstiefe meint dabei einen ambitionierten Effizienzstandard mit Bezug auf die erreichte energetische Qualität der Gebäudehülle.

Niedrigeffizienzscenario und Hocheffizienzscenario

Im Rahmen dieser Studie werden zwei Zielszenarien für den Gebäudebereich modelliert, die sich nur mit Bezug auf die umgesetzten energetischen Sanierungsmaßnahmen unterscheiden. Beim Im Niedrigeffizienzscenario werden die im Modell hinterlegten Referenzgebäudeklassen im Falle einer Sanierungsentscheidung jeweils auf den gesetzlichen Mindeststandard gemäß GEG saniert, bei gleichzeitig geringerer Sanierungsaktivität in Bezug auf die Hüllensanierung im Vergleich zum Hocheffizienzscenario.

Im Hocheffizienzscenario wird eine hohe Sanierungstiefe (EH55-Niveau) bei gleichzeitig erhöhter Sanierungsaktivität erreicht. Die Gebäude werden umfassend saniert, sodass Energieeffizienz- und Treibhausgasminderungspotenziale weitgehend ausgeschöpft werden. Der Heizungstauschrate ist in beiden Szenarien gleich.

1 Zusammenfassung

Die Dekarbonisierung des Gebäudebestands ist ein zentraler Baustein zur Erreichung der deutschen Klimaschutzziele bis 2045. Trotz erheblicher Fortschritte in anderen Sektoren verfehlt der Gebäudesektor die im Klimaschutzgesetz vorgesehenen Emissionsminderungen weiterhin deutlich. Vor diesem Hintergrund untersucht die vorliegende Studie im Auftrag der Wissenschaftsplattform Klimaschutz, wie die Transformation des Gebäudebestands in Deutschland beschleunigt und gleichzeitig gesamtwirtschaftlich kosteneffizient gestaltet werden kann.

Im Mittelpunkt der Untersuchung steht das Zusammenspiel zwischen energetischer Sanierung der Gebäudehülle, der Umstellung auf klimaneutrale Wärmeversorgungssysteme – insbesondere Wärmepumpen – sowie den daraus resultierenden Auswirkungen auf Energieverbrauch, Treibhausgasemissionen, Energiesystem und Infrastrukturkosten.

Die Analyse kombiniert einzelwirtschaftliche Bewertungen auf Ebene typologischer Referenzgebäude mit einer sektoralen Szenarienmodellierung des deutschen Gebäudebestands bis 2045. Grundlage ist das Bottom-up-Gebäudemodell Invert/ee-Lab, mit dem unterschiedliche Sanierungstiefen, Sanierungsraten und Wärmeversorgungstechnologien simuliert werden. Insgesamt werden 266 Referenzgebäudeklassen sowie etwa 9.700 Referenzgebäudesegmente unterschieden.

Die Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsanalyse auf Einzelgebäudeebene zeigen, dass energetische Sanierungen auf den gesetzlichen Mindeststandard gemäß GEG (GEG-Bestand) für einen großen Teil des Gebäudebestands einzelwirtschaftlich darstellbar sind – insbesondere bei langfristig steigenden Energiepreisen. Ambitionierte Effizienzhausstandards (55 und 40) führen zwar zu deutlich geringeren Energieverbräuchen und niedrigeren Heizlasten, verursachen jedoch höhere Investitionskosten, die sich ohne Förderung in vielen Fällen einzelwirtschaftlich nicht amortisieren. Gleichzeitig zeigt sich, dass die Wirtschaftlichkeit stark von Energiepreisen, Förderbedingungen, Zinssätzen sowie dem energetischen Ausgangszustand der Gebäude abhängt.

Die integrierte Betrachtung von Gebäudehülle und Wärmeversorgung verdeutlicht, dass für eine wirtschaftliche Dekarbonisierung nicht zwangsläufig hochambitionierte Effizienzstandards erforderlich sind. Bereits Sanierungen auf gesetzliche Mindestniveau sanierungsbedürftiger Bauteile ermöglichen in vielen Fällen einen effizienten Betrieb von Wärmepumpen. Zusätzliche Effizienzmaßnahmen reduzieren zwar den Energieverbrauch weiter, führen jedoch häufig nur zu begrenzten zusätzlichen Kostenvorteilen aus einzelwirtschaftlicher Sicht. Gleichzeitig sinken aber mit steigender Sanierungstiefe die Heizlasten erheblich, wodurch Wärmepumpen kleiner dimensioniert werden können und sich ihre Effizienz verbessert.

Die Szenarienmodellierung vergleicht ein Hocheffizienzscenario mit hoher Sanierungsrate und Sanierung auf EH55-Niveau mit einem Niedrigeffizienzscenario, das geringere Sanierungsraten und Sanierungen auf GEG-Mindestniveau unterstellt. Die mittlere Sanierungsrate beträgt 1,1 % im Niedrigeffizienzscenario und 1,6 % im Hocheffizienzscenario. Das heißt, dass im Szenariozeitraum rund 43 %

(Hocheffizienzscenario) bzw. rund 31 % (Niedrigeffizienzscenario) der Gebäude bis zum Jahr 2045 saniert werden.

Beide Szenarien erreichen bis 2045 Klimaneutralität im Gebäudesektor, unterscheiden sich jedoch deutlich hinsichtlich des Energiebedarfs, der Emissionsentwicklung und der Investitionsstruktur.

Im Hocheffizienzscenario reduziert sich der Nutzwärmebedarf bis 2045 deutlich stärker als im Niedrigeffizienzscenario. Der Unterschied beträgt im Jahr 2045 rund 100 TWh bzw. unter Berücksichtigung realer Nutzungseffekte etwa 91 TWh. Aufgrund der hohen Diffusion von Wärmepumpen in beiden Szenarien ist der Unterschied mit Bezug auf die aufzubringende Endenergie (ohne Umweltwärme) zur Wärmeerzeugung geringer. Hierbei resultiert ein Unterschied von 46 TWh im Jahr 2045. Die kumulierten Treibhausgasemissionen im Betrachtungszeitraum sinken im Hocheffizienzscenario um rund 56 Mio. t CO₂-Äquivalent gegenüber dem Niedrigeffizienzscenario.

Demgegenüber zeigt sich, dass die Gesamtkosten im Gebäudesektor über den Zeitraum 2025 bis 2045 im Niedrigeffizienzscenario geringer ausfallen. Zwar entstehen dort höhere Energiekosten und ein höherer Bedarf an erneuerbaren Energien, Netzinfrastruktur und klimaneutralen Energieträgern, die geringeren Investitionen in die Gebäudehülle kompensieren diesen Effekt jedoch weitgehend. Die Ergebnisse bestätigen damit, dass Effizienzmaßnahmen im Gebäudebereich und zusätzliche Infrastrukturinvestitionen im Energiesystem teilweise substitutive Wirkungen entfalten.

Die Analyse der Auswirkungen auf das Energiesystem zeigt, dass geringere Sanierungsaktivitäten zu höheren Strombedarfen und höheren Lastspitzen durch Wärmepumpen führen. Besonders relevant sind dabei winterliche Dunkelflauten mit gleichzeitig niedrigen Außentemperaturen und geringer erneuerbarer Stromerzeugung. In diesen Situationen steigt die elektrische Last von Wärmepumpen überproportional an, insbesondere bei Gebäuden mit hohen Vorlauftemperaturen und ineffizienten Wärmeverteilsystemen.

Gleichzeitig zeigen die Ergebnisse, dass Wärmepumpen auch im unsanierten oder teilsanierten Gebäudebestand grundsätzlich effizient betrieben werden können. Bereits geringinvestive Maßnahmen wie die Optimierung von Heizkurven oder der Austausch einzelner Heizkörper ermöglichen häufig niedrigere Vorlauftemperaturen und damit deutlich höhere Jahresarbeitszahlen. Solche niederschweligen Maßnahmen können kurzfristig erhebliche Effizienzgewinne ermöglichen und sollten stärker in den Fokus der Transformationsstrategie rücken.

Die Lebenszyklusanalyse verdeutlicht zudem, dass mit steigender Sanierungstiefe die sogenannten grauen Emissionen aus Herstellung und Rückbau der eingesetzten Baustoffe an Bedeutung gewinnen. Während ambitionierte Effizienzstandards die betriebsbedingten Emissionen deutlich reduzieren, steigen gleichzeitig die materialbedingten Emissionen der Sanierungsmaßnahmen. Der Einsatz von Baustoffen aus nachwachsenden Rohstoffen kann diese Effekte reduzieren und gewinnt daher im Zuge der Transformation an Bedeutung.

Insgesamt zeigen die Ergebnisse, dass die Dekarbonisierung des Gebäudebestands sowohl durch hohe Effizienzstandards als auch durch eine stärker auf die schnelle Umstellung der Wärmeversorgung fokussierte Strategie erreichbar ist. Ambitionierte Sanierungsstandards reduzieren langfristig Energiebedarf, Lastspitzen und Emissionen stärker, gehen jedoch mit höheren Investitionskosten einher. Niedrigere Sanierungstiefen ermöglichen dagegen auf Einzelgebäudeebene eine kostengünstigere und potenziell schnellere Transformation, führen jedoch zu höheren Anforderungen an das zukünftige Energiesystem. Ein zusätzlicher Wert von ambitionierten Sanierungsniveaus und Niedertemperatur-Heizsystemen liegt in der deutlichen Erhöhung der möglichen Lastflexibilität, welche die Integration hoher Anteile an erneuerbaren Energien im Stromsystem verbessern kann. Um dieses Flexibilitätspotenzial zu heben, müssen jedoch entsprechende Anreize geschaffen werden.

Aus den Ergebnissen ergibt sich die Notwendigkeit einer differenzierten politischen Strategie. Eine pauschale Förderung hoher Effizienzstandards über alle Gebäude hinweg ist wenig zielführend vor dem Hintergrund beschränkter Förderbudgets. Eine pauschale Förderung hoher Effizienzstandards über alle Gebäude hinweg ist wenig zielführend. Die Analyse zeigt, dass insbesondere jene Gebäude, bei denen ambitionierte Sanierungen wirtschaftlich am sinnvollsten sind, zugleich aus systemischer Perspektive prioritär behandelt werden sollten. Dabei handelt es sich vor allem um Gebäude mit sehr schlechtem energetischem Zustand, bei denen einerseits die Herstellung der Niedertemperaturfähigkeit für eine klimaneutrale Wärmeversorgung besonders dringend ist und andererseits durch Sanierungen die höchsten Treibhausgasreduzierungen zu vergleichsweise geringen Kosten erzielt werden können. Dies spricht dafür, Förderinstrumente gezielt auf solche Gebäude auszurichten. Gleichzeitig verdeutlichen die Ergebnisse, dass kostengünstige Effizienzmaßnahmen sowie Maßnahmen zur schnellen Dekarbonisierung der Wärmeversorgung auch in der Breite unterstützt werden sollten, um kurzfristig möglichst große Emissionsminderungen zu erreichen.

Langfristig wird die Transformation des Gebäudesektors nur durch ein abgestimmtes Zusammenspiel aus Energieeffizienz, erneuerbarer Wärmeversorgung, Flexibilisierung des Energiesystems sowie dem Einsatz klimafreundlicher Baustoffe gelingen.

2 Hintergrund und Zielsetzung

Die Wissenschaftsplattform Klimaschutz (WPKS) ist ein unabhängiges, interdisziplinär zusammengesetztes Gremium aus Expertinnen und Experten. Sie stellt wissenschaftliche Expertise für die Umsetzung und Weiterentwicklung der deutschen Langfriststrategie zum Klimaschutz bereit. Dazu erarbeitet sie Empfehlungen und zeigt Handlungsoptionen auf, die politischen Entscheidungsträgern über Ressort- und Fachgespräche, Gutachten sowie Policy Papers zur Verfügung gestellt werden.

Die WPKS wird mit dieser Auftragsstudie unterstützt, die der Frage nachgeht, mit welchen Instrumenten die Dekarbonisierung des Gebäudebestands in Deutschland beschleunigt und zugleich kosteneffizient umgesetzt werden kann.

2.1 Ausgangslage Treibhausgasemissionen im Gebäudesektor

Im Klimaschutzgesetz (KSG) ist das Ziel der Netto-Treibhausgasneutralität bis 2045 verankert. Vorgesehen ist eine schrittweise Reduktion der Treibhausgasemissionen (THG-Emissionen) im Vergleich zu 1990 um 65 % bis 2030 bzw. um 88 % bis 2040. Das KSG teilt die nationalen THG-Emissionen in spezifische Sektoren auf, für die jeweils jährliche Emissionsbudgets festgelegt sind. Die Abgrenzung der Sektoren Energie, Industrie, Gebäude, Verkehr und Landwirtschaft erfolgt dabei nach der Europäischen Klimaberichterstattungsverordnung und ist inhaltlich angelehnt an die europäische Effort Sharing Regulation (ESR). Diese legt für die Mitgliedstaaten verbindliche Emissionsminderungsziele für die nicht vom Europäischen Emissionshandel erfassten Bereiche fest, u.a. Verkehr, Gebäude, Landwirtschaft und Abfall.

Die aktuellen Treibhausgas-Projektionen bestätigen, dass das Zwischenziel des KSG (Reduktion um 65 % bis 2030 gegenüber 1990) grundsätzlich erreichbar ist. Im Vergleich zum Vorjahr ist jedoch eine Verschlechterung zu verzeichnen, es wird nur ein Rückgang von 62,6 % erreicht. Auch die Jahresemissionsmengen zwischen 2021 und 2030 werden nur mit einem knappen Überschuss von 3,8 Millionen t CO_{2äq} eingehalten (Wehmann u. a. 2026).

Zudem bestehen deutliche Unterschiede zwischen den Sektoren. Die Zielerreichung wird insbesondere durch die Energiewirtschaft und den Industriesektor ermöglicht. Der Gebäudesektor verfehlt sein Ziel immer noch deutlich. Bis 2030 ist hier mit einer kumulierten Überschreitung des zulässigen Emissionsreduktionsziels um rund 110 Millionen Tonnen CO₂ zu rechnen.¹

Im Kontext des KSG bezieht sich der Gebäudesektor ausschließlich auf direkte energiebedingte Emissionen, die beim Betrieb von Gebäuden durch den Einsatz fossiler Brennstoffe (z.B. Heizöl, Erdgas, Kohle) entstehen. Nicht enthalten im Gebäudesektor sind jedoch Vorkettenemissionen (z.B. Emissionen aus der Herstellung von Brennstoffen), indirekte Emissionen aus Strom- oder Fernwärmenutzung (diese fallen in den Stromsektor) sowie Bau- und materialbedingte Emissionen (z.B. aus der

¹ Wehmann u. a. 2026

Herstellung von Beton oder Stahl für den Hochbau), die dem Industriesektor zugerechnet werden.

Die sektorale Einteilung im KSG folgt einem regulatorischen Zweck zur Überwachung und Steuerung von Emissionszielen. Vor diesem Hintergrund liegt der Fokus von Klimaschutzmaßnahmen im Gebäudebereich auf dem Energieverbrauch des Gebäudes während der Betriebs- und Nutzungsphase. Der ordnungsrechtliche Rahmen im GEG fokussiert einen effizienten Betrieb von Gebäuden durch die Vorgabe energetischer Anforderungen an Neu- und Bestandsgebäude und den Einsatz erneuerbarer Energien.

Die Betrachtung des restlichen Lebenszyklus von Gebäuden, d.h. inklusive der Herstellung und Entsorgung von Bauprodukten, die sogenannte graue Energie, ist bislang nicht Gegenstand ordnungsrechtlicher Vorgaben. Der Industriesektor nach KSG war im Jahr 2025 für rund 22 % der nationalen THG-Emissionen verantwortlich. Etwa die Hälfte dieser Emissionen entfällt auf die Herstellung von Stahl, Zement, Beton sowie Kunststoffen – Materialien, die in erheblichem Umfang für den Bau und die Sanierung von Gebäuden benötigt werden. Der Bau und die Sanierung von Gebäuden stellen also einen zentralen Nachfragetreiber für industrielle Grundstoffe dar. Dabei wird die Nachfrage nicht ausschließlich aus inländischer Produktion bedient. Zum Vergleich: Die Energiewirtschaft verursachte im Jahr 2023 rund 29 % der nationalen Emissionen, der Verkehrssektor etwa 23 % und der Abfallsektor rund 0,8 %.²

Für die Transformation zur Klimaneutralität kommt daher nicht nur der Dekarbonisierung der Betriebsphase von Gebäuden, sondern auch dem Einsatz klimafreundlicher Baumaterialien eine zentrale Bedeutung zu. Dabei ist zwischen Neubau und Sanierung zu unterscheiden: Die Sanierung bestehender Gebäude ist im Vergleich zum Neubau mit deutlich geringeren Emissionen und einer geringeren Flächenneuanspruchnahme verbunden.³ Im Neubau hingegen werden erheblich mehr Grundstoffe eingesetzt. Gleichzeitig dominieren bei Sanierungsmaßnahmen nach wie vor konventionelle, synthetische Dämmstoffe: Im Jahr 2019 wurden in Deutschland insgesamt 38,5 Millionen Kubikmeter Dämmstoffe abgesetzt – davon 16,5 Millionen Kubikmeter mineralische, 18,5 Millionen Kubikmeter fossile und lediglich 3,5 Millionen Kubikmeter auf Basis nachwachsender Rohstoffe.⁴

Der größte Hebel für die Dekarbonisierung des Gebäudesektors liegt angesichts der Baualtersstruktur und der geringen Neubautätigkeit im Gebäudebestand. Hier ist insbesondere die energetische Ertüchtigung der Gebäudehülle sowie der Umstieg auf klimaneutrale Haustechnik entscheidend. Die zentrale Frage ist jedoch, in welchem Umfang diese beiden Elemente umgesetzt werden sollten, um eine möglichst große Minderung von THG-Emissionen zu erreichen und gleichzeitig die Kosten tragbar zu halten.

² Vgl. Umweltbundesamt, 2024; Wehmann et al., 2026

³ Vgl. Deurer et al., 2025; Klimawirkung von Sanierungen - Eine lebenszyklusbasierte Analyse, 2025

⁴ Vgl. FNR, 2020 Vgl. FNR, 2020

2.2 Zielsetzung und Vorgehen

Das Vorhaben soll daher einen Beitrag zu der Fragestellung leisten, wie und mit welchen politischen Instrumenten die Dekarbonisierung des Gebäudebestands in Deutschland beschleunigt und gesamtwirtschaftlich kosteneffizient erreicht werden kann.

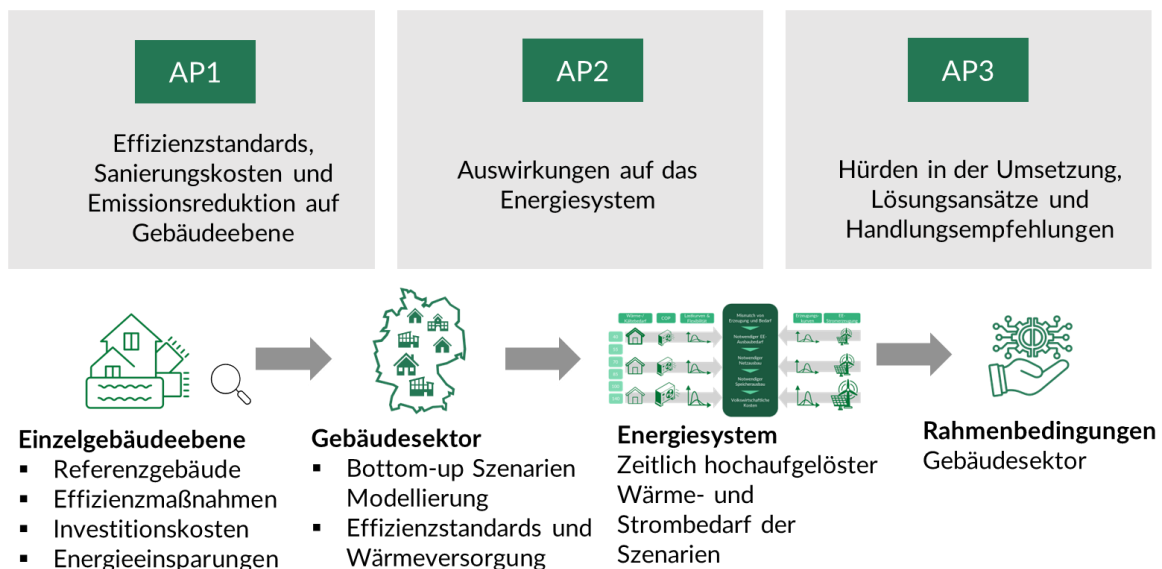
Zentrale Forschungsfragen

1. Innerhalb welcher Zeiträume rechnet sich die Sanierung zu bestimmten Effizienzhausstandards, wie beispielsweise 40, 55, 70, 85, 100, 140?
2. Für welchen Effizienzhausstandard ist das Verhältnis am günstigsten?
3. Was sind die energetischen, systemischen und ökonomischen Folgen verschiedener Sanierungsniveaus im Gebäudebestand?
4. Welche Auswirkungen auf Strombedarf, den Ausbau erneuerbarer Energien, Netzbelastung und Versorgungssicherheit ergeben sich durch verschiedene Sanierungsniveaus?

Struktur und Vorgehen

Abbildung 1 zeigt die Projektstruktur. Das Vorhaben unterteilt sich in drei verschiedene Arbeitspakete (APs). AP1 betrachtet das Zusammenspiel zwischen Sanierungstiefe (= energetische Ertüchtigung der Gebäudehülle), dem Wechsel zu klimafreundlichen Beheizungstechnologien und dessen Implikationen für die Emissionsreduktion. Hierzu erfolgt zunächst eine umfassende Analyse des bestehenden Forschungsstands auf Basis einer Literaturrecherche, um Erkenntnisse zu bündeln und Forschungslücken zu identifizieren. Darauf aufbauend werden zunächst vertiefte Einzelbetrachtungen und anschließend Szenarienanalysen durchgeführt. AP2 analysiert auf dieser Basis die Auswirkungen auf das Energiesystem. In AP3 werden abschließend mögliche Lösungsansätze für die Beschleunigung der Dekarbonisierung des Gebäudebestands untersucht.

Abbildung 1: Projektstruktur, zentrale Methoden und Ergebnisse



3 Stand der Forschung und Rahmenbedingungen

Zur Beantwortung der Fragen und zur Festlegung des Untersuchungsrahmens werden veröffentlichte Studien analysiert:

- Rau, D., Thamling, N., & Lettow, F. (2024). Auf die Zukunft bauen: So rechnen sich Sanierungen. WWF Deutschland, Prognos.
- EWI (2022). Wirtschaftlichkeit von energetischen Sanierungsmaßnahmen: Eine Analyse anhand exemplarischer Einfamilienhäuser.
- Dena (2011). dena-Sanierungsstudie. Teil 1: Wirtschaftlichkeit energetischer Modernisierung im Mietwohnungsbestand. Begleitforschung zum dena-Projekt „Niedrigenergiehaus im Bestand“
- Gunnar Luderer (Hrsg.), Frederike Bartels (Hrsg.), Tom Brown (Hrsg.), Clara Aulich, Falk Benke, Tobias Fleiter, Fabio Frank, Helen Ganal, Julian Geis, Norman Gerhardt, Till Gnann, Alyssa Gunnemann, Robin Hasse, Andrea Herbst, Sebastian Herkel, Johanna Hoppe, Christoph Kost, Michael Krail, Michael Lindner, Marius Neuwirth, Hannah Nolte, Robert Pietzcker, Patrick Plötz, Matthias Rehfeldt, Felix Schreyer, Toni Seibold, Charlotte Senkpiel, Dominika Sörgel, Daniel Speth, Bjarne Steffen, Philipp C. Verpoort (2025): Die Energiewende kosteneffizient gestalten: Szenarien zur Klimaneutralität 2045. Kopernikus-Projekt Ariadne, Potsdam.
- Peter Mellwig, Prof. Dr. Martin Pehnt (2025). Mit guten Gebäuden zum Ziel: Wie Klimaschutz im Gebäudebestand zu schaffen ist. Ifeu.
- Janis Bergmann, Julika Weiß (2025). Die Rolle der Gebäudeeffizienz für die Wärmewende: Bedeutung von energetischen Modernisierungsmaßnahmen an der Gebäudehülle aus Sicht des Gesamtsystems und von Nutzenden. IÖW, Deutsche Unternehmensinitiative Energieeffizienz.
- Prognos, Stiftung Klimaneutralität (12/2025): Auswirkungen unterschiedlicher Sanierungsraten auf das Energiesystem und seine Kosten.

3.1.1 Einzelwirtschaftliche Perspektive

In Rau et al., 2024 werden beispielhafte Wirtschaftlichkeitsberechnungen zur energetischen Gebäudesanierung am Beispiel je eines Einfamilienhaus (EFH) und eines Mehrfamilienhauses (MFH) durchgeführt. Beide Beispielgebäude stammen aus den Baualtersklassen 1958-1968 (EFH) und 1968-1978 (MFH) und sind weitgehend unsaniert. Es wurden Renovierungen auf die Effizienzstandards EH70 und EH55 berücksichtigt. Gebäudesanierungen wurden sowohl gebündelt als auch schrittweise betrachtet. Investitionskosten wurden erst unter Annahme eines Zinssatzes von 4% nach Inflation und einer Lebensdauer von 40 Jahren annualisiert und dann anteilig auf den Betrachtungszeitraum umgelegt.

Für Einfamilienhäuser kommt die Studie zu dem Ergebnis, dass der Einbau eines neuen Gaskessels ohne weitere Sanierungsmaßnahmen mit 94.188 € für die höchsten Gesamtkosten innerhalb des Betrachtungszeitraums sorgt. Dabei wird gemäß dem aktuell noch gültigen GEG eine Beimischung von Biogas angenommen. Die niedrigsten Gesamtkosten wurden mit 65.000€ für eine Vollsanierung kombiniert mit dem Einbau einer Wärmepumpe ermittelt. Sanierungen auf die verschiedenen Standards ergeben

dabei vergleichbare Kosten. Es wurde ermittelt, dass auch eine schrittweise Teilsanierung Kostenvorteile gegenüber dem Fall ohne Sanierung bietet, auf lange Sicht aber weniger wirtschaftlich als die Vollsanierung ist.

Die Studie weist darauf hin, dass der wirtschaftlich optimale Fall einer Vollsanierung gleichzeitig mit den höchsten Anfangsinvestitionen verbunden ist. Aus diesem Grund werden verschiedene Fördermaßnahmen vorgeschlagen.

Für Mehrfamilienhäuser sind die Studienergebnisse weniger eindeutig. Das teuerste betrachtete Szenario bleibt der Einbau einer neuen Gasheizung ohne sonstige Sanierungsmaßnahmen. Die günstigsten Szenarien sind der Einbau eines Pelletkessels ohne Renovierungsmaßnahmen oder der Einbau einer Wärmepumpe bei gleichzeitiger Sanierung auf den Effizienzstandard EH55. Dabei wird jedoch darauf hingewiesen, dass ein Pelletkessel nach Ansicht der Studie keine langfristig klimaneutrale Option ist. Die Preisspanne zwischen den betrachteten Szenarien ist deutlich kleiner als bei Einfamilienhäusern.

Als zusätzliche Faktoren, die die individuelle Entscheidung über Maßnahmen beeinflussen können, werden die Kostenteilung zwischen Mietenden und Vermietenden sowie eventuelle Wertsteigerungen der Gebäude durch Sanierungsmaßnahmen aufgeführt.

Pickert et al., 2022 betrachten ebenfalls die Wirtschaftlichkeit von energetischen Gebäudesanierungen anhand von zwei Beispielhäusern über einen Zeitraum von 20 Jahren. Beide betrachteten Gebäude sind unsanierte Einfamilienhäuser. Eins der Häuser wurde 1960 erbaut und wird mit einem Heizwert-Gaskessel über Heizkörper beheizt, das andere wurde 1990 erbaut und wird mit einem Öl-Brennwertkessel über eine Fußbodenheizung beheizt. In der Studie werden für beide Häuser eine Sanierung auf die Effizienzklasse EH55, sowie ein Austausch der Heizung durch eine Wärmepumpe betrachtet.

Die Studie betrachtet verschiedene Szenarien für die Entwicklung von Energiepreisen. Der Einfluss verschiedener Maßnahmen auf die Wertentwicklung der Gebäude wurde explizit in die Berechnung mit einbezogen.

Für das ältere Haus rentiert sich eine Sanierung je nach Preisszenario in zwischen 19 und 11 Jahren. Für das neuere Haus rentiert sich die energetische Sanierung nicht. Es wird darauf hingewiesen, dass sich die Sanierung im Falle eines Wegfalls der Förderung auch für das ältere Haus nicht lohnt.

In Discher et al., 2010 wurde eine Wirtschaftlichkeitsberechnung zu Renovierungsmaßnahmen in Mehrfamilienhäusern durchgeführt. Die Stichprobe bestand aus Mehrfamilienhäusern und großen Mehrfamilienhäusern aus jeweils fünf Baujahren. Sowohl die Anteile notwendiger und optionaler Kosten als auch die verbundene Umlagefähigkeit der Kosten werden analysiert. Die entstehenden relativen Sanierungskosten wurden sowohl aus Vermietenden- als auch aus Mietenden-Perspektive bewertet.

Nach Ergebnissen der Studie ist eine energetische Sanierung der Gebäude sowohl für Mietende als auch für Vermietende wirtschaftlich. Für Vermietende lohnt sich die Sanierung durch hohe Förder- und Umlagequoten, für Mietende durch in Relation zur

umgelegten Erhöhung der Kaltmiete sinkende Energiekosten. Insbesondere für ohnehin renovierungsbedürftige Gebäude erweist sich eine energetisch höherwertige Sanierung als wirtschaftlich.

Zusammenfassend bietet die Studienlage ein differenziertes Bild über den optimalen Weg zur Klimaneutralität einzelner Gebäude. Die Studienlage zum empfehlenswerten Umfang möglicher energetischer Sanierungen ist uneindeutig.

Die Voraussetzungen in allen betrachteten Fällen hängt stark von Regulatorik (CO₂-Preise, verfügbare Fördermaßnahmen) und unberechenbaren äußeren Faktoren wie den Energiepreisen ab.

3.1.2 Gesamtwirtschaftliche Perspektive

Im Bericht des Kopernikus-Projekts Ariadne (Luderer u. a. 2025) wird die gesamtgesellschaftliche Transformation zur Klimaneutralität 2045 erörtert. Dazu wurden fünf Szenarien modelliert und nach ihrer Effektivität zur Erreichung der Klimaziele sowie ihren volkswirtschaftlichen Kosten bewertet und mit einem Referenzszenario verglichen. Drei der Szenarien werden nach ihrem technologischen Fokus – Strom, Wasserstoff oder einem Mix verschiedener Energieträger – differenziert. Zwei weitere Szenarien sind über die Nachfrage definiert. Das Referenzszenario verwendet den zum Zeitpunkt der Studie aktuellen Gesetzesstand, garantiert aber keine Klimaneutralität bis 2045. Der Gebäudesektor ist nur einer der betrachteten Aspekte. Für das spezifische Thema der Gebäudemodernisierung sind insbesondere die nachfragebasierten Szenarien relevant.

Die jährliche Sanierungsquote bewegt sich in den unterschiedlichen Szenarien zwischen 1 % und 2 %. Dabei reizen sowohl das Szenario „Hohe Nachfrage“, als auch alle technologiebasierten Szenarien das festgelegte Maximum von 2 % aus. Das Szenario „Niedrige Nachfrage“ kommt auf eine Sanierungsquote von 1,6 % und das Referenzszenario verwendet eine Sanierungsquote von 1 %.

Die Qualität der Sanierungen wird in diesem Bericht in zwei Stufen betrachtet: Die niedrigere Stufe kombiniert die Standards EH55 und EH70, die höhere Stufe entspricht dem Standard EH40. Welcher Standard zum Einsatz kommt, ist Ergebnis einer Gesamtenergiesystemoptimierung, bei der nicht nur Energie- und Investitionskosten auf Einzelgebäudeebene einfließen, sondern auch übergeordnete volkswirtschaftliche Kosten betrachtet werden. Dabei kommt effizienteren Häusern eine gesonderte Rolle als Pufferspeicher für Wärme zu, der durch intelligente Steuerung von Heizungssystemen Nachfragespitzen abfangen kann. Diese Rolle ist insbesondere im Szenario „Fokus Elektrifizierung“ relevant. In jedem anderen betrachteten Szenario entfällt die Mehrheit der Investitionen auf die Klasse EH55-70.

Die Kurzstudie „Mit guten Gebäuden zum Ziel“ von Mellwig & Pehnt, 2025 betrachtet die Rolle der Gebäudesanierung als Voraussetzung für die Klimaneutralität des deutschen Gebäudebestands bis 2045. Dabei wurde der Fokus spezifisch auf die „Worst-Performing-Buildings“ (Effizienzklassen F, G und H) gelegt. Diese werden in der Studie betrachteten Szenario schrittweise durch Sanierung in höhere Effizienzklassen überführt. 50 % der Gebäude wechseln zu Klasse C, 40% zu Klasse B

und insgesamt 10 % zu den Klassen A und A+. Dadurch wird ein Potenzial zur Senkung des gesamtdeutschen Bedarfs an Heizwärme für Gebäude von 23% ermittelt. Durch die niedrigeren benötigten Vorlauftemperaturen hat diese Senkung einen überproportionalen Effekt auf den Stromverbrauch der verwendeten Wärmepumpen.

Im Auftrag der Deutschen Unternehmensinitiative Energieeffizienz wurde im Jahr 2025 ein Kurzgutachten erstellt (Bergmann und Weiß 2025). Dieses analysiert die Bedeutung von Gebäudeeffizienzmaßnahmen auf systemischer-, volkswirtschaftlicher und Endnutzerebene. Der Fokus liegt dabei insbesondere auf einem Vergleich zwischen Mehrkosten durch Sanierungsmaßnahmen und Folgekosten von ausgelassenen Investitionen sowie auf Synergieeffekten zwischen Sanierungen und ohnehin notwendigen Investitionen.

Es wurde eine Sanierungsquote von 1,7 % angenommen sowie eine Versorgungsquote mit Wärmepumpen von 60% zum Jahr 2045. Diese Sanierung wurde in zwei Szenarien entweder auf GEG-Niveau oder auf EH55-Niveau angenommen. Zu diesen Szenarien wurden Einsparungen im Wärmebedarf, im Strombedarf verwendeter Wärmepumpen, sowie Kosten in Relation zu Sowieso-Kosten berechnet.

Die Bedeutung der Sanierungsquote als Sensitivität für die gesamtsystemischen Kosten zur Erreichung von Klimaneutralität im Gebäudesektor wurde 2025 in einer Sensitivitätsanalyse im Auftrag der Stiftung Klimaneutralität untersucht (Prognos, Stiftung Klimaneutralität 2025). Dazu wurden zwei Szenarien mit unterschiedlicher Sanierungsrate verglichen. Ein Szenario basiert auf einer gleichbleibenden Sanierungsrate um 1 %, das andere nimmt den Plan der Studie „Klimaneutrales Deutschland – von der Zielsetzung zur Umsetzung“ (Agora Think Tanks 2024) an, in dem die Sanierungsrate bis 2035 auf 1,7 % steigt und bis 2045 auf 1,5 % abflacht. Das erste Szenario nimmt außerdem eine geringere Sanierungstiefe an.

Die Studie kommt zu dem Ergebnis, dass Klimaneutralität auch mit gleichbleibenden Sanierungsraten mit gesamtgesellschaftlich ähnlichen Kosten erreichbar ist. Geringere Effizienzen führen zu einem im Vergleich zum Referenzszenario erhöhten Energieverbrauch. Dieser muss vom Energiesektor aufgefangen werden. Dafür werden im Gebäudesektor Kosten für Sanierungen eingespart. Es kann also von einer Verschiebung von Kosten vom Gebäude- in den Energiesektor gesprochen werden. Die gesamtgesellschaftlichen Kosten bleiben bei einer solchen Verschiebung auf einem vergleichbaren Niveau.

3.2 Zentrale Instrumente im Gebäudesektor

Im Gebäudesektor bilden eine Reihe politischer und regulatorischer Instrumente den Rahmen für Energieeffizienz, Klimaschutz und die Dekarbonisierung des Gebäudebestands. Diese unterscheiden sich in ordnungsrechtliche, ökonomische und flankierende Instrumente. Im Folgenden werden zentrale ordnungsrechtliche als auch ökonomische Instrumente beschrieben. Die Instrumente werden in Kapitel 5 bei der Modellierung von Zielszenarien berücksichtigt.

Gebäudeenergiegesetz (GEG): Das GEG ist das zentrale nationale Regelwerk für energieeffizientes Bauen und Sanieren in Deutschland. Es fasst seit 2020 die bis dahin

geltenden technischen Anforderungen der Energieeinsparverordnung (EnEV), des Erneuerbare-Energien-Wärmegesetzes (EEWärmeG) und des Energieeinsparungsgesetzes (EnEG) zusammen. Wesentliche Vorgaben betreffen u. a. die energetische Qualität von Neubauten, die Effizienz von Heizungsanlagen und die Nutzung erneuerbarer Energien. Bei neuen Wärmeversorgungsanlagen schreibt das GEG vor, dass mindestens 65 % der Wärme aus erneuerbaren Quellen stammen müssen. Damit stellt es eine direkte Verbindung zu den Klimaschutzzielen auf nationaler Ebene her.

Energy Performance of Buildings Directive (EPBD): Die EPBD ist die zentrale europäische Richtlinie zur Verbesserung der Energieeffizienz von Gebäuden. Die aktuelle Novelle fordert unter anderem die Einführung von Nullemissionsgebäuden im Neubau, Mindestenergiestandards für Nichtwohngebäuden, die Erstellung von Lebenszyklusanalysen für Neubauten ab 2028/2030 sowie damit verbunden auch Grenzwerte für die Lebenszyklusemissionen von Gebäuden. Die EPBD gibt damit den übergeordneten Rahmen vor, der von den Mitgliedstaaten in nationales Recht umgesetzt werden muss.

Das GEG dient als nationales Umsetzungsinstrument der EPBD und integriert die europäischen Vorgaben in das deutsche Regelwerk. Während die EPBD den Rahmen und Mindeststandards auf EU-Ebene setzt, konkretisiert das GEG diese Anforderungen und ergänzt sie durch nationale Spezifika, wie z. B. die konkrete Höhe des Anteils erneuerbarer Energien für Heizsysteme. Damit sorgt das Zusammenspiel für Rechtsklarheit, fördert Investitionssicherheit und ermöglicht die Umsetzung europäischer Klimaschutzziele auf nationaler Ebene. Die EPBD-Novelle muss bis Ende Mai 2026 in deutsches Recht umgesetzt werden.

Energy Efficiency Directive (EED): Die EED ergänzt die EPBD auf EU-Ebene und richtet sich nicht nur an den Gebäudesektor, sondern an alle Energiesektoren. Sie enthält Vorgaben zur Steigerung der Energieeffizienz, etwa die Einführung von Sanierungsverpflichtungen für öffentliche Gebäude, Energieeinsparziele für öffentliche Institutionen sowie Berichterstattungspflichten über Energieeinsparungen.

Bundesförderung für effiziente Gebäude (BEG): Die BEG ergänzt das GEG durch finanzielle Anreize in Form von Zuschüssen oder zinsgünstigen Krediten für energetische Sanierungen. Gefördert werden sowohl Einzelmaßnahmen an Bauteilen als auch die Umsetzung definierter Effizienzhaus-Standards. Zu den förderfähigen Effizienzhaus-Stufen zählen EH40, EH55, EH70 und EH85, wobei die Förderhöhe mit steigendem Effizienzniveau zunimmt. Für Einzelmaßnahmen sind die Fördersätze hingegen einheitlich ausgestaltet und können zusätzlich an einen individuellen Sanierungsfahrplan (iSFP) gekoppelt sein.

Brennstoffemissionshandelsgesetz (BEHG): Das BEHG führt CO₂-Preise auf fossile Brennstoffe ein, wodurch sich deren Kosten erhöhen. Ziel ist es, Anreize zur Reduktion des Energieverbrauchs sowie zur Umstellung auf klimafreundlichere Technologien zu setzen.

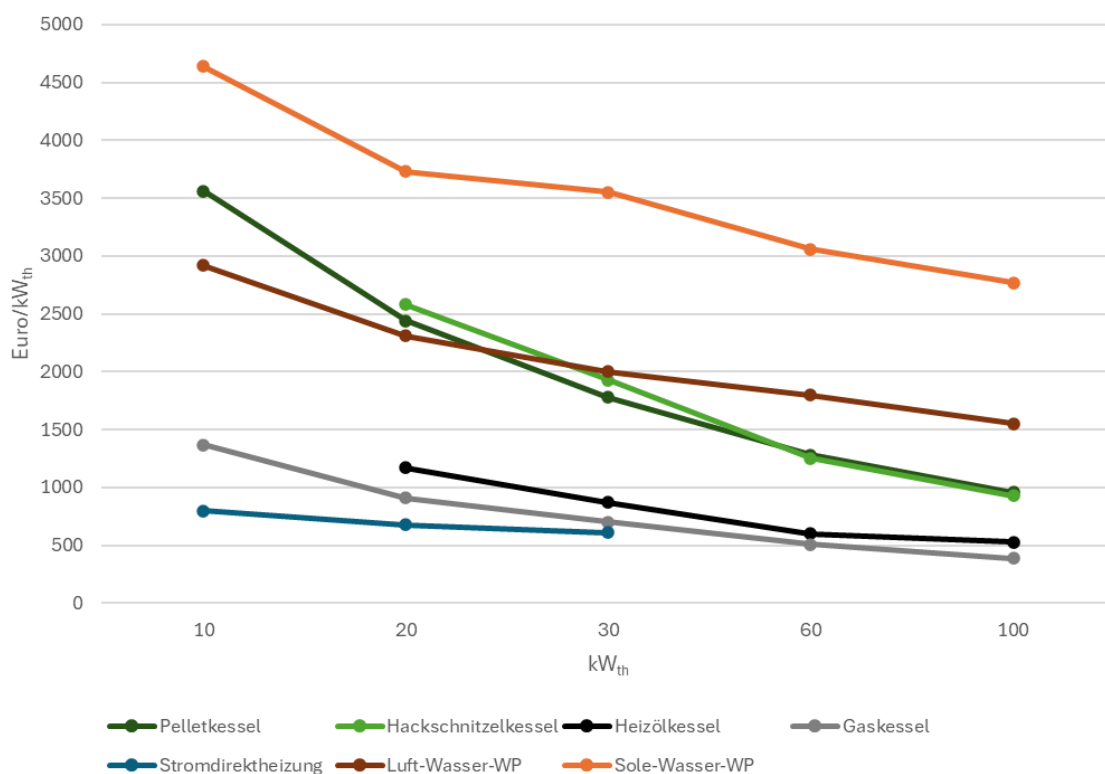
3.3 Rahmendaten zur Bewertung der Entwicklung im Gebäudesektor

Für die Energie- und CO₂-Preisentwicklung über den Szenariozeitraum sowie für die Kosten für Wärmeerzeugungssysteme werden die Rahmendaten der Treibhausgas-Projektionen 2026 (Projektionsbericht) verwendet (Kemmler u. a. 2026). Diese sind im Rahmen des Projektionsberichtes im Herbst 2025 mit dem Umweltbundesamt sowie den beteiligten Ressorts abgestimmt und veröffentlicht worden.

Energiepreise und CO₂-Kosten

Abbildung 2 zeigt die Entwicklung der Endverbraucherpreise für zentrale Energieträger. In den dargestellten Preisen sind Steuern, CO₂-Preise nach BEHG und Netzentgelte bereits berücksichtigt. Wie bereits oben beschrieben, wurden die Energiepreise im Rahmen des Prozesses zur Erstellung der nationalen Treibhausgasprojektion entwickelt. Das Basisjahr für die Projektionen ist das Jahr 2024, was somit auch das Preisniveau ist.

Abbildung 2: Energiepreisprojektion Endverbraucherpreise Wärmeversorgung



Quelle: Eigene Abbildung IREES; Primärdaten: Kemmler u. a. 2026

Bis 2045 sind für Pellets, Hackschnitzel, Heizöl und Erdgas nur moderate Preissteigerungen vorgesehen.⁵ Demgegenüber sinken die Preise für Wärmepumpenstrom sowie für Fernwärme bis 2045. Der CO₂-Preis steigt nominal auf 125 Euro je Tonne im Jahr 2030 und auf 350 Euro je Tonne bis 2045. Dies entspricht für

⁵ Es ist zu berücksichtigen, dass die Preise keine aktuellen Entwicklungen aufgrund des Iran-Kriegs berücksichtigen und dadurch keine Änderungen des Verhaltens der Nutzenden abbilden.

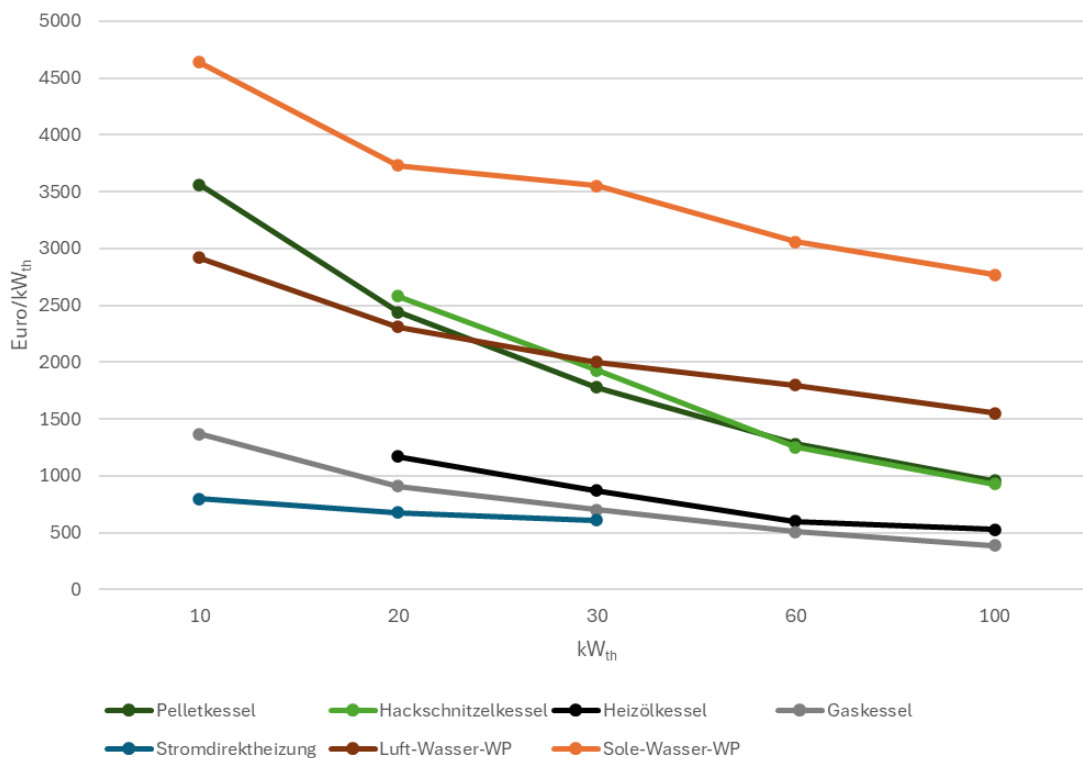
Erdgas in der Energiepreisprojektion einem realen Preisaufschlag von rund 2,5 Cent pro Kilowattstunde (kWh) bis 2045.

Investitionskosten für Wärmeerzeugungssysteme

Abbildung 3 stellt die spezifischen Investitionskosten verschiedener Wärmeversorgungssysteme in Euro pro kWh thermischer Leistung dar. Die dargestellten Investitionskosten entstammen dem Technikkatalog Wärmeplanung für das Jahr 2024 (dena 2025a). Berücksichtigt sind dabei die Netto-Investitionskosten für die jeweilige Anlage einschließlich Installation.

Es zeigt sich, dass Sole-Wasser-Wärmepumpen über alle betrachteten Leistungsklassen hinweg mit Abstand die höchsten spezifischen Investitionskosten aufweisen. Mit zunehmender installierter Leistung sinken die spezifischen Kosten. Dieser Rückgang ist auf Skaleneffekte zurückzuführen, da sich fixe Kostenbestandteile wie Planung, Installation und Infrastruktur auf eine größere installierte Leistung verteilen und größere Systeme zudem häufig effizienter dimensioniert und kostengünstiger realisiert werden können.

Abbildung 3: Spezifische Investitionskosten (netto) für verschiedene Wärmeerzeugungssysteme in Abhängigkeit von der installierten Leistung



Quelle: Eigene Abbildung IREES; Primärdaten Quelle: ((dena, 2025))

Die Luft-Wasser-Wärmepumpe ist deutlich günstiger als die Sole-Wasser-Wärmepumpe. Für kleinere Anlagen liegen die Investitionskosten auch unter denen des Pellet- und Hackschnitzelkessel. Die Investitionskosten sinken für alle drei Wärmeversorgungssysteme mit zunehmender Anlagengröße.

Im Gegensatz dazu weisen Brennwertkessel nur geringe Unterschiede zwischen den einzelnen Leistungsklassen auf, sodass die spezifischen Investitionskosten hier vergleichsweise konstant bleiben.

Für die zukünftige Entwicklung wird erwartet, dass die Investitionskosten für Wärmepumpen bis 2030 und 2040 sinken. Demgegenüber ist bei Brennwertkesseln von steigenden Kosten auszugehen, während für Biomassekessel keine wesentlichen Preisänderungen prognostiziert werden.

Investitionskosten für Effizienzmaßnahmen an der Gebäudehülle

Die erforderlichen Investitionskosten werden je nach Ausgangszustand der Gebäude und des zu erreichenden Effizienzstandards im Detail berechnet (vgl. Kapitel 4.4.1). Die Berechnung basiert dabei auf der Studie von (Hinz 2015), in der basierend auf einer umfangreichen Auswertung umgesetzter Projekte bauteilspezifische Kostenkurven in Abhängigkeit von der Dämmstärke bzw. der energetischen Qualität der Bauteile (bei Fenstern) abgeleitet sind. Die dort erfassten Kosten basieren auf dem Jahr 2015 und werden mittels Baupreisindex auf das Jahr 2024 als Basisjahr skaliert. Dabei wird die Baupreissteigerung für Bauleistungen am Bauwerk von Wohngebäuden angesetzt. Die folgende Formel zeigt die Kostenberechnung der spezifischen Investitionskosten in Abhängigkeit der Dämmstoffdicke pro Quadratmeter sanierter Bauteilfläche:

$$c_{eff,x} = I_{BP} * (m_x * d_x + b_x)$$

$c_{eff,x}$: spezifische Investitionskosten Effizienzmaßnahme am Bauteil x [$\frac{EURO}{m^2_{Bauteilfläche}}$]

$$I_{BP} = \frac{Baupreisindex\ 2024}{Baupreisindex\ 2015} = \frac{129,8}{80,3} = 1,62$$

d_x : Dämmdicke [cm] von Bauteil x

m_x, b_x : Parameter nach Hinz (2015)

Tabelle 1 zeigt die verwendeten Parameter nach Hinz (2015) vor Baupreisindexkorrektur und den jeweiligen Anteil von Ohnehin-Kosten bei Sanierung des jeweiligen Bauteils, mit der eine Differenzierung zwischen energiebedingten Mehrkosten und ohnehin erforderlichen Kosten, die bei einer Instandsetzung anfallen, erfolgen kann. Siehe Kapitel 4.4.1 für eine detailliertere Diskussion der darin beinhalteten Kostenbestandteile.

Tabelle 1: Kostenkurvenparameter für Gesamtinvestitionskosten (brutto) und Anteil Ohnehin-Kosten

Kostenkurvenparameter nach Hinz (2015)* Bauteil	m	b	Davon Ohnehin- Kosten [EURO/m ²]
Steildach außen	151.01	2.77	147
Flachdach	104.14	4.11	21.66
Oberer Geschossdecke (nicht begehbar)	3.72	1.06	0
Oberer Geschossdecke (begehbar)	28.03	1.18	0
Außenwand	96.88	2.81	46
Kellerdecke	30.75	1.25	0

Fenster EZFH 3-fach WSV		438	382**
Fenster MFH 3-fach WSV		420	366**
Fenster EZFH Passivhausverglasung		604	382**
Fenster MFH Passivhausverglasung		575	366**

Quelle: Eigene Darstellung IREES; Primärdaten: (Hinz 2015); Hinweis: *Die dargestellten Kostenparameter stellen die Investitionskosten im Jahr 2015 dar und werden in der Berechnung mit dem Baupreisindex multipliziert (siehe oben), **Investitionskosten für 2-fach WSV; WSV = Wärmeschutzverglasung

Emissionsfaktoren

Weiterhin sind für die Szenarien auch noch die direkten Emissionsfaktoren für die fossilen Energieträger Erdgas, Heizöl und Kohle relevant.

Die Emissionsfaktoren werden vom Umweltbundesamt bereitgestellt. Für Erdgas beträgt der Emissionsfaktor 202 g/kWh, für Heizöl 266 g/kWh und für Kohle 376 g/kWh (Umweltbundesamt 2026).

Für die Lebenszyklusbetrachtung in Kapitel 4.4.5 werden Emissionsfaktoren inkl. Vorketten benötigt. Für Erdgas wird beträgt der Emissionsfaktor 257 g/kWh (Lauf u. a. 2023).

Zur Bewertung der Wärmepumpe ein dynamischer Emissionsfaktor von 75 g CO₂-Äquivalent pro kWh für den eingesetzten Strom angesetzt.⁶ Bislang werden die THG-Emissionen über den Lebenszyklus mit statischen, d. h. zeitlich konstanten Emissionsfaktoren berechnet – sowohl für die eingesetzten bzw. ausgetauschten Baustoffe als auch für die Betriebsphase. Dynamische Emissionsfaktoren berücksichtigen hingegen die zeitliche Entwicklung des Energiesystems und der Produktionsprozesse, insbesondere die Dekarbonisierung von Energieträgern und Industrieprozessen, und bilden damit eine potenzielle Reduktion der Emissionsfaktoren über die Zeit ab. Deshalb ist der hier berücksichtigte dynamische Emissionsfaktor auch deutlich geringer als der statische Emissionsfaktor des deutschen Strommixes von 427 g CO₂äq (Icha und Lauf 2025).

Ökobilanzdaten

Zur Berechnung des Treibhauspotenzials wird die ÖKOBAUDAT eingesetzt. Die Datenbank bildet die Umweltauswirkungen und Primärenergieaufwände von Bauprodukten über den gesamten Lebenszyklus unter inländischen Produktionsbedingungen ab. Für die Berechnungen werden die Version 2023-I und die derzeit gültige Bilanzierungsmethode DIN EN 15804 (2022-03) + A2 sowie generische Datensätze verwendet. In den Berechnungen werden die Herstellungsphase (A1-A3) der bei der Sanierung eingesetzten Baustoffe, die Betriebsphase (B6) sowie der Rückbau und Abriss (C3-C4) berücksichtigt. Ein weiterer Ersatz von Bauteilen über den betrachteten Zeitraum von 50 Jahren findet nicht statt. Ebenso werden Transport- und Baustellenprozesse nicht berücksichtigt.

⁶ Der dynamische Emissionsfaktor wurde im Rahmen eines Vorhabens für das BBSR berechnet. Im Rahmen des Vorhabens wurden Transformationspfade für Strom, Fernwärme und Gas auf Basis bestehender Studien entwickelt. Der Transformationspfad für Strom entspricht einer konservativen Entwicklung.

4 Wirtschaftlichkeitsanalyse von Effizienzstandards im Wohngebäudebestand

4.1 Zielsetzung

Im ersten analytischen Schritt werden die Investitionen und Wirtschaftlichkeit unterschiedlicher Sanierungsmaßnahmen an der Gebäudehülle auf Einzelgebäudeebene analysiert, um das Zusammenspiel zwischen Sanierungstiefe und Wechsel zu klimafreundlichen Wärmeversorgungssystemen zu bewerten. Folgende Forschungsfragen sollen dabei zunächst aus einzelwirtschaftlicher Perspektive beantwortet werden:

- Welche Effizienzmaßnahmen sind in den verschiedenen Gebäuden erforderlich, um eine wirtschaftliche Dekarbonisierung der Wärmeversorgung zu ermöglichen?
- Kann die Dekarbonisierung des Gebäudebereichs durch einen Fokus auf die Emissionsreduktion in Kombination mit maßvoller Sanierung beschleunigt werden?

4.2 Vorgehen und Methodik


Um die genannten Forschungsfragen für den deutschen Gebäudebestand zu beantworten, wird eine Analyse der Wirtschaftlichkeit und Emissionsreduktion in Bestandsgebäuden durchgeführt. Um die unterschiedlichen Voraussetzungen der einzelnen Gebäude zu bewerten, erfolgt eine detaillierte gebäudetypologische Abbildung des Gebäudebestandes in Referenzgebäuden.

Analyse des Status-Quo des Gebäudebestandes

Die zugrundeliegenden Daten basieren auf repräsentativen Erhebungen zu Wohn- und Nichtwohngebäuden in Deutschland: Zu nennen sind dabei die aktuellen Ergebnisse des Zensus 2022 (Statistische Ämter des Bundes und der Länder 2024; Statistisches Bundesamt 2025), die Untersuchung des Instituts für Wohnen und Umwelt zur Datengrundlage und den energetischen Merkmalen des deutschen Gebäudebestandes (Cischinsky u. a. 2018; Diefenbach u. a. 2010) sowie die Ergebnisse der Forschungsdatenbank Nichtwohngebäude (IWU 2021). Die Gebäude werden hinsichtlich ihrer Nutzung, Größe, der bauphysikalischen Eigenschaften der einzelnen Bauteile – Außenwand, Dach, obere Geschossdecke, Fenster, unterer Gebäudeabschluss sowie der installierten Wärmeversorgungssysteme unterschieden. Die energetischen Kennwerte in Form von typischen U-Werten werden maßgeblich durch den Erbauungszeitpunkt und die damit verbundenen typischen Materialien sowie die gesetzlichen Mindesteffizienzanforderungen, die zum Errichtungszeitraum des Gebäudes galten, bestimmt. Zudem wird differenziert nach dem Ausgangszustand der Gebäude zum Zeitpunkt der Errichtung sowie der nachträglichen Sanierung einzelner Bauteile.

Unter Berücksichtigung der Nutzung – Einfamilienhäuser und Mehrfamilienhäuser sowie verschiedener Nichtwohngebäude – sowie der energetischen Eigenschaften in Abhängigkeit von Baualtersklassen und durchgeführten Sanierungsmaßnahmen werden insgesamt 266 Referenzgebäudeklassen für die Analyse unterschieden.

Abbildung 4: Unterscheidung des deutschen Gebäudebestandes in Referenzgebäudeklassen

- | | | |
|---|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> ▪ Bauphysikalische Beschreibung unterschiedlicher Gebäudetypen <ul style="list-style-type: none"> ▪ Unterscheidung der Gebäudenutzung ▪ U-Werte der Gewerke ▪ Abmessung ▪ Wärmeversorgung und Verteilung
 ▪ Unterscheidung der energetischen Zustände anhand von <ul style="list-style-type: none"> ▪ Baualter ▪ Nachträglich erfolgter Sanierung |  | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Einfamilienhaus ▪ Reihenhaushaus ▪ Großes Mehrfamilienhaus ▪ Kleines Mehrfamilienhaus ▪ Mittleres Mehrfamilienhaus |
| |  | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Büro & Verwaltung ▪ Forschung & Lehre ▪ Gesundheit & Pflege ▪ Schule, Kindergarten & Betreuung ▪ Kultur & Freizeit ▪ Sporthallen ▪ Gastronomie ▪ Produktion & Werkstatt ▪ Handel ▪ Versorgung & Entsorgung ▪ Verkehrsgebäude |

Quelle: Eigene Darstellung IREES

Die Referenzgebäudetypologie bildet die Grundlage für das Gebäudemodell Invert/ee-Lab, mit dem in weiterer Folge die energetische Modellierung einzelner Effizienzmaßnahmenpakete erfolgt sowie die Szenarienanalyse für die Entwicklung des Gebäudebestandes bis zum Jahr 2045 (vgl. Kapitel 5). Für die Szenarienanalyse erfolgt eine weitere Aufgliederung der Referenzgebäudeklassen nach installierten Wärmeversorgungssystemen und installierten Wärmeverteilsystemen. Zudem wird eine weitere Differenzierung nach Energieträgerregionen vorgenommen, die insbesondere danach unterscheidet, inwieweit Gebäude in einem Wärmenetzversorgungsgebiet, einem Wärmenetznachverdichtungsgebiet oder einem Wärmenetzausbaugbiet liegen. Im Modell werden demnach rund 9.700 sogenannte Referenzgebäudesegmente unterschieden. Jedes Gebäude des deutschen Gebäudebestandes wird einer Referenzgebäudeklasse und in der weiteren Aufgliederung unter Berücksichtigung der installierten Wärmeversorgung einem Referenzgebäudesegment im Modell zugewiesen.

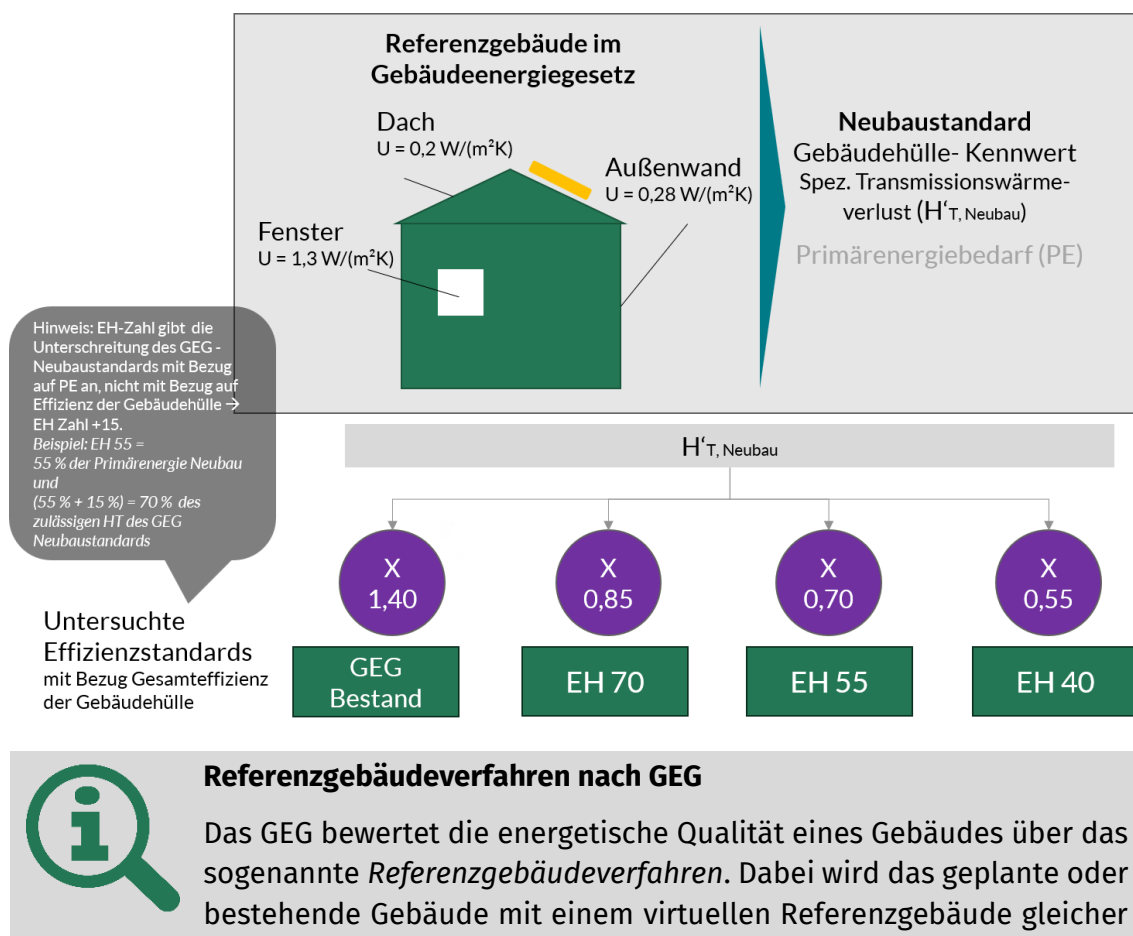
Berücksichtigte Effizienzstandards in der Untersuchung

Auf Basis des energetischen Ausgangszustandes wird für jede Referenzgebäudeklasse bestimmt, welche Effizienzmaßnahmen erforderlich sind, um bestimmte Effizienzstandards der Gebäudehülle zu erreichen, sowie die damit verbundenen Investitionen und Energiekosteneinsparungen. Der Fokus liegt in diesem Schritt zunächst auf Sanierungstiefen in Bezug auf Maßnahmen an der Gebäudehülle, um deren Wirtschaftlichkeit im Vergleich zu Maßnahmen im Bereich der Wärmeversorgung bewerten zu können.

Die bei der Untersuchung berücksichtigten Effizienzstandards werden anhand der Anforderungen des GEGs bei umfangreicher Sanierung von bestehenden Gebäuden sowie den daraus abgeleiteten Anforderungen an für die im Rahmen der BEG

geförderten Effizienzhaus-Standards (EH-Standards) definiert⁷. Abbildung 5 skizziert die Systematik der derzeitigen Anforderungen an die Gesamteffizienz der Gebäudehülle nach dem Referenzgebäudeverfahren des GEG für Neubauten und die daraus abgeleiteten Anforderungen an den Gebäudebestand bei umfangreichen Sanierungsmaßnahmen und die Mindesteffizienzen der Gebäudehüllen bei den geförderten EH Standards⁸. Für die Unterscheidung der verschiedenen Sanierungstiefen ist nicht die Primärenergieanforderung relevant, sondern der spezifische Transmissionswärmetransferkoeffizient⁹, der als Kennwert die energetische Qualität der Gebäudehülle beschreibt.

Abbildung 5: Untersuchte Effizienzstandards mit Bezug auf die Mindesteffizienz der Gebäudehülle



⁷ : Wohngebäude und Nichtwohngebäude, die sich durch eine energetisch optimierte Bauweise und Anlagentechnik auszeichnen, und die die mit der BEG-Richtlinie festgelegten technischen Mindestanforderungen an die Gesamtenergieeffizienz (Bezugsgröße: Primärenergiebedarf QP) und an die Energieeffizienz der Gebäudehülle (Bezugsgröße Nichtwohngebäude: Mittelwerte der Wärmedurchgangskoeffizienten \bar{U} , Bezugsgröße Wohngebäude: Transmissionswärmeverlust HT) für eine Effizienzhaus (EH)-Stufe erreichen.“ Für die Analyse hier bezieht sich der Effizienzstandard nur auf die Anforderungen an die Energieeffizienz der Gebäudehülle.

⁸ Das GEG definiert auch bauteilspezifische Anforderungen bei Sanierung einzelner Bauteile. Die U-Werte liegen teilweise unter den U-Werten des Referenzgebäudes. Für die Untersuchung in dieser Studie erfolgt die Unterscheidung jedoch anhand der Gesamteffizienz der Gebäudehülle für die einzelnen Standards als Zielwert. Für jedes Gebäude wird ermittelt, welche Bauteile saniert werden und in welcher Tiefe, um zu geringsten Kosten die Zielwerte zu erreichen.

⁹ Höchstwert des spezifischen, auf die wärmeübertragende Umfassungsfläche bezogene Transmissionswärmeverlust

Geometrie, Nutzung, Ausrichtung und Fläche verglichen. Das Referenzgebäude besitzt festgelegte energetische Eigenschaften für Gebäudehülle und Anlagentechnik gemäß den Vorgaben des GEG.

Für den Neubau gelten Anforderungen an:

- den Jahres-Primärenergiebedarf Q_p ,
- den baulichen Wärmeschutz der Gebäudehülle,
- sowie an den Einsatz erneuerbarer Energien.

Das zu errichtende Gebäude darf den zulässigen Primärenergiebedarf des Referenzgebäudes nicht überschreiten.

$$Q_{p, \text{Gebäude}} \leq Q_{p, \text{Referenzgebäude}}$$

Zusätzlich muss die Gebäudehülle die Anforderungen an den mittleren Wärmedurchgangskoeffizienten erfüllen. Maßgeblich sind dabei insbesondere die energetischen Qualitäten von Außenwand, Dach, Bodenplatte, Fenstern und Außentüren. Ziel ist die Begrenzung der Transmissionswärmeverluste sowie die Vermeidung von Wärmebrücken und unkontrollierten Lüftungswärmeverlusten.

$$H'_{T, \text{Gebäude}} \leq H'_{T, \text{max}}$$

Im **Gebäudebestand** gelten die Anforderungen abhängig von Art und Umfang der Sanierungsmaßnahme. Werden einzelne Bauteile erneuert oder erstmalig eingebaut, sind die im GEG festgelegten Höchstwerte der Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Werte) einzuhalten. Dies betrifft unter anderem:

- Außenwände,
- Dachflächen und oberste Geschossdecken,
- Fenster und Fenstertüren,
- Kellerdecken und Bodenflächen.

Bei größeren Sanierungen oder Erweiterungen kann alternativ ein energetischer Nachweis über das Referenzgebäudeverfahren geführt werden. Erfolgt der Nachweis über das Referenzgebäudeverfahren, darf der Jahres-Primärenergiebedarf des modernisierten Bestandsgebäudes in der Regel bis zu **40 % höher** liegen als beim entsprechenden Neubau-Referenzgebäude.

$$Q_{p, \text{Bestand}} \leq 1,40 \cdot Q_{p, \text{Referenzgebäude}}$$

Auch bei der Gebäudehülle gelten weniger strenge Anforderungen. Der zulässige mittlere Wärmedurchgangskoeffizient der Gebäudehülle darf im Bestand typischerweise bis zu **40 % über dem Neubauwert** liegen.

$$H'_{T, \text{Bestand}} \leq 1,40 \cdot H'_{T, \text{max, Neubau}}$$

Berechnung der erforderlichen Investitionen für die Gebäudehülle

Für jedes Gebäude wird berechnet, welche Effizienzmaßnahmen unter Minimierung der Investitionskosten erforderlich sind, um die jeweiligen Effizienzstandards zu

erreichen. Mittels mathematischer Optimierung wird ermittelt, welche Bauteile saniert werden und welche Sanierungstiefen (Dämmdicken, Fensterqualitäten) erforderlich sind. Zudem werden neben den Gesamtinvestitionen auch die Ohnehin-erforderlichen Investitionen, die bei einer reinen Instandsetzung anfallen, berechnet.

Die mathematische Optimierung ist als ein separates Modul im Modell Invert/ee-lab implementiert und direkt mit der hinterlegten Referenzgebäudedatenbank gekoppelt. Die mathematische Beschreibung der Berechnungslogik ist in (Steinbach und Schultmann 2015) bzw. (Steinbach 2016, 120ff) beschrieben. Das lineare Optimiermodell berechnet für jedes der zu sanierende Bauteile (Außenwand, Dach, Keller/Bodenplatte, Fenster) die jeweilige Sanierungstiefe (Dämmdicke, Fenster) unter Minimierung der erforderlichen Investitionen. Der spezifische Transmissionswärmeflusskoeffizient (H_T) des jeweiligen Energiestandards geht somit als Nebenbedingung in die Optimierung ein. Das Modell führt die Optimierung separat für jedes Referenzgebäude und für jeden vorgegebenen Energiestandard durch. Im Resultat ergeben sich für jedes Referenzgebäude damit Unterschiede in dem zu sanierenden Bauteil bzgl. der Sanierungstiefe und damit verbundenen U-Wert des Bauteils nach der Sanierung. Die spezifischen Investitionen werden anhand der erforderlichen Dämmdicken basierend auf den oben dargestellten Kostenkurven berechnet (vgl. Kapitel 3.3).

Somit ergeben sich für jedes Referenzgebäude ein individuelles Sanierungspaket zur Erreichung der zu untersuchenden Effizienzstandards und somit auch unterschiedliche spezifische Sanierungskosten je nach energetischer Ausgangssituation der Referenzgebäude. Im Ergebnis ist somit eine weitaus differenziertere Analyse möglich als sie in anderen Studien durchgeführt wurde, bei denen grundsätzlich pauschale spezifische Investitionskosten für wenige Referenzfälle angesetzt werden, die sich nur in Bezug auf den zu erreichenden Effizienzstandard unterscheiden und in der Regel auch nur gegenüber dem unsanierten Ausgangszustand im Errichtungsjahr berechnet werden.¹⁰

Berechnung der Lebenszyklusemissionen

Des Weiteren wird für die Referenzgebäudeklassen eine Lebenszyklusanalyse der durchgeführten Sanierungsmaßnahmen durchgeführt, um die THG-Emissionen der Sanierungsmaßnahmen in der Herstellungs- und Rückbauphase zu berechnen und dem Energieverbrauch in der Betriebsphase gegenüberzustellen.

Dazu werden im Modell die Materialmengen (Schichtdicke, Volumen und Gewicht) unterschiedlicher Konstruktionsvarianten für die zu sanierenden Komponenten und die damit verbundenen energetischen Kennwerte und THG-Emissionen durch direkte Kopplung mit der ÖKOBAUDAT für jede Referenzgebäudeklasse und jeden analysierten Effizienzstandard ermittelt. Der Aufbau der Konstruktionsvarianten und die erforderlichen Materialien werden als Input im Modell vorgegeben (vgl. Kapitel 3.3), wobei je nach Material unterschieden wird, inwieweit die jeweilige Schichtdicke

¹⁰ Beispielsweise werden in (Rau u. a. 2024) zwei unsanierte Typgebäude (EFH, MFH) mit zwei verschiedenen energetischen Zielzuständen untersucht, mit denen Rückschlüsse auf den gesamten Gebäudebestand gezogen werden.

als feste Größe eingeht oder vom Modell in Abhängigkeit des zu erreichenden U-Wertes und der jeweiligen Wärmeleitfähigkeit bestimmt wird.

Für die Berechnung wird nicht die Errichtung der Gebäude und die Herstellung aller Gebäudekomponenten untersucht, sondern nur die THG-Emissionen für die Baumaßnahmen, die mit der energetischen Sanierung auf unterschiedliche Energiestandards verbunden sind. Dabei werden alle nachträglich aufgebrachten Materialien (Dämmmaterial, Putz, Armierung, Fensterglas, Rahmen etc.) berücksichtigt. Bei der Quantifizierung wird stets die gesamte Baumaßnahme betrachtet.



Das Modell berücksichtigt die Lebenswegmodule der DIN EN 15804. Bei der Berechnung der spezifischen THG-Emissionen wird ein Zeitraum von 50 Jahren sowie die Bruttogrundfläche der ausgewählten Typgebäude berücksichtigt.

4.3 Typologische Beschreibung des deutschen Gebäudebestandes über Referenzgebäude und Effizienzstandards

Wie im vorherigen Kapitel dargestellt, bildet die typologische Abbildung des deutschen Gebäudebestands die Grundlage der quantitativen Untersuchung.

Abbildung 6 zeigt die Differenzierung des Gebäudebestands im Modell anhand verschiedener Referenzgebäudeklassen und ihrer jeweiligen Anzahl. Diese bilden die Grundlage für die Bottom-up-Berechnung des Wärmebedarfs und die Szenarienmodellierung (vgl. Kapitel 5). Im Wohngebäudebestand erfolgt die Unterscheidung nicht nur nach Gebäudetyp und Baualtersklasse, sondern auch nach Sanierungszustand.

Abbildung 6: Differenzierung des Gebäudebestandes über Referenzgebäudeklassen

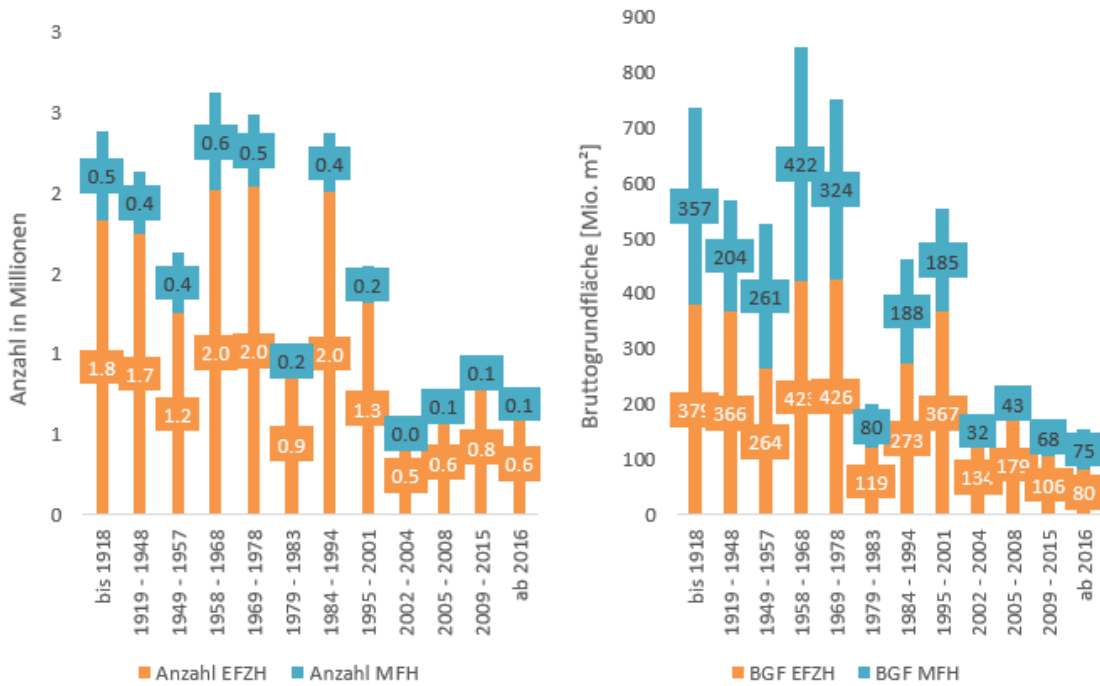
	Art der Gebäude / Nutzung	Baualtersklassen	Sanierungszustand
 Wohngebäude	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Einfamilienhaus ▪ Reihenhaushaus ▪ Großes Mehrfamilienhaus ▪ Kleines Mehrfamilienhaus ▪ Mittleres Mehrfamilienhaus 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Vor 1918 ▪ 1918 - 1948 ▪ 1949 - 1957 ▪ 1958 - 1968 ▪ 1969 - 1978 ▪ 1979 - 1983 ▪ 1984 - 1994 ▪ 1995 - 2001 ▪ 2002 - 2008 ▪ 2009 - 2015 ▪ Ab 2016 	<p>Nachträglich bereits sanierte Bauteile</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ D: Dach ▪ W: Außenwand ▪ K: Kellerdecke <p>Beispiel für Kürzel:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ _oooo = keine nachträgliche Sanierung ▪ _fdwk = alle Bauteile sind bereits nachträglich saniert
 Nichtwohngebäude	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Büro & Verwaltung ▪ Forschung & Lehre ▪ Gesundheit & Pflege ▪ Schule, Kindergarten & Betreuung ▪ Kultur & Freizeit ▪ Sporthallen ▪ Gastronomie ▪ Produktion & Werkstatt ▪ Handel ▪ Versorgung & Entsorgung ▪ Verkehrsgebäude 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ bis 1978 ▪ 1978 - 2010 ▪ Ab 2010 	<ul style="list-style-type: none"> • Keine Unterscheidung der Sanierungszustände aufgrund fehlender Datengrundlage

Quelle: Eigene Darstellung IREES

Abbildung 7 zeigt die Anzahl und Bruttogrundfläche der Wohngebäude nach Gebäudetypen und Baualtersklassen. Dabei wird deutlich, dass der Wohngebäudebestand überwiegend aus älteren Baualtersklassen bis 1994 besteht. Es

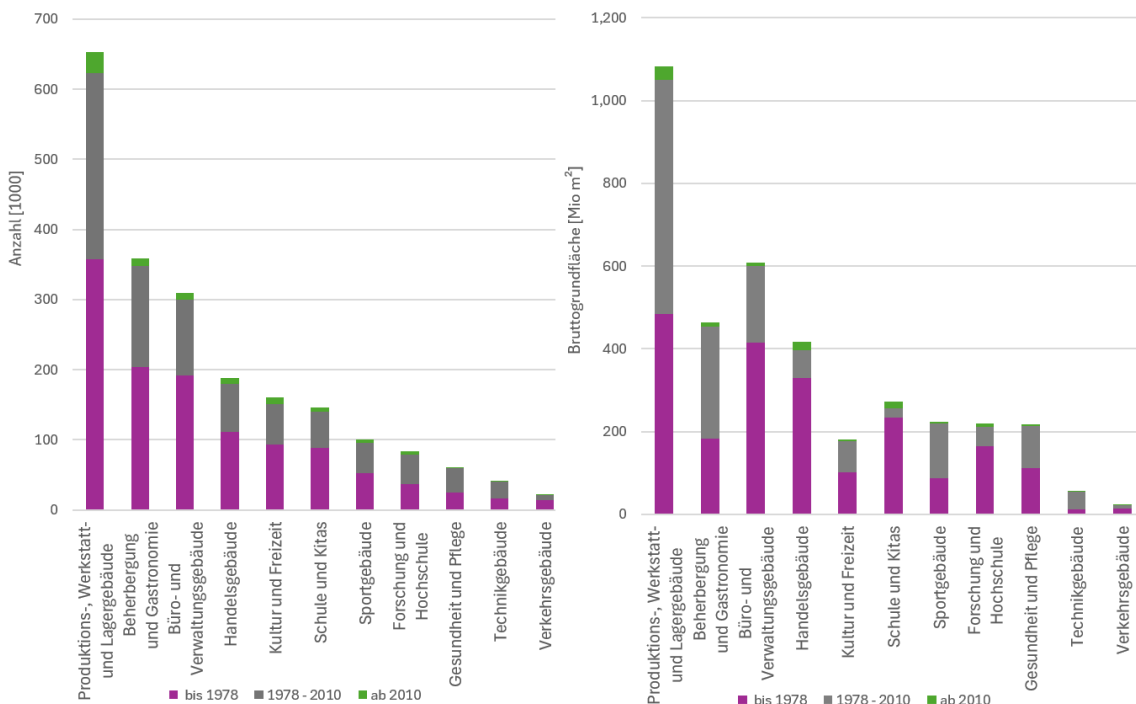
überwiegt die Anzahl der Ein- und Zweifamilienhäuser (EFZH) gegenüber den MFH. Abbildung 8 zeigt die entsprechende Differenzierung für die Nichtwohngebäude.

Abbildung 7: Anzahl und Bruttogrundfläche nach Gebäudetyp und Baualterklassen im Wohngebäudebestand



Quelle: Eigene Darstellung IREES

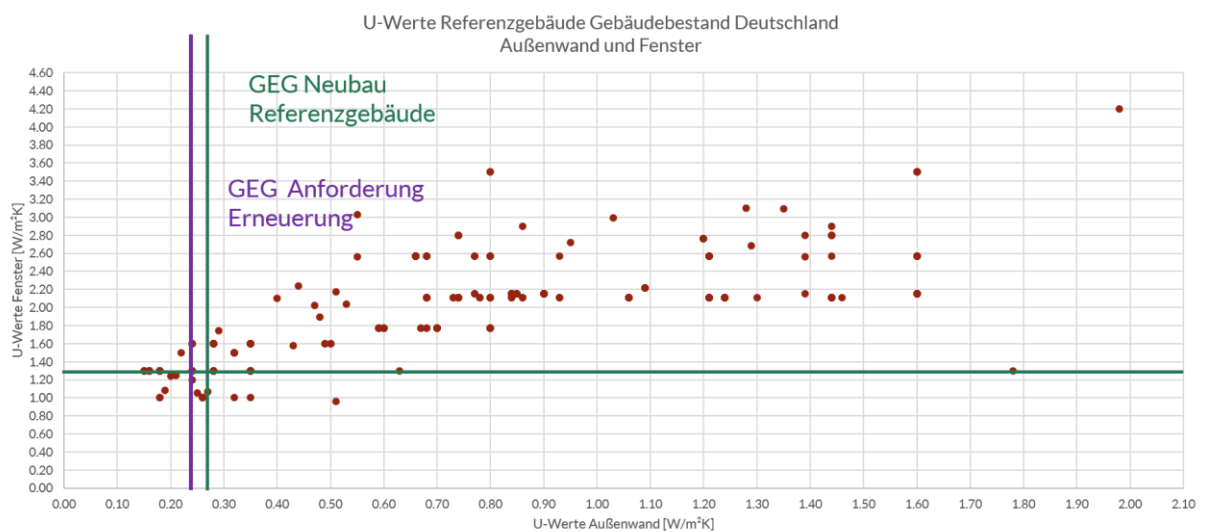
Abbildung 8: Bruttogrundfläche und Anzahl nach Gebäudetyp und Baualterklasse im Nichtwohngebäudebestand



Quelle: Eigene Abbildung IREES; Primärdaten (IWU 2021)

Abbildung 9 zeigt am Beispiel der U-Werte für Außenwände und Fenster die unterschiedlichen energetischen Ausgangszustände der untersuchten Referenzgebäudeklassen im Wohngebäudebereich. Die eingetragenen Linien zeigen die aktuellen Anforderungen an die U-Werte für Neubauten und bei Erneuerung einzelner Bauteile im Gebäudebestand nach GEG. Für die Berechnung der erforderlichen Investitionskosten wird, wie oben dargestellt, für jede Referenzgebäudeklasse der erforderliche Transmissionstransferwärmekoeffizient als Gesamtkennwert für die energetische Qualität der Gebäudehülle für jeden der analysierten Effizienzstandards berechnet.

Abbildung 9: U-Werte Außenwand und Fenster nach GEG-Anforderungen und in den Referenzgebäuden des Gebäudebestandes

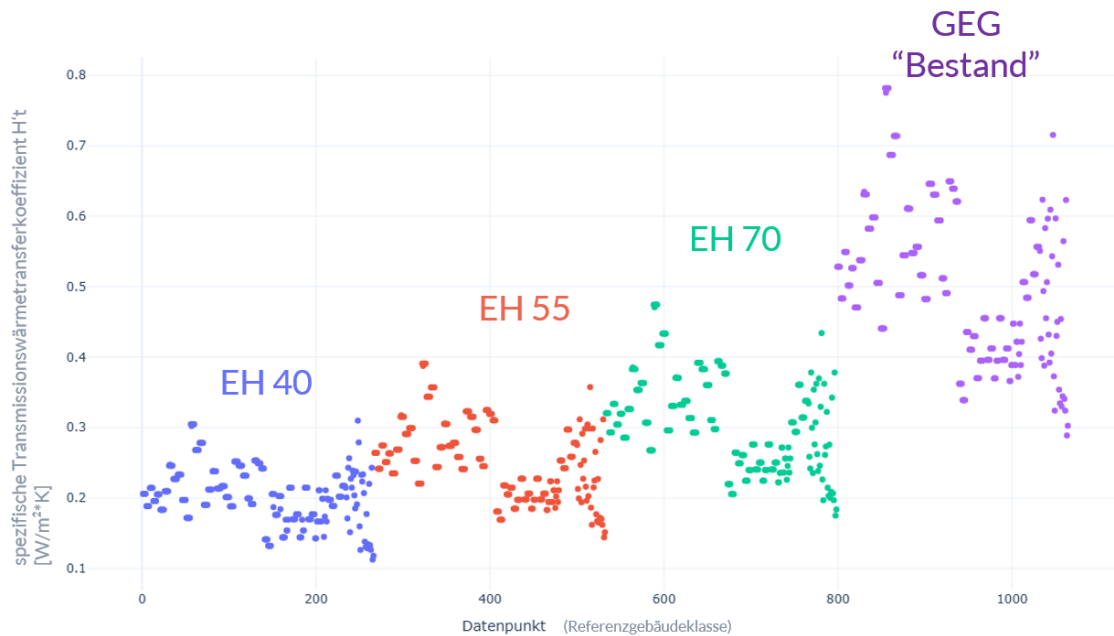


Quelle: Eigene Darstellung IREES

Abbildung 10 zeigt den resultierenden Zielwert für die einzelnen Referenzgebäude in den vier Effizienzstandards.

Der Unterschied in den Zielwertanforderungen innerhalb eines Effizienzstandards resultiert aus der unterschiedlichen Kubatur der Gebäude – Oberflächen-Volumen Verhältnis - und Anteilen der einzelnen Bauteile an der wärmeübertragenden Umfassungsfläche – z.B. Anteil von Fensterflächen. Für den Gebäudebestand ist das zentral, da hier in aller Regel keine nachträgliche Optimierung der energetischen Qualität durch Veränderung der Gebäudestruktur möglich ist – z.B. große Fensterflächen nach Süden, sondern nur durch höhere Effizienz der Bauteile.

Abbildung 10: Resultierender Zielwert für die Gesamteffizienz der Gebäudehülle für die untersuchten Effizienzstandards in den einzelnen Referenzgebäudeklassen-teilweise Überlappung der Datenpunkte bei gleichem Zielwert



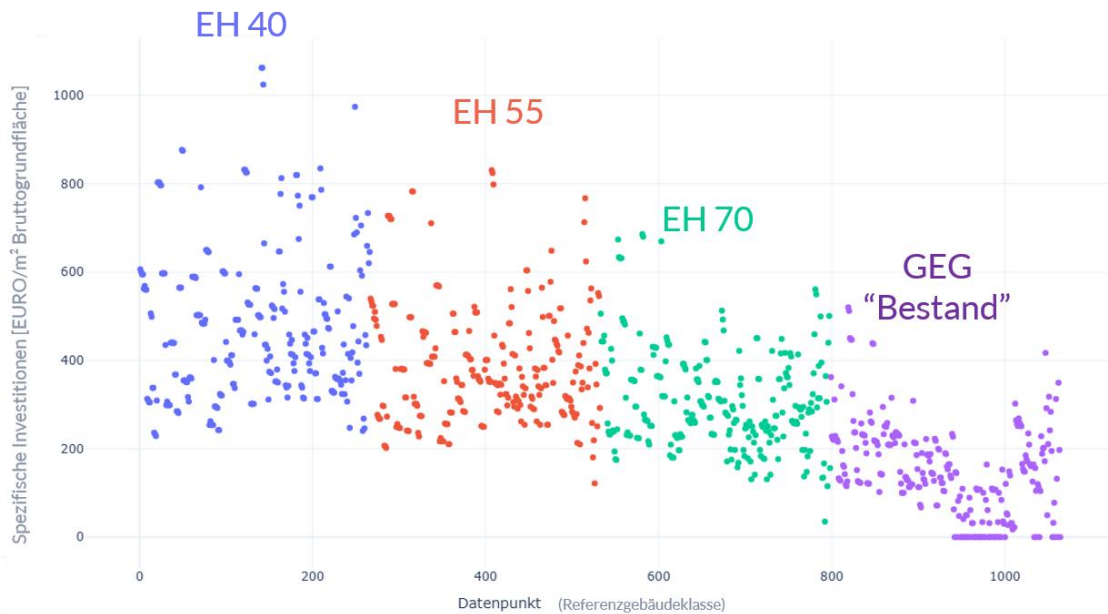
Quelle: Eigene Darstellung IREES

4.4 Analyse auf Einzelgebäudeebene

4.4.1 Erforderliche Investitionskosten im Wohngebäudebestand zur Erreichung der Effizienzstandards

Abbildung 11 zeigt die berechneten spezifischen Investitionskosten der einzelnen Referenzgebäudeklasse für die untersuchten Effizienzstandards. Die Ergebnisse zeigen zum einen die große Bandbreite der spezifischen Investitionskosten innerhalb eines Effizienzstandards, zum anderen auch, dass der Abstand zwischen den Effizienzstandards je nach Gebäude und dem energetischen Ausgangszustand unterschiedlich ist. Damit ist ersichtlich, dass pauschale Investitionskostensätze, die sich nur nach zu erreichendem Effizienzstandard oder Gebäudegröße unterscheiden, je nach Gebäude zu großen Ungenauigkeiten sowohl bei einer systemischen als auch einzelwirtschaftlichen Bewertung führen können.

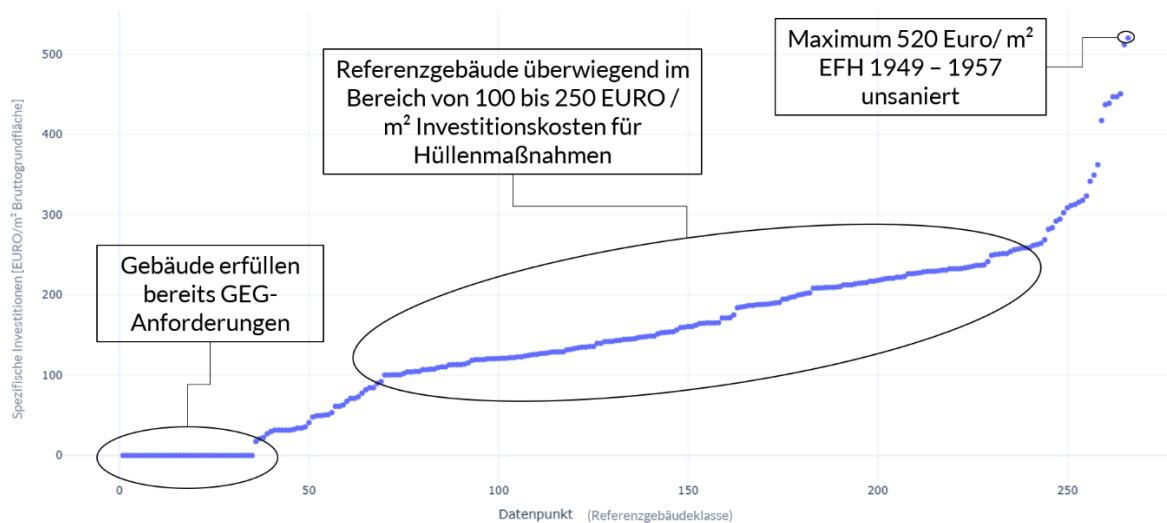
Abbildung 11: Erforderliche spezifische Investitionen für Effizienzmaßnahmen an der Gebäudehülle zur Erreichung der Effizienzstandards – teilweise Überlappung der Datenpunkte



Quelle: Eigene Darstellung IREES

Abbildung 12 zeigt die spezifischen Investitionen für den Effizienzstandard GEG „Bestand“ sortiert nach Höhe. Die spezifischen Investitionen zum Erreichen des GEG „Bestand“ Effizienzstandards liegen für den größten Teil der Referenzgebäudeklassen zwischen 100 und 250 EURO/m² Bruttogrundfläche.

Abbildung 12: Spezifische Investitionen zum Erreichen des Effizienzstandards GEG Bestand

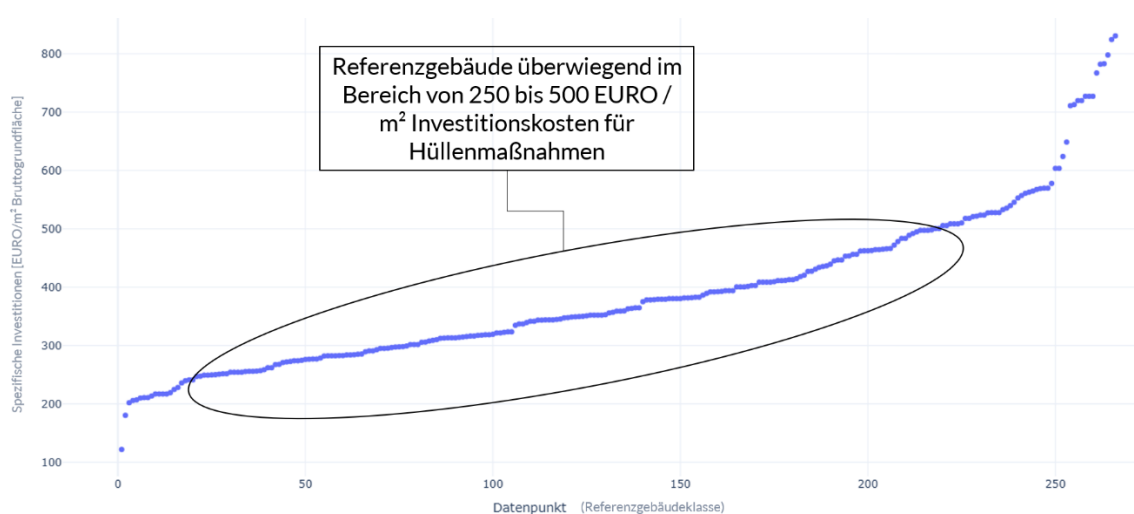


Quelle: Eigene Darstellung IREES

Das berechnete Maximum resultiert für die Referenzgebäudeklasse der unsanierten Einfamilienhäuser in der Baualtersklasse 1949 – 1957. Für die Referenzgebäude, die bereits die Anforderungen an die Gebäudehülle mit Bezug auf die Gesamteffizienz erfüllen, z.B. aufgrund des jüngeren Gebäudealters und/oder bereits erfolgter nachträglicher energetischer Sanierung, werden keine Investitionskosten ausgewiesen.

Abbildung 13 zeigt als Vergleich die spezifischen Investitionen sortiert nach Höhe für den EH 55 Standard. Für die Referenzgebäude liegen die erforderlichen Investitionen zwischen 250 und 500 EURO/m².

Abbildung 13: Spezifische Investitionen zum Erreichen des Effizienzhausstandards EH 55



Quelle: Eigene Darstellung IREES

Die dargestellten spezifischen Investitionen in Abbildung 11 bis Abbildung 13 beinhalten die Gesamtinvestitionen der jeweils erforderlichen Maßnahmen inklusive der sogenannten „Ohnehin-Maßnahmen“, die auch anfallen, sofern für das jeweilige Bauteil eine Instandsetzung oder Sanierung durchgeführt wird. Die Ohnehin-Kosten werden in der Modellierung je nach Bauteil nach Hinz (2015) berechnet.

Tabelle 2 gibt einen Überblick zu den mit entsprechenden Kosten hinterlegten Ohnehin-Maßnahmen, die bei energetischer Sanierung der jeweiligen Bauteile berücksichtigt sind bzw. bei einer Wirtschaftlichkeitsbewertung anhand der energetischen Mehrkosten abgezogen werden müssen.

Tabelle 2: Ohnehin anfallende Maßnahmen bei Instandsetzung von Gebäuden

Maßnahme	Ohnehin anfallende Maßnahmen bei Instandsetzung
Außenwand: Dämmung mit Wärmedämmverbundsystem	<ul style="list-style-type: none"> • Gerüstaufstellung • Vorarbeiten: Abdecken von Flächen, Abschlagen des Altputztes, Reinigen der Fassade, Herstellen eines tragfähigen Untergrundes • Demontage und Erneuerung von einzelnen Elementen wie Außenleuchten, Steckdosen, Briefkästen, Klingelanlagen und ähnlichem • Anstrich
Kellerdecke: Unterseitige oder oberseitige Dämmung	<ul style="list-style-type: none"> • Keine Ohnehin-Maßnahmen
Fenster: Austausch	<ul style="list-style-type: none"> • Investitionen für Fenster mit 2-fach Wärmeschutzverglasung¹¹
Steildach: Zwischensparrendämmung und Aufsparrendämmung	<ul style="list-style-type: none"> • Gerüstaufstellung • Luftdichtung/ Dampfbremse • Konterlattung • Spenglerarbeiten, Anschlüsse in Blech • Abriss & Entsorgung • Traglattung, Eindeckung & Anschlüsse, Neben-/Regiearbeiten

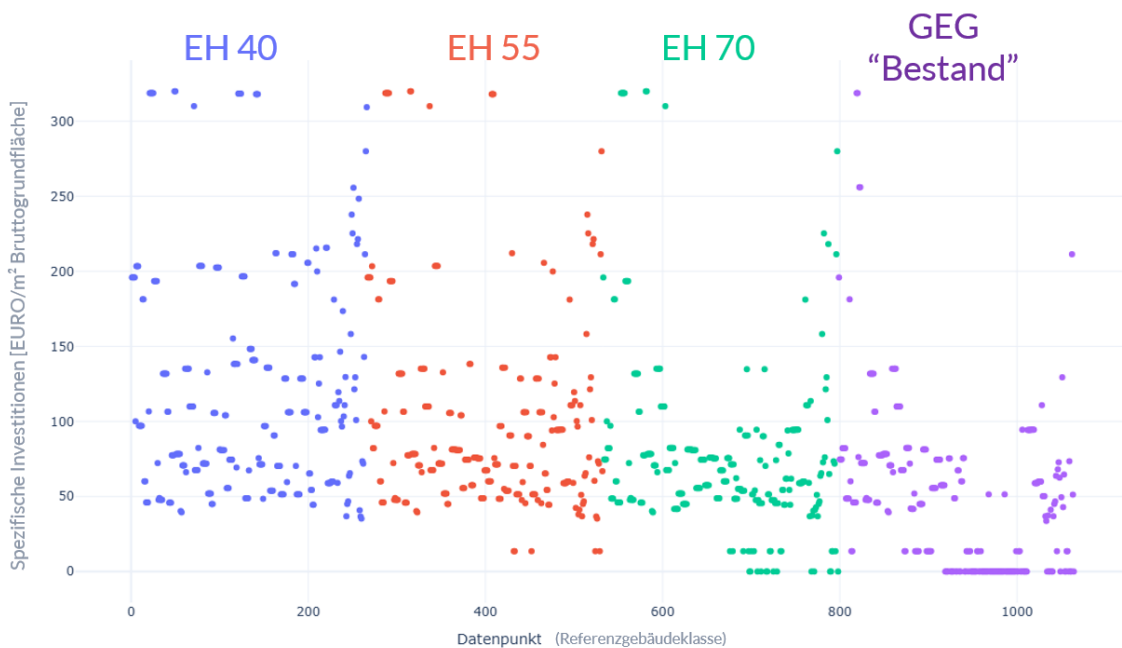
Quelle: IREES nach Hinz (2015)

Die beinhalteten spezifischen Investitionen dieser ohnehin erforderlichen Maßnahmen sind für alle untersuchten Effizienzstandards und Referenzgebäude in Abbildung 14 dargestellt. In den Ergebnissen unterscheiden sich diese für einige Referenzgebäude zwischen den verschiedenen Standards, da für höhere Effizienzstandards teilweise mehr Bauteile angefasst werden müssen. Dabei wird unterstellt, dass die Sanierung der entsprechenden Bauteile auch in der Realität nur durchgeführt würde, wenn diese Bauteile auch aufgrund des Alters bzw. Instandsetzungsbedarfs ertüchtigt werden würden. Der Anteil der Kosten für Ohnehin-Maßnahmen an den Gesamtinvestitionen nimmt mit steigendem Effizienzstandard jedoch ab, da der Anteil der „variablen“ energiebedingten Kosten – z.B. aufgrund der Dämmdicke – mit der Sanierungstiefe steigt, während die ohnehin erforderlichen Investitionen einer Instandsetzung pro Bauteile als Fixkosten eingehen. Die Abbildung zeigt, dass ein Unterschied in den ohnehin erforderlichen Kosten insbesondere

¹¹ In Hinz (2015) werden beim Tausch der Fenster keine energiebedingten Mehrkosten zugeschrieben bei 2-fach Wärmeschutzverglasung, mit der die U-Wert Anforderung an Fenster erfüllt wird, da energetische Mindesteffizienzen nach GEG nur bei einer ohnehin anstehenden Instandsetzung gefordert werden. Entsprechend werden energiebedingte Mehrinvestitionen nur für Fenster mit höherem Effizienzstandard (3-Fach-Verglasung) gerechnet.

zwischen dem Effizienzstandard GEG Bestand und den Effizienzhausstandards EH 40 – EH 70 besteht.

Abbildung 14: Spezifische „Ohnehin-Kosten“ der jeweiligen Maßnahmen



Quelle: Eigene Darstellung IREES

4.4.2 Energieeinsparungen durch Effizienzmaßnahmen an der Gebäudehülle

In der folgenden Abbildung werden die Ergebnisse der Nutzwärmebedarfsanalyse für die verschiedenen Referenzgebäude verglichen. Die Berechnung der Nutzwärmebedarfe erfolgt mit dem Modell Invert/ee-Lab auf Grundlage der bauphysikalischen Eigenschaften der Gebäude in einem Monatsbilanzverfahren. Für die Berechnung wird das Mittel der Außentemperaturen in Deutschland (mit Daten des Deutschen Wetterdienstes)¹² angesetzt, die auf das zehnjährige Mittel witterungsbereinigt sind¹³.

Im Modell wird sowohl der normbasierte Nutzwärmebedarf für Raumwärme und Warmwasser auf Grundlage der DIN V 18599 als auch der „effektive“ Nutzwärmebedarf berechnet. Letzterer berücksichtigt Nutzereinflüsse und reale Nutzungsszenarien in den Gebäuden, die in der Literatur als Rebound- bzw. Prebound-Effekt¹⁴ beschrieben werden (Sunikka-Blank und Galvin 2012). Für den Vergleich der energetischen Qualität zwischen Gebäuden ist es sinnvoll, sich auf bauphysikalische und klimatische

¹² Siehe <https://www.umweltbundesamt.de/system/files/medien/11850/publikationen/projektionen-2025-zentrale-annahmen.pdf>

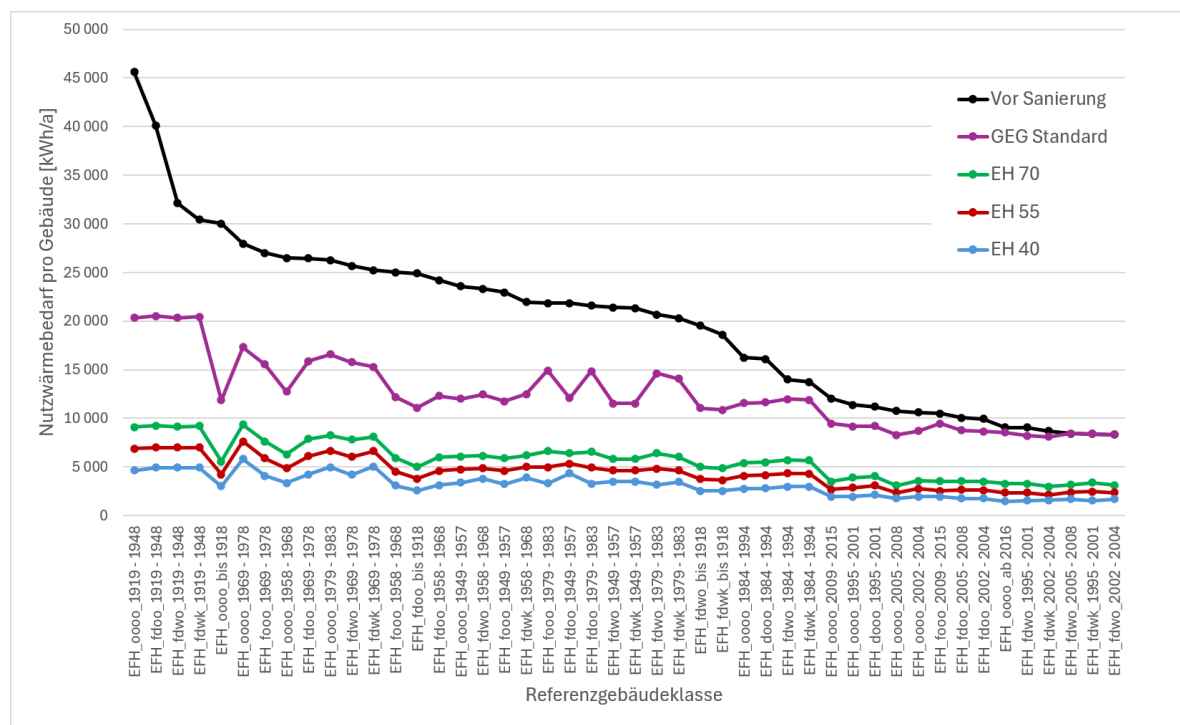
¹³ Für die Beschreibung der Witterungsbereinigung wird auf den aktuellen Projektionsbericht verwiesen.

¹⁴ Der Prebound-Effekt beschreibt das Phänomen, dass der tatsächliche Energieverbrauch von (unsanierten) Gebäuden oft deutlich niedriger ist als der theoretisch berechnete Energiebedarf.

Parameter zu beschränken. Für die Bewertung der Wirtschaftlichkeit aus Perspektive der Eigentümerinnen und Eigentümer genauso wie für die Bewertung der realen THG-Einsparungen muss jedoch der Gebäudebetrieb und damit die tatsächliche Nutzung parametrisiert werden: „Empirische Untersuchungen zeigen [...], dass eine signifikante Abweichung zwischen gemessenem und berechnetem Endenergiebedarf existiert, [...] die sich teilweise auf gebäudespezifische Merkmale zurückführen lassen“ (Steinbach 2016, 81). In der Modellberechnung sind diese Nutzereinflüsse über eine Änderung der effektiven Innenraumtemperatur im Vergleich zur Norminnentemperatur operationalisiert. Diese sind durch räumliche oder zeitlich Teilbeheizung sowie eine allgemeine nutzungsspezifische Komponente bedingt. Diese Reduktionsfaktoren sind nach Loga et al. (2003) implementiert. Eine höhere energetische Qualität von Gebäuden führt demnach zu geringerer Teilbeheizung und damit einer höheren effektiven Innenraumtemperatur.

Im Folgenden wird der „effektive“ Nutzwärmebedarf für die Referenzgebäudeklassen, differenziert nach Baualtersklasse und Sanierungszustand für jeden Gebäudetyp, aufgezeigt. Abbildung 15 zeigt die Ergebnisse der Referenzgebäude für die Referenzgebäudeklassen des Gebäudetyps Einfamilienhäuser. Dargestellt sind jeweils der Ausgangszustand – vor Sanierung – und der effektive Nutzwärmebedarf nach dem berechneten Effizienzstandard. Die jeweiligen Referenzgebäudeklassen sind absteigend sortiert nach dem effektiven Nutzwärmebedarf vor der Sanierung.

Abbildung 15: Effektiver Nutzwärmebedarf pro Gebäude für die Einfamilienhaus-Referenzgebäude nach Effizienzstandards



Hinweis: Erklärung zur Bezeichnung/Codierung der Referenzgebäudeklasse auf der X-Achse: „Gebäudetyp“_ „Bereits nachträglich erfolgte Sanierungsmaßnahme“_ „Baualtersklasse“

Bezeichnung Gebäudetyp

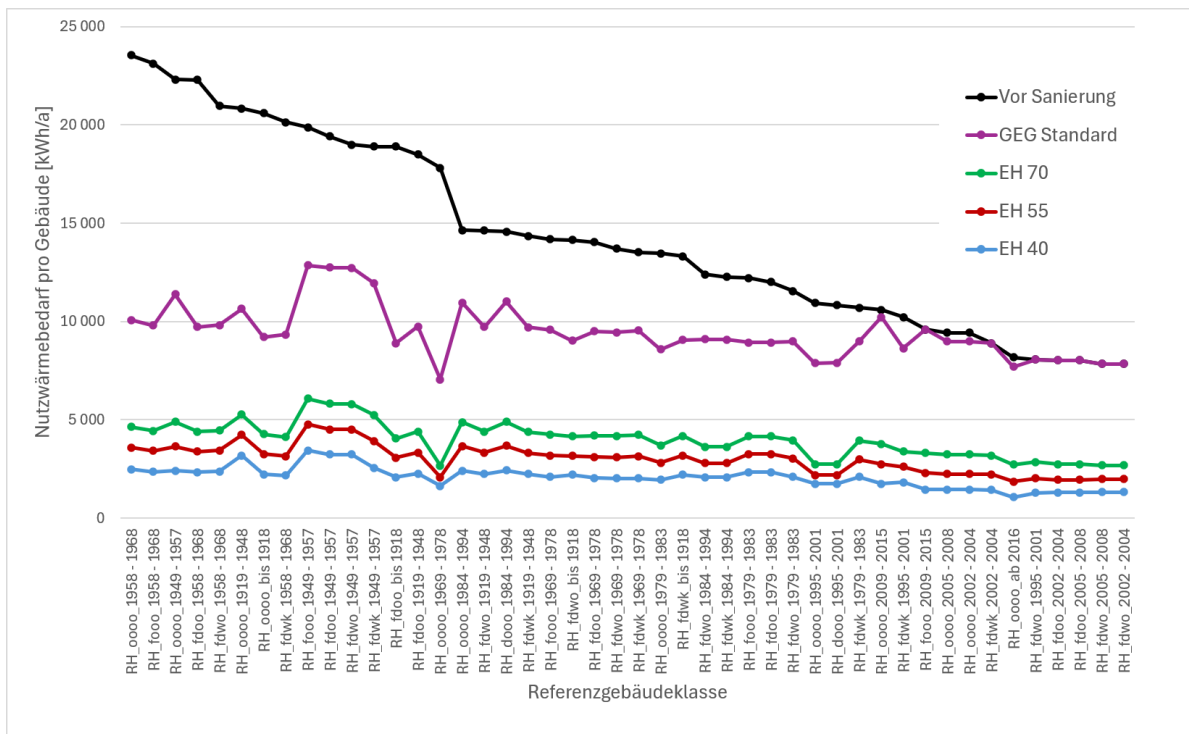
Bezeichnung der bereits nachträglich erfolgten Sanierungsmaßnahmen sanierter Bauteile

EFH: Ein- und Zweifamilienhaus	0000: Kein Bauteil des Gebäudes wurde nachträglich energetisch saniert (energetischer Zustand Gebäudehülle wie im Errichtungsjahr)
RH: Reihenhäuser	
KMF: Kleines Mehrfamilienhaus	f: Fenster bereits nachträglich saniert
MMF: Mittleres Mehrfamilienhaus	d: Dach bereits nachträglich saniert
GMF: Großes Mehrfamilienhaus	w: Außenwände bereits nachträglich saniert
	k: Kellerdecke nachträglich saniert

Quelle: Eigene Darstellung IREES

Abbildung 16 zeigt den effektiven Nutzwärmebedarf vor Sanierung und für die analysierten Effizienzstandards der Referenzgebäudeklassen des Gebäudetyps Reihenhäuser.

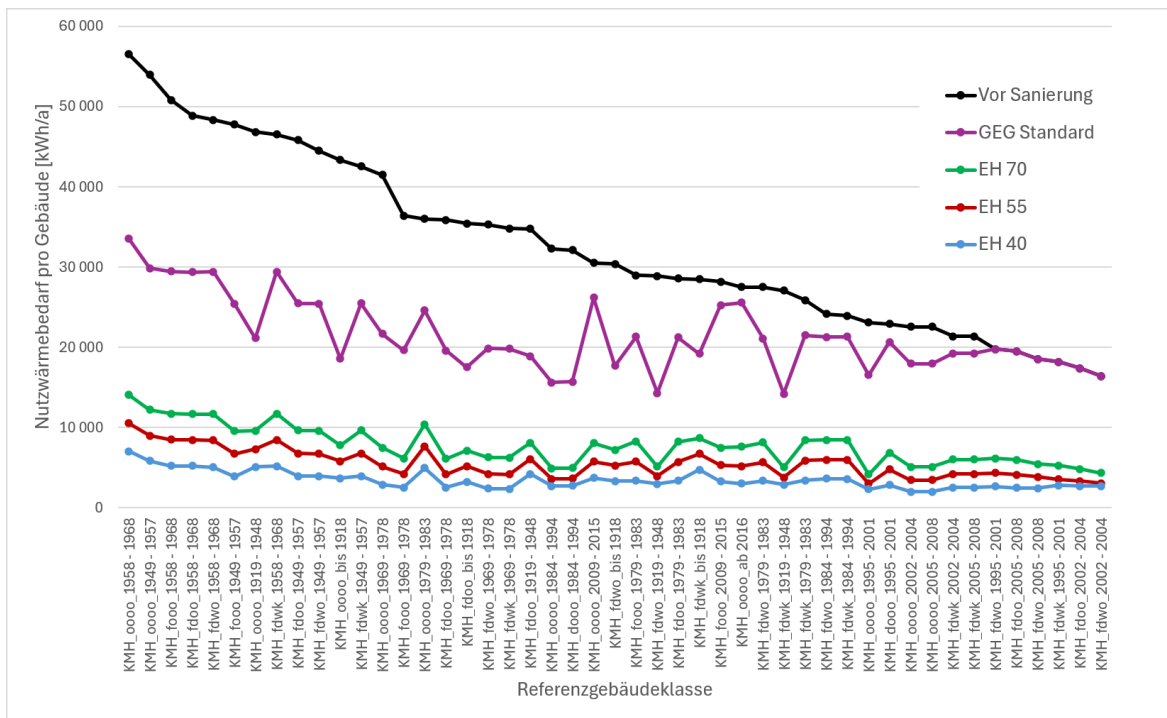
Abbildung 16: Effektiver Nutzwärmebedarf pro Gebäude für die Reihenhäuser-Referenzgebäude nach Effizienzstandards



Quelle: Eigene Darstellung IREES

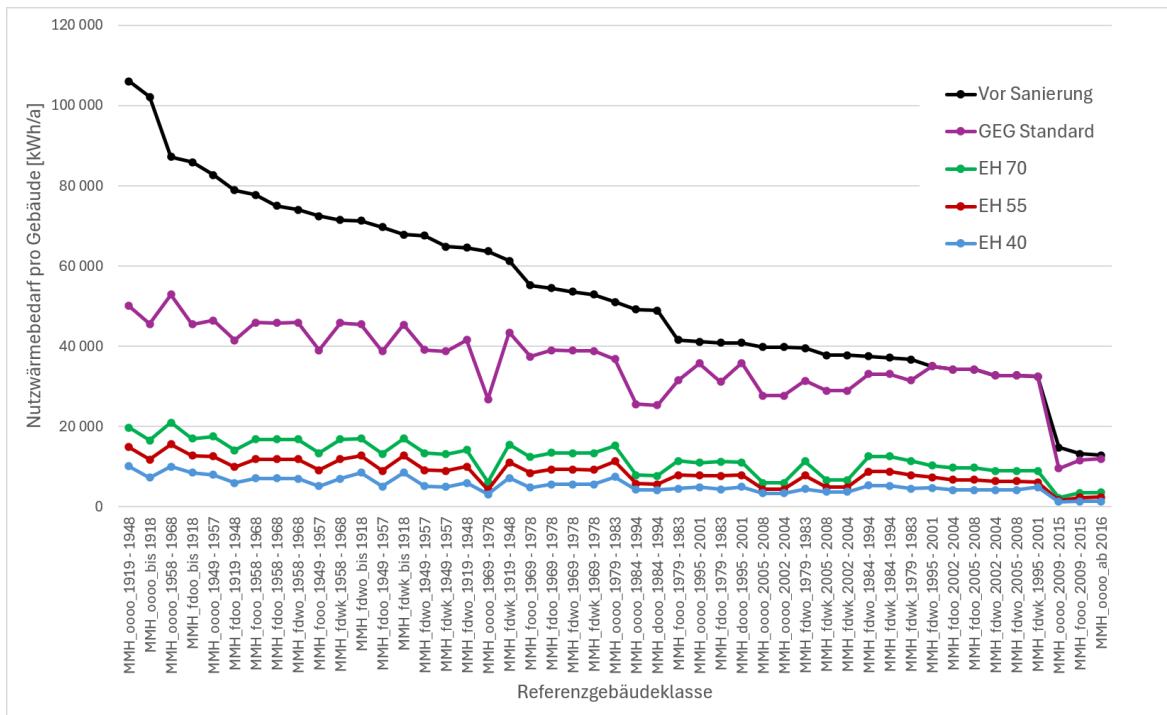
Abbildung 17 beinhaltet die entsprechenden Werte für die kleinen Mehrfamilienhäuser. Abbildung 18 und Abbildung 19 zeigen die Ergebnisse für die mittleren und großen Mehrfamilienhäuser.

Abbildung 17: Effektiver Nutzwärmebedarf pro Gebäude für die Kleinen Mehrfamilienhäuser-Referenzgebäude nach Effizienzstandards



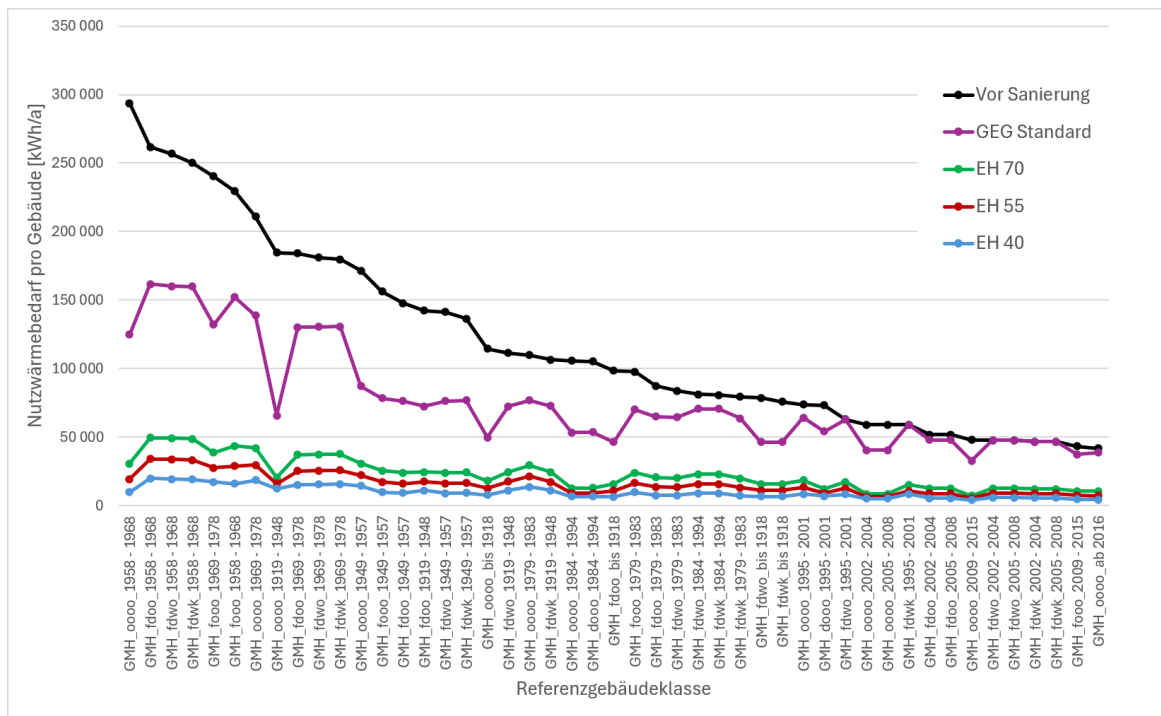
Quelle: Eigene Darstellung IREES

Abbildung 18: Effektiver Nutzwärmebedarf pro Gebäude für die mittleren Mehrfamilienhäuser-Referenzgebäude nach Effizienzstandards



Quelle: Eigene Darstellung IREES

Abbildung 19: Effektiver Nutzwärmebedarf pro Gebäude für die großen Mehrfamilienhäuser-Referenzgebäudeklassen nach Effizienzstandards



Quelle: Eigene Darstellung IREES

4.4.3 Bewertung der Wirtschaftlichkeit energetischer Maßnahmen an der Gebäudehülle

Annuitätenmethode zur Berechnung von Energieeinsparkosten

Auf Basis der Ergebnisse der Investitionskostenanalyse und der real realisierbaren Einsparungen wird eine Wirtschaftlichkeitsbewertung für die Effizienzmaßnahmen an der Gebäudehülle durchgeführt. Dazu werden spezifische Kosten pro eingesparte Kilowattstunde berechnet – sogenannte spezifische Einsparkosten (vgl. Staniaszek et al., 2015). Die Kosten der Energieeinsparung sind damit die kapitalgebundenen Kosten und ergeben sich aus den Investitionen in die Maßnahmen verteilt über die Lebensdauer, die mittels Annuitätenmethode berechnet wird. Die Berechnung bezieht sich nur auf die energiebedingten Mehrkosten (vgl. Kapitel 4.4.1). Es wird somit angenommen, dass energetische Sanierungsmaßnahmen an ohnehin erforderliche Instandsetzungsmaßnahmen an der Gebäudehülle gekoppelt werden (Enseling 2003). Folgende Formel stellt die Berechnung der spezifischen Einsparkosten dar:

$$\text{Spezifische Einsparkosten}_j = \frac{(I_{j,0} - I_j^{INST}) \cdot \frac{r}{(1 - (1 - r)^{-T})}}{Q_{w,nd,j}}$$

$I_{j,0}$ Investitionsauszahlung der Effizienzmaßnahme j beim Anschaffungszeitpunkt ($t=0$)

I_j^{INST}	<i>Investitionsauszahlung in ohnehin erforderliche Maßnahmen bei nicht energetischer Instandsetzung</i>
T	<i>Planungshorizont/ Nutzungsdauer</i>
$Q_{w,nd,j}$	<i>Nutzwärmebedarf Sanierung mit Effizienzmaßnahme</i>

Nutzungsdauer und Zinssatz

Für die Berechnung der spezifischen Einsparkosten wird ein Zinssatz von 2 % sowie eine durchschnittliche Nutzungs- bzw. Abschreibungsdauer zwischen 30 und 60 Jahren angesetzt, die über Sensitivitätsrechnungen variiert wird. Die tatsächliche Lebensdauer variiert je nach Bauteil und eingesetzten Materialien; die gewählte Abschreibungsdauer bildet daher einen Mittelwert über die betrachteten Effizienzmaßnahmenpakete ab, in denen unterschiedliche Bauteile saniert werden. Tabelle 3 gibt einen Überblick zu ansetzbaren Nutzungsdauern relevanter Bauteile, die als Grundlage für Lebenszyklusrechnungen im Rahmen des Bewertungssystems nachhaltiges Bauen (BNB) und dem Qualitätssiegel nachhaltiges Bauen (QNG) dienen. Die darin ausgewiesenen Lebensdauern werden nach neusten Erkenntnissen laufend aktualisiert und sind letztmalig im Jahr 2026 überarbeitet und veröffentlicht worden (BBSR 2026). In der LCA-Betrachtung wird ein Zeitraum von 50 Jahren betrachtet, so dass bei den Nutzungsdauern unterschieden wird, inwieweit sie innerhalb des Betrachtungszeitraums fallen oder länger sind. Das heißt bei der Angabe einer Nutzungsdauer von 50 Jahren und mehr, kann diese auch signifikant darüber liegen. Die angegebenen Nutzungsdauern zeigen, dass fast alle relevanten Bauteile und Konstruktionen mit einer Lebensdauer von mindestens 50 Jahren angegeben werden.

Tabelle 3: Lebensdauern von Baukonstruktionen

Baukonstruktion	Lebensdauer
Tragende Außenwände	≥50
Mineralische Putze auf Mauerwerk und Beton	≥ 50
Mineralische Putze auf Mauerwerk und Beton:	≥ 50
Pastöse Putze auf Mauerwerk und Beton:	45
Putz auf Wärmedämmung: Mineralische und pastöse Putze	45
Dämmschicht als Kerndämmung: Mineralwolle Dämmplatten, Polyurethandämmplatten, Polystyrol, Blähschiefergranulat, Blähglasgranulat, Blähtongranulat, Holzfaser, Zellulose, Hanf, Flachs, Wiesengras, Kork, Leichtlehmischung	≥ 50
Dämmschicht hinter Vorsatzschale hinterlüftet: Mineralschaumplatten, Schaumglasplatten, Mineralwolle	≥ 50
Dämmschicht hinter Vorsatzschale: Vakuumdämmpaneele	35
Wärmedämm-Verbundsystem (nach allgemeiner bauaufsichtlicher Zulassung/allgemeiner Bauartgenehmigung): Dämmplatten aus Mineralwolle, Polystyrol, Polyurethan, Holzfaser, Holzwolle und Kork	≥ 50

Dachkonstruktion	≥50
Zwischensparrendämmung	≥ 50
Fenster (Rahmen und Flügel): Aluminium, Aluminium-Holz-Komposit, Aluminium-Kunststoff-Komposit, Laubholz behandelt, Stahl	≥ 50
Fenster (Rahmen und Flügel): PVC-U	≥ 50
Fenster (Rahmen und Flügel): Nadelholz behandelt	≥ 50

Quelle: (BBSR 2026)

Insofern sind 60 Jahren als obere Grenze für die Nutzungsdauer begründbar. Allerdings müssen insbesondere für eine ökonomische Bewertung aus einzelwirtschaftlicher Perspektive geringe Lebensdauern bzw. Abschreibungsdauern berücksichtigt werden. Aus der Perspektive einer einzelwirtschaftlichen ökonomischen Bewertung sind 60 Jahre als Abschreibungsdauer auch für Gebäude und Gebäudeelemente hoch. In Rau et al., (2024) wird eine einheitliche Lebensdauer in der Wirtschaftlichkeitsbewertung von 40 Jahren angesetzt. Daher führt die vorliegende Analyse auch Sensitivitätsrechnungen mit Bandbreiten zur Abschreibungsdauer sowie dem Zinssatz durch.

Um die Wirtschaftlichkeit der Maßnahmen zu bewerten, werden berechnete spezifische Kosten der eingesparten Kilowattstunde mit den Kosten für den Bezug der Kilowattstunde verglichen. Als Referenzenergiepreise werden für diese Bewertung Brennstoffpreise für Erdgas und Biomethan als defossilisierte gasförmigen Energieträger herangezogen. Eine integrierte Bewertung der Wirtschaftlichkeit der verschiedenen Effizienzstandards mit der Umstellung der Wärmeversorgung auf Wärmepumpen erfolgt im folgenden Kapitel 4.4.4. Die Referenzenergiepreise für die Bewertung der Wirtschaftlichkeit werden aus den Energiepreisannahmen des aktuellen Projektionsberichtes (vgl. Kapitel 3.3) angesetzt. Dabei wird für die Referenzenergiepreise jeweils sowohl eine kurzfristige als auch langfristige Perspektive verglichen in Form der durchschnittlichen Energiepreise bis 2035 und für den Zeitraum 2035 bis 2045.

Tabelle 4 fasst die verwendeten Parameter für die Wirtschaftlichkeitsbewertung der Effizienzmaßnahmen zusammen.

Tabelle 4: Verwendete Parameter für die Wirtschaftlichkeitsberechnung

Parameter	Annahme	Sensitivitäten
Lebensdauer / Abschreibungsdauer Effizienzmaßnahmenpakete zur Erreichung der untersuchten Effizienzstandards	60 Jahre	50 Jahre / 30 Jahre
Kalkulatorischer Zinssatz ¹⁵	2 %	3 %

¹⁵ Derzeitige Zinssätze für KfW Kredit 261: 2,4 % - 3 % (abgerufen Februar 2026)

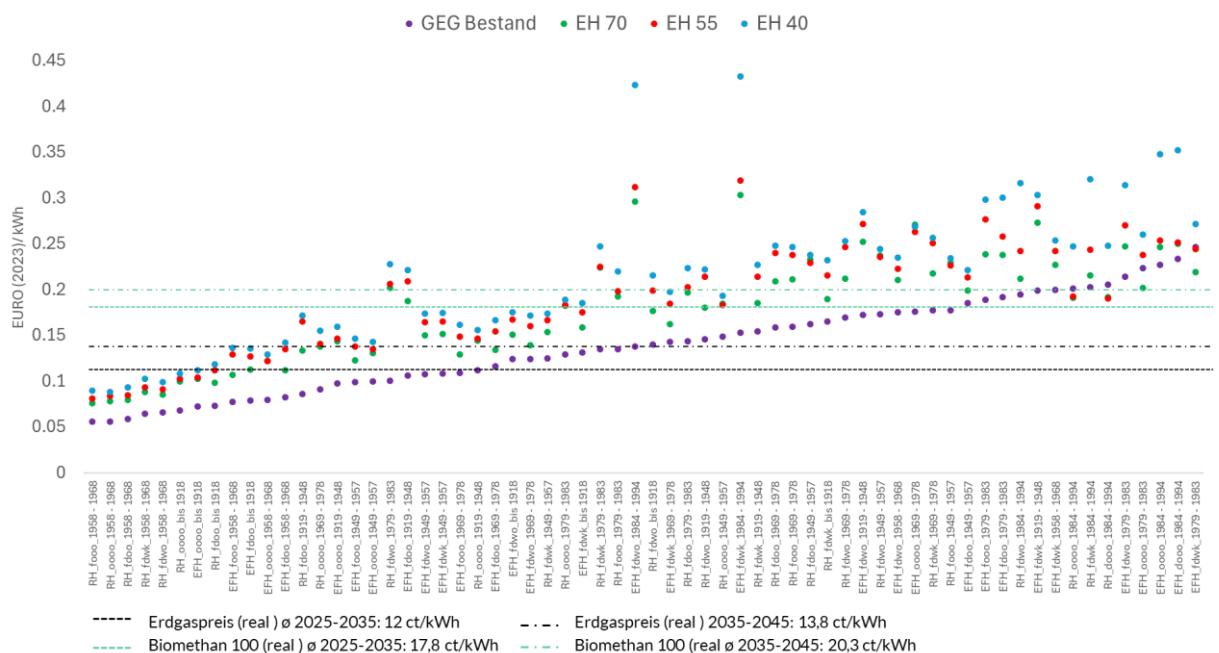
Referenzenergiepreise für Wirtschaftlichkeitsvergleich	
Erdgas ϕ 2025-2035 (real) *	12 Cent/ kWh
Erdgas ϕ 2035-2045 (real) *	13,8 Cent / kWh
Biomethan 100 ϕ 2025-2035 (real)	17,8 Cent/ kWh
Biomethan 100 ϕ 2035-2045 (real)	20,3 Cent/ kWh

Quelle: IREES; Primärdaten: (Kemmler u. a. 2026); *Die Energiepreise beinhalten bereits den CO₂-Preisauflschlag

Abbildung 20 zeigt die berechneten spezifischen Energieeinsparkkosten – Kosten der eingesparten Kilowattstunde – für die Referenzgebäudeklassen der Gebäudetypen der Einfamilienhäuser und Reihenhäuser. Die Abbildung zeigt die Ergebnisse in aufsteigender Reihenfolge. Die Punkte stellen für jede Referenzgebäudeklasse die Kosten der eingesparten Kilowattstunde dar, die sich aus den erforderlichen Investitionen ergeben. Sofern die spezifischen Einsparkosten unter dem Referenzenergiepreis liegen, ist die Effizienzmaßnahme wirtschaftlich.

Es zeigt sich, dass für fast alle Referenzgebäudeklassen des Gebäudetyps die spezifischen Einsparkosten der untersuchten Effizienzhausstandards signifikant über dem Effizienzstandard GEG „Bestand“ liegen. Im Vergleich mit den Referenzenergiepreisen zeigt sich, dass rund die Hälfte der Referenzgebäude beim GEG Standard in der langfristigen Perspektive bei Erdgas als Referenz wirtschaftlich sind. Wenn der Vergleich zu Biomethan als Referenzenergiepreis gezogen wird, steigt die Wirtschaftlichkeit signifikant, insbesondere auch für die ambitionierten Effizienzhausstandards - auch ohne Förderung.

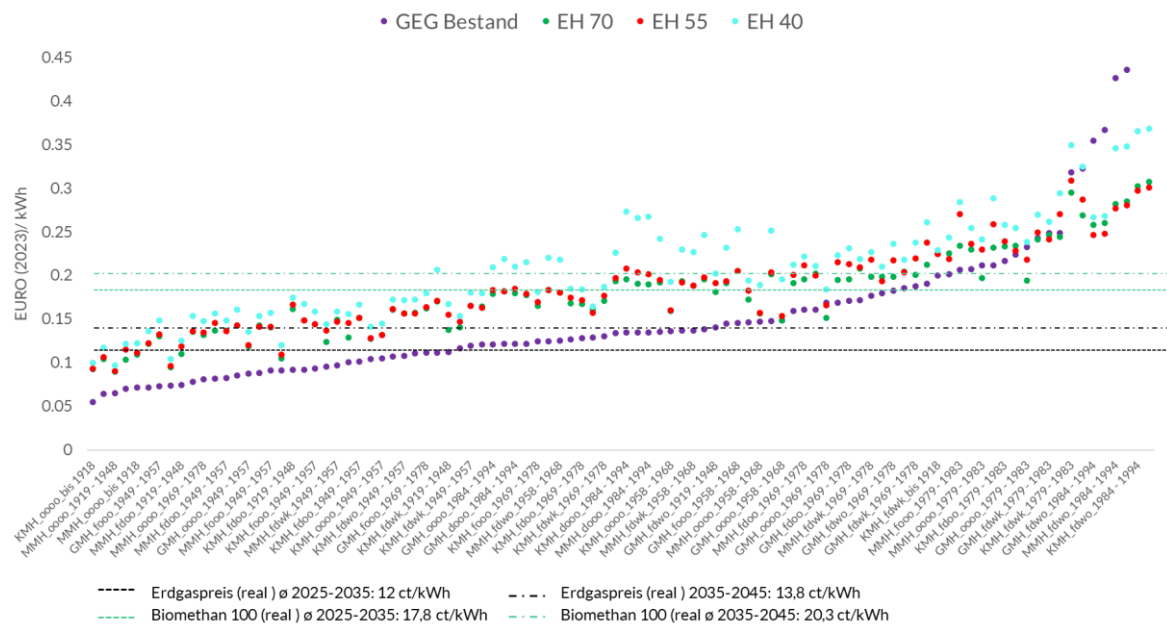
Abbildung 20: Energieeinsparkkosten: Annuität der Investitionen pro eingesparte Kilowattstunden Nutzwärme [EURO/kWh] bei einer Abschreibungsdauer von 60 Jahren – Einfamilienhäuser und Reihenhäuser (ohne Förderung)



Quelle: Eigene Darstellung IREES

Im Segment der Mehrfamilienhäuser (Abbildung 21) ist die Bewertung für den Standard GEG-Bestand ähnlich. Nur die bereits in der Vergangenheit umfangreich sanierten Gebäude resultieren in sehr hohen Einsparkosten.

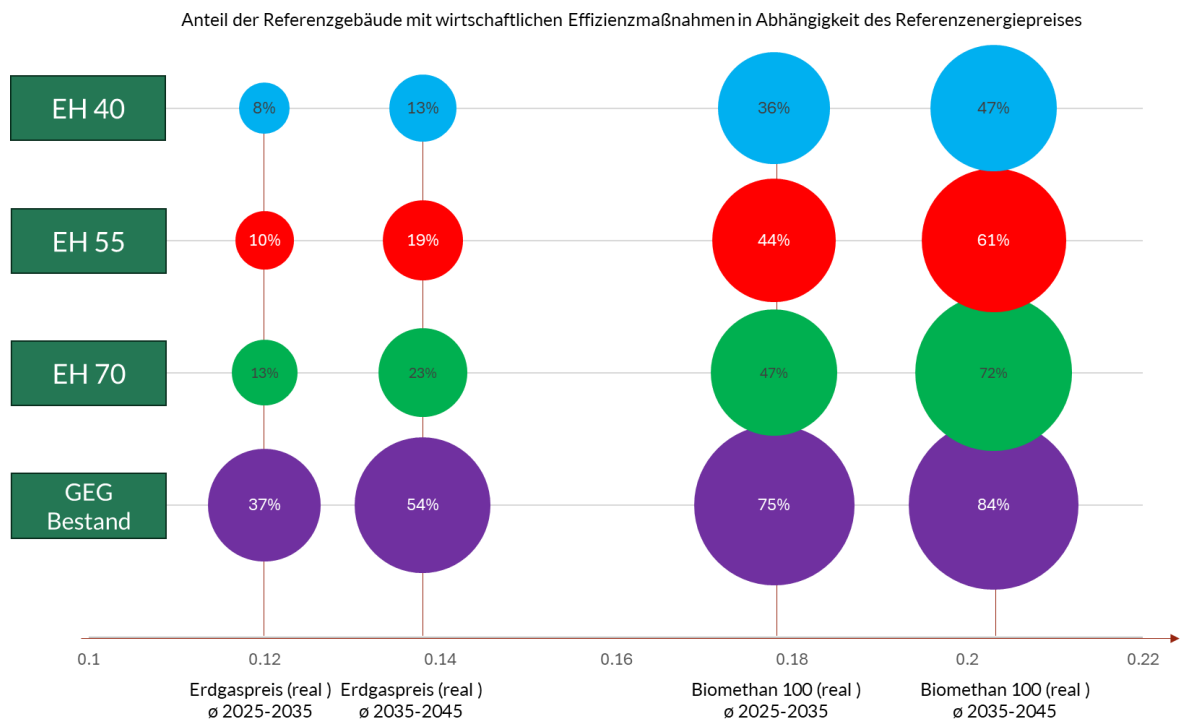
Abbildung 21: Energieeinsparkosten: Annuität der Investitionen pro eingesparte Kilowattstunden Nutzwärme [EURO/kWh] bei einer Abschreibungsdauer von 60 Jahren–Mehrfamilienhäuser (ohne Förderung)



Quelle: Eigene Darstellung IREES

Abbildung 22 fasst die Ergebnisse für alle Referenzgebäude im Wohngebäudebestand zusammen und zeigt jeweils den Anteil der analysierten Referenzgebäude mit wirtschaftlichen Effizienzmaßnahmen bei unterschiedlichen Energiepreisen. Beispielsweise sind 54 % der Effizienzmaßnahmen zur Erreichung des GEG-Standards in den untersuchten Referenzgebäuden wirtschaftlich, wenn man den langfristigen Erdgaspreis aus der Energiepreisprognose ansetzt. Wird hingegen Biomethan angesetzt, sind 84 % der Effizienzmaßnahmen wirtschaftlich. Nicht wirtschaftlich sind Maßnahmenpakete insbesondere in den Gebäuden, in denen bereits nachträgliche Sanierungsmaßnahmen durchgeführt wurden, die aber im derzeitigen Sanierungszustand noch nicht den definierten Standard erreichen. Für ambitioniertere Effizienzhausstandards zeigt sich, dass bei höheren Energiepreisen – etwa beim Einsatz von Biomethan – die Effizienzmaßnahmenpakete für einen größeren Anteil der Referenzgebäude wirtschaftlich sind.

Abbildung 22: Zusammenfassung Anteil wirtschaftlicher Effizienzmaßnahmenpakete bei unterschiedlichen Energiepreisen und einer Abschreibungsdauer von 60 Jahren



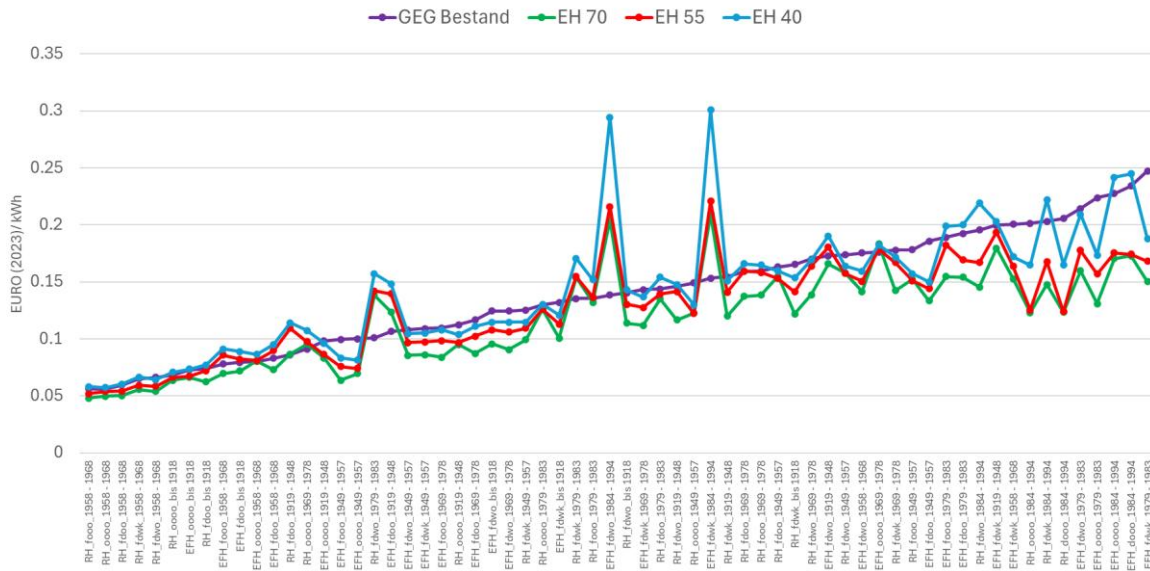
Quelle: Eigene Darstellung IREES

Bewertung inklusive Förderung

Die folgenden Abbildung 23 und Abbildung 24 zeigen die Ergebnisse inklusive einer Förderung für die Umsetzung der Effizienzhausstandards von 30 % der Investitionskosten. Es zeigt sich, dass durch die Förderung die spezifischen Einsparkosten der Effizienzhausstandards in vielen Fällen unter dem GEG „Bestand“ Effizienzstandard liegen.

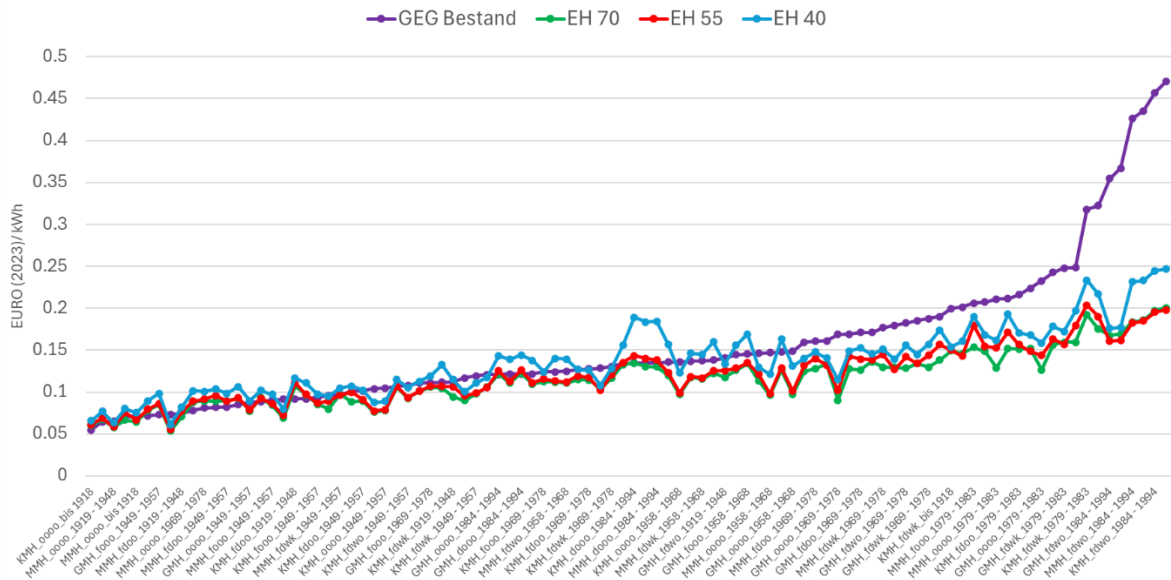
Mit der Förderung kann somit zumindest unter Annahme der kalkulatorischen Nutzungsdauer von 60 Jahren und einen Zinssatz von 2 % eine Wirtschaftlichkeit aus Investoren-/ Eigentümerperspektive erreicht werden.

Abbildung 23: Energieeinsparkosten: Annuität der Investitionen pro eingesparte Kilowattstunde Nutzwärme [EURO/kWh] – Einfamilienhäuser und Reihenhäuser (inkl. Förderung)



Quelle: Eigene Darstellung IREES

Abbildung 24: Energieeinsparkosten: Annuität der Investitionen pro eingesparte Kilowattstunde Nutzwärme [EURO/kWh] – Mehrfamilienhäuser (inkl. Förderung)

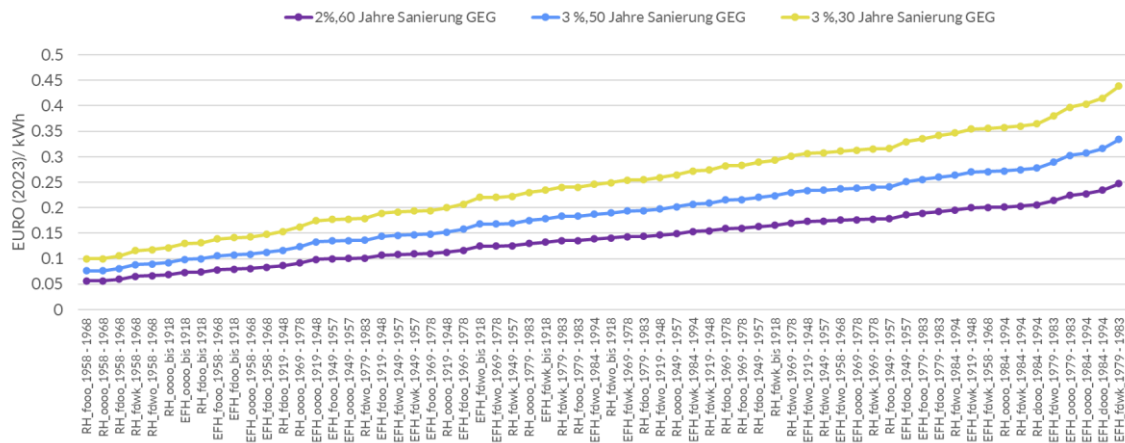


Quelle: Eigene Darstellung IREES

Sensitivitätsrechnung – Zinssatz und Abschreibungsdauer

Abbildung 25 stellt die Ergebnisse der Sensitivitätsrechnungen für den Effizienzstandard GEG Bestand dar. Die Ergebnisse verdeutlichen die Relevanz der Annahmen und die mögliche Diskrepanz zwischen einer einzelwirtschaftlichen Betrachtung und einer gesamtwirtschaftlichen systemischen Betrachtung in Bezug auf Effizienzstandards.

Abbildung 25: Energieeinsparungskosten Sensitivitäten: Annuität der Investitionen pro eingesparte Kilowattstunde Nutzwärme [EURO/kWh] – Einfamilienhäuser und Reihenhäuser



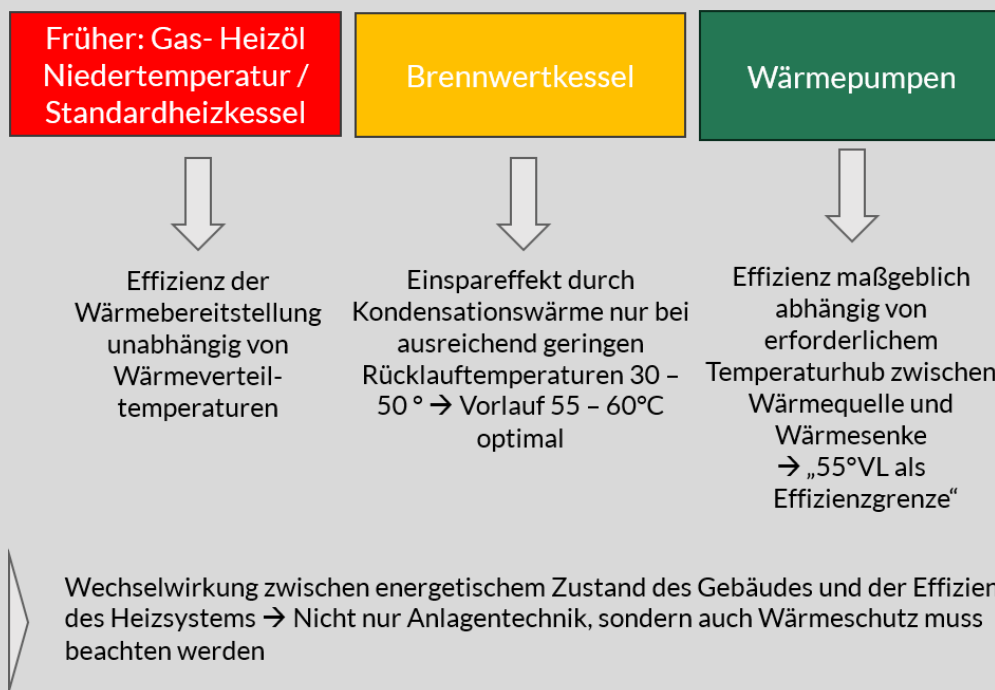
Quelle: Eigene Darstellung IREES

Exkurs: Mindesteffizienzmaßnahmen und gering-investive Maßnahmen zur Erreichung von Niedertemperaturwärmeversorgung

Die Dekarbonisierung der Wärmeversorgung im Gebäudebestand erfordert zunehmend den Einsatz von Niedertemperatursystemen. Dies betrifft sowohl dezentrale Wärmepumpensysteme als auch zukünftige Niedertemperatur-Fernwärmenetze. Gleichzeitig gilt eine umfassende energetische Sanierung des gesamten Gebäudebestandes auf sehr hohe Effizienzstandards bis 2045 als unrealistisch – sowohl aufgrund der hohen Investitionskosten als auch begrenzter Umsetzungskapazitäten. Vor diesem Hintergrund gewinnen sogenannte „Low-hanging Fruits“, also gering-investive Maßnahmen zur Verbesserung der Niedertemperaturfähigkeit von Gebäuden, an Bedeutung.

Ein zentraler Zusammenhang besteht zwischen dem energetischen Zustand des Gebäudes und der Effizienz des Heizsystems. Während konventionelle Niedertemperaturkessel weitgehend unabhängig von hohen Vorlauftemperaturen betrieben werden können, steigt bei Wärmepumpen der Strombedarf mit zunehmender Temperaturdifferenz zwischen Wärmequelle und Wärmesenke deutlich an (Abbildung 26).

Abbildung 26: Abhängigkeit Effizienz der Wärmeversorgung von der Temperatur der Wärmeverteilung



Quelle: IREES

Die Effizienz der Wärmepumpe hängt somit maßgeblich von den erforderlichen Vorlauftemperaturen ab. In der Praxis gilt eine Vorlauftemperatur von etwa 55 °C häufig als relevante Effizienzgrenze für einen wirtschaftlichen Wärmepumpenbetrieb (BMWE 2024). Eine hohe Vorlauf- und damit Rücklauftemperatur wirkt sich auch auf die Effizienz von Brennwertkesseln aus, da bei Abgastemperaturen über 55°C die Nutzung der Kondensationswärme (Brennwerteffekt) nicht mehr möglich ist (Kienzlen u. a. 2019).

Die erforderlichen Vorlauftemperaturen werden im Wesentlichen durch vier Faktoren bestimmt (Abbildung 27):

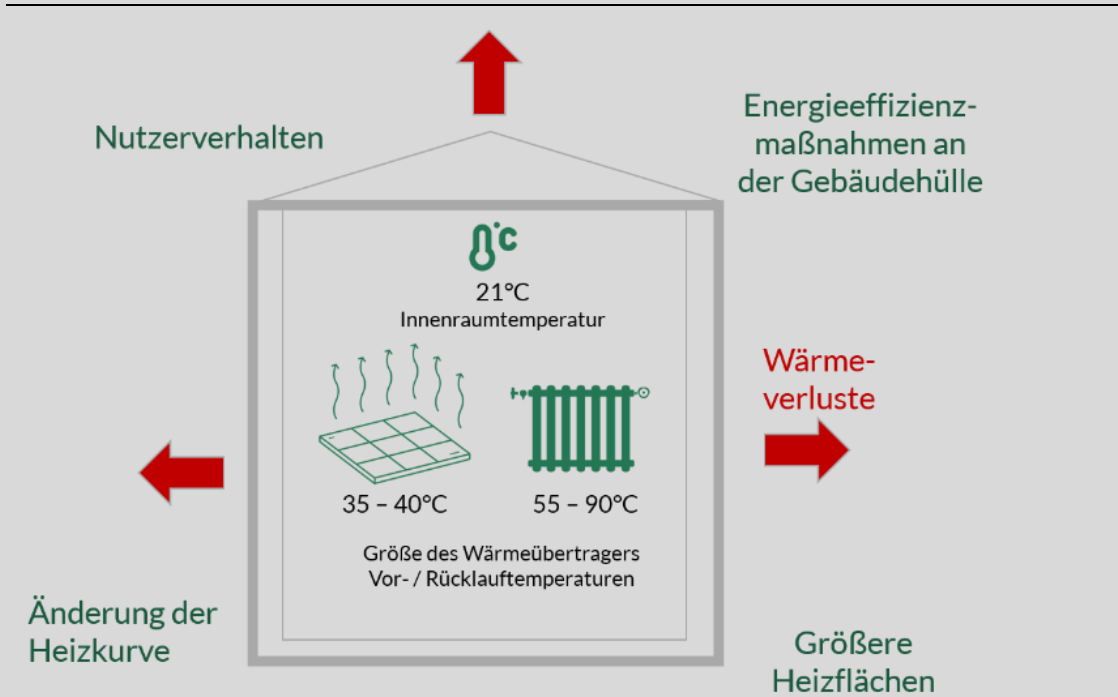
- den baulichen Wärmeschutz des Gebäudes,
- die Dimensionierung der Heizflächen,
- die Regelung des Heizsystems sowie
- das Nutzerverhalten.

Entsprechend können bereits einfache Maßnahmen erhebliche Beiträge zur „Niedertemperatur-Readiness“ leisten.

Bei Gebäuden jüngerer Baujahre – insbesondere ab Mitte der 1990er Jahre – ist der Wärmeschutz häufig bereits ausreichend, sodass keine zusätzlichen Maßnahmen an der Gebäudehülle erforderlich sind. Diese Gebäude gelten vielfach bereits als „Wärmepumpen-ready“. Für Gebäude der Baualtersklassen zwischen 1978 und 1995 besteht oftmals lediglich punktueller Anpassungsbedarf. Hier können einzelne Heizkörpervergrößerungen oder der Austausch ungünstig dimensionierter

Heizflächen ausreichen, um niedrigere Vorlauftemperaturen zu ermöglichen. Ergänzend können Schwachstellen wie undichte Dachbereiche oder ältere zweifachverglaste Fenster in Räumen mit hohen Fensteranteilen adressiert werden.

Abbildung 27: Einflussfaktoren auf die Vorlauftemperatur



Quelle: IREES

Gering-investive Maßnahmen können aber auch im älteren Gebäudebestand vor 1978 hochrelevant sein. Auch dort zeigen praktische Erfahrungen, dass eine umfangreiche Gebäudesanierung nicht in allen Fällen zwingend Voraussetzung für den Einsatz von Wärmepumpen ist. Vielmehr können schrittweise Maßnahmen erhebliche Verbesserungen bewirken. Eine zentrale Rolle spielt dabei die Optimierung der Heizkurve. Durch die Absenkung unnötig hoher Vorlauftemperaturen können Energieeinsparungen von etwa 7 bis 15 % erreicht werden. Dies entspricht teilweise Einsparwirkungen, die mit dem Austausch älterer Isolierverglasungen vergleichbar sind. Gleichzeitig sinken die erforderlichen Vorlauftemperaturen über weite Teile der Heizperiode deutlich ab.

Weitere gering-investive Maßnahmen, die typische Schwachstellen dieser Gebäude adressieren sind (Abbildung 28):

- die Dämmung und Abdichtung von Dachbodenzugängen,
- die Verbesserung der Luftdichtheit,
- die Einblasdämmung von Schrägdächern sowie
- der gezielte Austausch einzelner Heizkörper.

Abbildung 28: Übersicht geringinvestive Maßnahmen für „Niedertemperatur-/Wärmepumpen ready“

	Bewertung	Maßnahmen
Baujahr Nach 1995	<ul style="list-style-type: none"> Wärmeschutz bereits ausreichend → keine Maßnahmen an der Gebäudehülle erforderlich Bereits „Wärmepumpen Ready“ 	<ul style="list-style-type: none"> Dimensionierung Heizkörper überprüfen ggf. einzelne Heizkörper tauschen
Baujahr Nach 1978 bis 1995	<ul style="list-style-type: none"> Wärmeschutz opaker Bauteile ausreichend i.d.R. keine Dämmung erforderlich Schwachstellen: <ul style="list-style-type: none"> Fenster mit 2-fach Isolierverglasung → relevant für Räume mit großen Fensterflächen und Terrassentüren Luftdichtheit Dach 	<ul style="list-style-type: none"> Austausch einzelner Fenster Luftdichtheit herstellen mit Dampfbremse
Baujahr Vor 1978 (bereits (teilmodernisiert)	<ul style="list-style-type: none"> Wärmeschutz wahrscheinlich nicht ausreichend 55°C Vorlauftemperaturregel 	<ul style="list-style-type: none"> Dachbodenzugang dämmen und dichten (insbesondere in Gebäuden bis 1918) Einblasdämmung Schrägdach Hybrid-Heizung Umfangreiche Effizienzmaßnahmen

Quelle: IREES basierend auf (Herbert 2023, 2024)

Empirische Untersuchungen bestätigen die Wirksamkeit solcher Maßnahmen. Im Projekt „Smartes Quartier Karlsruhe-Durlach“ wurde untersucht, welche Anpassungen bei Mehrfamilienhäusern der 1950er Jahre mit Teilsanierungen aus den 1980er und 1990er Jahren erforderlich sind. Die Ergebnisse zeigen, dass beim Übergang von einem Heizsystem mit 70/55 °C auf 60/50 °C lediglich rund 3 % der Heizkörper ausgetauscht werden mussten. Selbst beim Übergang auf 55/45 °C waren nur etwa 11 % der Heizkörper betroffen. Dies verdeutlicht, dass eine Niedertemperaturversorgung häufig mit deutlich geringeren Eingriffen erreichbar ist als vielfach angenommen (Jank u. a. 2020).

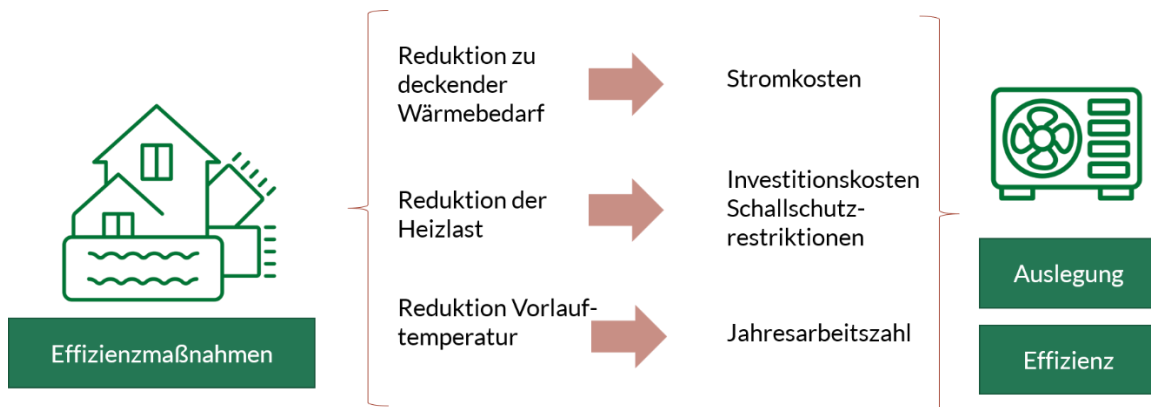
Grundsätzlich bleibt die Effizienz von Wärmepumpensystemen saisonal abhängig. Kennzahlen wie der COP (Coefficient of Performance), der SCOP (Seasonal Coefficient of Performance) oder die reale Jahresarbeitszahl (JAZ) verdeutlichen, dass nicht allein die maximale Auslegungstemperatur entscheidend ist, sondern insbesondere das tatsächliche Betriebsverhalten über die Heizperiode hinweg. Da hohe Vorlauftemperaturen nur an wenigen sehr kalten Tagen erforderlich sind, können Wärmepumpen auch in Bestandsgebäuden vielfach effizient betrieben werden, sofern die mittleren Systemtemperaturen abgesenkt werden.

4.4.4 Bewertung der möglichen Dekarbonisierungspfade aus Effizienzmaßnahmen und Wärmeversorgung

Um mögliche Wege zur Dekarbonisierung zu bewerten, werden die Ergebnisse von Effizienzmaßnahmen an der Gebäudehülle mit verschiedenen Optionen der Wärmeversorgung kombiniert. Im Rahmen der Szenarienanalyse werden sowohl die verschiedenen baulichen Effizienzmaßnahmenpakete als auch unterschiedliche Wärmeversorgungssysteme in der Simulation der Investitionsentscheidung und daraus resultierenden Entwicklung des Gebäudesektors vorgegeben (vgl. Kapitel 5).

Die in diesem Kapitel beschriebene Analyse auf Einzelgebäudeebene konzentriert sich auf die Versorgung mit Wärmepumpen. Besonders im Gebäudebestand kommt der integrierten Betrachtung mit Effizienzmaßnahmen eine große Bedeutung zu. Anders als Brennstoffkessel sind Wärmepumpen stark davon abhängig, wie effizient das Gebäude ist, wobei mehrere Faktoren gleichzeitig beeinflusst werden (Abbildung 29).

Abbildung 29: Relevanz von Effizienzmaßnahmen in Gebäuden für die Effizienz und Auslegung von Wärmepumpen



Quelle: Eigene Darstellung IREES

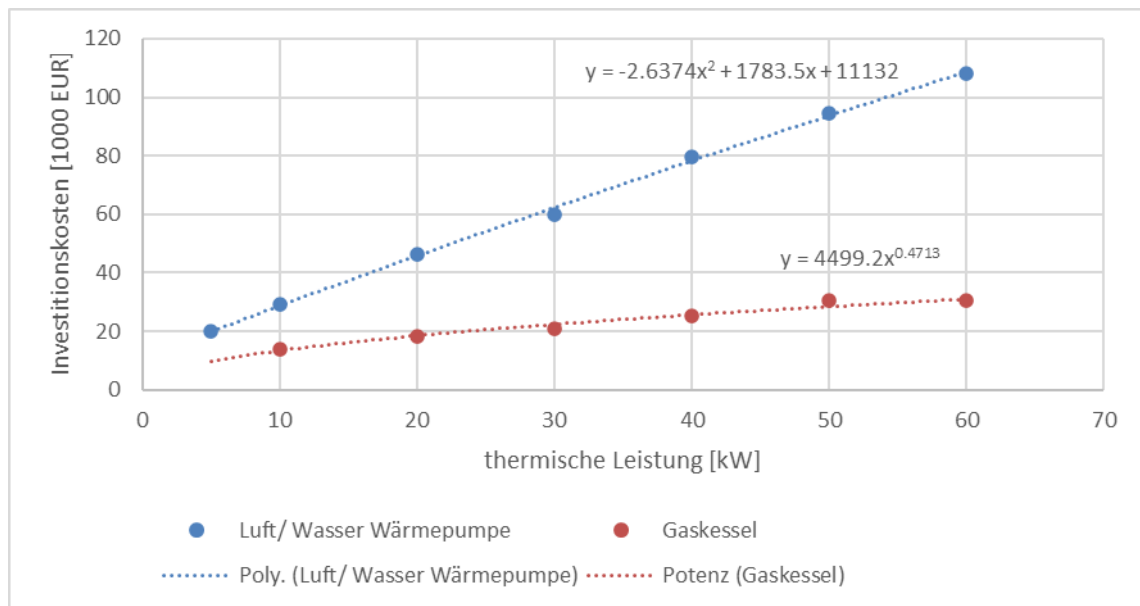
Reduktion der maximalen Heizlast und Investitionskosten

Die Reduktion des Wärmebedarfs durch Effizienzmaßnahmen ist zunächst für alle Wärmeversorgungssysteme relevant, da dadurch laufende Energiekosten reduziert werden. Eine Verbesserung der energetischen Qualität der Gebäudehülle sorgt jedoch auch dafür, dass die Heizlast¹⁶ deutlich reduziert wird. Für Wärmepumpen ist dies besonders relevant, denn eine höhere Heizleistung bedeutet auch größere Investitionen, was bei Wärmepumpen stärker ins Gewicht fällt als beispielsweise bei Gaskesseln (Abbildung 30).

Abbildung 31 zeigt die resultierende Reduktion der Heizlast durch die analysierten Effizienzstandards in den Einfamilienhaus- und Reihenhaus-Referenzgebäuden mit Baujahr vor 1995. Die Referenzgebäude sind nach der erforderlichen Heizlast vor der Sanierung sortiert. Mit Sanierung auf den Effizienzstandard GEG Bestand wird die Heizlast durchschnittlich um 36 % reduziert. Mit Effizienzmaßnahmen, die die Gebäudehüllenforderungen der Effizienzhausstandards erreichen, reduziert sich die Heizlast durchschnittlich zwischen 63 % (EH 70) und 74 % (EH 40).

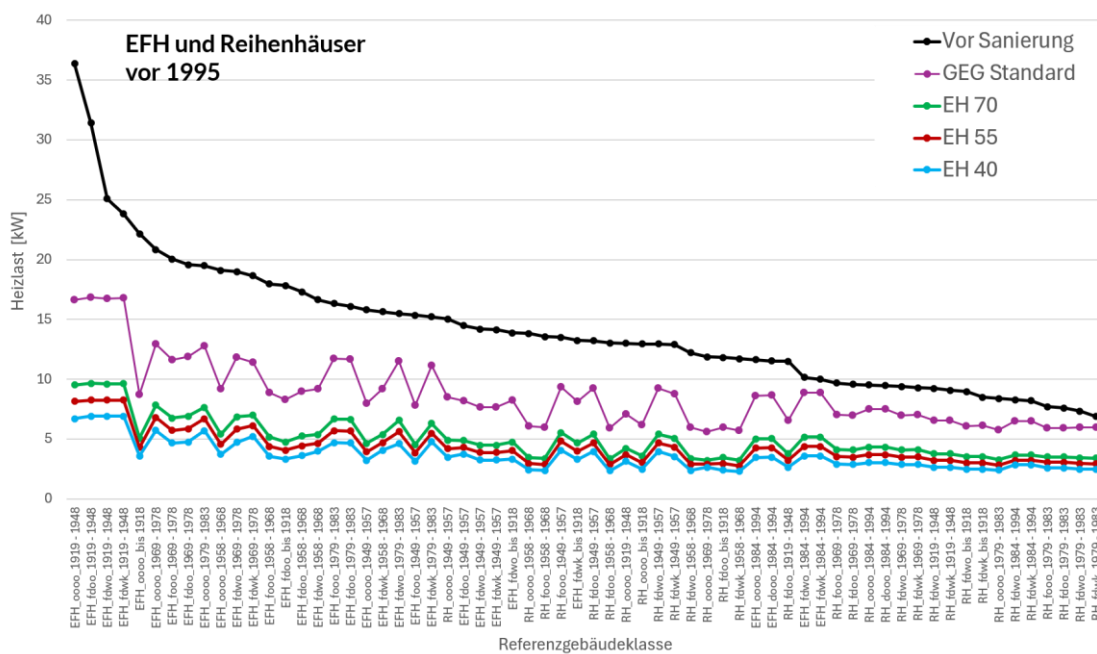
¹⁶ Die Heizlast bezeichnet die erforderliche Heizleistung bzw. den Wärmestrom, der einem Raum zugeführt werden muss, um eine festgelegte Rauminnentemperatur aufrechtzuerhalten. Gemeint ist hier die maximale thermische Leistung, auf die die Wärmepumpe ausgelegt wird, um den Wärmebedarf des Gebäudes am kältesten Tag gemäß Norm-Außentemperatur zu decken.

Abbildung 30: Vergleich Investitionskosten Luft-Wasser Wärmepumpen und Gaskessel in Abhängigkeit von der thermischen Leistung (inkl. MwSt.)



Quelle: Eigene Abbildung IREES, Primärdaten: (dena 2025a)

Abbildung 31: Maximale Heizlast Referenzgebäudeklassen der Gebäudetypen Einfamilienhaus und Reihenhaus vor und nach Sanierung

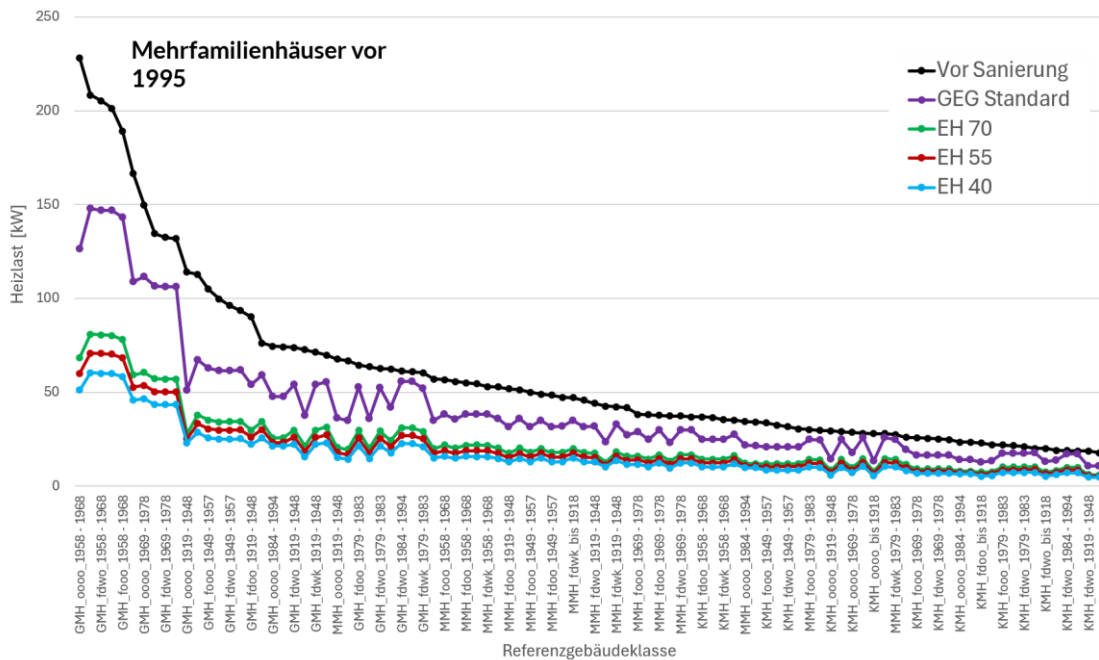


Quelle: Eigene Darstellung IREES

Für Mehrfamilienhäusern liegt die relative Heizlastreduktion in ähnlicher Größenordnung mit durchschnittlich 30 % beim Effizienzstandard GEG Bestand und zwischen 61 % und 71 % bei den Effizienzhausstandards (Abbildung 32). Aufgrund der deutlich höheren Heizlasten sind die absoluten Reduktionen jedoch im

Mehrfamilienhaussegment für eine technische Umsetzung und Machbarkeit von größerer Bedeutung.

Abbildung 32: Heizlast eines Mehrfamilienhaus-Referenzgebäude vor und nach Sanierung



Quelle: Eigene Darstellung IREES

Mit der erforderlichen thermischen Leistung steigen nämlich auch die Schallemissionen von Wärmepumpen. Das ist insbesondere auch im Mehrfamilienhausbestand relevant mit höheren Heizlasten. Diese können insbesondere in dichtbesiedelten Quartieren die zentrale Einschränkung beim Einsatz von Wärmepumpen darstellen. Abbildung 33 zeigt beispielhaft die Schallanalyse für ein Quartier mit Optimierung des Aufstellortes für das Außengerät von Wärmepumpen vor (rechts) und nach Sanierung (links) der Gebäude.

Abbildung 33: Analyse der Barrieren von Luftwärmepumpen aufgrund von Schallemissionen an Nachbargebäuden in einem realen Quartier



Quelle: IREES; rote Punkte mögliche Aufstellorte

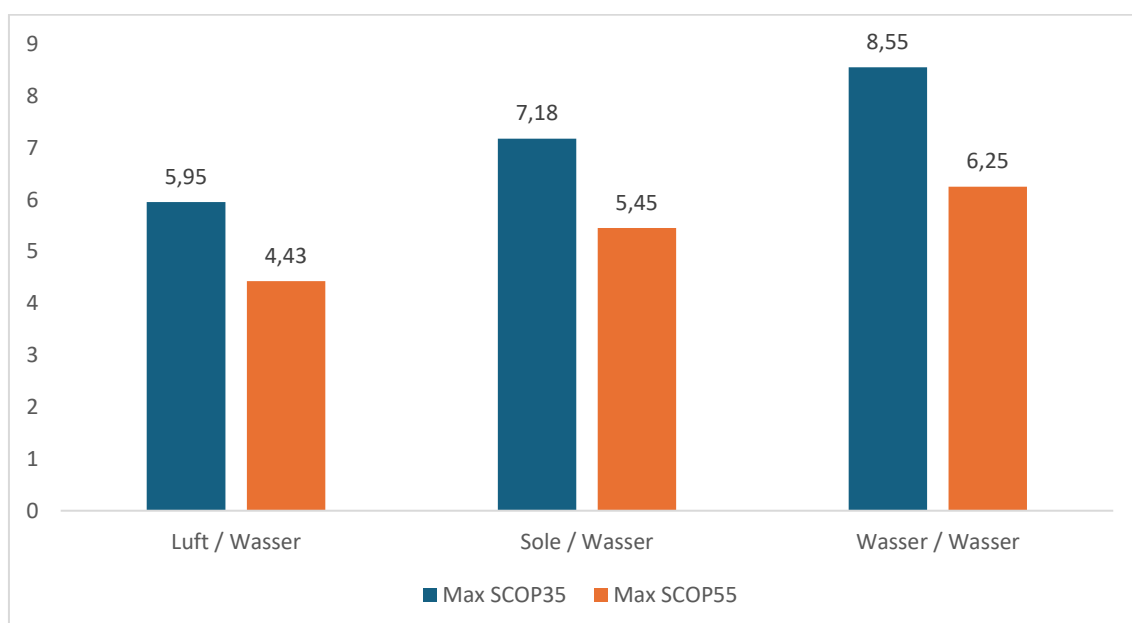
Effizienzbewertung von Wärmepumpen im Gebäudebestand

Darüber hinaus beeinflussen Effizienzmaßnahmen sowie die energetische Qualität der Gebäudehülle die Leistungsfähigkeit von Niedertemperatursystemen und Wärmepumpen erheblich. Durch die Senkung der benötigten Wärmeverteiltertemperaturen zur Gewährleistung angenehmer Raumtemperaturen lässt sich der Temperaturhub verringern, was die Effizienz der Wärmepumpe weiter erhöht. Zur Bewertung der Effizienz der Wärmepumpe sind dabei sowohl die klimatischen Bedingungen, die Gebäudeparameter als auch die technischen Eigenschaften der Wärmepumpe relevant. Zur Beschreibung der Effizienz der Wärmepumpen werden folgende Kennwerte herangezogen:

- **Seasonal Coefficient of Performance (SCOP):** Die Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe unter definierten Betriebszuständen mit Bezug auf die Außentemperatur, die nach Klimazonen gewichtet wird
- **Arbeitszahl / Coefficient of Performance (COP):** Effizienz der Wärmepumpe zu einem bestimmten Zeitpunkt bei definierten Temperaturen von Wärmequelle und Wärmesenke → typische Angaben A2/W35 = Außentemperatur 2°C, Heizungsvorlauftemperatur 35°C oder A7/W55
- **Jahreszeitbedingter Raumheizeffizienz (ETA):** SCOP unter Berücksichtigung des Primärenergiefaktors für Strom
- **Jahresarbeitszahl (JAZ):** Tatsächliche standortbezogene Effizienz im realen Betrieb über ein Jahr

Abbildung 34 zeigt Mittelwert, Maximum und Minimum des SCOP der am Markt verfügbaren Wärmepumpensysteme. Grundlage ist die Auswertung der Bafa förderfähigen Wärmepumpensysteme aus über 11 000 Systemen. Dargestellt ist der SCOP jeweils für eine Heizungsvorlauftemperatur von 35°C und 55°C. Die Fehlerbalken zeigen die Bandbreite der Systeme an.

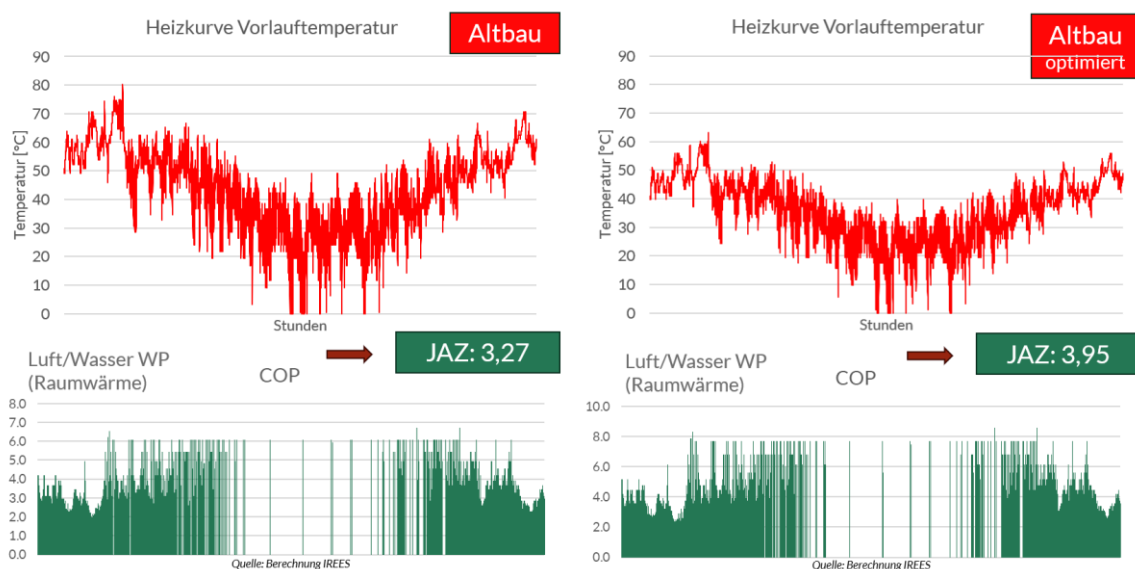
Abbildung 34: Seasonal Coefficient of Performance aktueller Wärmepumpensysteme



Quelle: IREES; Primärdaten: (Bafa/ S4F u. a. 2025).

Um die realen Bedingungen im Gebäudebestand zu berücksichtigen, wird im Folgenden die Jahresarbeitszahl auf Grundlage einer stündlichen Modellierung des COP berechnet. Die gebäudeseitigen Bedingungen werden dabei über die Einstellung der Heizkurve berücksichtigt. Die konkreten Einstellungen für die Heizkurve ergeben sich aus den Anforderungen im Gebäude (Qualität der Gebäudehülle / Wärmeverluste, Wärmeverteilung, Wärmeübergabe) sowie den Nutzeranforderungen. Für die im folgenden dargestellte Beispielberechnung wird die stündliche Außentemperatur für den Standort Berlin angesetzt. Abbildung 35 zeigt die Ergebnisse der Berechnung der JAZ für die Raumwärmeversorgung. Auf der linken Seite wird der Fall für eine typische Heizkurveneinstellung im unsanierten bzw. nicht optimierten Gebäudebestand dargestellt. Auch hier lässt sich unter den unterstellten Außentemperaturen eine Jahresarbeitszahl für die Raumwärmeversorgung mit einer Luft-Wasser-Wärmepumpe von über 3 realisieren. Auf der rechten Seite ist eine Optimierung der Heizkurve unterstellt worden, mit der die Vorlauftemperaturen reduziert werden können. Dies kann nicht nur durch bauliche Sanierungsmaßnahmen, sondern in Abhängigkeit des energetischen Zustands des Gebäudes auch durch eine reine Optimierung der Einstellungen realisiert werden. Aus der Berechnung ergibt sich eine JAZ für die Raumwärmeversorgung von knapp 3,95.

Abbildung 35: Modellierung der Heizungsvorlauftemperatur und resultierende JAZ für den Standort Berlin im Gebäudebestand



Quelle: IREES

Vergleich der Gesamtkosten aus Effizienzmaßnahmen und Wärmeversorgungen

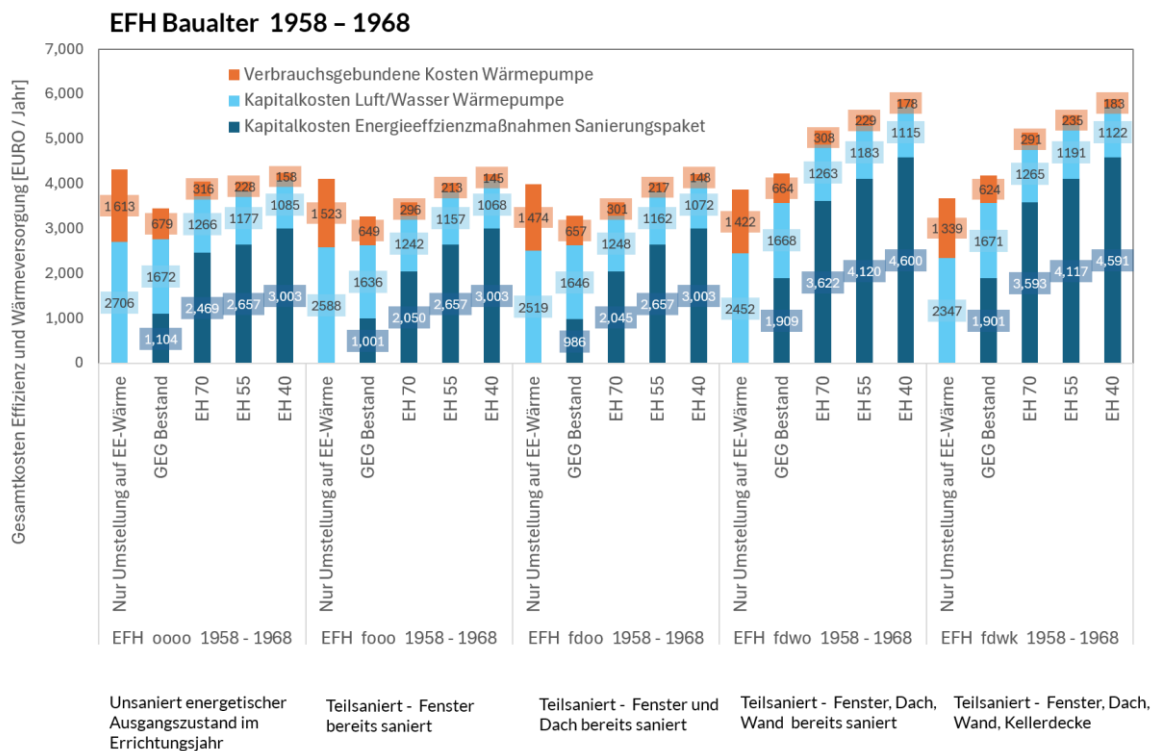
Im letzten Schritt der Analyse werden die Gesamtkosten aus Effizienzmaßnahmen und Wärmeversorgung für die Referenzgebäude verglichen. Die ökonomischen und technischen Rahmenbedingungen werden wie anlog zu Kapitel 4.4.3 angenommen:

- Als Strombezugspreis ist der durchschnittliche Strompreis (WP-Tarif) für den Zeitraum 2025 bis 2045 angesetzt (vgl. Kapitel 3.3).

- Investitionskostenförderung für Wärmepumpen und Effizienzmaßnahmen sind nicht berücksichtigt. Bei den Effizienzmaßnahmen
- Als Abschreibungs-/ Lebensdauer werden für die Wärmeversorgungssysteme 20 Jahre angesetzt, bei den Effizienzmaßnahmen an der Gebäudehülle werden 60 Jahre angesetzt. Der kalkulatorische Zinssatz wird mit 2 % angesetzt.
- Bei den Effizienzmaßnahmen werden nur die energiebedingten Mehrinvestitionen berücksichtigt.

Abbildung 36 zeigt die Ergebnisse für Referenzgebäudeklassen der Einfamilienhäuser der Baualtersklasse 1958 – 1969. Auf diese Baualtersklasse entfallen insgesamt die meisten Wohngebäude in Deutschland und neben der Baualtersklasse 1969 – 1978 auch die meisten Einfamilienhäuser. Dargestellt sind die modellierten Ergebnisse für die Referenzgebäudeklassen der unterschiedlichen Sanierungszustände vor den Maßnahmen: Unsaniert im energetischen Ausgangszustand im Errichtungsjahr sowie teilsaniert nach bereits im Lebenszyklus sanierten Bauteilen. Neben den Varianten Wärmepumpen in Kombination mit umfangreichen Effizienzmaßnahmen auf die definierten Standards wird auch der Fall berechnet, in dem nur die Umstellung der Wärmeversorgung erfolgt. Dabei wird in den unsanierten geringfügig teilsanierten Referenzgebäudeklassen jedoch eine Optimierung der Wärmeverteilung angenommen, mit der ein effizienter Betrieb von Wärmepumpen möglich ist.

Abbildung 36: Jahresgesamtkosten aus Effizienzmaßnahmen und Wärmeversorgung ausgewählte Referenzgebäudeklassen im Einfamilienhausbestand



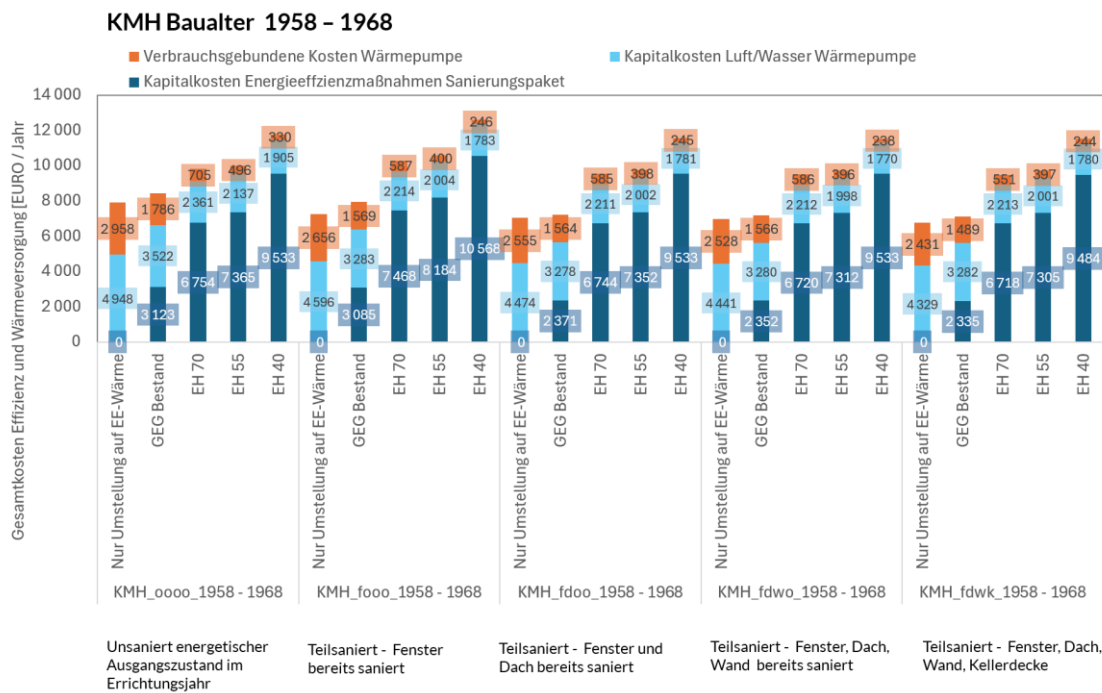
Quelle: Eigene Darstellung IREES

Aus den Ergebnissen für die dargestellte Referenzgebäudeklassen lassen folgende Schlüsse ziehen:

- Im unsanierten Zustand und bei geringer bereits erfolgter Teilsanierung (Fenster bereits erneuert) führt eine umfangreiche Sanierung der Gebäudehülle auf GEG „Bestand“ in Kombination mit der Umstellung auf Wärmepumpen zu den niedrigsten jährlichen Gesamtkosten. Die Kombinationen mit ambitionierten Effizienzstandards EH 70 bis EH 40 liegen für die unsanierte Referenzgebäudeklasse alle in ähnlicher Größenordnung und der Abstand zur wirtschaftlichsten Option ist nicht hoch (ohne Förderung gerechnet).
- Die reine Umstellung auf Wärmepumpen ohne Effizienzmaßnahmen ist für die Referenzgebäudeklassen mit geringen energetischen Ausgangszustand (unsaniert, teilsaniert mit bereits erfolgt Fenstertausch) nicht wirtschaftlich. Die Gesamtkosten liegen aufgrund der hohen Verbrauchskosten deutlich über der Variante GEG „Bestand“ mit Umstellung auf Wärmepumpen. Im unsanierten Zustand sind die Gesamtkosten sogar höher als bei den Varianten mit EH-Effizienzstandards.
- Je besser der energetische Zustand der Gebäude bereits ist (hoher Teilsanierungsgrad), je höher sind auch die Gesamtkosten für die ambitioniertere Sanierungsstandards. Das zeigen die Ergebnisse für die Referenzgebäudeklassen, in denen bereits mehrere Bauteile im Lebenszyklus der Gebäude nachträglich saniert wurde. Für die Einordnung ist zu berücksichtigen, dass die bereits nachträglich sanierten Bauteile der Referenzgebäudeklassen dabei noch nicht den hier untersuchten Zielstandards entsprechen. Die kapitalgebundenen Kosten der Effizienzmaßnahmen liegen für diese Referenzgebäudeklassen insgesamt höhere als für den unsanierten Zustand, da Wirtschaftlichkeitsberechnung die Ohnehin erforderlichen Kosten nicht einfließen. Für die bereits teilsanierten Gebäude müssen Bauteile zum Teil außerhalb des Instandsetzungszyklus vorzeitig ausgetauscht werden, um den jeweiligen Standard zu erreichen. Zudem reichen bei einem niedrigeren Dämmstandard bereits durchgeführten Maßnahmen nicht aus, so diese Bauteile dann komplett erneuert werden müssen.
- Die Ergebnisse verdeutlicht zudem, dass die Umstellung auf Wärmepumpen ohne zusätzliche Effizienzmaßnahmen bei den Gebäuden mit einem hohen Teilsanierungsgrad mit Abstand die geringste Gesamtkosten und damit Wirtschaftlichkeit aufweisen.

Die Ergebnisse und Zusammenhänge lassen sich auch auf andere Referenzgebäudeklassen übertragen, insbesondere auf Gebäude in älteren Gebäudeklasse. Abbildung 37 zeigt die Ergebnisse der Gesamtkosten für Referenzgebäudeklassen der Kleinen Mehrfamilienhäuser ebenfalls in der Baualtersklasse 1958 – 1969. Hier lassen sich die gleichen Erkenntnisse wie für die Einfamilienhäuser ableiten. In jüngeren Gebäudeklassen ist die Umstellung auf Wärmepumpe ohne umfangreiche Effizienzmaßnahmen bereits die wirtschaftlichste Variante. Das liegt an dem bereits höheren energetischen Standard der Gebäudehülle im Errichtungszeitpunkt.

Abbildung 37: Jahresgesamtkosten aus Effizienzmaßnahmen und Wärmeversorgung ausgewählte Referenzgebäudeklassen im Mehrfamilienhäuserbestand

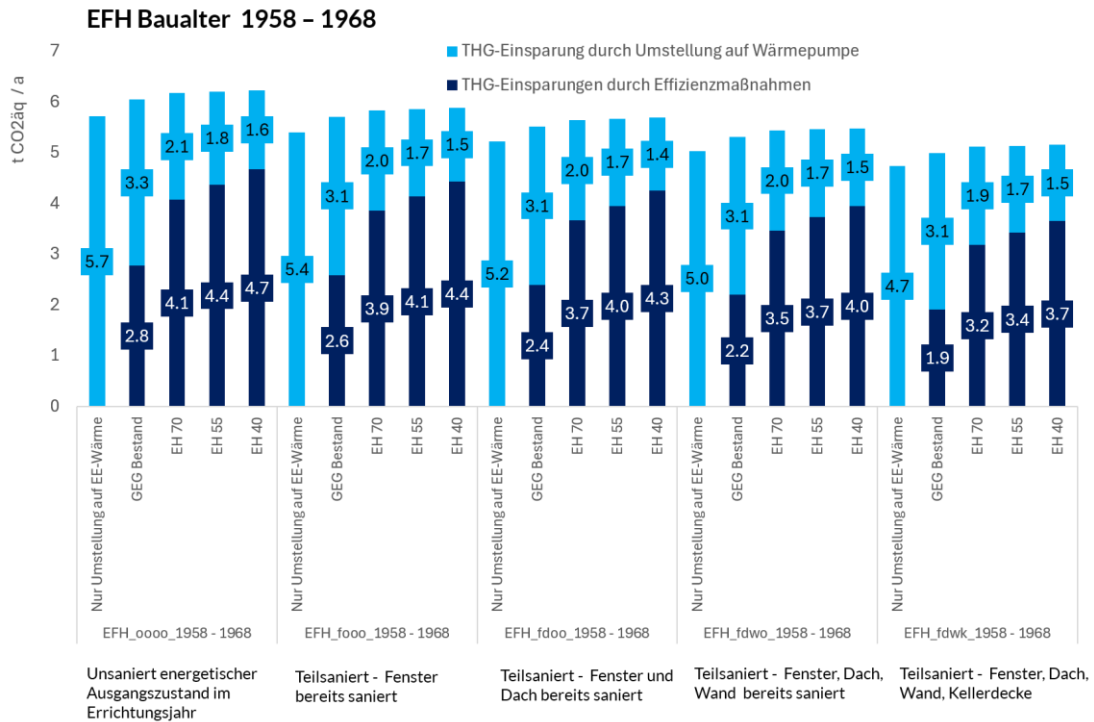


Quelle: Eigene Darstellung IREES

Neben den Gesamtkosten ist entscheidend, welche THG-Emissionsreduktionen sich durch die Varianten realisieren lassen. Grundsätzlich führen ambitionierte Effizienzmaßnahmen in den Gebäuden mit dem schlechtesten energetischen Zustand auch zur höchsten THG-Minderung. Abbildung 38 zeigt die Ergebnisse der direkten THG-Emissionseinsparungen der Raumwärmeversorgung in den Einfamilienhäusern der Baualtersklasse 1958 – 1968. Bei der Berechnung wird unterstellt, dass vor den Maßnahmen die Gebäude mit Gas beheizt wurden. Für Gas wird ein Emissionsfaktor von 202 g/kWh angesetzt, für Strom (Wärmepumpen) wird der dynamische Emissionsfaktor von 75 g/kWh angesetzt (vgl. Kapitel 3.3). Abbildung 38 differenziert die Ergebnisse nach den THG-Einsparungen durch jeweiligen Effizienzmaßnahmen und die THG-Einsparungen durch die Umstellung der Wärmeversorgung auf Wärmepumpen. Mit höheren Effizienzstandard steigt der Anteil der Einsparungen durch Effizienz, da die Wärmepumpen einen geringen Restwärmebedarf dekarbonisieren muss.

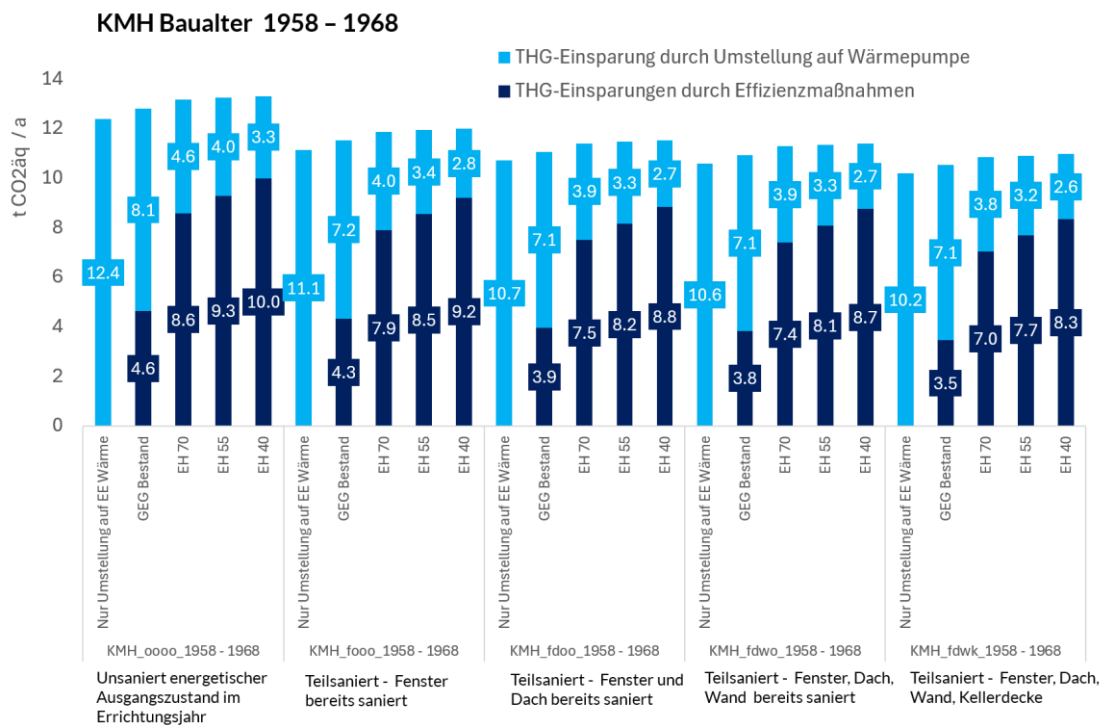
Abbildung 39 zeigt die resultierenden THG-Emissionseinsparungen für die Referenzgebäudeklassen der kleinen Mehrfamilienhäuser in der Baualtersklasse 1958 – 1968.

Abbildung 38: Direkte THG-Emissionseinsparungen Referenzgebäudeklasse Einfamilienhäuser 1958 – 1968



Quelle: Eigene Darstellung IREES

Abbildung 39: Direkte THG-Emissionseinsparungen Referenzgebäudeklasse kleine Mehrfamilienhäuser 1958 – 1968

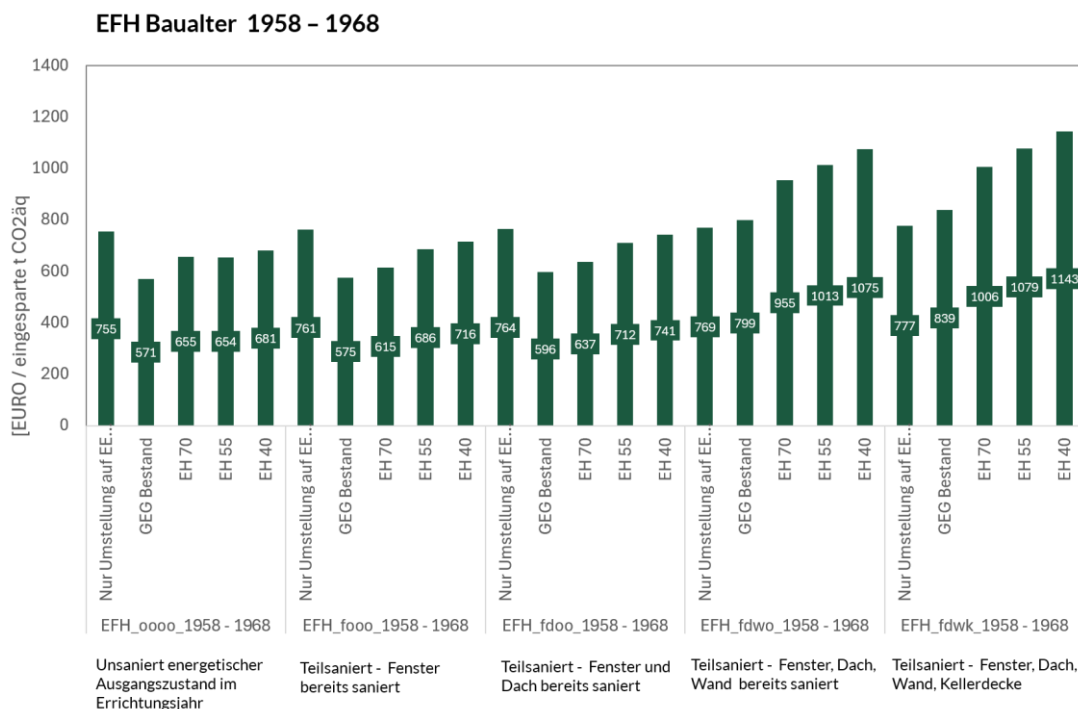


Quelle: Eigene Darstellung IREES

Um die Wirkungseffizienz der Maßnahmen zu bewerten, können aus dem Verhältnis von annuisierten Jahresgesamtkosten und resultierenden THG-Einsparungen Vermeidungskosten ermittelt werden. Dies bezeichnen die Kosten einer vermiedenen Tonne CO₂-Äquivalente. Abbildung 40 zeigt die Ergebnisse für die ausgewählten Referenzgebäude der EFH. Im Vergleich der Varianten aus Effizienzmaßnahmen und Wärmeversorgungsumstellung bestätigen die Ergebnisse die bereits aus den Kostenvergleichen resultierenden Erkenntnisse. Die Vermeidungskosten liegen für diese Referenzgebäudeklassen zwischen 571 EURO /t CO₂äq und 1143 EURO /t CO₂äq.

Neben den direkten Emissionen sind jedoch auch die Gesamtemissionen über den Lebenszyklus in Betracht zu ziehen, die im folgenden Kapitel 4.4.5 betrachtet werden.

Abbildung 40: THG-Vermeidungskosten für die untersuchten Varianten in den ausgewählten Referenzgebäudeklassen der Einfamilienhäuser



Quelle: Eigene Darstellung IREES

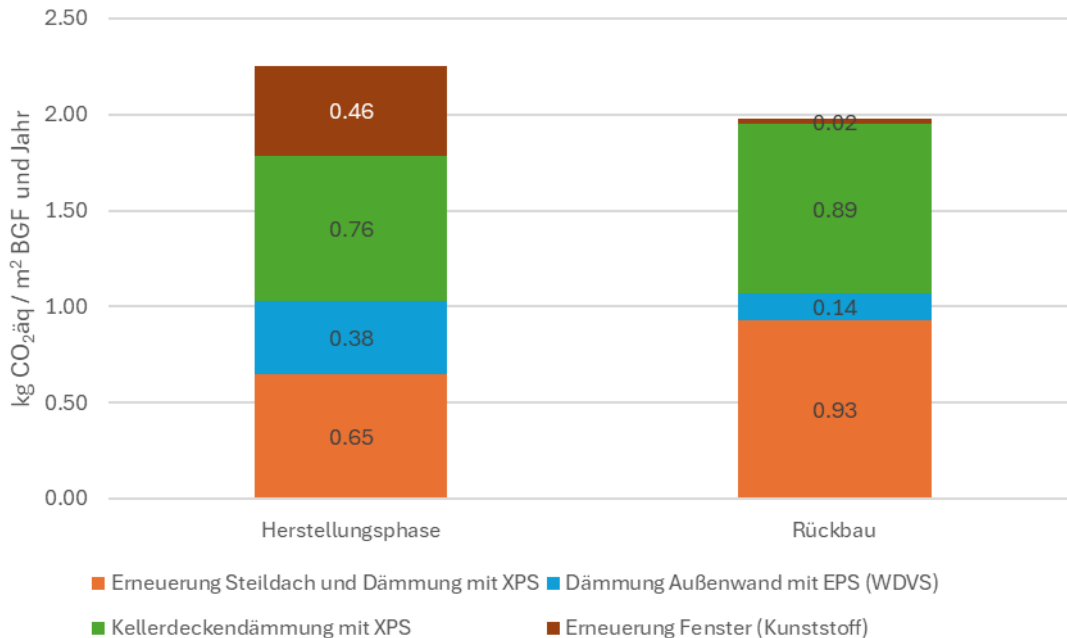
4.4.5 Bewertung der Lebenszyklusemissionen von Sanierungen

In diesem Abschnitt wird, aufbauend auf der vorherigen Betrachtung der Einzelgebäude, für ausgewählte Gebäude eine Lebenszyklusanalyse der Sanierungsmaßnahmen durchgeführt, um die THG-Emissionen über den Lebenszyklus der Sanierungsmaßnahmen hinweg darzustellen. Dabei werden ausgewählte Gebäudetypen, Baualtersklassen sowie vier unterschiedliche Effizienzstandards berücksichtigt.

Abbildung 41 zeigt die spezifischen THG-Emissionen in der Herstellungs- und Rückbauphase einer Komplettisanierung eines Einfamilienhauses der Baualtersklasse 1969–1978 auf EH55-Niveau. Berücksichtigt werden dabei die Maßnahmen Steildacherneuerung mit synthetischer Dämmung (Extrudiertes Polystyrol (XPS)),

Außenwanddämmung mittels Wärmedämmverbundsystem (mit Expandiertem Polystyrol (EPS)), Kellerdeckendämmung mit XPS sowie der Austausch der Fenster.

Abbildung 41: Spezifische THG-Emissionen in der Herstellungs- und Rückbauphase bei Komplettsanierung eines Einfamilienhauses auf EH55-Niveau [Baujahr 1969-1978]



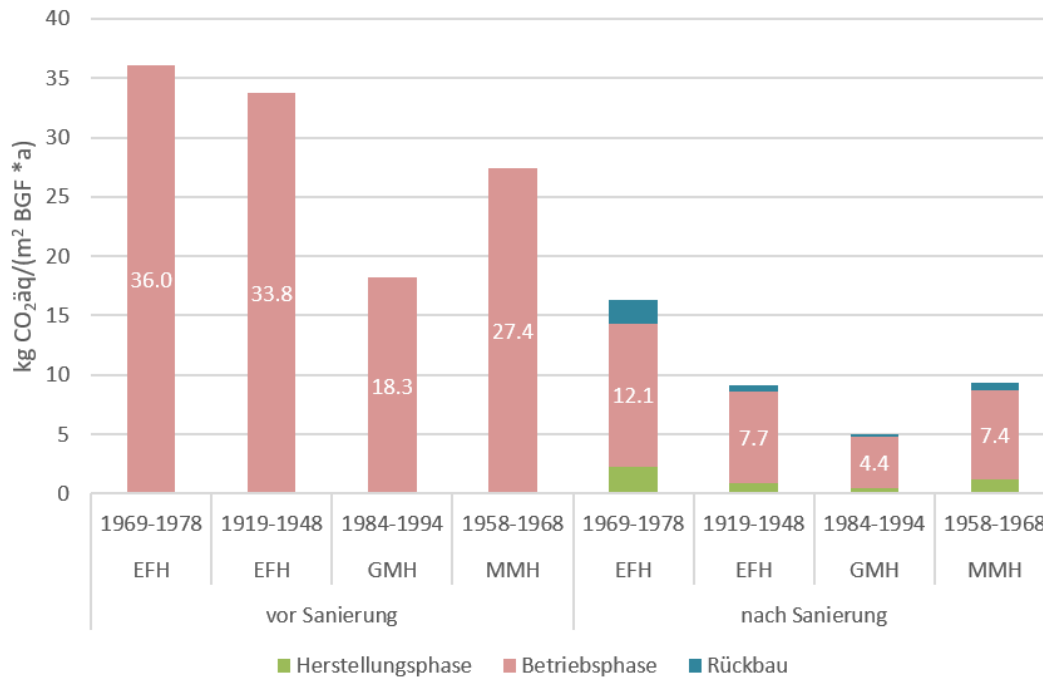
Quelle: Eigene Darstellung IREES

Die Herstellungsphase umfasst die Module A1–A3, während die Rückbauphase die Module C1–C3 gemäß DIN EN 15978 abbildet. Die Ergebnisse zeigen, dass die Dämmung der Kellerdecke mit XPS die höchsten THG-Emissionen verursacht. Ein wesentlicher Anteil entfällt dabei auf die Rückbauphase, insbesondere durch die thermische Verwertung der Materialien am Lebensende. Auch die Steildacherneuerung mit XPS weist vergleichsweise hohe Emissionen auf, die sowohl durch die materialintensive Herstellungsphase als auch durch relevante Beiträge in der Rückbauphase geprägt sind. Die Fenstererneuerung liegt insgesamt auf einem niedrigeren Emissionsniveau, wobei ihr Beitrag in der Rückbauphase nur sehr gering ausfällt. Die geringsten Emissionen verursacht die Dämmung der Außenwand mit EPS.

Abbildung 42 zeigt die spezifischen THG-Emissionen über den Lebenszyklus bei Komplettsanierung verschiedener Gebäudetypen aus unterschiedlichen Baujahren auf EH55-Niveau. Betrachtet werden zwei Einfamilienhäuser in verschiedenen Baujahren sowie ein mittleres Mehrfamilienhaus (MMH) und ein großes Mehrfamilienhaus (GMH), jeweils unter der Annahme einer vollständigen Sanierung auf diesen Effizienzstandard. Abgebildet sind die Emissionen der Herstellungsphase, der Betriebsphase nach der Sanierung sowie der Rückbauphase. Ergänzend wird der Energieverbrauch vor der Sanierung ausgewiesen. Es zeigt sich deutlich, dass die Betriebsphase den größten Anteil an den gesamten THG-Emissionen einnimmt. Dabei wird in der Berechnung angenommen, dass die Wärmeversorgung weiterhin auf Erdgas basiert.

Alle dargestellten Varianten umfassen sowohl synthetische als auch mineralische Dämmstoffe, keine erneuerbaren Rohstoffe. Die Einfamilienhäuser weisen höhere spezifische Emissionen auf, was insbesondere auf die kleinere Bruttogrundfläche zurückzuführen ist.

Abbildung 42: Spezifische THG-Emissionen über den gesamten Lebenszyklus bei Komplettsanierung verschiedener Gebäudetypen auf EH55-Niveau



Quelle: Eigene Darstellung IREES

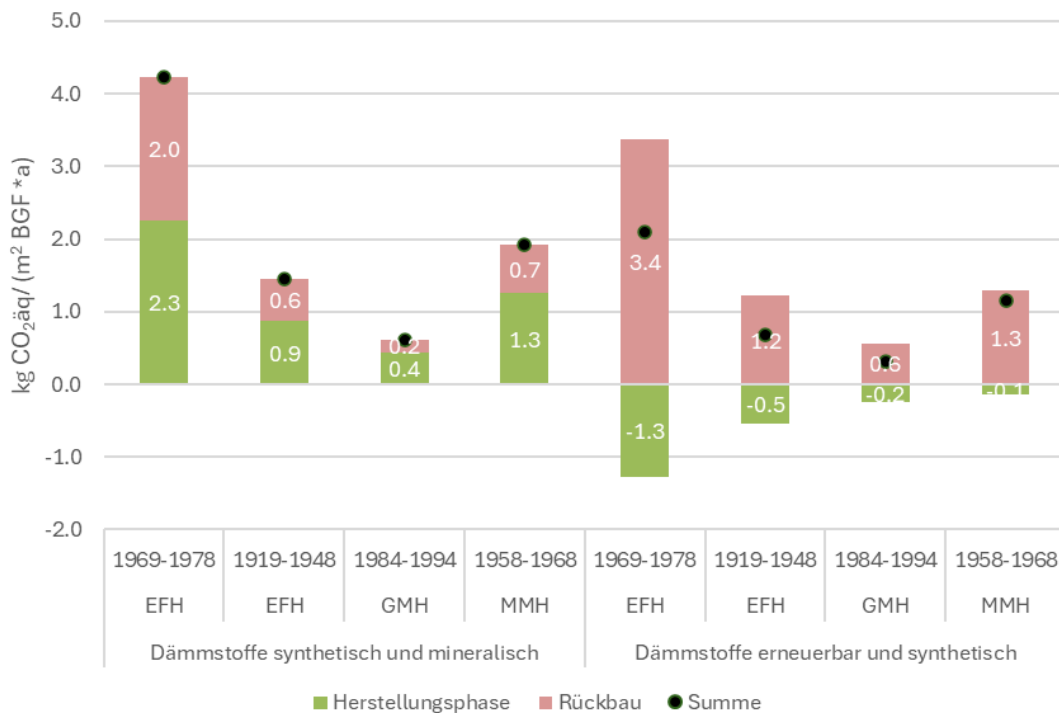
Abbildung 43 zeigt ergänzend die spezifischen THG-Emissionen über den gesamten Lebenszyklus bei der Komplettsanierung verschiedener Gebäudetypen auf EH55-Niveau unter Berücksichtigung unterschiedlicher Dämmstoffarten.

Neben der zuvor gezeigten Variante mit synthetischen und mineralischen Dämmstoffen wird nun auch eine Variante mit erneuerbaren und synthetischen Dämmstoffen dargestellt. Synthetische Dämmstoffe werden in dieser Variante ausschließlich im Perimeterbereich eingesetzt, da es dafür keine erneuerbaren Alternativen gibt. Die Ergebnisse zeigen, dass die Variante mit erneuerbaren und synthetischen Dämmstoffen über den gesamten Lebenszyklus hinweg geringere THG-Emissionen aufweist als die Varianten mit synthetischen und mineralischen Dämmstoffen.

Erneuerbare Dämmstoffe weisen in der Herstellungsphase geringere THG-Emissionen auf als synthetische und mineralische Dämmstoffe, da sie biogenen Kohlenstoff enthalten und damit während des Wachstums CO₂ speichern. Am Lebensende wird dieser gespeicherte Kohlenstoff jedoch wieder freigesetzt, beispielsweise durch Abbau- oder Verwertungsprozesse, sodass sich die Klimawirkung über den gesamten Lebenszyklus entsprechend verschiebt. Negative biogene THG-Emissionen resultieren

vor allem im Holzbau, durch die Speicherung von CO₂ in der Herstellungsphase, am Lebensende (Modul C3) werden diese wieder freigesetzt.

Abbildung 43: Spezifische THG-Emissionen über den Lebenszyklus der Sanierungsmaßnahmen bei Komplettsanierung verschiedener Gebäudetypen auf EH55-Niveau nach verschiedenen Dämmstoffarten



Quelle: Eigene Darstellung IREES

Abbildung 44 zeigt die spezifischen THG-Emissionen über den gesamten Lebenszyklus bei der Komplettsanierung eines Einfamilienhauses auf unterschiedliche Effizienzstandards mit mineralischen und synthetischen Dämmstoffen. Der Vergleich der vier betrachteten Effizienzstandards verdeutlicht, dass die THG-Emissionen in der Herstellungsphase mit steigendem Effizienzniveau zunehmen. Gleiches gilt für die Emissionen in der Rückbauphase. Gleichzeitig sinken die betriebsbedingten Emissionen mit höherem Effizienzstandard deutlich, insbesondere beim Übergang vom GEG-Standard zu EH70. Diese Entwicklung zeigt eine Entkopplung des Rückgangs der THG-Emissionen im Betrieb von denen der Baustoffe.

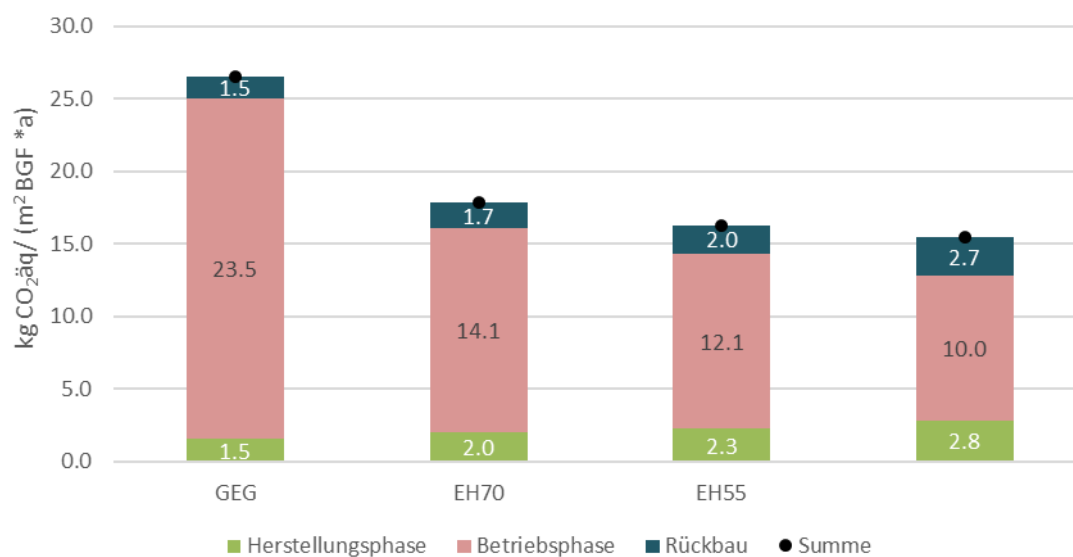
Abbildung 45 zeigt die spezifischen THG-Emissionen über Lebenszyklus bei Nutzung eines Gaskessels.

Abbildung 45 stellt demgegenüber die spezifischen THG-Emissionen über den gesamten Lebenszyklus bei der Komplettsanierung eines Einfamilienhauses unterschiedlicher Effizienzstandards (Baujahr 1969–1978) dar, einschließlich eines

Wechsels auf eine Wärmepumpe unter Berücksichtigung des dynamischen Emissionsfaktors für Strom von 75 g CO₂äq pro kWh.

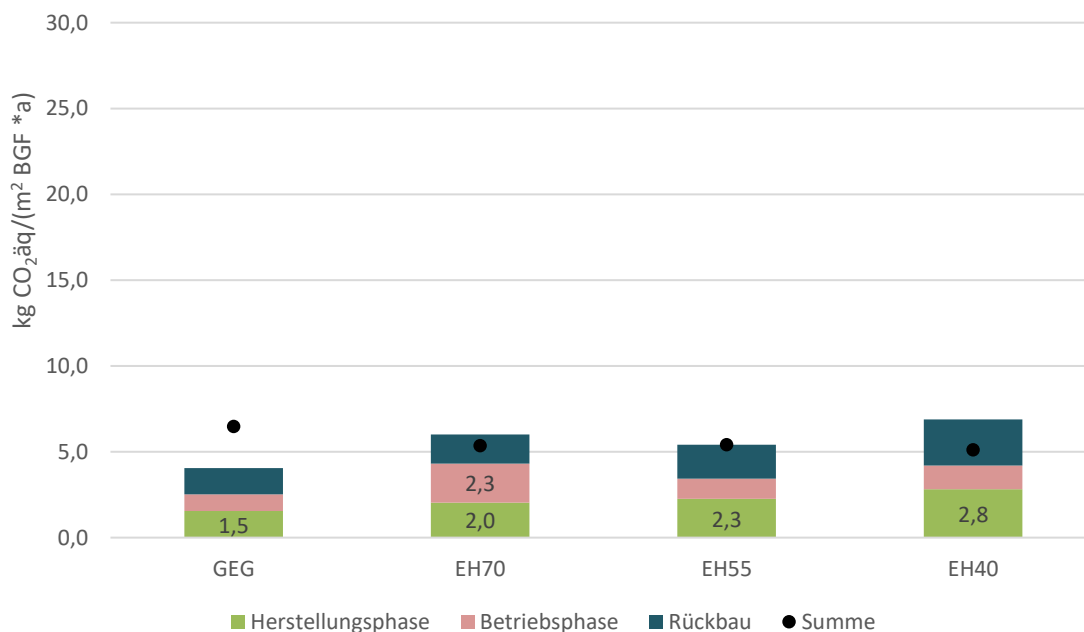
Im Vergleich zur Erdgasvariante sinken die betriebsbedingten Emissionen deutlich, während die relative Bedeutung der grauen Emissionen entsprechend zunimmt.

Abbildung 44: Spezifische THG-Emissionen über den Lebenszyklus der Sanierungsmaßnahmen bei Komplettsanierung eines Einfamilienhauses auf verschiedene Effizienzniveaus [Baujahr 1969-1978]



Quelle: Eigene Darstellung IREES

Abbildung 45: Spezifische THG-Emissionen über den Lebenszyklus der Sanierungsmaßnahmen bei Komplettsanierung eines Einfamilienhauses auf verschiedene Effizienzniveaus inkl. Wechsel auf Wärmepumpe mit dynamischem Emissionsfaktor [Baujahr 1969-1978]



Quelle: Eigene Darstellung IREES

4.5 Zwischenfazit aus der Analyse auf Einzelgebäudeebene

Die Analyse zeigt, dass die Wirtschaftlichkeit energetischer Sanierungsmaßnahmen im Gebäudebestand stark von den jeweiligen Gebäudecharakteristika, dem energetischen Ausgangszustand sowie dem angestrebten Effizienzstandard abhängt. Pauschale Annahmen zu Investitionskosten oder Wirtschaftlichkeit werden der erheblichen Heterogenität des Gebäudebestands daher nur unzureichend gerecht. Gleichzeitig wird deutlich, dass mit zunehmender Sanierungstiefe die Investitionskosten überproportional ansteigen, während die zusätzlichen Energieeinsparungen und damit die wirtschaftlichen Vorteile nicht im gleichen Maße zunehmen.

Aus ökonomischer Sicht weisen Maßnahmen zur Erreichung des Effizienzstandards „GEG Bestand“ im Durchschnitt die günstigsten Einsparkosten auf. Für einen großen Teil der untersuchten Referenzgebäude können diese Maßnahmen wirtschaftlich sein, insbesondere bei höheren zukünftigen Energiepreisen. Ambitioniertere Effizienzhausstandards führen zwar zu deutlich stärkeren Reduktionen von Wärmebedarf und Heizlast, sind jedoch mit erheblich höheren Investitionen verbunden und erreichen unter den gewählten Annahmen häufig erst bei hohen Energiekosten oder durch Förderinstrumente eine vergleichbare Wirtschaftlichkeit.

Die Ergebnisse verdeutlichen zugleich, dass die Bewertung energetischer Sanierungen nicht allein auf Grundlage der eingesparten Endenergie erfolgen sollte. Höhere

Effizienzstandards reduzieren nicht nur den Wärmebedarf, sondern verbessern auch die technischen Voraussetzungen für klimaneutrale Wärmeversorgungssysteme. Insbesondere die deutliche Verringerung der Heizlast und der erforderlichen Vorlauftemperaturen erleichtert den Einsatz von Wärmepumpen und anderen Niedertemperatursystemen und kann deren Investitions- und Betriebskosten senken.

Für die übergeordnete Fragestellung der Dekarbonisierung der Wärmeversorgung ergibt sich daraus ein differenziertes Bild: Eine vollständige Sanierung auf sehr ambitionierte Effizienzstandards ist aus wirtschaftlicher Sicht nicht für alle Gebäude erforderlich und angesichts der erforderlichen Investitionen sowie begrenzter Umsetzungskapazitäten nur eingeschränkt realistisch. Gleichzeitig zeigen die Ergebnisse, dass maßvolle Effizienzmaßnahmen häufig einen wesentlichen Beitrag zur Reduktion von Wärmebedarf und Heizlast leisten und damit die Voraussetzungen für eine breite Umstellung auf klimafreundliche Wärmeversorgungssysteme schaffen können. Die Dekarbonisierung des Gebäudebestands erfordert daher eine integrierte Betrachtung von Energieeffizienz und Wärmeversorgung, bei der die jeweils kosteneffiziente Kombination beider Handlungsfelder im Vordergrund steht.

5 Modellierung von Zielszenarien für den Gebäudesektor in Deutschland

5.1 Zielsetzung

Aufbauend auf den Erkenntnissen aus Kapitel 4 werden im nächsten Schritt verschiedene Szenarien zur Analyse der sektoralen Auswirkungen unterschiedlicher Sanierungsstrategien im Gebäudebestand entwickelt. Im Mittelpunkt stehen dabei Variationen in Sanierungsaktivität und Sanierungstiefe sowie deren Auswirkungen auf Energienachfrage, Kosten im Gebäudesektor und Emissionspfade.

Ziel der Szenarien ist es, die Implikationen unterschiedlicher Transformationspfade im Gebäudebereich bis 2045 zu untersuchen. Beide Szenarien sind dabei so ausgestaltet, dass gemäß den Vorgaben des KSG im Jahr 2045 ein klimaneutraler Gebäudesektor erreicht wird, das heißt Netto-Null-Emissionen im Gebäudebestand vorliegen.

5.2 Vorgehen

In diesem Kapitel werden zwei Szenarien für den Gebäudebestand in Deutschland dargestellt. Die Szenarien unterscheiden dabei systematisch zwischen Sanierungsaktivität und Sanierungstiefe: Die Sanierungsaktivität beschreibt grundsätzlich, ob und in welchem Umfang Investitionsentscheidungen der Eigentümerinnen und Eigentümer zur energetischen Sanierung getroffen werden. Sie umfasst dabei sowohl Maßnahmen an der Gebäudehülle als auch den Heizungstausch.

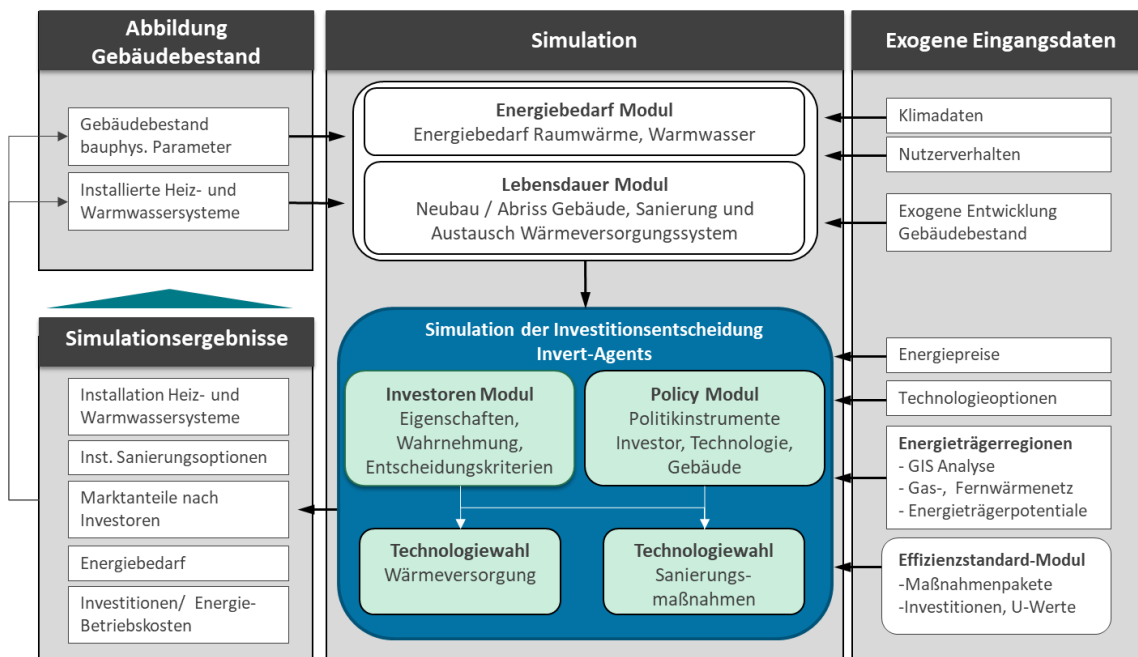
5.2.1 Methodisches Vorgehen – Modellbeschreibung

Die Berechnung der Szenarien erfolgt mit dem Modell Invert/ee-lab. Das Modell ist ursprünglich an der TU Wien entwickelt worden und wird gemeinsam mit dem IREES und Fraunhofer ISI in vielen nationalen und europäischen Projekten eingesetzt und konstant weiterentwickelt, so auch seit vielen Jahren für die Modellierung des Gebäudesektors in den nationalen Treibhausgasprojektionen (Projektionsbericht) (Wehnmann u. a. 2026). Abbildung 46 zeigt die Struktur des Modells. Eine detaillierte Modellbeschreibung findet sich in den Dissertationen von (Müller 2015) und (Steinbach 2016), auf die für eine umfassende Beschreibung der Methodik verwiesen wird. An dieser Stelle werden die zentralen Modellzusammenhänge mit Bezug auf die Modellierung der Investitionsentscheidungen in Wärmeversorgungssysteme und Effizienzmaßnahmen sowie die Modellierung der Aktivitätsraten – Sanierungsrate und Heizungstauschrate dargestellt.

Methodisch stellt Invert/ee-Lab ein dem Bottom-up-Ansatz folgendes, sozio-technoökonomisches, agentenbasiertes Simulationsmodell dar, mit dem Optionen des Energiebedarfs und dessen Deckung für Wärme von Wohn- und Nichtwohngebäuden ermittelt und die Auswirkungen energie- und klimapolitischer Instrumente in Jahresschritten abgebildet werden können. Mit dem Modell wird zum einen der Gebäudebereich disaggregiert über eine detaillierte thermische Simulation von Referenzgebäuden unter Berücksichtigung der jeweiligen bauphysikalischen und technologischen Parameter abgebildet. Zum anderen wird die

Investitionsentscheidung in Technologien und Effizienzmaßnahmen unter Berücksichtigung von investorenspezifischen Entscheidungskalkülen und Hemmnissen sowie Energieträgerpotentialen und Politikinstrumenten modelliert. Eine ausführliche Modellbeschreibung findet sich im Anhang.

Abbildung 46: Struktur des Simulationsmodells Invert/ee-Lab



Quelle: Steinbach 2016

Lebensdauer-Modul – Modellierung der Aktivitätsraten (siehe Steinbach 2016: 82-83)

Das Lebensdauer-Modul bestimmt für jeden Simulationsschritt (Jahresschritt) den Anteil der Gebäude, bei denen eine Sanierung durchgeführt wird, sowie den Anteil der Gebäude, bei denen ein Austausch des Wärmeversorgungs-systems stattfindet. Des Weiteren wird der Abriss und Neubau von Gebäuden ebenfalls in Abhängigkeit des Gebäudealters ermittelt (Kranzl u. a. 2013). Die Berechnung erfolgt für jedes Referenzgebäude in Abhängigkeit des Alters der Gebäudebauteile und Technologien mittels einer *Weibull-Verteilung*, welche das gängigste statistische Modell zur Beschreibung der Ausfallwahrscheinlichkeit technischer Systeme darstellt (Lawless 2003). Da sich die Lebensdauer von Gebäudebauteilen und Wärmeversorgungs-systemen signifikant unterscheiden, werden die jeweiligen Anteile unabhängig voneinander berechnet. Die relevanten Eingabedaten für die Simulation sind das Installationsjahr der Wärmeversorgungs-systeme und das Alter der Bauteile. Da diese Informationen in der Regel nicht jahresscharf vorliegen, sondern Daten zu Baualtersklassen Verwendung finden, werden bei der Berechnung das früheste und jüngste Installations- bzw. Baujahr berücksichtigt. Des Weiteren werden typische Lebensdauer Die Kenngröße der *Weibull-Verteilung* ist die charakteristische Lebensdauer (L_m), bei denen eine Ausfallrate von 63,2 Prozent auftritt.

$$S_{bu,m,T} = \frac{\sum_{t=T-\hat{Y}}^{T-\check{Y}} 1 - e^{-\left(\frac{t}{L_m}\right)^k}}{\sum_{t=T-\hat{Y}}^{T-\check{Y}} 1 - e^{-\left(1-\frac{t}{L_m}\right)^k}}$$

m *Maßnahme: Sanierung der Gebäudehülle/
Wärmeversorgungssystemtausch*

T *Simulationsjahr*

$S_{bu,m,T}$ *Anteil der Gebäude, die in bu zum Zeitpunkt T eine Maßnahme durchführen*

\hat{Y} *Frühestes Installationsjahr/Baujahr $< T$*

\check{Y} *Spätestes Installationsjahr/Baujahr $< T$*

L_m *Charakteristische Lebensdauer*

k *Formparameter der Verteilung $k = 5,5$*

Basierend auf der charakteristischen Lebensdauer und dem Formfaktor (k), welcher die Änderung der Ausfallwahrscheinlichkeit über die Zeit definiert, können Baualtersklassen und technologiespezifische Parameter definiert werden (Kranzl u. a. 2013) kalibrieren beide Parameter anhand der Analysen von (Wüest 1994; Meyer u. a. 1994)¹⁷. Der Abriss von Gebäuden (Gebäudeabgang) wird ebenfalls als anteiliger Wert jedes Referenzgebäudesegments mittels der Weibull-Verteilung ermittelt, wobei die Erhöhung der charakteristischen Lebensdauer durch nachträgliche Sanierungsmaßnahmen berücksichtigt wird.

$$S_{bu,m,T} = \frac{\sum_{t=T-\hat{Y}}^{T-\check{Y}} 1 - e^{-\left(\frac{t}{L_{bu}} + 0,5 \cdot \Sigma L_{reno}\right)^k}}{\sum_{t=T-\hat{Y}}^{T-\check{Y}} 1 - e^{-\left(t - \frac{1}{L_{bu}} + 0,5 \cdot \Sigma L_{reno}\right)^k}}$$

L_{reno} *Charakteristische Lebensdauer der erneuerten Gebäudebauteile*

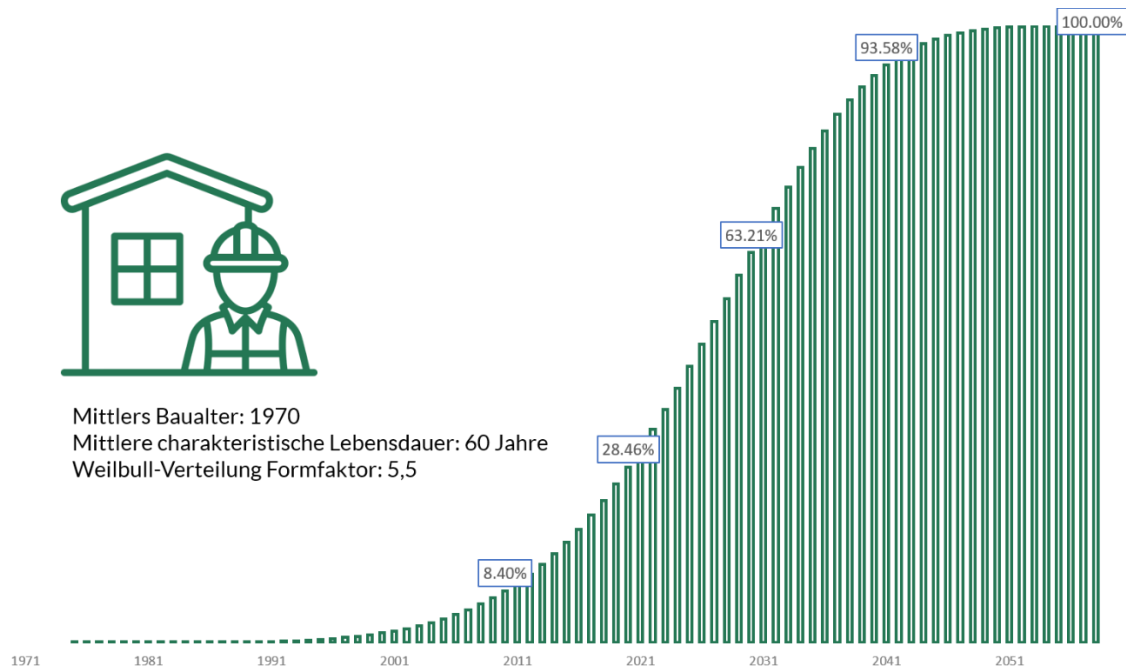
L_{bu} *Charakteristische Lebensdauer des Referenzgebäudesegments*

Die Neubauaktivität ergibt sich aus der Differenz von Abriss zu der exogen vorgegebenen Entwicklung des Gebäudebestandes über die Zeit.“

Im Falle der Sanierung der Gebäudehülle können für verschiedene Bauteile unterschiedliche Altersverteilung bzw. auch unterschiedliche Lebensdauern angesetzt werden, um verschiedene Reinvestitionszyklen abzubilden. In der Modellierung kumulierten Austausch- bzw. Sanierungsrate innerhalb eines Referenzgebäudesegments wird daher die mittlere charakteristische Lebensdauer und das mittlere Alter aus den einzelnen Bauteilen berücksichtigt.

¹⁷ Die Ausfallrate von Gebäudebauteilen und Wärmeversorgungssystemen nimmt über die Zeit zu ($k > 1$). Auf Grundlage der Kalibrierung von (Kranzl u. a. 2013) wird der k -Parameter in der weiteren Analyse einheitlich auf 5,5 gesetzt.

Abbildung 47: Beispielhafte Darstellung der berechneten kumulierten Austausch- / Sanierungsraten



Quelle: Eigene Darstellung IREES

Modellierung der Investitionsentscheidung und Technologiewahl

Während das Lebensdauer-Modul das „Wann“ modelliert, wird das „Was“ – Wahl der Effizienzmaßnahmen und Wahl der Wärmeversorgungssystem im agentenbasiertes Investitionsentscheidungsmodell modelliert (vgl. Steinbach 2016, 83ff): Dies ermöglicht, unterschiedliche Investoreninstanzen zu definieren und die Technologiewahl unter Berücksichtigung individueller Entscheidungskalküle und Hemmnisse zu simulieren. Grundlage der Investitionsentscheidung sind verschiedene ökonomische und nicht-ökonomische Kriterien, die für jede Kombination aus Investoren, Referenzgebäudesegmenten und Technologieoptionen spezifisch bestimmt werden. Die Eigenschaften einer Investoreninstanz dienen dabei als Eingangsdaten: Sie legen einerseits über Gewichtungen die Relevanz der einzelnen Entscheidungskriterien fest und beeinflussen andererseits deren konkrete Ausprägung. Auf diese Weise unterscheiden sich sowohl die Art der Investitionsentscheidung als auch die Wahrnehmung der Technologieoptionen und ihrer Parameter. Für jede verfügbare Technologieoption werden in jedem Referenzgebäudesegment aus Sicht jeder Investoreninstanz Nutzwerte berechnet; auf dieser Grundlage werden die Marktanteile mit einem *Nested-Logit-Modell* ermittelt. Für eine detaillierte Beschreibung wird auf (Steinbach 2016) verwiesen.

Berücksichtigung von Energiepreisprojektionen, Technologiekosten und weiteren Rahmendaten

Die Szenarienanalysen berücksichtigen die in Kapitel 3.3 dargestellten Rahmendaten, also Energiepreise (als Endverbraucherpreise) sowie Investitionskosten für Wärmeversorgungssysteme und Sanierungspakete. Zudem werden die in Kapitel 3.2 beschriebenen Politikinstrumente berücksichtigt. Hinsichtlich der Umsetzung des GEG

werden zur Zielerreichung einige Anpassungen vorgenommen: Gemäß GEG ist der Einbau von Gaskesseln bis einschließlich 2027 zulässig. Voraussetzung ist jedoch, dass diese ab 2029 anteilig mit Biomethan betrieben werden. Ab 2028 dürfen ausschließlich Gaskessel neu installiert werden, die bereits für einen Betrieb mit mindestens 65 % Biomethan ausgelegt sind. Ab dem Jahr 2045 ist ein vollständig biomethanbasierter Betrieb vorgesehen. Abweichend von den Vorgaben des GEG werden Wasserstoff-Ausbauregionen in den Szenarien nicht berücksichtigt. Entsprechend wird die im GEG vorgesehene Möglichkeit, in diesen Regionen auch nach 2028 neue Gasheizungen zu installieren, nicht abgebildet. Im Mit-Maßnahmen-Szenario (MMS) der Bundesregierung werden Wasserstoff-Ausbauregionen dagegen berücksichtigt (siehe Kapitel 4.5).

Die Szenarien umfassen – anders als im nationalen Projektionsbericht – auch die Gebäude des Industriesektor. Diese werden im Rahmen der KSG-Berichterstattung nicht dem Gebäudesektor zugerechnet und sind daher in den Projektionen des MMS nicht enthalten. Da die Anforderungen der Europäischen Gebäuderichtlinie (EPBD) grundsätzlich auch Nichtwohngebäude des Industriesektors adressieren, werden diese Gebäude in den vorliegenden Szenarien berücksichtigt. Dadurch liegt der Endenergieverbrauch in den hier dargestellten Szenarien über dem Niveau des MMS.

5.2.2 Definition der untersuchten Szenarien

Niedrigeffizienzzenario

Im Niedrigeffizienzzenario werden die im Modell hinterlegten Referenzgebäudeklassen im Falle einer Sanierungsentscheidung jeweils auf den gesetzlichen Mindeststandard gemäß GEG saniert – „GEG Bestand“ (vgl. Ergebnisse der Einzelgebäudebetrachtung in Kapitel 4). Gleichzeitig wird in dem Szenario eine geringe Sanierungsrate in Bezug auf die Hüllensanierung im Vergleich zum Hocheffizienzzenario angenommen. Diese Kombination aus Mindeststandard bei Sanierungen und reduzierter Sanierungsaktivität wird gewählt, um die Auswirkungen eines entsprechend restriktiven Entwicklungspfads auf das Energiesystem abzuschätzen.

Im Niedrigeffizienzzenario wird im Vergleich zum Hocheffizienzzenario von einer längeren Bauteillebensdauer ausgegangen, wodurch die Sanierungsaktivität insgesamt sinkt. Für die charakteristische Lebensdauer als Parameter der Weibull-Verteilung wird für die Fassaden 70 Jahre und für Fenster 50 Jahre angenommen.

Hocheffizienzzenario

Im Hocheffizienzzenario wird eine hohe Sanierungstiefe (EH55-Niveau) bei gleichzeitig erhöhter Sanierungsaktivität erreicht. Die Gebäude werden umfassend saniert, sodass Energieeffizienz- und Treibhausgasreduzierungsspotenziale weitgehend ausgeschöpft werden. Das EH55-Niveau wird gewählt, um eine realistische höhere Sanierungstiefe abzubilden. Gemäß dem BEG-Evaluationsbericht stellt das EH 55 im Jahr 2023 bei den Vollsanierungen den am häufigsten realisierten Effizienzstandard dar (Heinrich u. a. 2025).

Im Modell wird die erhöhte Sanierungsaktivität dabei insbesondere über eine kürzere bzw. „normale“ Bauteillebensdauer abgebildet, wodurch sich die Sanierungszyklen verkürzen und Gebäude häufiger in einen Sanierungsprozess eintreten. Die Investitionsentscheidungen der Eigentümerinnen und Eigentümer orientieren sich weiterhin an den Lebenszyklen der Bauteile, jedoch führt die kürzere Lebensdauer dazu, dass energetische Sanierungen früher und damit insgesamt häufiger erfolgen. Hierbei für die charakteristische Lebensdauer der Weibull-Verteilung für alle Bauteile 50 Jahre angesetzt. Dadurch steigt die Sanierungsrate im Vergleich zum Niedrigeffizienzscenario, während die Sanierungstiefe auf EH55-Niveau konstant bleibt. Mit Bezug auf den Heizungstausch sind die Annahmen in beiden Szenarien identisch.

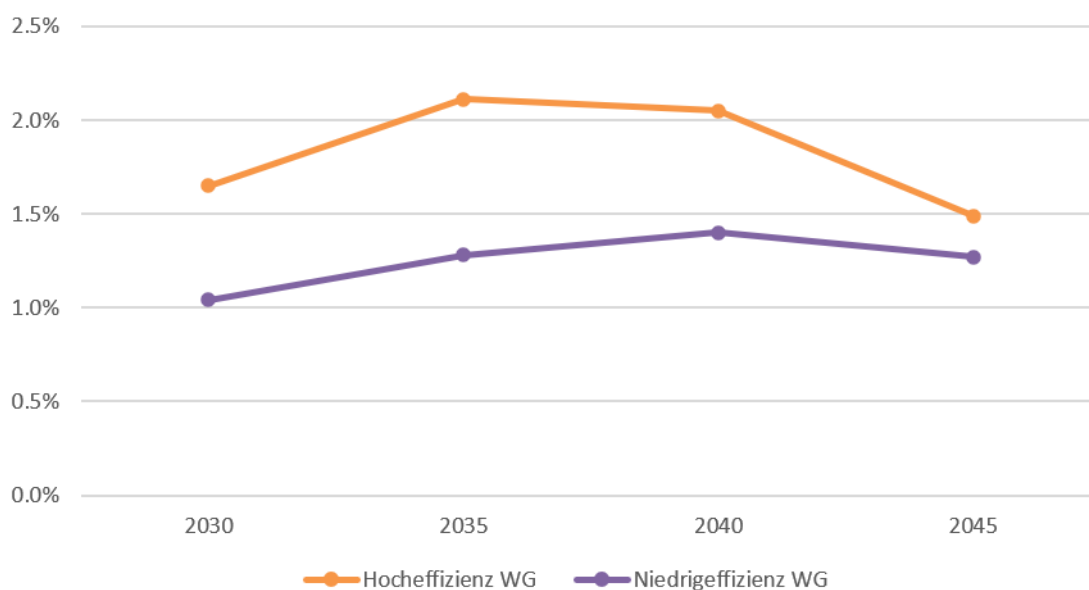
5.3 Zentrale Ergebnisse der Szenarienmodellierung

Im Ergebnis werden die Entwicklung der Sanierungsraten, des Nutzwärmebedarfs, des Endenergieverbrauchs und der THG-Emissionen sowie die Marktanteile der neu installierten Wärmeversorgungssysteme und die Kostenentwicklung über den Betrachtungszeitraum 2024 bis 2045 dargestellt.

5.3.1 Entwicklung der Sanierungsrate

Abbildung 48 zeigt die Sanierungsrate für Wohngebäude in beiden Szenarien. Im Hocheffizienzscenario steigt die Sanierungsrate bis 2035 auf 2,1 % an und nimmt anschließend wieder leicht ab. Im Niedrigeffizienzscenario bleibt die Sanierungsrate hingegen über den gesamten Betrachtungszeitraum relativ konstant und liegt zwischen 1 % und 1,5 %. Für Nichtwohngebäude ist die Rate im Hocheffizienzscenario höher und steigt von 1,1 % im Jahr 2030 auf 2,6 % in 2045. Im Niedrigeffizienzscenario steigt diese von 0,5 % in 2030 auf 1,1 % in 2045.

Abbildung 48: Sanierungsrate für Wohngebäude in den beiden Szenarien



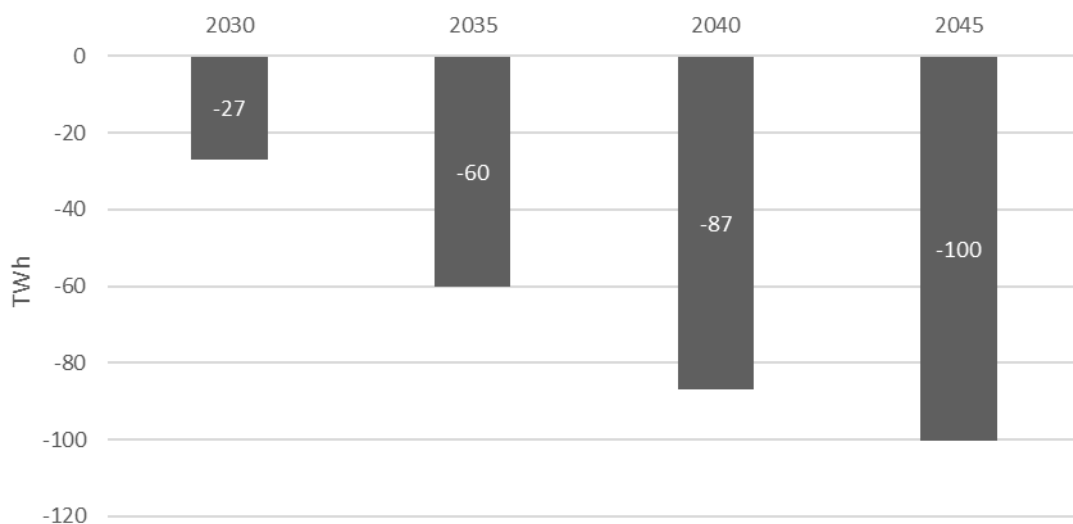
Quelle: Eigene Darstellung IREES

Die Sanierungsraten im Niedrigeffizienzzenario decken sich weitgehend mit den in Kapitel 3 analysierten Studien und bilden damit lediglich eine moderat gesteigerte Entwicklung gegenüber dem heutigen Niveau ab. Das Hocheffizienzzenario weist hingegen deutlich höhere Sanierungsraten auf und orientiert sich damit stärker an ambitionierten Zielszenarien anderer Studien.

5.3.2 Entwicklung des (effektiven) Nutzwärmebedarfs

Abbildung 49 zeigt die Differenz des Nutzwärmebedarfs zwischen dem Hocheffizienz- und Niedrigeffizienzzenario für die Jahre 2030, 2040 und 2045. Der Nutzwärmebedarf beschreibt den Energiebedarf der Gebäude für Heizung, Warmwasser. Verluste in den Wärmeversorgungs- und Verteilersystemen sind dabei nicht berücksichtigt, ebenso wenig wie Umweltwärme. Die Berechnung des Nutzwärmebedarfs erfolgt gemäß den Anforderungen der DIN 18599.

Abbildung 49: Differenz des Nutzwärmebedarfs der beiden Szenarien



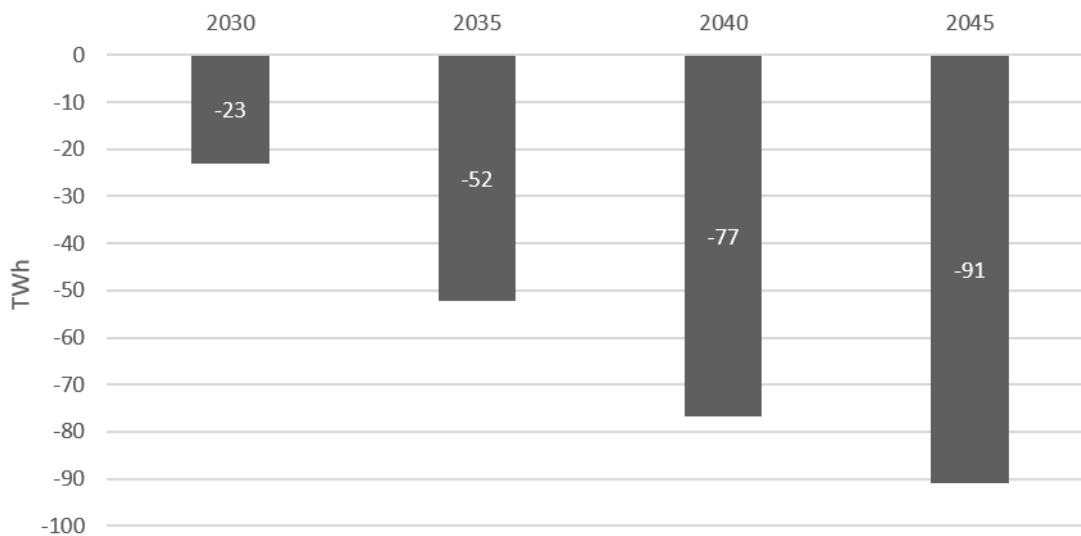
Quelle: Eigene Darstellung IREES

Im Niedrigeffizienzzenario liegt der Nutzwärmebedarf in allen betrachteten Jahren deutlich über dem Niveau des Hocheffizienzzenarios. Die Differenz wächst bis 2045 auf bis zu 100 TWh an. Ursache hierfür ist die geringere Sanierungsaktivität im Niedrigeffizienzzenario. Im Hocheffizienzzenario führen umfassendere Sanierungsmaßnahmen zu deutlich reduzierten Energiebedarfen der Gebäude.

Abbildung 50 zeigt ergänzend die Differenz des *effektiven* Nutzwärmebedarfs zwischen den Szenarien für die Jahre 2030, 2040 und 2045. Im Unterschied zum zuvor dargestellten normbasierten Nutzwärmebedarf nach DIN 18599 berücksichtigt dieser Ansatz Nutzungseinflüsse wie Rebound- und Preboundeffekt und ist anhand des realen Verbrauchs kalibriert (vgl. Kapitel 0).

Die Differenz des effektiven Nutzwärmebedarf liegt unter dem nach Norm berechneten Wert und steigt bis 2045 auf 91 TWh. In energetisch sanierten Gebäuden wird trotz geringeren theoretischen Bedarfs tendenziell mehr Energie verbraucht, z. B. durch verändertes Nutzerverhalten (von Manteuffel und Offermann 2022).

Abbildung 50: Differenz des effektiven Nutzwärmebedarfs der beiden Szenarien



Quelle: Eigene Darstellung IREES

5.3.3 Entwicklung des Endenergieverbrauchs nach Energieträgern und der Treibhausgasemissionen

Abbildung 51 zeigt die Entwicklung des Endenergieverbrauchs nach Energieträgern sowie die entsprechenden THG-Emissionen in beiden Szenarien für die Jahre 2030, 2040 und 2045.

Im Gegensatz zum Nutzwärmebedarf berücksichtigt der Endenergieverbrauch nicht nur die reine Nutzenergie, sondern auch Verluste der Wärmeerzeuger und Verteilung. Umweltenergiequellen wie Umgebungswärme oder Solarthermie gehen dabei nicht direkt in die Endenergie ein, sondern reduzieren den erforderlichen Endenergieeinsatz. Im Hocheffizienzscenario ergibt sich insgesamt ein etwas geringerer Endenergieverbrauch als im Niedrigeffizienzscenario. Dies ist auf die höhere Sanierungsaktivität und die daraus resultierenden Effizienzgewinne zurückzuführen. Der Effekt zeigt sich über alle Energieträger hinweg. Gleichzeitig fällt der Unterschied im Endenergieverbrauch zwischen den beiden Szenarien geringer aus als beim Nutzwärmebedarf. Dies liegt daran, dass sich parallel auch der Einsatz von Umweltenergie – insbesondere durch Wärmepumpen – deutlich unterscheidet. Ein Teil des reduzierten Nutzwärmebedarfs wird somit durch einen höheren Anteil an genutzter Umweltenergie kompensiert, sodass sich die Unterschiede nicht vollständig im Endenergiesystem widerspiegeln.

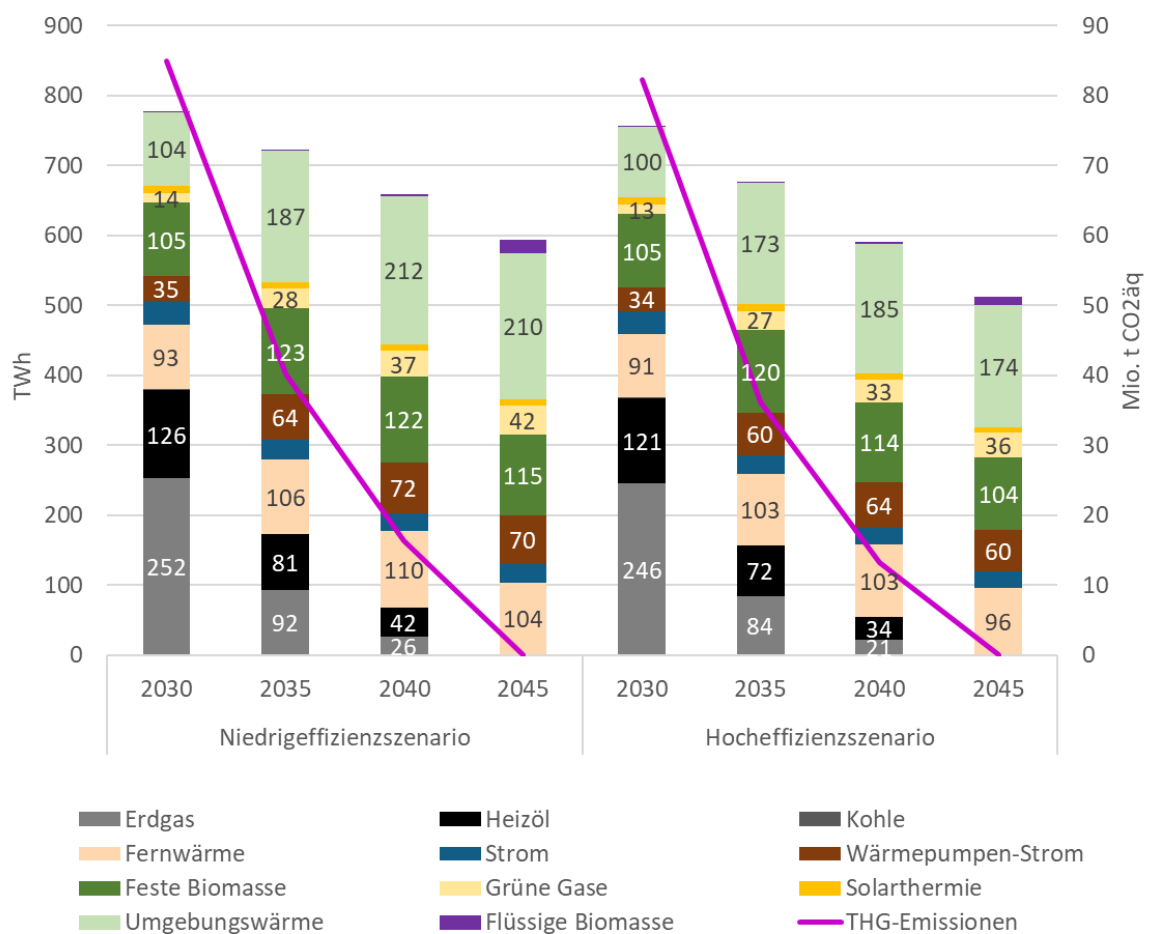
Im Hocheffizienzscenario sinkt der Endenergieverbrauch auf 756 TWh (2030), 591 TWh (2040) und 513 TWh (2045). Im Niedrigeffizienzscenario beträgt er 776 TWh (2030), 659 TWh (2040) und 594 TWh (2045). Auch bei den THG-Emissionen zeigen sich Unterschiede: Im Niedrigeffizienzscenario betragen sie 85 Mio. t CO₂-Äq (2030) und im Hocheffizienzscenario 82 Mio. t CO₂-Äq. Für das Jahr 2040 liegen die Emissionen bei 16 Mio. t CO₂-Äq im Niedrigeffizienzscenario und 13 Mio. t CO₂-Äq im Hocheffizienzscenario.

Kumuliert ergeben sich für den betrachteten Zeitraum THG-Emissionen von rund 1.216 Mio. t CO₂-Äq im Niedrigeffizienzscenario gegenüber rund 1.160 Mio. t CO₂-Äq im Hocheffizienzscenario.

Der Einbezug von Industriegebäuden hat einen relevanten Einfluss auf die ausgewiesenen Energieverbräuche und THG-Emissionen. Ohne Berücksichtigung der Industriegebäude läge der Endenergieverbrauch im Niedrigeffizienzscenario im Jahr 2030 um 43 TWh niedriger; die CO₂-Emissionen würden um 5,3 Mio. t CO₂äq geringer ausfallen. Im Jahr 2045 ergäbe sich eine Reduktion des Endenergieverbrauchs um 30 TWh.

Im Hocheffizienzscenario würde der Endenergieverbrauch ohne Industriegebäude im Jahr 2030 um 41 TWh niedriger ausfallen. Die CO₂-Emissionen lägen um 5,1 Mio. t CO₂äq unter den ausgewiesenen Werten. Für das Jahr 2045 ergäbe sich eine Verringerung des Endenergieverbrauchs um rund 23 TWh.

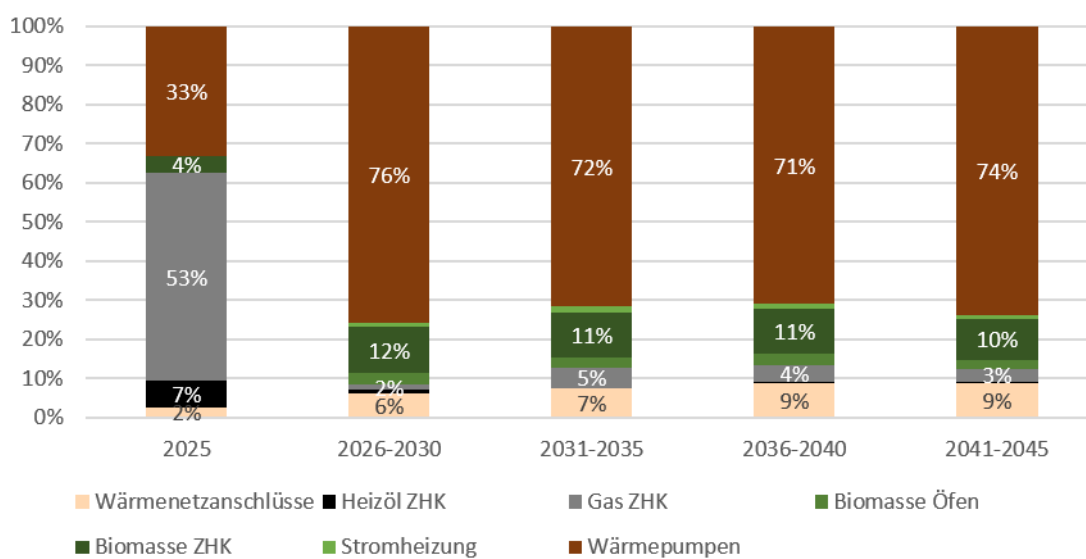
Abbildung 51: Entwicklung des Endenergieverbrauchs nach Energieträgern und der THG-Emissionen in beiden Szenarien



Quelle: Eigene Darstellung IREES

Abbildung 52 zeigt abschließend die Marktanteile der neu installierten Wärmeversorgungssysteme für die Jahre 2025, 2030, 2040 und 2045 für beide Szenarien, da die Unterschiede zwischen den Szenarien nicht signifikant sind. In beiden Szenarien dominieren Wärmepumpen und erreichen die überwiegenden Marktanteile bei allen neu installierten Systemen. Gas- und Ölkessel sind im Jahr 2025 noch verbreitet; danach sind aufgrund der Vorgaben im GEG nur noch Gaskessel zulässig, die Biomethan bzw. grüne Gase nutzen. Der Zubau von Biomasse- und Fernwärmesystemen erfolgt in beiden Szenarien kontinuierlich.

Abbildung 52: Marktanteile neu installierter Wärmeversorgungssysteme in beiden Szenarien [5-Jahres-Mittelwerte]



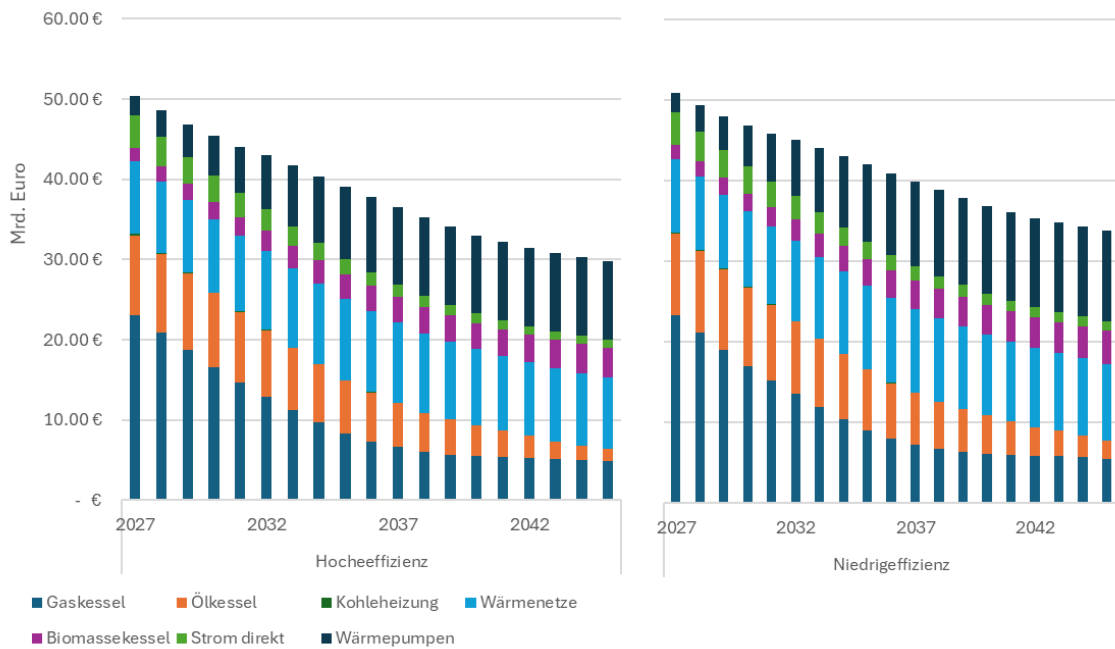
Quelle: Eigene Darstellung IREES

5.3.4 Entwicklung der ökonomische Perspektive

Abbildung 53 zeigt die Entwicklung der laufenden Betriebskosten der Wärmeversorgung für den Wohngebäudebestand in beiden Szenarien im Zeitraum von 2027 bis 2045 (über alle Gebäude in Deutschland aufsummiert) im Vergleich.

Dabei ist in beiden Szenarien ein kontinuierlicher Rückgang der laufenden Energiekosten bis zum Jahr 2045 zu beobachten. Gleichzeitig liegen die Energiekosten im Niedrigeffizienzscenario durchgehend über dem Niveau des Hocheffizienzscenarios, sodass sich insbesondere im ambitionierten Szenario eine dauerhaft geringere finanzielle Belastung der Haushalte durch Energiekosten ergibt.

Abbildung 53: Laufende Energiekosten für den Wohngebäudebestand nach Wärmeversorgungssystemen (netto)



Quelle: Eigene Darstellung IREES

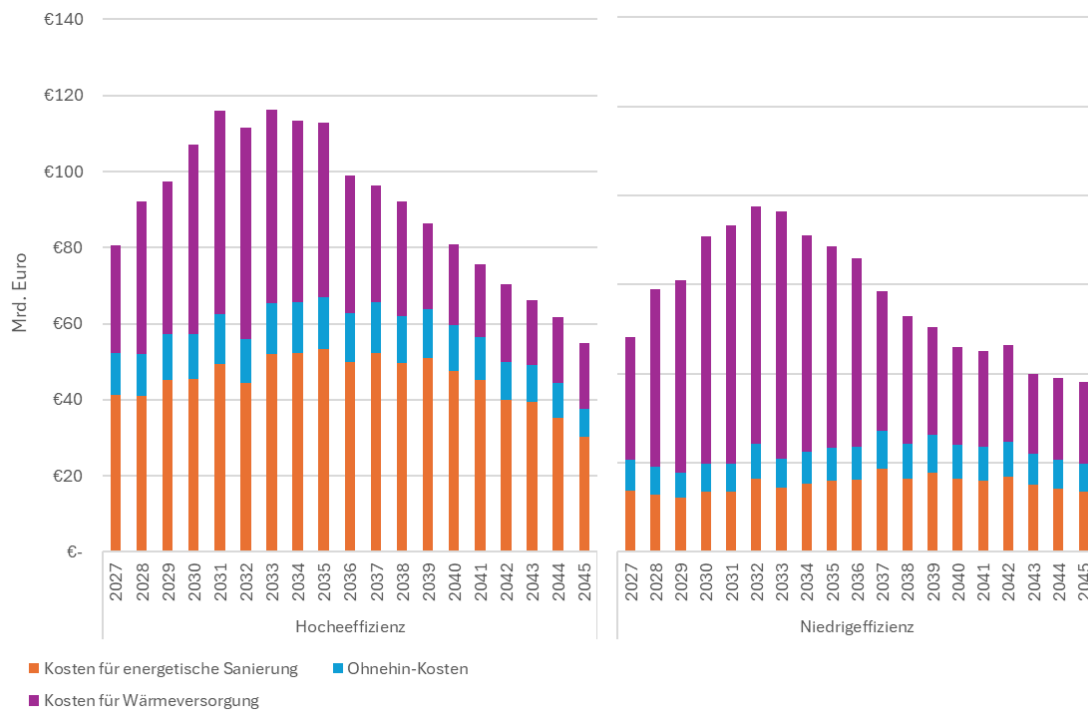
Abbildung 54 zeigt die Kosten für energetische Sanierungen, Ohnehin-Kosten sowie Kosten für Wärmeversorgung im Wohngebäudebestand in beiden Szenarien im Vergleich (netto).

Die notwendigen Investitionen in beiden Szenarien gliedern sich auf in Investitionen in die Kosten für die energetische Sanierung, in Ohnehin-Kosten der Instandsetzung (für eine Definition siehe

Tabelle 2) sowie in die Kosten des Heizungstausch. Dabei haben die Kosten für die energetische Sanierung den größten Anteil. Die Kosten für energetische Sanierungen sind im Niedrigeffizienzzenario deutlich geringer, da die Sanierungsaktivität insgesamt niedriger ausfällt. Dadurch reduzieren sich auch etwas die Ohnehin-Kosten für begleitende Umfeldmaßnahmen, jedoch nicht im gleichen Maße wie die Kosten für energetische Sanierungen. Gleichzeitig wird auch insgesamt weniger saniert.

Da aufgrund der geringeren Sanierungsaktivität jedoch höhere Leistungen für Wärmeversorgungssysteme installiert werden müssen, sind die Investitionskosten für Wärmeversorgung im Niedrigeffizienzzenario etwas höher als im Hocheffizienzzenario. In Summe sind die Investitionskosten im Niedrigeffizienzzenario über den betrachteten Zeitraum deutlich geringer als im Hocheffizienzzenario

Abbildung 54: Jährliche Investitionen in Effizienzmaßnahmen und Wärmeversorgung im Wohngebäudebestand (netto)



Quelle: Eigene Darstellung IREES

Abbildung 55 zeigt die Gesamtkosten im Niedrig- und Hocheffizienzscenario. Zur Darstellung der summierten Kosten aus laufenden Energie- und Betriebskosten sowie Investitionen in die Gebäudehülle und Wärmeversorgung über den gesamten Szenariozeitraum wurden die Investitionen in die Gebäudehülle und Wärmeversorgung analog den Annahmen in Kapitel 4.4.3 mit 2 % und über 60 Jahre für die Sanierungen bzw. 20 Jahre für die Wärmeversorgung abgezinst.

Die Gesamtkosten liegen im Niedrigeffizienzscenario unter denen des Hocheffizienzscenarios. Zwar sind die laufenden Betriebskosten in diesem Szenario etwas höher, jedoch führen die deutlich geringeren Investitionen in die Gebäudehülle insgesamt zu niedrigeren Gesamtkosten.

Abbildung 55: Annuierte Gesamtkosten über Betrachtungszeitraum von 2025 bis 2045 in beiden Szenarien



Quelle: Eigene Darstellung IREES

5.4 Zwischenfazit aus der Szenarienmodellierung

Zur Analyse der Auswirkungen unterschiedlicher Sanierungsaktivitäten im Gebäudebestand wurden ein Hocheffizienz- und ein Niedrigeffizienzscenario modelliert, die unterschiedliche Sanierungsraten sowie Sanierungstiefen abbilden.

Die Ergebnisse zeigen, dass sich der Nutzwärmebedarf im Hocheffizienzscenario bis 2045 deutlich reduziert und gegenüber dem Niedrigeffizienzscenario um rund 100 TWh geringer ausfällt. Unter Berücksichtigung von Rebound-Effekten reduziert sich die tatsächlich erzielte Einsparung jedoch auf etwa 91 TWh im Jahr 2045.

Auch der Endenergieverbrauch sinkt in beiden Szenarien, insbesondere infolge des rückläufigen Einsatzes fossiler Energieträger sowie durch die zunehmende Installation von Wärmepumpen. Der rückläufige Einsatz fossiler Energieträger sowie die zunehmende Installation von Wärmepumpen führen nicht nur zu einer Verringerung der THG-Emissionen, sondern auch zu einer deutlichen Reduktion der fossilen Abhängigkeit des Gebäudesektors. Bis 2045 wird in beiden Szenarien gemäß den Annahmen an die Zielszenarien eine vollständige Umstellung auf erneuerbare Energien erreicht. Gasbasierte Heizungen müssten spätestens ab diesem Zeitpunkt mit grünen Gasen wie Biomethan oder Wasserstoff betrieben werden, wobei die zukünftige Bereitstellung entsprechender Mengen derzeit noch ungeklärt ist. Im Niedrigeffizienzscenario müssen somit mehr fossile Energieträger durch grüne Gase ersetzt werden, was langfristig zu höheren Energiekosten führt. In der Folge gehen die THG-Emissionen im Hocheffizienzscenario etwas schneller zurück als im Niedrigeffizienzscenario. Hinsichtlich der Kosten zeigt sich jedoch, dass über den gesamten Betrachtungszeitraum von 2025 bis 2045 im Niedrigeffizienzscenario

insgesamt geringere Gesamtkosten anfallen. Zwar sind im Hocheffizienzscenario sowohl die laufenden Energiekosten als auch die Investitionen in die Wärmeversorgung geringer, diese Vorteile werden jedoch durch höhere Investitionskosten für Sanierungsmaßnahmen kompensiert.

In Kapitel 5 werden die Szenarien erneut diskutiert und um weitere Ergebnisse ergänzt.

Einordnung zum Mit-Maßnahmen-Szenario des Projektionsberichts 2026

Im Rahmen des KSG ist die Bundesregierung verpflichtet, die Einhaltung bzw. Verfehlung der Treibhausgasminderungsziele zu überwachen. Hierzu werden jährlich sogenannte Projektionsdaten erstellt.

Das **MMS** stellt dabei ein *Business-as-usual*-Szenario dar, das die aktuell gültigen Politikinstrumente abbildet und deren Wirkung auf die Emissionsentwicklung bewertet. Das MMS wird für alle Sektoren des KSG erstellt, darunter Gebäude, Verkehr, Industrie, Energiewirtschaft, Landwirtschaft und Abfallwirtschaft. Zur Einordnung der in dieser Arbeit entwickelten Zielszenarien werden im Folgenden **zentrale Kennwerte des MMS des UBA für den Gebäudesektor** dargestellt:

• Treibhausgasemissionen:

Emissionen liegen im Jahr 2030 bei 77 Mio. t CO₂-Äq für Raumwärme und Warmwasser; einschließlich Geräte und Prozesse bei rund 80 Mio. t CO₂-Äq. Im Vergleich dazu betragen die Emissionen in den in dieser Arbeit betrachteten Zielszenarien 85 Mio. t CO₂-Äq im Niedrigeffizienzscenario und 82 Mio. t CO₂-Äq im Hocheffizienzscenario. Jedoch ist im Vergleich zum MMS auch der Bilanzraum durch die Industriegebäude vergrößert, was nicht nur Auswirkungen auf die THG-Emissionen, sondern auch auf den Energiebedarf hat.

• Endenergieverbrauch:

Der Endenergieverbrauch im MMS sinkt von 742 TWh im Jahr 2024 auf 703 TWh im Jahr 2030 und weiter auf 549 TWh im Jahr 2045. Im Hocheffizienzscenario reduziert er sich auf 756 TWh (2030), 591 TWh (2040) und 513 TWh (2045). Im Niedrigeffizienzscenario beträgt er 776 TWh (2030), 659 TWh (2040) und 594 TWh (2045).

• Marktanteile neu installierter Heizsysteme:

Im Vergleich zu den in dieser Studie entwickelten Szenarien zeigt sich im MMS ein ähnlicher Anteil an Wärmepumpen, jedoch einen höheren Anteil an Biomasse und Fernwärme. Im MMS ist dagegen der Anteil an Gaskesseln höher als in den hier betrachteten Szenarien, was auf die im Rahmen der 65%-Regel des GEG weiterhin zulässige Installation von Gaskesseln mit anteiliger Nutzung von Biomethan zurückzuführen ist. In der vorliegenden Studie wurde zur Zielerreichung hingegen der Einbau von fossil betriebenen Gaskesseln (ohne EE-Brennstoffe) ab 2028 ausgeschlossen. Dadurch verschiebt sich die Wärmebereitstellung stärker in Richtung elektrischer Wärmepumpen und Fernwärme, wodurch insbesondere der Anteil der Fernwärme im Vergleich zum MMS höher ausfällt.

6 Auswirkung auf das Energiesystem

6.1 Zielsetzung

Aufbauend auf den Zielszenarien für den Gebäudesektor in Deutschland in Kapitel 5 werden in diesem Kapitel die technischen und ökonomischen Auswirkungen unterschiedlicher Sanierungsniveaus der beiden Effizienzsznarien auf das Energiesystem untersucht. Dabei werden insbesondere die Effekte auf Strombedarf, Ausbau erneuerbarer Energien, Netzbelastung und Speicherbedarf bewertet. Dies erlaubt neben der einzelwirtschaftlichen Bewertung in Kapitel 4, auch einen Blick auf die Energiesystem-Folgen verschiedener Sanierungsniveaus.

Ein Schwerpunkt liegt auf der Kopplung von Strom- und Wärmesektor, da aufgrund der prognostizierten hohen Verbreitung von Wärmepumpensystemen erhebliche Wechselwirkungen zwischen den Sektoren zu erwarten sind. Insbesondere führt das Niedrigeffizienzzenario, wie in Kapitel 5.3 gezeigt, aufgrund deutlich höherer Nutzwärmebedarfe der Gebäude zu einem erhöhten Endenergiebedarf im Wärmesektor. In einem klimaneutralen Energiesystem, das überwiegend auf elektrifizierte Wärmeversorgung setzt, resultiert daraus ein erhöhter Strombedarf sowie ein erhöhter Bedarf an installierter Leistung bei erneuerbaren Energien, Stromspeichern und Netzinfrasturktur. Insbesondere die höheren Lastspitzen im Winterhalbjahr verstärken die Anforderungen an gesicherte Leistung und Flexibilitätsoptionen.

Diese Zusammenhänge werden auch durch aktuelle Studien bestätigt. So zeigt eine Analyse von Prognos¹⁸, dass unterschiedliche Sanierungsniveaus insbesondere über Veränderungen des Strombedarfs und des daraus resultierenden Ausbaubedarfs erneuerbarer Energien auf das Energiesystem wirken. Zentrale Kenngrößen der Bewertung sind dabei der zusätzliche Strombedarf im Wärmesektor, der erforderliche Ausbau erneuerbarer Erzeugungskapazitäten sowie die daraus resultierenden Systemkosten. Die Ergebnisse zeigen, dass eine geringere Sanierungsaktivität zu einem höheren Strombedarf und entsprechend erhöhtem Ausbaubedarf im Energiesystem führt. Gleichzeitig bleiben die Gesamtsystemkosten in den von Prognos untersuchten Szenarien weitgehend vergleichbar, da geringere Investitionen in die Gebäudehülle durch höhere Investitionen in Stromerzeugung, Netze und Speicher kompensiert werden. Dies verdeutlicht, dass energetische Sanierung systemisch als Substitut für Infrastrukturinvestitionen im Energiesystem wirkt.

In der Prognos-Studie basiert die Quantifizierung systemischer Effekte überwiegend auf makroskopischen Kenngrößen wie Jahresenergiebedarf, installierter Leistung und Systemkosten. Zeitlich hochaufgelöste Effekte, insbesondere Lastspitzen in kritischen Versorgungssituationen wie Dunkelflauten, werden hingegen nur begrenzt berücksichtigt. Diese Aspekte sind jedoch für die Auslegung von Stromsystem und

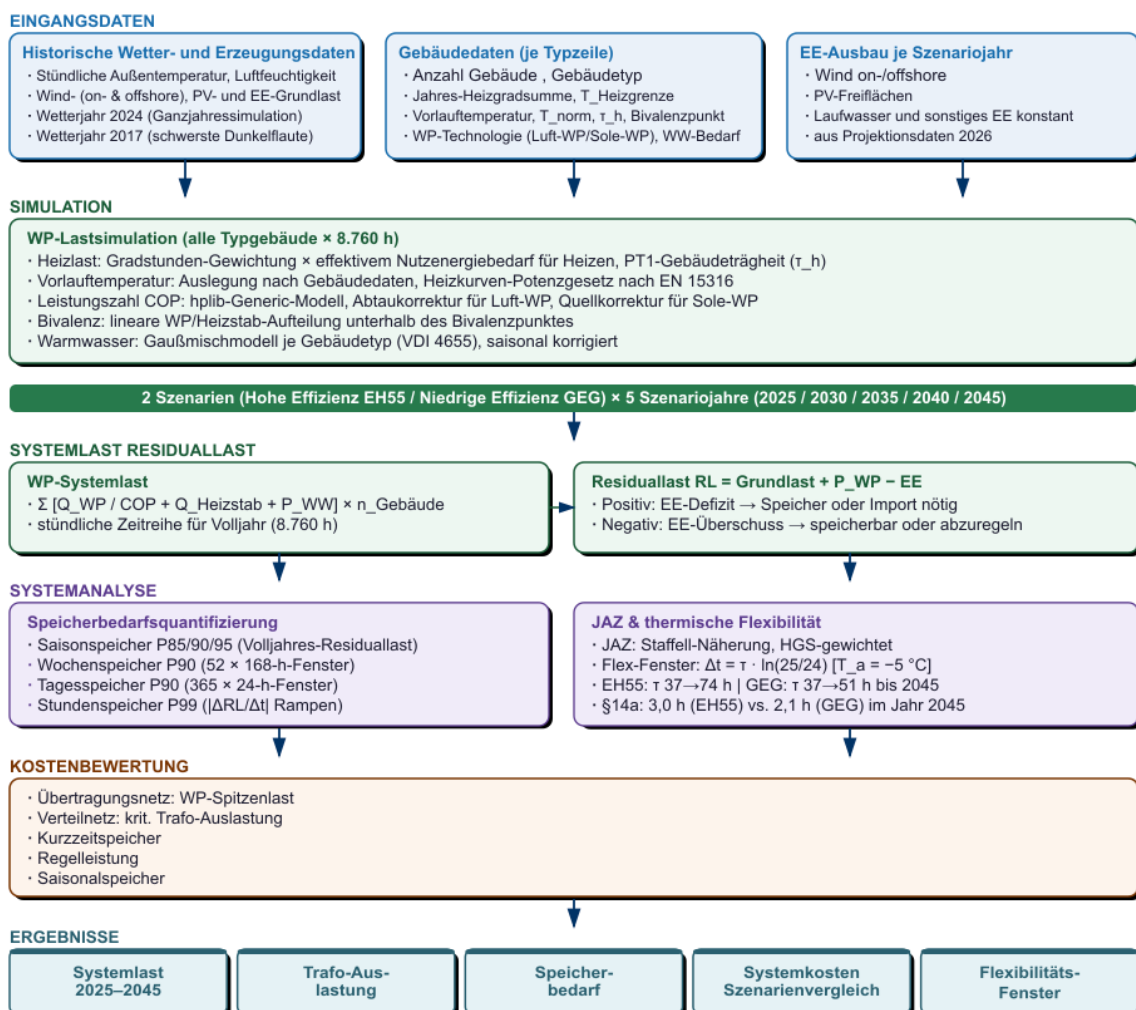
¹⁸Prognos, Stiftung Klimaneutralität (12/2025): Auswirkungen unterschiedlicher Sanierungsraten auf das Energiesystem und seine Kosten: https://www.prognos.com/sites/default/files/2025-12/SKN_Paper_Prognos.pdf

Netzinfrastruktur von zentraler Bedeutung und werden daher im vorliegenden Arbeitspaket explizit analysiert.

6.2 Vorgehen und Methodik

Um die Auswirkungen unterschiedlicher Effizienzniveaus des Gebäudebestands auf systemischer Ebene zu analysieren, werden die zwei in Kapitel 5.2 definierten Effizienzscenarien gegenübergestellt: ein Hocheffizienzscenario mit hoher Sanierungstiefe auf EH55-Niveau mit gleichzeitig erhöhter Sanierungsaktivität sowie ein Niedrigeffizienzscenario mit gesetzlichem Sanierungsstandard und einer Trendfortschreibung der Sanierungsaktivität. Der Vergleich erfolgt entlang zentraler Systemindikatoren wie Jahrestrombedarf, Spitzenlast, Residuallast, EE-Ausbaubedarf sowie Netzbelastung.

Abbildung 56: Übersicht der angewendeten Methodik zur Abschätzung der systemischen Auswirkungen verschiedener Gebäudeeffizienzen



Quelle: Eigene Darstellung IREES

Vorgehensweise:

1. Gebäudedaten aus Invert-Szenarien:

Für jedes Typgebäude werden Heizsystem, Vorlauftemperatur, Sanierungszustand, thermische Zeitkonstante sowie der effektive Warmwasser- und Raumwärme-Nutzenergiebedarf (inkl. Rebound Effekten) für alle Jahre bis 2045 geladen.

2. Stündliche Heizlast:

Der Jahresendenergiebedarf wird proportional zu den stündlichen Heizgradstunden verteilt. Die so berechnete Rohheizlast wird mit einem PT1-Tiefpassfilter auf Grundlage der gebäudespezifischen thermischen Zeitkonstante geglättet, um die thermische Trägheit und Speicherfähigkeit der Gebäudehülle zu berücksichtigen.

3. Vorlauftemperatur und COP:

Die Vorlauftemperatur folgt einer witterungsgeführten Heizkurve (Potenzmodell nach EN 15316). Der COP wird über eine bilineare Lookup-Tabelle aus dem hplib Generic-Modell (Fraunhofer ISE, Keymark-Datenbankdurchschnitt) berechnet. Außerhalb des Kalibrierbereichs ($T_{VL} > 65 \text{ °C}$) erfolgt eine Extrapolation auf Basis eines idealisierten Carnot-Prozesses mit einer exergetischen Effizienz von $\eta = 0,45$.

4. Bivalenz und Heizstab:

Luft-Wasser-Wärmepumpen wechseln ab einer Außentemperatur von typischerweise -7 °C schrittweise in den bivalenten Betrieb. Bei -20 °C wird die Wärmebereitstellung vollständig durch einen elektrischen Heizstab ($\text{COP} = 1$) gedeckt. Sole-Wärmepumpen werden als monovalente Systeme modelliert.

5. Systemlast-Aggregation:

Alle Typgebäude werden zu einer stündlichen Systemlast [GW] aggregiert. Die Aggregation erfolgt deterministisch, d. h. alle Gebäude einer Typklasse reagieren synchron auf Temperaturänderungen. Taktbetrieb, individuelle Regelstrategien und Nutzerverhalten werden nicht modelliert. Die resultierende Systemspitzenlast stellt somit eine konservative Obergrenze dar.

6. Auswirkungen auf Gesamtsystemebene:

Die aggregierte Stromlast durch Wärmepumpen, insbesondere während Perioden mit Dunkelflauten, wird dem gleichzeitig verfügbaren erneuerbaren Stromangebot unter identischen Wetterbedingungen gegenübergestellt. Die daraus resultierende Deckungslücke definiert die notwendige zusätzliche Residuallast. Diese muss im Zieljahr 2045 entweder durch zusätzlichen Ausbau erneuerbarer Erzeugungskapazitäten (z. B. Wind Onshore/Offshore) oder durch Stromspeicher (Kurz- und Langzeitspeicher) gedeckt werden, wenn sie nicht durch eine Flexibilisierung des Wärmepumpenbetriebs (durch Wärmespeicher oder höhere thermische Trägheit) kompensiert werden kann. Zusätzlich wird analysiert, in welchem Maße unterschiedliche Sanierungsniveaus die Häufigkeit und Intensität solcher kritischer Versorgungssituationen beeinflussen.

7. Auswirkungen auf Verteilnetzebene:

Auf Basis der aggregierten Lastprofile werden Gleichzeitigkeitsfaktoren in Abhängigkeit von Temperatur und Tageszeit abgeleitet. Daraus werden Trafo-Auslastungsprofile sowie potenzielle Überlastsituationen im Niederspannungs- und Mittelspannungsnetz bestimmt. Die Analyse ermöglicht

eine Abschätzung des notwendigen Netzausbaubedarfs in Abhängigkeit vom Sanierungsgrad sowie von der Durchdringung mit Wärmepumpen.

8. Flexibler WP-Betrieb:

Die potenzielle Entlastungswirkung eines netzdienlichen Betriebs gemäß §14a EnWG wird untersucht. Dabei wird modelliert, in welchem Umfang Lastverschiebungen durch temporäre Leistungsreduktionen oder Vorziehen von Heizprozessen möglich sind, ohne den thermischen Komfort signifikant zu beeinträchtigen. Insbesondere wird analysiert, wie stark sich Spitzenlasten reduzieren lassen und welche Auswirkungen dies auf Netzdimensionierung und Systemkosten hat.

Zentrale Annahmen und Beschränkungen:

Die Simulation basiert auf einer Volljahresbetrachtung unter Verwendung eines historischen Wetterjahres (2024), das als relativ warm einzustufen ist, jedoch zukünftige Klimabedingungen näherungsweise repräsentieren kann. Das historische Wetterjahr dient der Verteilung eines zukünftig veränderten jährlichen Nutzwärmebedarfs aus dem Gebäudemodell auf die Stunden jedes Jahres. Die relative Lastverteilung in zukünftigen Jahren bleibt also immer dieselbe. Klimateffekte werden ausschließlich über veränderte Heizlasten je Gebäudetyp abgebildet, während strukturelle Änderungen des Wetters (z. B. Häufigkeit extremer Ereignisse) nicht explizit modelliert werden. Zur Analyse systemkritischer Situationen werden zusätzlich historische Dunkelflauten herangezogen, bei denen niedrige Temperaturen mit geringer erneuerbarer Energieerzeugung zusammenfallen. Diese Extremereignisse werden mit auf zukünftige Ausbaupfade skalierten EE-Profilen kombiniert, um realistische Worst-Case-Bedingungen abzubilden. Die Zweiteilung der Simulation in Gesamtjahr und Dunkelflauten-Woche ist dabei physikalisch motiviert. Die Netzkomponenten werden auf die Momentanleistung im Extremfall einer Dunkelflautenperiode dimensioniert. Speicher werden auf die Energie dimensioniert, die über lange Zeiträume verschoben werden muss und sich aus der Jahresbilanz der Residuallast ergibt.

Alle Analysen dienen primär dem Vergleich der Effizienzscenarien und der Bewertung der Auswirkungen unterschiedlicher Gebäudeeffizienzen auf das Energiesystem. Die Ergebnisse basieren auf Modellierungen auf aggregierter Ebene und können die komplexen Wechselwirkungen eines zunehmend gekoppelten Energiesystems nur stark vereinfacht abbilden. Die ausgewiesenen Kennzahlen sind daher nicht als absolute Prognosen zu interpretieren, sondern besitzen ihre Aussagekraft vor allem im relativen Vergleich der Szenarien.

6.3 Stromspitzenlast aus Wärmepumpenversorgung

Die Häufigkeit von Kältewellen mit Außentemperaturen unterhalb von -7 °C (dem typischen Bivalenzpunkt von Luft-Wasser-Wärmepumpen) ist entscheidend für die Dimensionierung von Stromnetz, Kraftwerken und Speicherkapazitätsreserven. In diesen Perioden steigt der Anteil der Heizlast, der nicht mehr effizient über die Wärmepumpe abgedeckt werden kann und in den meisten Fällen über einen elektrischen Heizstab bereitgestellt werden muss.

Um den Auslegungsfall auf Systemebene zu treffen, werden drei Dunkelflauten-Wochen als die drei kältesten Winterwochen mit gleichzeitig geringstem Wind- und Photovoltaikangebot im Datensatzensemble 2017–2024 definiert. Diese Perioden stellen besonders kritische Systemzustände dar, da hier sowohl eine hohe Wärmenachfrage als auch ein geringes erneuerbares Stromangebot zusammenfallen.

Für jeden Gebäudetyp gilt dabei, dass sich die gesamte elektrische Leistung P_{el} aus der Heizleistung Q_{WP} , geteilt durch den COP in Abhängigkeit der Außentemperatur T_a und der Vorlauftemperatur T_{VL} , sowie der Momentanleistung des Heizstabs $Q_{Heizstab}$ ergibt:

$$P_{el} = \frac{Q_{WP}}{COP(T_a, T_{VL})} + Q_{Heizstab}$$

Die Summe über alle Gebäude ergibt die Systemlast, wobei der Spitzenwert innerhalb der betrachteten Dunkelflauten-Wochen als relevante Stromspitzenlast für die Systemauslegung interpretiert wird.

Beim Vergleich der Sanierungsszenarien zeigt sich: Je höher das Sanierungsniveau, desto niedriger die erforderlichen Vorlauftemperaturen. Dies führt zu einem höheren COP der Wärmepumpen sowie zu einem geringeren Anteil der Heizlast, der über ineffiziente elektrische Heizstäbe gedeckt werden muss – selbst in extremen Kälteperioden.

Gleichzeitig wirken jedoch mehrere Effekte auf die resultierende Systemspitzenlast:

- Unterschiedliche Heizlastniveaus: Höhere Sanierungsstände führen zu deutlich reduzierten spezifischen Heizlasten, wodurch die absolute Wärmenachfrage und damit auch die elektrische Last in Kälteperioden sinkt.
- Unterschiedliche Effizienz (JAZ/COP): Niedrigere Vorlauftemperaturen in gut sanierten Gebäuden erhöhen die Effizienz der Wärmepumpen, wodurch für die gleiche bereitgestellte Wärmemenge weniger elektrische Leistung erforderlich ist.

6.3.1 Wärmepumpen im Gebäudebestand

Abbildung 57 zeigt die Anzahl der Bestandsgebäude mit Wärmepumpen nach Gebäudetyp, Vorlauftemperatur, Leistungsklasse und nach Baualtersklasse, wie sie im Gebäudemodell Invert/ee-Lab für das Basisjahr 2025 implementiert sind. Derzeit sind Wärmepumpen insbesondere in Einfamilienhäusern (EFH) installiert, während sie in Mehrfamilienhäusern (MFH) und Nichtwohngebäuden (NWG) nur selten vorkommen.

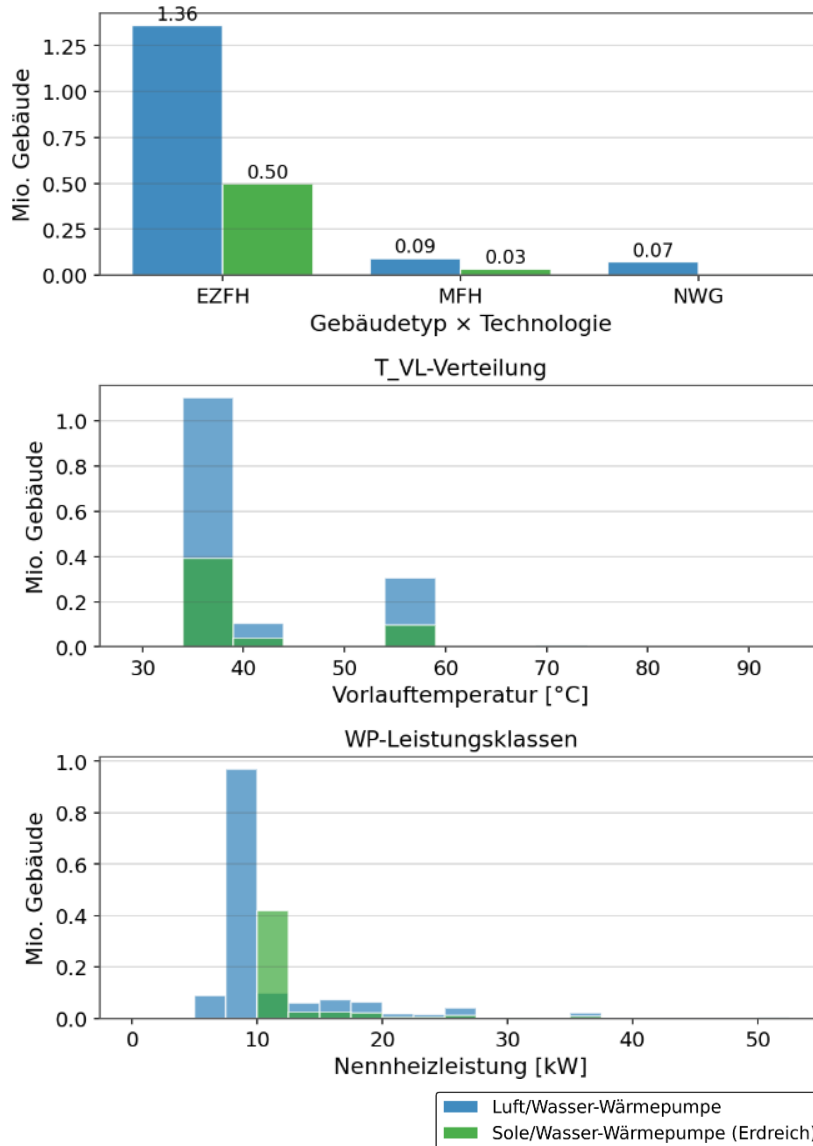
Die überwiegende Zahl der Wärmepumpen sind Luft-Wasser Wärmepumpen, es gibt jedoch auch einen substanziellen Anteil an Sole-Wasser-Wärmepumpen. Wärmepumpen werden aktuell überwiegend mit niedriger Vorlauftemperatur betrieben, was auf ihre Installation in Neubauten oder energetisch sanierten bzw. optimierten Bestandsgebäuden hinweist. Das wird durch den dena-Gebäudereport 2025¹⁹ bestätigt, in dem die Beheizungsstruktur des Gebäudebestands nach

¹⁹ dena Gebäudereport 2025:

https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2025/Gebaedereport_2025_BF.pdf

Altersklassen zeigt, dass der überwiegende Anteil der Wärmepumpen-Systeme in Gebäuden ab dem Baujahr 2000 installiert sind. Aktuelle Absatzzahlen zeigen jedoch einen deutlichen Anstieg von Wärmepumpen-Installationen in Sanierungen gegenüber weitgehend stagnierenden Absatzzahlen bei Neubauten in den letzten Jahren²⁰, was bei weitgehend gleichbleibenden Sanierungsraten auf die vermehrte Installation in teilsanierten Bestandsgebäuden hindeutet. Bezüglich der Leistungsklassen sind in der verwendeten Gebäudetypologie vor allem kleinere Wärmepumpen mit um die 10 kW_{th} verbreitet, passend zu den typischen Heizlasten von sanierten und teilsanierten Einfamilienhäusern.

Abbildung 57: Anzahl der Gebäude mit Wärmepumpen nach Gebäudetyp, nach Vorlauftemperatur und nach Leistungsklasse wie im Gebäudemodell Invert/ee-Lab für das Basisjahr 2025 implementiert.



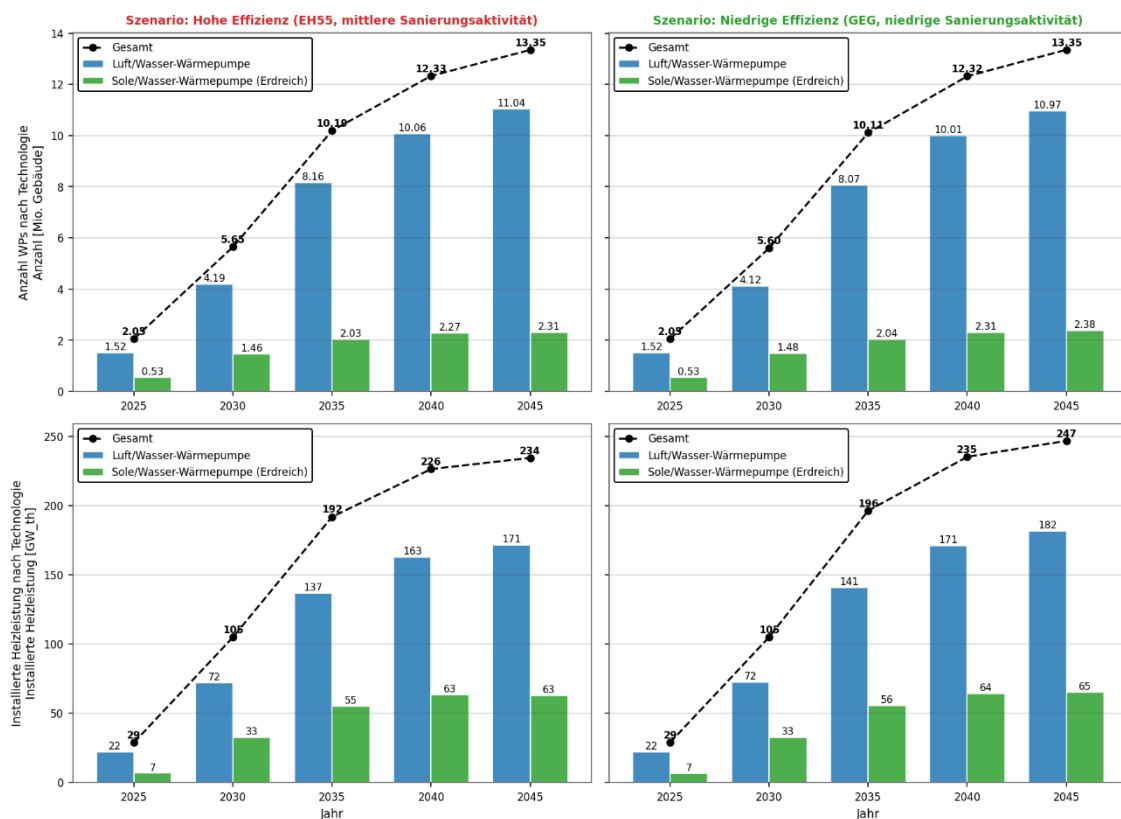
Quelle: Eigene Darstellung IREES

²⁰ Siehe Absatzzahlen des Bundesverband Wärmepumpe: <https://www.waermepumpe.de/presse/zahlen-daten/>

6.3.2 WP-Hochlaufpfad in den Effizienz-Szenarien:

Die Ergebnisse des Gebäudemodells Invert/ee-Lab in Abbildung 58 zeigen, dass sich die Anzahl der Gebäude mit Wärmepumpensystemen zwischen den Effizienzscenarien kaum unterscheiden. Die Gesamtzahl der mit Wärmepumpen versorgten Gebäude steigt von derzeit rund 2 Mio. Gebäuden auf über 13 Mio. im Zieljahr 2045. Der Großteil der Wärmepumpensysteme sind Luft-WP, rund 20 % sind erdwärmeversorgte Sole-WP. Die installierte Leistung unterscheidet sich hingegen deutlich zwischen den Szenarien, im Niedrigeffizienzscenario liegt die installierte Gesamtleistung im Jahr 2045 rund 13 GW_{th} über dem Hocheffizienzscenario.

Abbildung 58: Anzahl und thermische Leistung installierter Wärmepumpen in beiden Effizienzscenarien im Simulationszeitraum 2025 bis 2045



Quelle: Eigene Darstellung IREES

6.3.3 Stromlast von Wärmepumpen in Abhängigkeit von Temperaturbedingungen

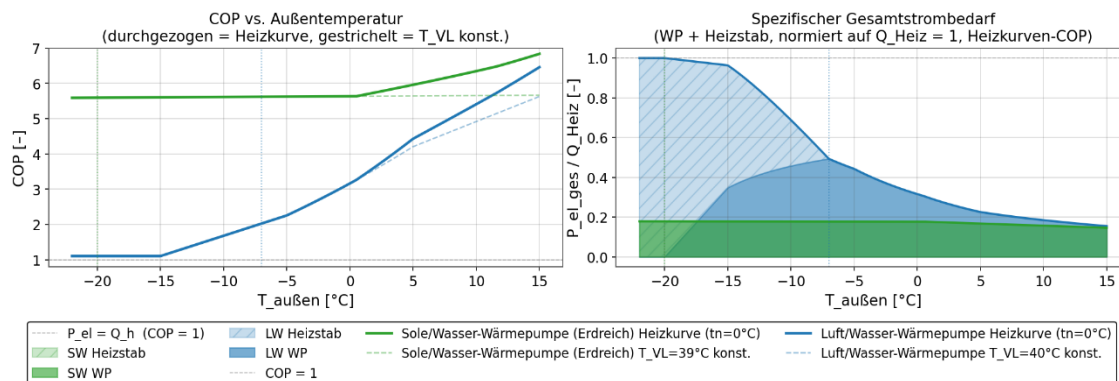
Die Stromlast von Wärmepumpen wird maßgeblich durch meteorologische Randbedingungen bestimmt. Insbesondere in Kälteperioden wirken sich niedrige Außentemperaturen nicht nur auf die Höhe der Heizlast aus, sondern auch auf die Effizienz und Betriebsweise der eingesetzten Technologien. Dadurch entsteht ein stark temperaturabhängiges und nichtlineares Lastverhalten auf Systemebene.

Für die Analyse von Spitzenlasten ist es daher erforderlich, die physikalischen Zusammenhänge zwischen Witterung, Anlagenbetrieb und elektrischer Leistungsaufnahme differenziert zu betrachten. Neben der reinen Wärmenachfrage

spielen insbesondere technologische Effekte wie temperatur- und feuchtebedingte Effizienzänderungen und Betriebsgrenzen eine entscheidende Rolle.

Die folgenden Unterkapitel 6.3.4 - 6.3.8 untersuchen diese Zusammenhänge entlang zentraler Einflussgrößen und zeigen, wie sich daraus das Lastverhalten einzelner Anlagen sowie der aggregierten Wärmepumpenflotte ableiten lässt.

Abbildung 59: Technologieverhalten bei Kälte: Leistungszahl (COP) und spezifischer Gesamtstrombedarf (rechts) abhängig von der Außentemperatur



Quelle: Eigene Darstellung IREES

Abbildung 59 zeigt das temperaturabhängige Technologieverhalten der gängigsten Wärmepumpensysteme für eine typische Auslegungs-Vorlauftemperatur in Neubauten von 40°C . Für beide dargestellten Systeme erhöht sich der COP oberhalb von 0°C Außentemperatur aufgrund der sinkenden Vorlauftemperatur bei typischer Heizkurve. Der COP einer Luft-Wasser-Wärmepumpe (Luft-WP) links in der Abbildung sinkt mit fallender Außentemperatur aus zwei Gründen: Zum einen nimmt die Temperaturdifferenz zwischen Quelle und Senke zu, was direkt die Carnot-Effizienz und damit den theoretisch maximal erreichbaren COP reduziert. Zum anderen verschlechtert sich bei tiefen Temperaturen der Wärmeübergang am Außenwärmetauscher durch Reifbildung, was regelmäßige Abtauzyklen erfordert und die effektive Betriebszeit vermindert. Die Abtaukorrektur im Modell beträgt bei -5°C und 90 % relativer Luftfeuchte bis zu 21 % und ist damit quantitativ bedeutsam.

Der Bivalenzpunkt bei $T_{\text{biv}} = -7^\circ\text{C}$ ist der entscheidende Schwellenwert für die Systemlast. Unterhalb dieser Temperatur schaltet sich bei Luft-WP der elektrische Heizstab (COP = 1) schrittweise hinzu, was den Strombedarf je WP-Einheit sprunghaft erhöht, wie in Abbildung 59 rechts zu sehen.

Sole/Wasser-Wärmepumpen (Sole-WP) sind von dieser Problematik weitgehend frei. Die Erdreich-Quelltemperatur liegt selbst im tiefsten Winter typischerweise zwischen -2°C und $+5^\circ\text{C}$ (je nach Erdreichtiefe und Auslegung), was einen stabilen und hohen COP von 4,5–5,5 gewährleistet.

6.3.4 Wetterdaten mit historischen Dunkelflauten der letzten Jahre

Die Wahl geeigneter Klimadaten ist entscheidend für die Bewertung systemischer Effekte, da Netzkomponenten auf die Momentanleistung im Extremfall einer Dunkelflautenperiode dimensioniert werden. Einzelne Wetterjahre können die Bandbreite meteorologischer Bedingungen, insbesondere Extremereignisse, nicht ausreichend abbilden. Daher basiert die Analyse auf einem achtjährigen Klimaensemble (2017–2024), das aus zehn populationsgewichteten Messstationen zu einem deutschlandweiten Mittelwert aggregiert wird (Hamburg, Berlin, Essen, Frankfurt, Leipzig, Stuttgart, München, Nürnberg, Hannover, Dresden)²¹. Auf dieser Basis wird die mittlere Jahres-Heizgradsumme bestimmt, die als Normierungsgrundlage für die Heizlastberechnung dient. Die korrespondierenden Einspeiseprofile für Wind-, PV- und EE-Grundlaststrom (Laufwasser, Biomasse, Geothermie) werden aus dem Energy-Charts-Datensatz des Fraunhofer ISE übernommen²².

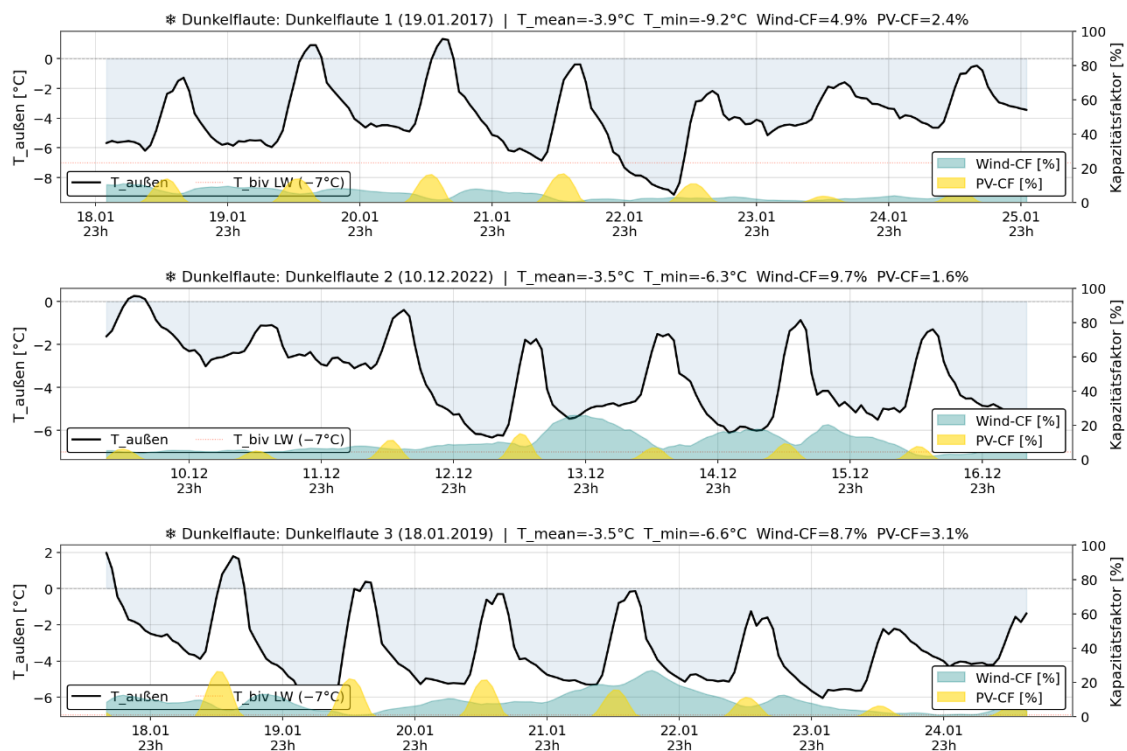
Zur Analyse kritischer Systemzustände werden innerhalb dieses Ensembles gezielt Wochen mit besonders ungünstigen Bedingungen ausgewählt. Im Fokus stehen sogenannte Dunkelflauten, in denen niedrige Außentemperaturen mit gleichzeitig geringer erneuerbarer Stromerzeugung zusammentreffen. Abbildung 60 zeigt die ausgewählten Analysewochen als Worst-Case für Wärmepumpenlasten. Neben der Außentemperatur sind die Kapazitätsfaktoren (CF) von Wind und Photovoltaik dargestellt, also der relative Anteil der aktuellen Produktion an der installierten Leistung. Dunkelflauten zeichnen sich durch das gleichzeitige Auftreten von niedrigen Temperaturen und geringer erneuerbarer Stromerzeugung aus und markieren damit die systemisch kritischsten Situationen für die Residuallast.

Als primäre Referenz dient die schwerste Dunkelflaute im Datensatz (19.01.2017) mit einer mittleren Temperatur von $-3,9\text{ °C}$, einem Minimum von $-9,2\text{ °C}$ sowie einem sehr niedrigen mittleren Windkapazitätsfaktor von $4,9\%$. Diese Kombination aus hoher Wärmenachfrage und geringem Stromangebot stellt einen systemisch kritischen Auslegungsfall dar. Ergänzend werden zwei weitere Dunkelflauten (Dezember 2022 und Januar 2019) als Vergleichswochen herangezogen, um die Robustheit der Ergebnisse gegenüber unterschiedlichen meteorologischen Ausprägungen zu prüfen.

²¹ <https://open-meteo.com/>

²² <https://www.energy-charts.info/>

Abbildung 60: Deutschland-gemittelte Außentemperaturen und Wind- sowie PV-Produktion in ausgewählten Wochen mit Dunkelflaute



Quelle: Eigene Darstellung IREES

6.3.5 Leistungszahlen aller Gebäude in Abhängigkeit von Vorlauf- und Außentemperatur

Der COP einer Wärmepumpe hängt wesentlich von der Quelltemperatur und der Heizungsvorlauf-temperatur ab (vgl. Kapitel 4.4.4). Beide Größen sind direkt durch die Außentemperatur beeinflusst: Während bei Luft-Wasser-Wärmepumpen die Quelltemperatur mit fallender Außentemperatur sinkt, steigt gleichzeitig die erforderliche Vorlauf-temperatur über die witterungsgeführte Heizkurve an.

Die Höhe der Vorlauf-temperatur hängt vor allem vom Wärmeverteilsystem ab. Flächenheizungen wie Fußboden-, Decken- oder Wandheizungen kommen mit sehr niedrigen Vorlauf-temperaturen von rund 30-40 °C aus, während Heizkörper je nach Größe meist deutlich höhere Temperaturen von bis zu 70 °C benötigen. Typischerweise kommen Flächenheizungen eher in energetisch sanierten Gebäuden vor, da die Heizleistung aufgrund der geringen Vorlauf-temperaturen für unsanierte ältere Gebäude häufig nicht ausreicht. Die Vorlauf-temperaturen von Heizkörpern lassen sich jedoch auch durch niederschwellige Maßnahmen wie den Tausch einzelner Heizkörper gegen größere Heizkörper oder ein Anpassen der Heizkurve signifikant reduzieren. Niedrigere Vorlauf-temperaturen führen direkt zu höheren COP-Werten und damit zu einem geringeren Strombedarf.

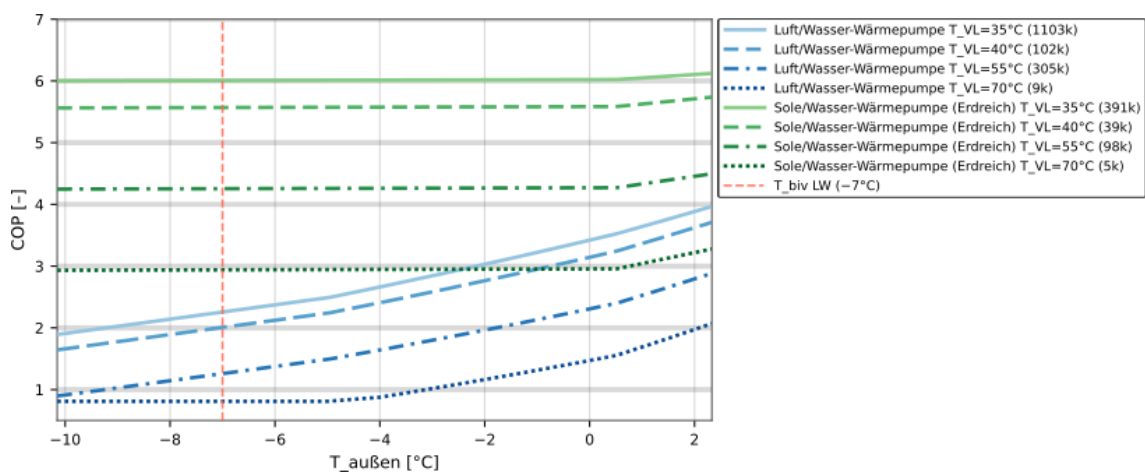
Die Quelltemperatur unterscheidet sich je nach Wärmepumpentyp: Luft-Wasser-Wärmepumpen reagieren stark auf die Außentemperatur und verlieren bei Kälte deutlich an Effizienz, während Sole-Wärmepumpen aufgrund der stabilen

Erdtemperaturen nahezu konstant hohe COP-Werte erreichen. Zusätzlich treten bei Luft-Wasser-Wärmepumpen im Bereich um den Gefrierpunkt Effizienzverluste durch Abtauvorgänge auf, die den COP um bis zu 20 % reduzieren können.

In der Kombination führt die sinkende Quelltemperatur und steigende Vorlauftemperatur zu einem stark nichtlinearen Verhalten: Bei niedrigen Außentemperaturen fällt der COP überproportional ab, wodurch der elektrische Leistungsbedarf entsprechend stark ansteigt (siehe Kapitel 6.3). Besonders kritisch ist der Bereich unterhalb des Bivalenzpunkts (typischerweise bei -7 °C für Luft-WP), in dem elektrische Heizstäbe zum Einsatz kommen. Da diese mit einem COP von 1 arbeiten, steigt der Strombedarf in diesen wenigen Stunden sprunghaft an. Diese Effekte bestimmen maßgeblich die Stromspitzenlast und führen in Extremkälteperioden zu hoher Gleichzeitigkeit im System.

Abbildung 61 zeigt den COP für verschiedene Außentemperaturen und unterschiedliche Technologien und Vorlauftemperaturen. Die Kennlinien wurden mithilfe der hplib-Bibliothek des Forschungszentrum Jülich²³ auf Grundlage des Keymark-Datenbankdurchschnitts berechnet. Die Kennlinien bestätigen, dass Sole-Wasser-Wärmepumpen (überwiegend erdwärmegestützt) aufgrund der nahezu konstanten Quelltemperatur weitgehend unabhängig von der Außentemperatur mit einer konstanten Effizienz arbeiten (eine leichte Temperaturabhängigkeit ergibt sich durch den Anteil von Flächenkollektoren an den Sole-WP). Dahingegen sinkt der COP und damit die Effizienz von Luft-Wasser-Wärmepumpen mit sinkender Außentemperatur deutlich.

Abbildung 61: Leistungszahl (COP) von Wärmepumpensystemen abhängig von der Außentemperatur und der Auslegungs-Vorlauftemperatur



Quelle: Eigene Darstellung IREES

Abbildung 62 zeigt exemplarisch das Zusammenspiel von Außentemperatur, Heizlast, Effizienz und elektrischer Leistung für fünf repräsentative Einfamilienhäuser (EFZH)

²³ <https://github.com/FZJ-IEK3-VSA/hplib>

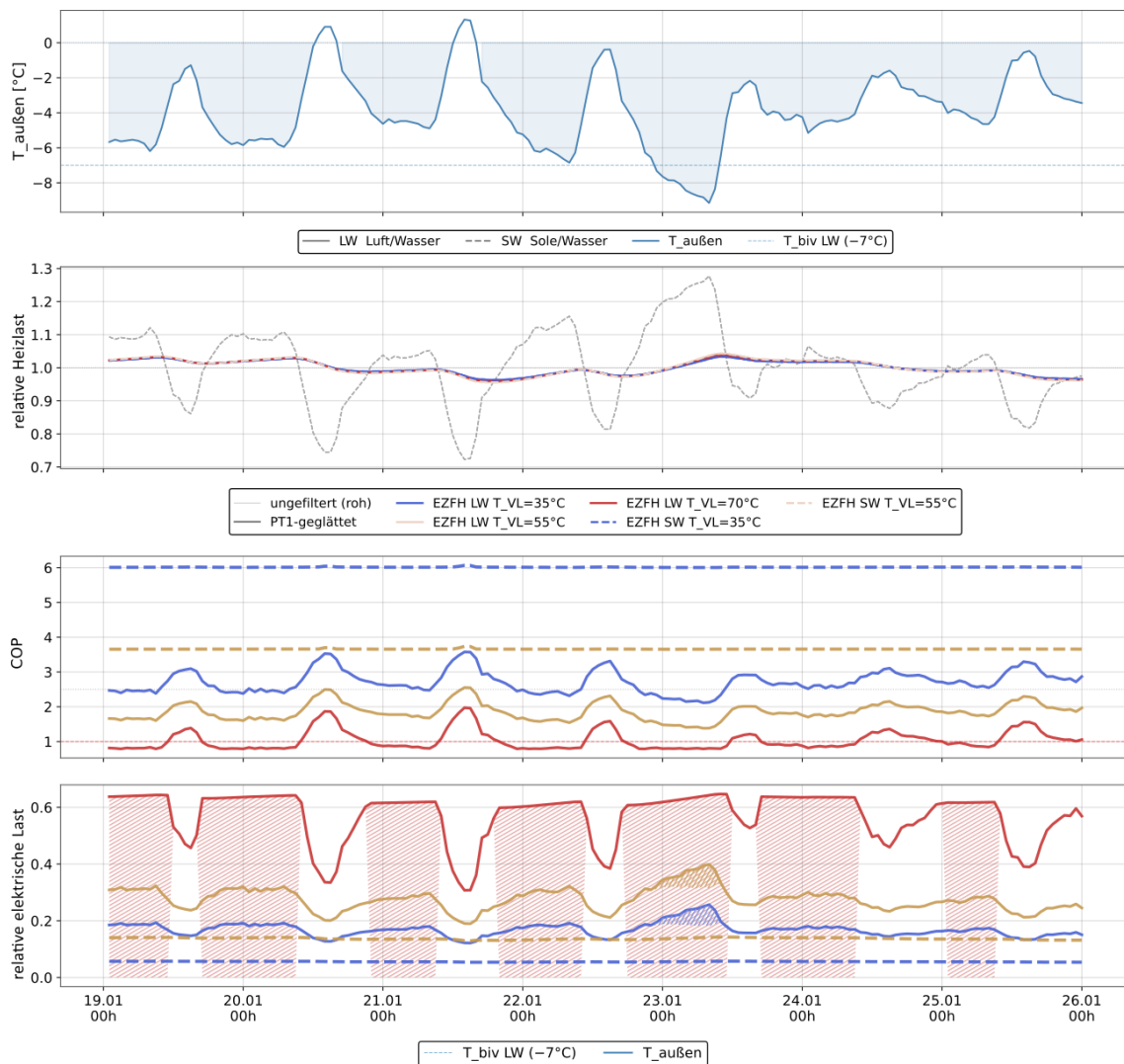
während einer der schwersten historischen Dunkelflautenwochen. Dargestellt sind Gebäude mit unterschiedlichen Vorlauftemperaturen von 35 bis 70 °C, wobei die Farbskala von niedrigen Vorlauftemperaturen (blau, z. B. Fußbodenheizung) bis zu hohen Temperaturen (rot, z. B. Altbau-Heizkörper) reicht.

Im oberen Panel ist die Außentemperatur dargestellt, ergänzt durch eine Markierung des Bivalenzpunkts bei -7 °C. Unterhalb dieser Schwelle setzt bei Luft-Wasser-Wärmepumpen der Heizstabbetrieb ein. Das zweite Panel zeigt die relative Heizlast, normiert auf den Wochenmittelwert. Neben der direkt witterungsabhängigen Rohheizlast (gestrichelt) ist eine geglättete Lastkurve dargestellt (durchgezogen), die die thermische Trägheit der Gebäude berücksichtigt. Dadurch wird sichtbar, dass reale Lastverläufe gegenüber kurzfristigen Temperaturschwankungen gedämpft sind.

Das dritte Panel zeigt den resultierenden COP unter Berücksichtigung typischer Heizkurven. Luft-Wasser-Wärmepumpen weisen bei sinkenden Temperaturen einen deutlichen Effizienzurückgang auf, verstärkt durch steigende Vorlauftemperaturen und Abtauverluste. Sole-Wärmepumpen hingegen zeigen aufgrund stabiler Quelltemperaturen ein deutlich konstanteres und höheres Effizienzniveau. Kritisch ist insbesondere der Bereich niedriger COP-Werte, in dem der Betrieb zunehmend ineffizient wird. Zur Einordnung sei hier aber erwähnt, dass selbst der Betrieb mit einem COP von 1 bei zunehmendem Anteil an erneuerbaren Energien am Strommix im Vergleich zu fossilen Heizungen langfristig primärenergetisch effizienter ist.

Im unteren Panel ist die daraus resultierende elektrische Leistung je Gebäude dargestellt. Hier wird der zentrale systemische Effekt deutlich: Unterhalb des Bivalenzpunkts steigt die elektrische Leistung sprunghaft an, da zusätzlich zum sinkenden COP der Heizstab zum Einsatz kommt. Der Heizstabanteil kann in den kältesten Stunden die eigentliche Wärmepumpenleistung übersteigen. Gleichzeitig zeigt sich ein deutlicher Unterschied zwischen Gebäudetypen: Gebäude mit niedrigen Vorlauftemperaturen weisen trotz identischer normierter Heizlast eine deutlich geringere elektrische Leistung auf als Gebäude mit hohen Systemtemperaturen. Ursache ist der stark reduzierte COP bei hohen Vorlauftemperaturen.

Abbildung 62: Auswirkungen verschiedener Vorlauftemperaturen auf die Stromlast von Wärmepumpen



Quelle: Eigene Darstellung IREES

6.3.6 Jahresarbeitszahlen von Typgebäuden

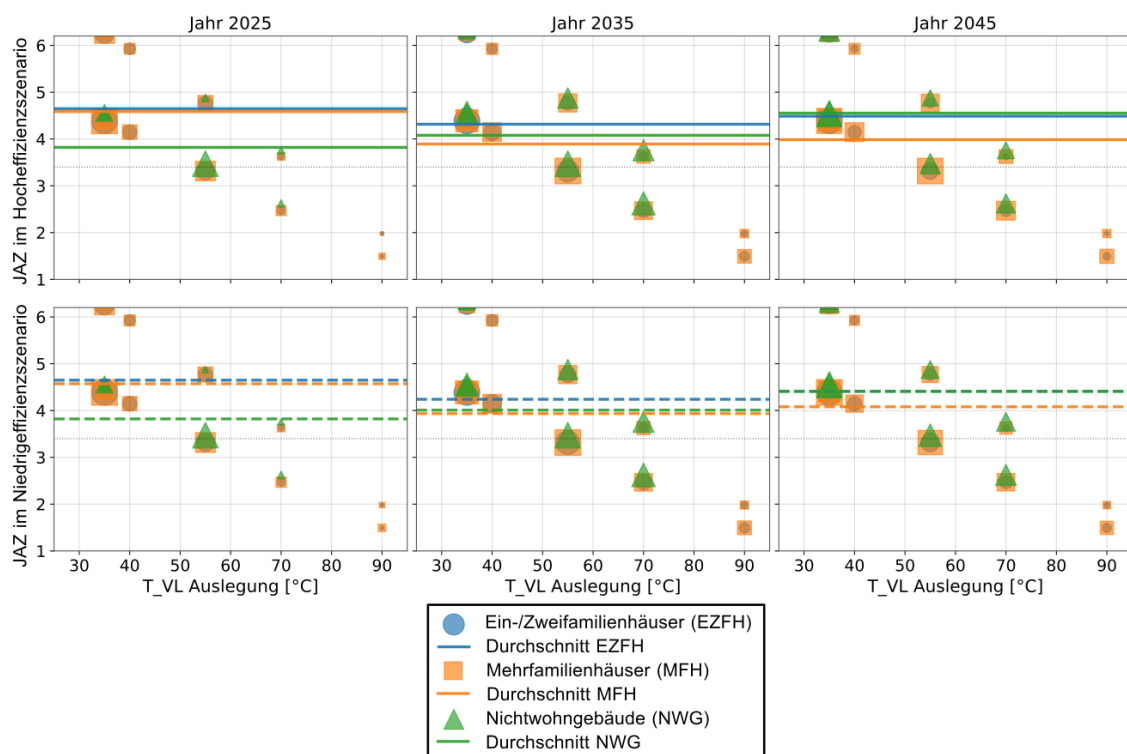
Die Jahresarbeitszahl (JAZ) beschreibt die mittlere Effizienz einer Wärmepumpe über ein Jahr und ergibt sich als Verhältnis der Jahressummen von bereitgestellter Wärme zu eingesetztem Strom. Sie fasst alle Betriebszustände auf Grundlage der Wetterdaten eines Jahres zusammen und ist damit eine zentrale Kenngröße zur Bewertung der realen Systemeffizienz.

Sole/Wasser-Wärmepumpen erreichen aufgrund stabiler Quelltemperaturen in der Regel höhere und konstantere JAZ-Werte als Luft-Wasser-Wärmepumpen. Insgesamt zeigt sich, dass höhere Sanierungsstände zu deutlich besseren Jahresarbeitszahlen führen und damit den Strombedarf der Wärmepumpen nachhaltig reduzieren.

Abbildung 63 zeigt die JAZ für verschiedene Gebäudeklassen in Abhängigkeit der Vorlauftemperatur der Heizsysteme für beide Effizienzsznarien und verschiedene

Stützjahre. Die Punktgröße gibt die Anzahl der Gebäude entsprechend den Szenario Rechnungen in Kapitel 5 wieder und die horizontalen Linien die populationsgewichteten Mittelwerte. In beiden Szenarien steigt mittelfristig die Zahl der Wärmepumpensysteme mit höheren Vorlauftemperaturen deutlich an, insbesondere bei Mehrfamilien- und Nichtwohngebäuden. Wärmepumpen kommen im agentenbasierten Gebäudemodell ab 2035 also vermehrt auch in älteren Bestandsgebäuden zum Einsatz, unabhängig von der Tiefe der Sanierung. Im Niedrigeffizienzzenario zeigt sich im Vergleich zum Hocheffizienzzenario nur eine geringfügig niedrigere mittlere JAZ über alle Gebäude einer Kategorie. Das zeigt, dass im Modell bei effizienterer Gebäudehülle zwar Wärmepumpen geringerer Leistungen installiert werden, die Vorlauftemperaturen sich aber in den meisten Fällen nicht signifikant verändern. An dieser Stelle besteht weiterer Forschungsbedarf, um zu klären, inwieweit die Entscheidungen der Investitionsagenten im Modell, energetische Sanierungen ohne signifikante Reduktion der Vorlauftemperatur vorzunehmen, von Praxiserfahrungen gedeckt werden.

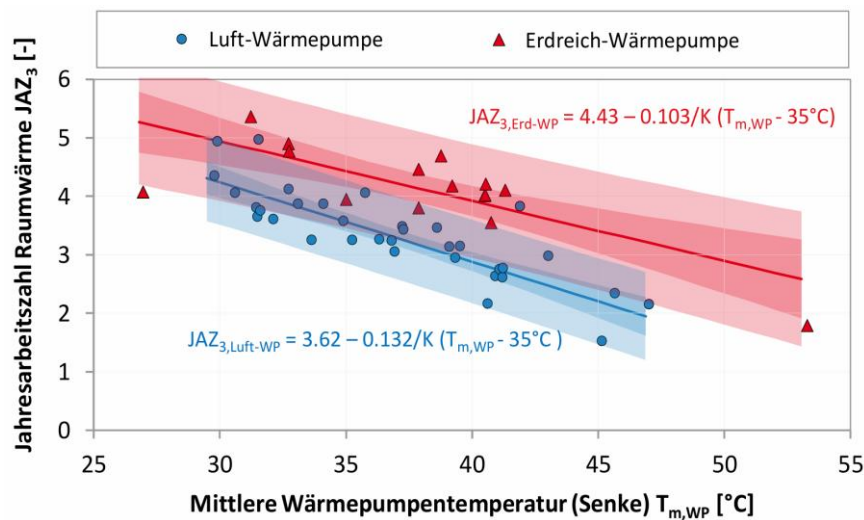
Abbildung 63: Jahresarbeitszahlen je Typgebäude und Szenariojahr



Quelle: Eigene Darstellung IREES

Untersuchungen des Fraunhofer ISE in Abbildung 63 zeigen, dass die JAZ im Modell insbesondere bei höheren Vorlauftemperaturen sowohl für Luft- als auch für Erdreich-Wärmepumpen etwas überschätzt werden, sodass Systemauswirkungen eher konservativ geschätzt werden.

Abbildung 64: Jahresarbeitszahlen von Wärmepumpensystemen in Abhängigkeit der Vorlauftemperatur in einer Feldstudie des Fraunhofer ISE (Lämmle u. a. 2022)



Quelle: Eigene Darstellung IREES

6.3.7 Stündliche Stromlast in der Dunkelflaute

Abbildung 65 zeigt, wie die gesamte WP-Stromlast im Jahr 2025 für die gewählten historischen Dunkelflauten unter Berücksichtigung von Bivalenz-, Abtaubetrieb und Warmwasserbedarf aussehen würde. In Dunkelflaute 1 wird die maximale Stromlast der anderen Dunkelflautewochen an einem einzigen sehr kalten Tag um etwa 2 GW überschritten. Dieser Tag ist damit für die Systemauslegung entscheidend, der kurze Zeitraum zeigt aber auch, dass hier eine Kombination von Stundenspeichern und eine moderate Drosselung regelfähiger Wärmepumpen unter Ausnutzung der thermischen Gebäudeträgheit die schlimmsten Lastspitzen abfangen kann.

Der Vergleich der drei Dunkelflauten (DF) offenbart die kritische Rolle der minimalen Außentemperatur. Die Temperaturdifferenz von etwa 3 K beim Minimum erzeugt eine Lastdifferenz von ca. 25 %. Dieser ausgeprägte Nichtlinearitätseffekt ist eine direkte Konsequenz der Bivalenz: Sobald die Temperatur die -7°C -Schwelle unterschreitet, spielt die direkte Last durch Heizstäbe eine überproportionale Rolle.

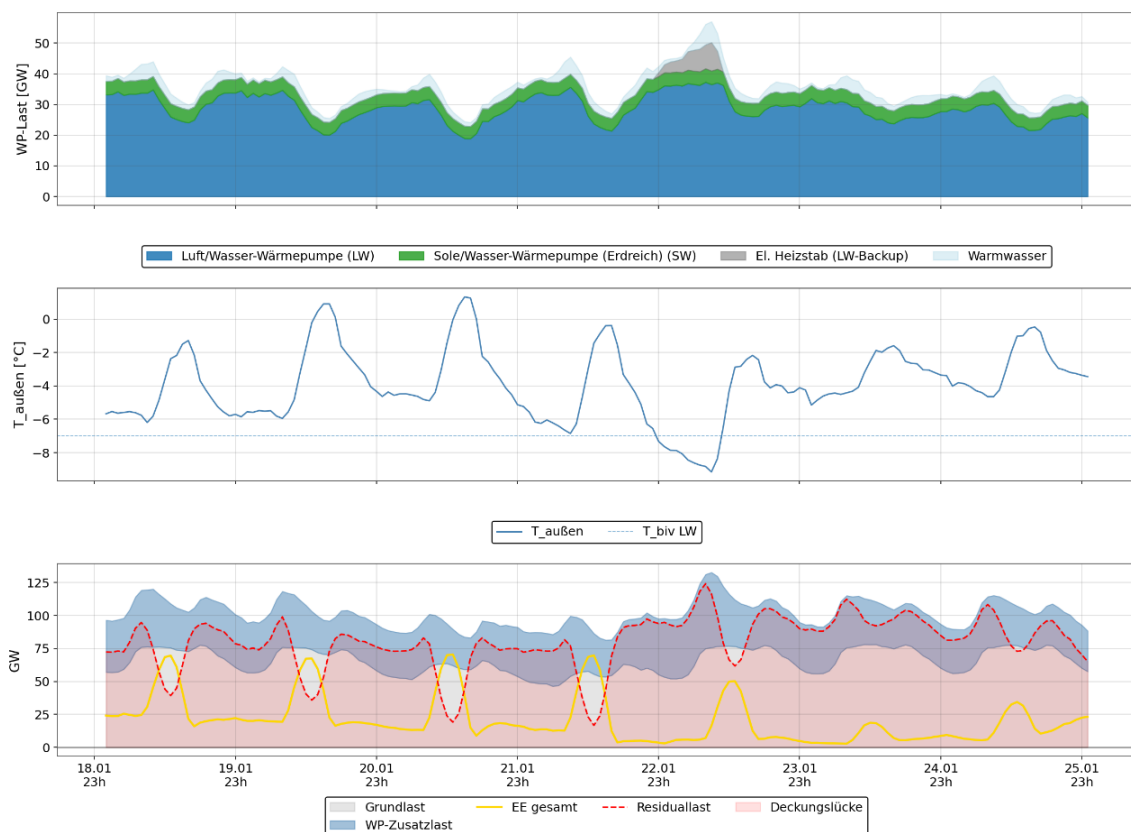
Abbildung 65: Vergleich der gesamten Stromlast durch Wärmepumpen im Jahr 2025 bei Annahme der Wetterdaten der gewählten Dunkelflaute-Wochen



Quelle: Eigene Darstellung IREES

Abbildung 66 illustriert das für die Dunkelflaute 1 noch einmal. Die Lastspitze durch den Heizstabbetrieb bei niedrigen Außentemperaturen ist hier deutlich zu erkennen und die gleichzeitig niedrige EE-Produktion während dieser Zeit hat eine hohe Residuallast zur Folge, die derzeit noch durch fossile Gas- und Kohlekraftwerke kompensiert wird. In einem Zielszenario mit klimaneutraler Stromproduktion (2045) muss die Residuallast allerdings vollständig durch erneuerbaren Strom aus zeitgleicher Produktion oder aus Speicherung gedeckt werden, wenn es keine weiteren Anreizmechanismen zur Lastflexibilisierung von Wärmepumpensystemen gibt. Solche Anreize könnten die Residuallast deutlich verringern, wenn die bestehenden Flexibilitätswenster der Gebäude (siehe Kapitel 6.7) durch Lastabschaltung ohne nennenswerten Komfortverlust ausgenutzt würden.

Abbildung 66: Stromlast durch Wärmepumpen und resultierende Residuallast während der Dunkelflaute 1



Quelle: Eigene Darstellung IREES

6.3.8 Stündliche Stromlast im Gesamtjahr

Die Wärmepumpen-Systemlast wird für alle Stunden eines Simulationsjahres berechnet. Die Volljahressimulation bildet die Grundlage für die Analyse von Residuallast, Speicherbedarf und Systemdynamik in Kapitel 6.4. Die Dunkelflauten-Woche stellt dabei einen besonders kritischen Zeitraum dar, anhand dessen die Systemkomponenten ausgelegt werden.

Die Berechnung kombiniert zwei zentrale Eingangsdaten: stündlich aufgelöste Meteorologie²⁴- und Energiesystemprofile²⁵ mit Wind- (Onshore und Offshore) und PV-Kapazitätsfaktoren. Hinzu kommt eine Grundlast (ohne Wärmepumpenstrom) für 2024, welche auch für zukünftige Jahre als konstant angenommen wird. Auf dieser Basis wird für jeden Gebäudetyp und jede Stunde die elektrische Last der Wärmepumpen bestimmt.

²⁴ Basierend auf öffentlich verfügbaren Wetterdaten für 2024 von <https://open-meteo.com>

²⁵ Basierend auf Daten für 2024 von <https://www.energy-charts.info>, für zukünftige Jahre skaliert anhand der installierten Kapazitäten aus dem Projektionsbericht 2026

Zunächst wird die stündliche Heizlast aus dem temperaturabhängigen Heizbedarf abgeleitet und über einen PT1-Filter mit der thermischen Zeitkonstante der Gebäude aus dem Gebäudemodell Invert/ee-Lab geglättet, um die thermische Trägheit der Gebäude zu berücksichtigen. Anschließend wird die Vorlauftemperatur über eine witterungsgeführte Heizkurve bestimmt. In Kombination mit der Quelltemperatur ergibt sich daraus der stündliche COP, der mithilfe des hplib-Generic-Modells²⁶ berechnet wird. Für Luft-Wasser-Wärmepumpen werden zusätzlich Effizienzverluste durch Abtauvorgänge berücksichtigt.

Unterhalb des Bivalenzpunkts wird die Wärmepumpe schrittweise durch einen elektrischen Heizstab ergänzt, wodurch der Strombedarf deutlich ansteigt. Ergänzend wird ein standardisiertes Warmwasserprofil nach VDI 4655/DHWcalc mit typischer konstanter Effizienz (COP = 2,5) für drei Gebäudekategorien berechnet.

Die elektrische Gesamtlast ergibt sich als Summe der elektrischen Lasten aller Typgebäude aus dem Gebäudemodell Invert/ee-Lab mit installierter Wärmepumpe unter Berücksichtigung ihrer Häufigkeit im Gebäudebestand. Dabei wird für jeden Gebäudetyp ein synchrones Verhalten angenommen. Nicht berücksichtigt werden stochastische Effekte wie Nutzerverhalten, sodass die resultierende Systemlast als konservative Obergrenze interpretiert werden kann.

Auf Basis der berechneten Wärmepumpenlast wird die Residuallast als Differenz aus Gesamtlast (inkl. Wärmepumpen) und erneuerbarer Erzeugung bestimmt. Diese Zeitreihe bildet die Grundlage für die Analyse von Lastdauern, Rampen, Speicherbedarf und Deckungsgraden. Die identifizierten Dunkelflauten stellen dabei die systemkritischsten Zeiträume innerhalb der Jahressimulation dar.

6.4 Auswirkungen auf Gesamtsystemebene

Die Auswirkungen des Wärmepumpenhochlaufs auf das Energiesystem zeigen sich nicht nur in steigenden Lastspitzen, sondern insbesondere in der zeitlichen Dynamik der sogenannten Residuallast. Diese beschreibt die Differenz zwischen Stromnachfrage und fluktuierender erneuerbarer Erzeugung (insbesondere Wind und Photovoltaik). Sie gibt somit an, welcher Leistungsbedarf zu jedem Zeitpunkt durch steuerbare Kraftwerke, Speicher oder Lastmanagement gedeckt werden muss. Im Nachfolgenden wird aus der Lastspitze der installierten Wärmepumpen in der Dunkelflaute die maximale Residuallast entwickelt, welche die Grundlage für die Abschätzung des Speicherbedarfs bildet.

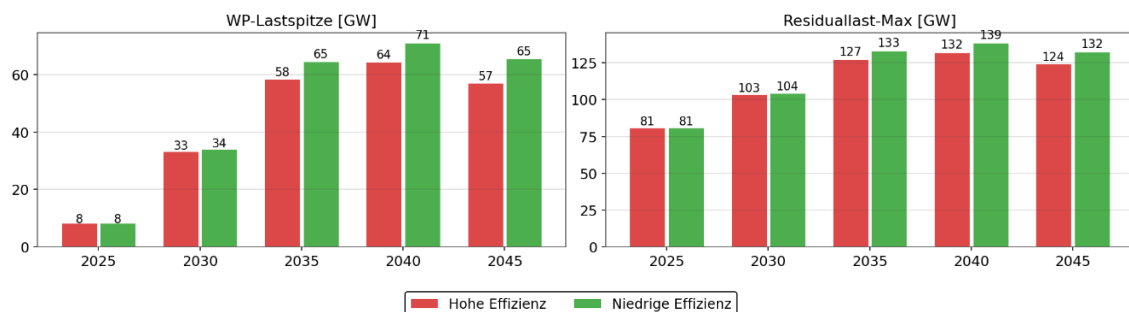
6.4.1 Entwicklung der maximalen WP-Last und Residuallast

Aus der Jahressimulation ergibt sich einerseits die maximale Stromlast der Wärmepumpensysteme im Jahr und im Zusammenspiel mit der EE-Erzeugung die maximale Residuallast, die Aufschluss über den notwendigen weiteren EE- bzw. Speicherausbau gibt. Abbildung 67 zeigt den Vergleich beider Größen in beiden

²⁶ Tjarko Tjaden, Hauke Hoops, Kai Rösken. (2021). RE-Lab-Projects/hplib: heat pump library (v2.0). Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.5521597>

Szenarien für die Jahre 2025, 2035 und 2045. Im Niedrigeffizienzzenario liegt die Lastspitze im Jahr 2045 um rund 8 GW höher als im Szenario mit höheren Sanierungsraten und Sanierungstiefen. Das führt zu einer Differenz in der maximalen Residuallast in derselben Größe, was eine Erhöhung um etwa 6 % bedeutet. Mit zunehmender Elektrifizierung des Wärmesektors steigt die Residuallast insbesondere im Winter deutlich an, da hohe Heizlasten mit gleichzeitig geringer erneuerbarer Erzeugung zusammentreffen. Zusätzlich nehmen die Änderungsraten der Residuallast (sogenannte Rampen) zu. Diese beschreiben die stündliche Veränderung der benötigten Leistung und sind eine zentrale Kenngröße für den Flexibilitätsbedarf des Energiesystems.

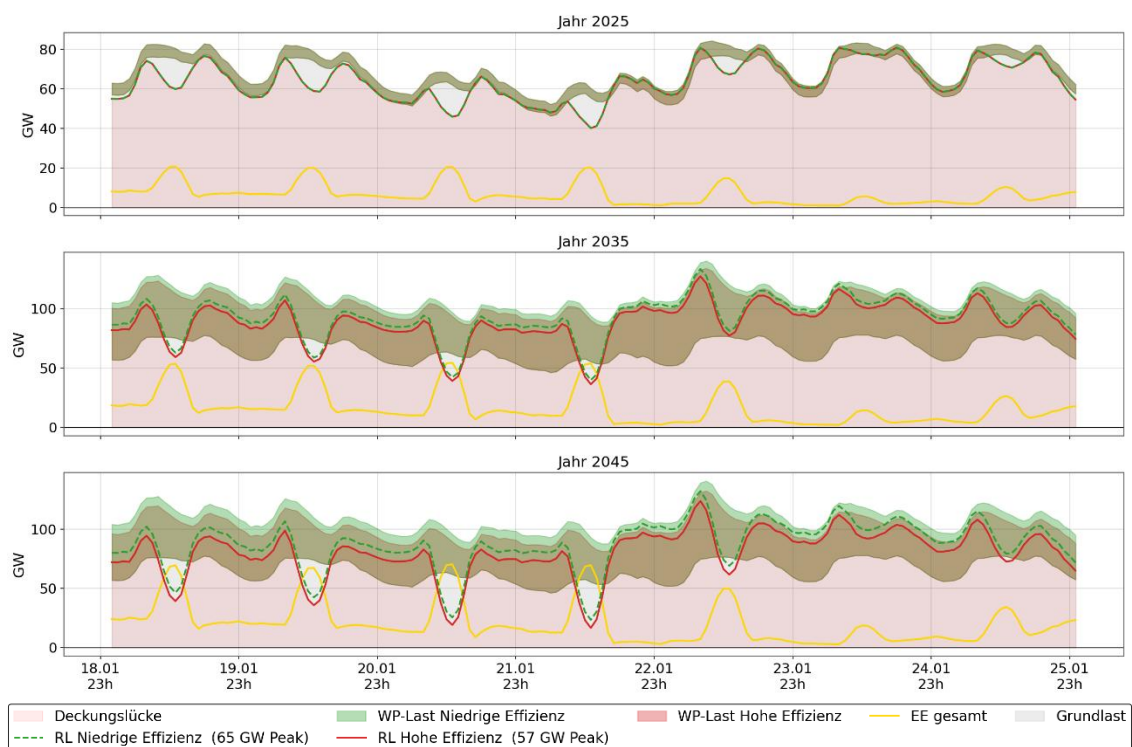
Abbildung 67: Vergleich der Strom-Lastspitzen und maximalen Residuallasten durch Wärmepumpen beider Effizienzzenarien



Quelle: Eigene Darstellung IREES

Abbildung 68 zeigt den Verlauf der Stromlast durch Wärmepumpen, der EE-Erzeugung und der Residuallast für eine Woche mit Dunkelflaute-Bedingungen für die Jahre 2025, 2035 und 2045 im Vergleich zwischen den beiden Effizienzzenarien. Dabei wurden die Wetterdaten der Dunkelflautenwochen verwendet und die historische Wind- und PV-Produktion anhand des EE-Ausbaus aus dem Projektionsbericht 2026 skaliert.

Abbildung 68: Vergleich der WP-Stromlasten zwischen den Effizienzscenarien während einer Dunkelflautenwoche



Quelle: Eigene Darstellung IREES

6.4.2 Entwicklung des Speicherbedarfs

Der durch den Wärmepumpenhochlauf induzierte Speicherbedarf wird auf Basis der stündlichen Residuallast bestimmt. Positive Residuallast bedeutet dabei einen Strombedarf, der durch Speicher oder andere Flexibilitätsoptionen gedeckt werden muss, während negative Werte auf Überschüsse hinweisen.

Die Berechnung des Speicherbedarfs erfolgt zunächst auf verschiedenen Zeitskalen und für ein vollständiges Meteorologiejahr und wird mithilfe eines hierarchischen Speicherkapazitätsmodells in Anlehnung an (Mahmud u. a. 2022), hier als „Wasserfallmethode“ bezeichnet, ausgewertet. Dabei wird die minimale Speicherkapazität bestimmt, die erforderlich ist, um zeitliche Defizite auf verschiedenen Zeitskalen vollständig auszugleichen. Die auszugleichende Residualleistung wird um eine Dauerleistung, die durch steuerbare Kraftwerke, Netzimporte und Nachfrageflexibilität permanent bereitgestellt wird und somit nicht durch den Speicher erbracht werden muss, reduziert. Alle Stunden, in denen die Residuallast unterhalb dieses Schwellenwertes liegt, leisten keinen Beitrag zum Speicherbedarf. Dieser Schwellenwert wird als Quantil der Jahres-Residuallastzeitreihe definiert. Das Kappungsperzentil P90 bedeutet beispielsweise, dass 90 % aller Jahresstunden unterhalb des Schwellenwertes liegen und allein durch die unterstellte Dauerleistung versorgt werden und nur die verbleibenden zehn Prozent der Jahresstunden erzeugen Speicherbedarf. Die Wahl des Kappungsperzentils ist eine Systemannahme und beeinflusst den ausgewiesenen

Speicherbedarf erheblich: Bei P95 werden lediglich die absoluten Extremstunden dem Speicher zugerechnet, während P85 nahezu den gesamten Winterenergieüberhang erfasst.

Im ersten Schritt wird für jede Stunde die effektive Fehlenergie berechnet, die der Speicher bereitzustellen hat. Stunden mit einer Residuallast unterhalb des oben beschriebenen Schwellenwertes werden dabei auf null gesetzt, da sie durch andere Quellen gedeckt sind. Im zweiten Schritt wird die Fehlenergie über die Zeit kumuliert. Das entscheidende Merkmal dieses Schritts ist die Bildung des laufenden Maximums des kumulierten Werts: Das Speicherniveau steigt an, wenn aufeinanderfolgende Defizit-Stunden die verfügbare Kapazität schrittweise in Anspruch nehmen. Es bleibt konstant, wenn ein EE-Überschuss den Speicher zwischenzeitlich wieder auflädt. Diese Formalisierung des laufenden Maximums ist das mathematische Kernstück der Methodik. Im dritten Schritt ergibt sich die gesuchte Mindestkapazität als das globale Maximum des Niveauprofils über das gesamte Betrachtungsjahr.

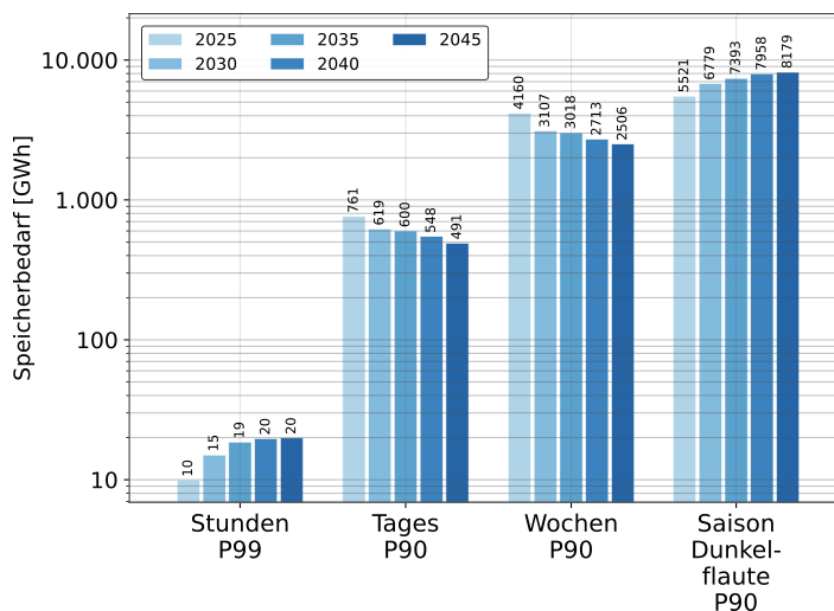
Im Modell wird die beschriebene „Wasserfallmethode“ auf vier Zeitskalen angewendet, die unterschiedliche Systemanforderungen und Technologien adressieren.

- **Stundenspeicher:** Hier wird nicht die Wasserfallmethode, sondern das P99-Quantil der stündlichen absoluten Residuallast-Rampen (stündliche Residuallast-änderung) verwendet. Dieser Wert entspricht der Regelleistungskapazität, die in 99 Prozent aller Jahresstunden ausreicht, um Lastsprünge der WP-Systemlast auszugleichen.
- **Tagesspeicher:** Die Wasserfallmethode wird auf jedem der 365 Tagessegmente (24 Stunden) separat angewendet. Das P90-Quantil über alle Tageswerte ergibt die Kapazität, die an 90 Prozent aller Tage ausreicht, um bspw. den photovoltaikbedingten Tagesgang auszugleichen.
- **Wochenspeicher:** Analog wird die Methode auf die 52 Wochensegmente (168 Stunden) angewendet und das P90-Quantil bestimmt. Dieser Wert entspricht der Kapazität, die in der fünftschlimmsten Woche des Jahres eine vollständige Überbrückung ermöglicht und damit Dunkelflauten-Ereignisse typischer Dauer abdeckt.
- **Saisonspeicher:** Die Wasserfallmethode wird auf das vollständige Jahresprofil angewendet, nach Kappung mit dem P90 Perzentil. Der resultierende Speicherbedarf quantifiziert den saisonalen Mismatch zwischen dem sommerseitigen PV-Überschuss und dem winterseitigen WP-Energiebedarf. Dieser Wert wächst mit zunehmendem EE-Ausbau, da der Sommer-Überschuss schneller ansteigt als der Winter-Bedarf abnimmt.

Zu beachten ist, dass der Speicherausbau für ein rein erneuerbares Zielsystem ohne fossile Kraftwerke in dieser Studie auch schon vor 2045 berechnet wurde. Insbesondere der saisonale Speicherbedarf weist eine hohe Unsicherheit auf und ist daher als Größenordnung zu interpretieren. Zudem werden andere Maßnahmen der Lastverschiebung bspw. durch Flexibilisierung industrieller Stromverbräuche oder flexiblen Betrieb von Wärmepumpen und Ladestationen hier nicht berücksichtigt. Für den Vergleich der Szenarien sind die Ergebnisse jedoch robust, da die methodischen Annahmen konsistent angewendet werden.

Die Ergebnisse in Abbildung 69 zeigen eine klare Verschiebung der Speicheranforderungen: Während mittelfristige Speicherbedarfe (Tage und Woche) mit zunehmendem Ausbau erneuerbarer Energien tendenziell sinken, steigt der Bedarf an saisonaler Speicherung deutlich an. Der Saisonspeicher wächst von rund 5,5 TWh im Jahr 2025 auf über 8 TWh im Jahr 2045 (jeweils P90) und dominiert damit den Gesamtbedarf. Er ist etwa zwei Größenordnungen größer als der Bedarf an kurzzeitigen Speichern. Die abgeschätzte Kapazität an Kurzzeitspeichern zeigt ebenfalls einen deutlichen Anstieg in diesem Zeitraum. Die P99-Rampe der Residuallast steigt von etwa 10 GW im Jahr 2025 auf 20 GW im Jahr 2045 und verdoppelt sich damit innerhalb von zwei Jahrzehnten. Zum Vergleich liegt die heute verfügbare Regelleistung (Primär- und Sekundärregelleistung) in Deutschland mit etwa 7 GW in einer deutlich geringeren Größenordnung. Diese zeigt, dass der identifizierte Flexibilitätsbedarf im Modell mit dem P99 Perzentil deutlich überschätzt wird.

Abbildung 69: Speicherkapazitätsbedarf auf verschiedenen Zeitskalen, bestimmt nach der „Wasserfallmethode“ in Anlehnung an (Mahmud u. a. 2022)



Quelle: Eigene Darstellung IREES

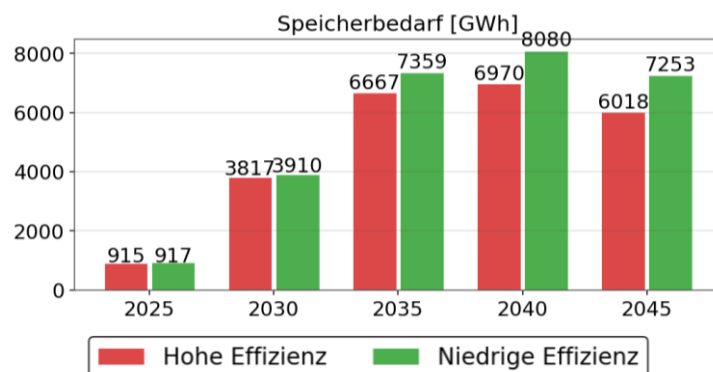
Die beobachtete Entwicklung ist systemisch begründet, da mit zunehmendem Ausbau von Photovoltaik im Sommer große Stromüberschüsse entstehen, während im Winter gleichzeitig hohe Wärmepumpenlasten und geringe erneuerbare Einspeisung auftreten. Dieses saisonale Ungleichgewicht kann nicht durch kurzzeitige Speicher ausgeglichen werden, sondern erfordert langfristige Speicherlösungen, typischerweise auf Basis von Wasserstoff.

Der Vergleich des durch Wärmepumpen induzierten Speicherbedarfs zwischen den Szenarien erfolgt auf Basis einer Dunkelflautenwoche (168 Stunden) ohne Residuallastkappung anstelle einer jahresbasierten Analyse. Diese methodische Wahl ist durch die Interaktion unterschiedlicher Zeitskalen im Energiesystem begründet: Speicher wirken nicht unabhängig auf Tages-, Wochen- oder saisonaler Ebene, sondern sind hierarchisch substitutiv miteinander verknüpft. So kann beispielsweise

ein groß dimensionierter saisonaler Speicher bei entsprechender Dynamik auch kurzfristige Schwankungen ausgleichen und damit den Bedarf an Kurzzeitspeichern reduzieren. Eine konsistente Abbildung dieser Zusammenhänge würde eine optimierte Einsatzplanung über alle Zeitskalen hinweg erfordern, einschließlich technologiespezifischer Restriktionen wie Wirkungsgrade, Leistungsgrenzen und Mindestfüllstände. Ein derartiges Optimierungsmodell liegt jedoch außerhalb des Rahmens dieser Untersuchung. Die gewählte Dunkelflautewoche stellt demgegenüber einen konsistenten und konservativen Referenzfall dar, da sie den systemkritischsten Zeitraum mit hoher Last und gleichzeitig geringer erneuerbarer Einspeisung abbildet. Der daraus berechnete kumulierte Fehlbedarf erfolgt ohne Annahmen über verfügbare Dauerleistung und ist somit unabhängig von spezifischen Systemkonfigurationen direkt zwischen Szenarien vergleichbar. Methodisch ist jedoch zu berücksichtigen, dass der so bestimmte Speicherbedarf keine eindeutige Zuordnung zu konkreten Speichertechnologien oder Zeitskalen erlaubt, sondern vielmehr eine vom Szenario unabhängige Untergrenze des erforderlichen Pufferbedarfs in der kritischsten Woche darstellt.

Die Ergebnisse der Abschätzung des saisonalen Speicherbedarfs zum vollständigen Ausgleich der Wärmepumpen-bedingten Residuallast einer Dunkelflaute sind in Abbildung 69 zu sehen. Der maximale Speicherbedarf wird in beiden Szenarien im Jahr 2040 erreicht und ist bis 2045 wieder leicht rückläufig. Diese Entwicklung ist auf den schnellen Wärmepumpenhochlauf bis 2040 zurückzuführen, welcher ab diesem Zeitpunkt vom EE-Ausbau und dem Bedarfsrückgang durch Bestandssanierung kompensiert wird. Im Niedrigeffizienzscenario zeigt sich im Jahr 2045 ein um 1.235 GWh erhöhter Ausgleichsbedarf, voraussichtlich in Form von saisonalen Wasserstoffspeichern.

Abbildung 70: Vergleich des Speicherbedarfs in beiden Effizienzscenarien bei Annahme eines vollständigen Ausgleichs der Residuallast durch saisonale Speicher



Quelle: Eigene Darstellung IREES

6.5 Auswirkungen auf Verteilnetzebene

Die Auswirkungen unterschiedlicher Sanierungsszenarien auf die Verteilnetzebene werden anhand der resultierenden Transformatorauslastung in Niederspannungsnetzen auf sehr vereinfachte Art analysiert. Ziel ist es, abzuschätzen,

ab welcher Marktdiffusion von Wärmepumpen und Anschlussleistungen kritische Netzbelastungen in verschiedenen Siedlungstypen auftreten.

Eine zentrale Kenngröße ist dabei der Gleichzeitigkeitsfaktor (GZF), der das Verhältnis zwischen der tatsächlich auftretenden Spitzenlast eines Gebäudeclusters und der theoretischen Maximallast beschreibt. Mit zunehmender Clustergröße nimmt der GZF üblicherweise ab, da sich individuelle Lastspitzen teilweise entkoppeln. Zur Bestimmung werden für verschiedene Clustergrößen ($N = 1$ bis 5.000) jeweils 300 zufällige Stichproben aus dem gewichteten Gebäudebestand gezogen. Die Ergebnisse berücksichtigen die strukturelle Heterogenität des Bestands (z. B. unterschiedliche Vorlauftemperaturen und thermische Trägheit), jedoch keine stochastischen Effekte wie Nutzerverhalten oder Taktbetrieb. Der reale GZF liegt daher typischerweise etwa 10–25 % unter den Modellwerten, die als konservative Obergrenze interpretiert werden.

Die Auslastung eines Niederspannungstransformators ergibt sich aus der Überlagerung von Haushalts- und Wärmepumpenlast, wobei letztere über die Anzahl der Anlagen, die mittlere Gebäudeleistung und den Gleichzeitigkeitsfaktor skaliert wird. Auf dieser Basis können kritische Betriebszustände identifiziert und Diffusionsschwellen für Überlastungen bestimmt werden. Zusätzlich wird der Einfluss netzdienlicher Steuerung gemäß §14a EnWG untersucht, indem eine teilweise Leistungsreduktion der Wärmepumpen modelliert und deren Wirkung auf die Trafoauslastung quantifiziert wird.

Ähnliche Fragestellungen wurden in der Studie des Fraunhofer IEE „Flexible Wärmepumpen im Verteilnetz“²⁷ im Auftrag des Bundesverband Wärmepumpe untersucht. Diese analysiert ebenfalls gebäudescharfe Lastprofile und deren Auswirkungen auf Niederspannungsnetze und kommt zu dem Ergebnis, dass Netzengpässe im Jahresverlauf typischerweise nur zeitlich und räumlich begrenzt auftreten. Zudem zeigt sie, dass Wärmepumpen im Durchschnitt keine stärkere Netzbelastung verursachen als Photovoltaik oder Elektromobilität und dass einfache Flexibilitätsmechanismen den Netzausbaubedarf um bis zu 23 % reduzieren können.

Die vorliegende Analyse bestätigt diese Befunde grundsätzlich, erweitert sie jedoch um den systemisch relevanten Extremfall der Dunkelflaute. Während Engpässe unter normalen Betriebsbedingungen nur an wenigen Tagen auftreten, zeigt sich unter Extremkälte (Außentemperaturen < -7 °C) eine witterungsgetriebene Synchronisierung der Lasten: Der Gleichzeitigkeitsfaktor konvergiert für Luft-Wasser-Wärmepumpen gegen 1, da alle Anlagen gleichzeitig ineffizient arbeiten und Heizstäbe zuschalten. In diesen Situationen werden Wärmepumpen zum dominierenden Lastfaktor, während PV-Einspeisung praktisch entfällt und andere Lasten wie E-Mobilität eine untergeordnete Rolle spielen.

Die durchgeführte Analyse zeigt, dass bereits bei sehr niedrigen Durchdringungsraten kritische Netzsituationen auftreten können. Die kritische Diffusionsrate liegt in allen Siedlungstypen bei etwa 5 %. Ursache ist die starke Synchronisierung der Lasten bei

²⁷ (Spalthoff u. a., o. J.): https://www.waermepumpe.de/fileadmin/user_upload/Kurzstudie_FlexWP.pdf

niedrigen Außentemperaturen, insbesondere unterhalb des Bivalenzpunkts. Für das Jahr 2030 kommen (Spalthoff u. a. 2022) hingegen zu dem Schluss, dass geringe Zubauten durch die vorhandene Netzkapazität gut aufgefangen werden können, während in hoch ausgelasteten Netzen einzelne weitere Verbraucher zu einem überproportionalen Anstieg der Netzüberlastungen führen.

Mit steigender Wärmepumpendurchdringung nimmt die Überladungsdauer in der hier durchgeführten Modellierung deutlich zu und wird zunehmend strukturell. Während bei niedrigen Diffusionsraten nur einzelne Stunden betroffen sind, treten bei höheren Anteilen ($\geq 50\%$) langanhaltende Überlastungen auf, die einen Netzausbau notwendig erscheinen lassen.

Zur Bewertung netzdienlicher Flexibilität wird die Wirkung der Steuerung gemäß §14a EnWG berücksichtigt. Diese Regelung erlaubt es Netzbetreibern, steuerbare Verbrauchseinrichtungen wie Wärmepumpen im Fall lokaler Netzengpässe temporär (max. 2 Stunden pro Tag) in ihrer Leistung zu begrenzen, wobei eine Mindestversorgung (z. B. 4,2 kW Anschlussleistung) sichergestellt bleibt. Im Modell wird angenommen, dass 30 % der Wärmepumpen steuerbar sind und im Bedarfsfall um bis zu 35 % gedimmt werden können.

Die Ergebnisse zeigen, dass §14a EnWG insbesondere bei niedrigen bis mittleren WP-Diffusionsraten (ca. 5–20 %) eine signifikante Reduktion der Überladungsdauer ermöglicht. Bei hohen WP-Diffusionsraten über 50 % reicht diese Maßnahme jedoch nicht aus, um strukturelle Netzengpässe zu vermeiden. In diesen Fällen sind zusätzliche Maßnahmen wie Netzausbau, Lastverschiebung oder eine gezielte Steuerung auf Quartiersebene erforderlich.

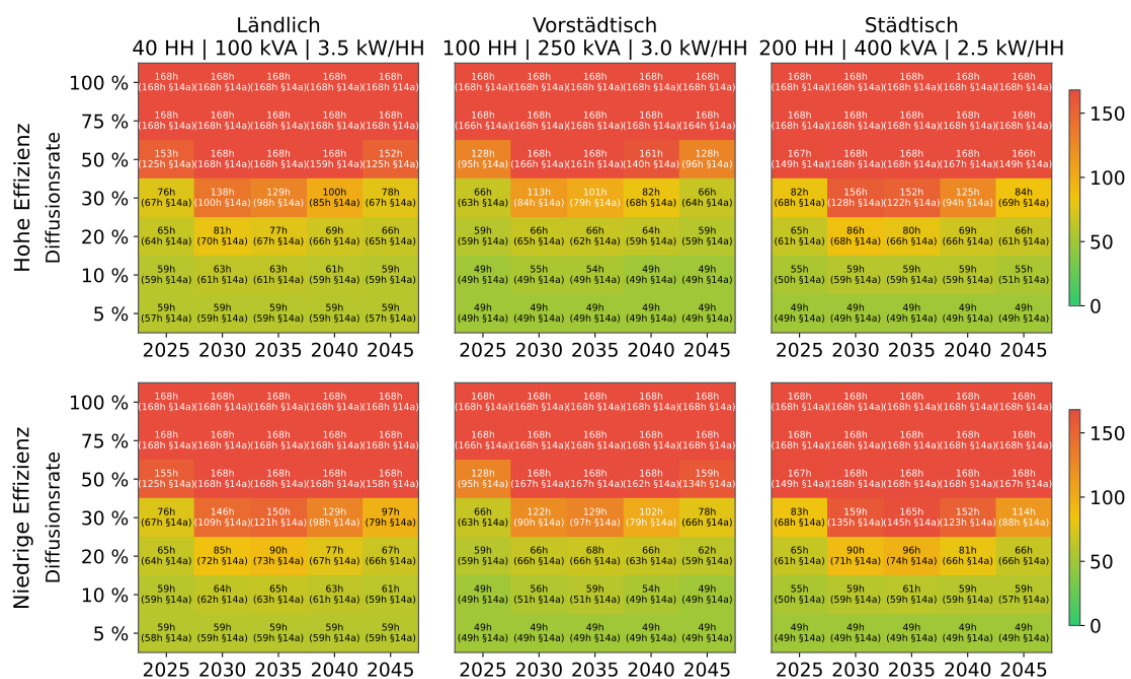
Hinsichtlich der Flexibilitätswirkung zeigen sich Ergebnisse in ähnlicher Größenordnung wie in der Studie des Fraunhofer IEE. Unter Normalbedingungen weist diese eine Reduktion des Netzausbaubedarfs um bis zu 23 % durch freiwillige Regelungsmechanismen auf. In der vorliegenden Analyse ergibt sich für §14a-Steuerung eine Reduktion der Überlastungsstunden um etwa 15–25 %, trotz deutlich ungünstigerer Randbedingungen. Beide Analysen kommen damit übereinstimmend zu dem Schluss, dass Flexibilitätsmaßnahmen eine wichtige Entlastungswirkung haben, strukturelle Netzengpässe bei einer hoher Marktdiffusion von Wärmepumpen jedoch nicht vollständig vermeiden können.

Siedlungstyp	Trafo-Nennlast	Haushalte je Trafo	Kritische WP-Diffusionsrate	Reduktion der Überlastungsstunden durch Drosselung (§ 14a EnWG)
Ländlich	100 kVA	40	5 %	20–30 %
Vorstädtisch	250 kVA	100	5 %	15–25 %
Städtisch	400 kVA	200	5 %	10–20 %

Es zeigt sich, dass Wärmepumpen die Anforderungen an die Verteilnetze deutlich erhöhen und gleichzeitig aber auch Möglichkeiten für systemdienliche Flexibilität bieten. Mechanismen wie die Drosselung nach § 14a EnWG oder freiwillige Lastverschiebung sind daher eine zentrale kurzfristige Maßnahme zur Netzentlastung, können jedoch den langfristig notwendigen Netzausbau nicht ersetzen. Eine effiziente Integration hoher Wärmepumpenanteile erfordert daher eine Kombination aus Netzausbau und Flexibilisierung mit „smarten“ Lösungen.

Wie ein Vergleich der Überlastungszeiten von Verteilnetz-Transformatoren in Abbildung 71 zeigt, unterscheiden sich die beiden Effizienzsznarien nur geringfügig in der kritischen Diffusionsrate, ab der zu jeder Stunde der Dunkelflautenwoche eine Belastung von über 80 % der Transformator-Kapazität stattfindet. In beiden Szenarien wird deutlich, dass unter Extrembedingungen ab etwa 30 % Verbreitung von Wärmepumpen eine dauerhafte Überlastung stattfindet.

Abbildung 71: Modellierte Stunden mit einer Transformator-Auslastung > 80 % für drei typische Verteilnetze, verschiedene Wärmepumpen-Diffusionsraten (Anteil der Gebäude) und das Hoch- und NiedrigeffizienzszENARIO während der Dunkelflautenwoche



Quelle: Eigene Darstellung IREES

6.6 Schätzung der Energiesystemkosten

Grundlage der Abschätzung der Energiesystemkosten, die kausal dem Wärmepumpenhochlauf zugerechnet werden können, ist ein Multiplikatoren-Ansatz: Die aus der physikalischen Modellierung abgeleiteten Kenngrößen (z. B. Spitzenlast, Speicherbedarf, Rampen) werden mit spezifischen Kostensätzen aus der Literatur verknüpft. Die Ergebnisse stellen keine vollständige Systemkostenanalyse dar,

sondern eine konservative Untergrenze der WP-induzierten Kosten für Netze, Speicher und Systemdienstleistungen.

Die dargestellten Kosten sind ausschließlich im relativen Vergleich der Szenarien zu interpretieren. Aufgrund der vereinfachten Modellierung, aggregierter Annahmen und methodischer Unsicherheiten erlauben die Ergebnisse keine belastbaren absoluten Aussagen über die tatsächliche Höhe der Systemkosten. Sie dienen vielmehr der Abschätzung von Größenordnungen und der Bewertung von Kostenunterschieden zwischen unterschiedlichen Effizienzpfaden im Gebäudesektor.

6.6.1 Verwendete Kostensätze

Übertragungsnetz (95 T€/MW)

Die Kosten werden proportional zur zusätzlichen WP-Spitzenlast angesetzt. Der Kostensatz basiert auf Standardkosten des Netzentwicklungsplans Strom 2035 (ÜNB, 2021), der u. a. HGÜ-Freileitungen (~2,0 Mio. €/km), DC-Konverter (~0,3 Mio. €/MW) und 380-kV-Leitungen (~2,5 Mio. €/km) ausweist (siehe *Netzentwicklungsplan Strom 2035*, o. J.). Daraus ergeben sich systemische Kosten von mehreren hundert T€/MW, von denen ein Anteil dem WP-Hochlauf zugerechnet wird. Der verwendete Wert von 95 T€/MW liegt im Zentrum eines plausiblen Korridors.

Verteilnetz (60 T€/MVA)

Die Kosten basieren auf der Verstärkung von Ortsnetztransformatoren und Niederspannungssträngen. Der Wert entspricht typischen Planungsansätzen und wird durch aktuelle Studien zum steigenden Verteilnetzausbaubedarf bestätigt (z. B. dena-Verteilnetzstudien, Bundesnetzagentur mit signifikanten Investitionsbedarfen im zweistelligen Milliardenbereich) (Wenderoth u. a. 2025).

Kurzzeitspeicher – Batteriespeicher (300 T€/MWh)

Der Kostensatz entspricht einer konservativen Mittelfristschätzung zwischen aktuellen Marktpreisen für großskalige Batteriesysteme von etwa 500-1000 €/kWh und langfristigen Projektionen für 2040 von 150-420€/kWh (Kost 2024).

Saisonspeicher – Wasserstoff in Salzkavernen (12 T€/MWh)

Für große Speicherbedarfe können H₂-Kavernenspeicher eingesetzt werden. Die reine Speicherung in Salzkavernen ist dabei mit Werten zwischen 100 und 840€/MWh vergleichsweise günstig (Deutsche Energie-Agentur 2024). Für die notwendige Elektrolyse, Verdichtung und Rückverstromung wird unter optimistischen Annahmen ein verketteter Wirkungsgrad von 30-40 % angenommen. Mit prognostizierten Wasserstoffkosten nach einem Whitepaper von Prognos (2024)²⁸ werden die Gesamtkosten der Umwandlung und Speicherung auf 12 000 €/MWh geschätzt.

Alle Kosten werden als Barwert für den Zeitraum 2025–2045 mit Kapitalkosten von 4 % ausgewiesen. Nicht enthalten sind Investitionen in Wärmepumpen, Gebäudesanierung, erneuerbare Erzeugung sowie externe Effekte.

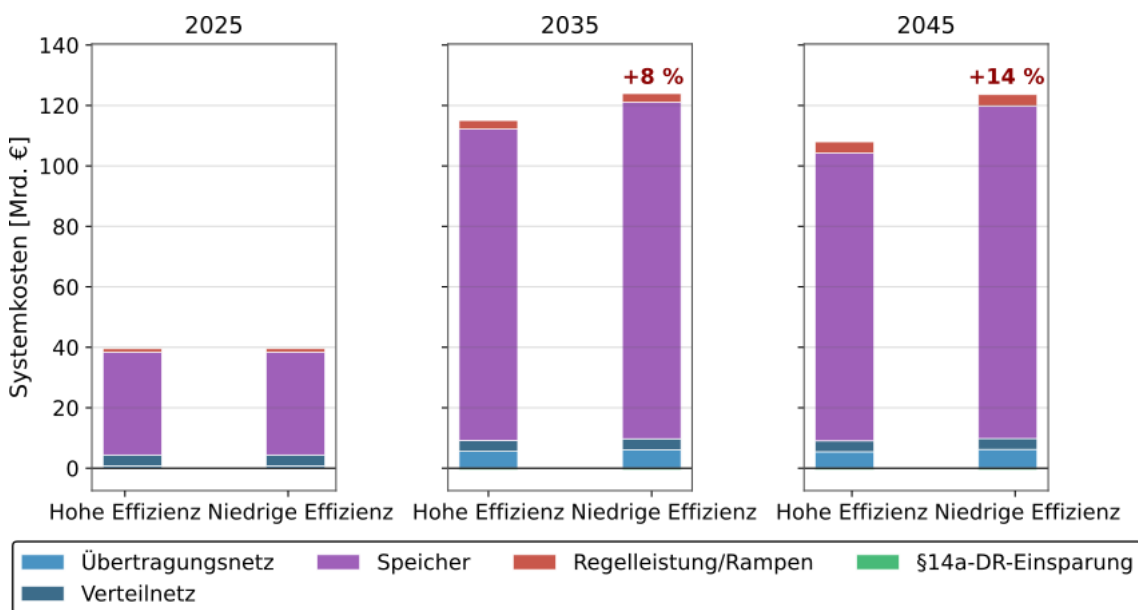
²⁸ [Kosten und Transformationspfade für strombasierte Energieträger](#)

EE-Ausbaukosten werden bewusst von der Abschätzung der Energiesystemkosten ausgenommen, da sie nicht direkt dem Hochlauf von Wärmepumpen zugerechnet werden können und zudem ein Substitutionsverhältnis zwischen Erzeugung und Speicher besteht. Die ausgewiesenen Kosten stellen die Systemkosten bei gegebenem EE-Ausbau Pfad dar und insbesondere die Kosten für einen Ausgleich von Last und Erzeugung.

6.6.2 Vergleich der Kosten zwischen den Szenarien

Abbildung 72 zeigt den Vergleich der abgeschätzten, Wärmepumpen-induzierten jährlichen Kosten aufseiten des Stromsystems für verschiedene Stützjahre. Den größten Kostenanteil haben in beiden Szenarien die kurz-, mittel- und langfristigen Stromspeicher, die aufgrund der Annahmen der Analyse auch schon vor 2045 gebraucht werden, um Last und EE-Erzeugung zeitlich auszugleichen. Alternativ können auch die EE-Erzeugungskapazitäten ausgebaut werden, allerdings würde das zu einer erhöhten Abregelung bzw. Speicherbedarf insbesondere im Sommer führen. Der Hauptunterschied zwischen den Szenarien liegt in eben diesem Speicherausbau, der im Niedrigeffizienzscenario um 14 % erhöhte Energiesystemkosten bewirkt.

Abbildung 72: Vergleich der geschätzten jährlichen Kosten aufseiten des Stromsystems durch unterschiedliche Wärmepumpen-Stromlasten zwischen beiden Effizienzszzenarien



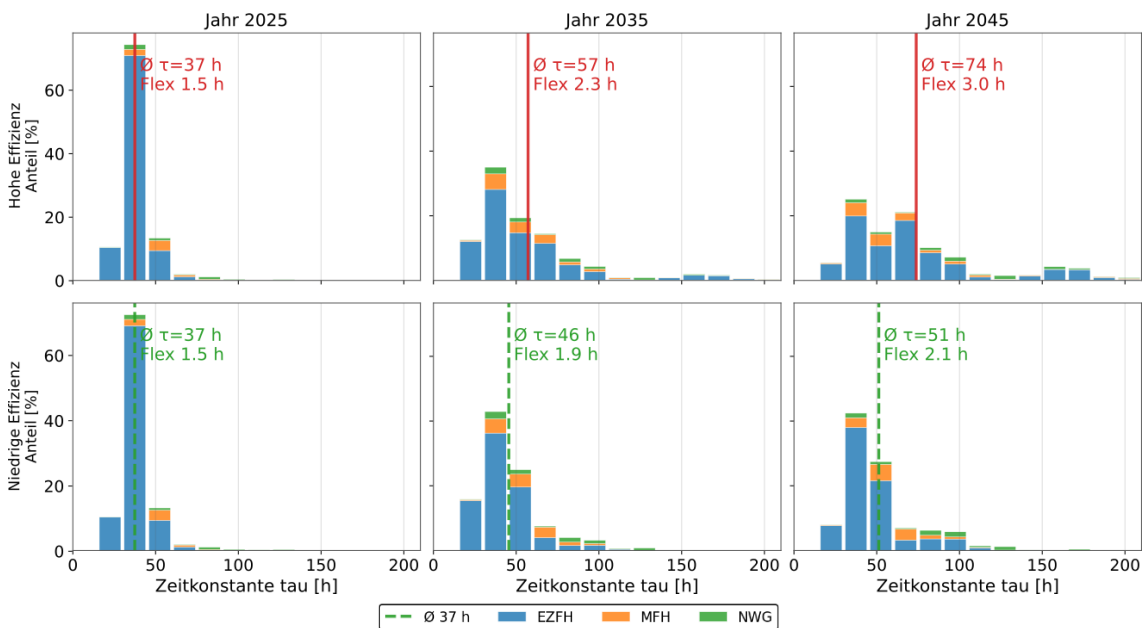
Quelle: Eigene Darstellung IREES

6.7 Flexibler Wärmepumpenbetrieb

Durch mehr und tiefere Sanierung erhöht sich das Potenzial für systemdienliche, flexible Fahrweise von Wärmepumpen ohne Komforteinbußen gleich durch zwei Effekte. Die thermische Zeitkonstante des Gebäudebestands liegt im Hocheffizienzscenario höher als im Niedrigeffizienzscenario (siehe Abbildung 73). Damit kann das Heizsystem längere Zeit heruntergeregelt werden, ohne die

Raumtemperatur nennenswert zu beeinflussen. Gleichzeitig werden bei verstärkter Sanierung häufiger Flächenheizungen mit niedrigen Vorlauftemperaturen eingesetzt, wodurch sich die Trägheit des Wärmeverteilsystems und das Potenzial für systemdienliche Lastreduktion der Wärmepumpe deutlich steigert. Allerdings sind solche Flächenheizungen (üblicherweise Fußboden-, aber auch Decken- oder Wandheizungen) gleichzeitig mit deutlich höheren Kosten im Vergleich zu neuen Radiatoren verbunden.

Abbildung 73: Relative Verteilung der thermischen Zeitkonstanten von Gebäuden mit Wärmepumpe für das Hoch- und Niedrigeffizienzzenario



Quelle: Eigene Darstellung IREES

Das Flexibilitäts-Fenster beschreibt die maximale WP-Abschaltdauer ohne Komfortverlust. Es folgt aus der Abkühlkurve durch PT1-Modellierung des Gebäudes mit der Gebäudezeitkonstante. Als Grenze für den Komfortverlust wird dabei eine Raumtemperaturänderung von 1 K angenommen. Das Flexibilitäts-Fenster gibt also die Zeiträume wieder, in denen das Heizsystem abgeschaltet sein kann, bis die Raumtemperatur um mehr als 1 K abkühlt. Das Flexibilitäts-Fenster wächst linear mit der Zeitkonstante τ und nimmt mit tieferen Außentemperaturen ab. Tabelle 5 zeigt die Entwicklung des Flexibilitäts-Fensters in beiden Szenarien.

Tabelle 5: Entwicklung des Flexibilitäts-Fensters

	Hocheffizienz-Szenario	Niedrigeffizienz-Szenario		Hocheffizienz-Szenario	Niedrigeffizienz-Szenario
Jahr	$\tau_{\text{Ø}}$ [h]	$\tau_{\text{Ø}}$ [h]	$\Delta\tau$ [h]	Flexibilitätsfenster [h]	Flexibilitätsfenster [h]
2025	37	37	0	1,5	1,5
2035	57	46	11	2,3	1,9
2045	74	51	23	3,0	2,1

Die gesamte Stromnachfrage durch Wärmepumpen lässt sich also theoretisch aktuell um etwa 90 Minuten und im Jahr 2045 im Hocheffizienzscenario bis zu drei Stunden ohne nennenswerten Komfortverlust vollständig abschalten. Durch eine Drosselung anstelle einer Abschaltung der Leistung könnten die durch Wärmepumpen verursachten Spitzenlasten im Stromsystem auch über längere Zeiträume reduziert werden. Ebenso bei Inkaufnahme stärkerer Abweichungen von der Raumtemperatur. Dazu müssen allerdings noch geeignete Anreizsysteme (weiter-)entwickelt werden.

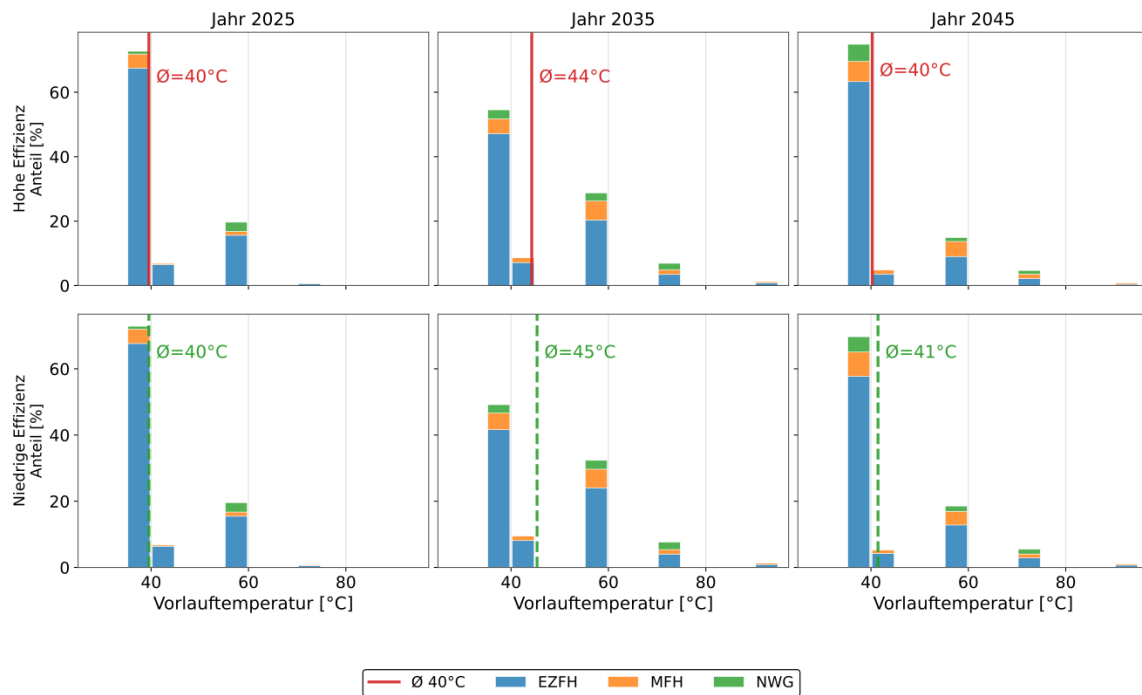
Eine Kurzstudie des Reiner Lemoine Instituts²⁹ zeigt, dass Wärmepumpen in Kombination mit Wärmespeichern ein relevantes Flexibilitätspotenzial für das Stromsystem bereitstellen können. Durch den netzdienlichen Betrieb lassen sich Lasten gezielt aus Hochlastzeiten in Zeiten niedriger Netzbelastung verschieben, wodurch insbesondere in Verteilnetzen Netzengpässe reduziert werden können. Die Modellierung verschiedener Flexibilitätsszenarien zeigt, dass bereits eine mittlere Flexibilisierung die größten systemischen Vorteile erzielt. In diesem Szenario reduzieren sich die Netzausbaukosten um rund 3,7 % beziehungsweise 1,33 Mrd. €, insbesondere in urbanen Niederspannungsnetzen. Gleichzeitig können Wärmepumpen durch den zusätzlichen Einsatz von Wärmespeichern in Gebäuden kleiner dimensioniert werden, wodurch auch die Investitionskosten für Wärmepumpen- und Speichersysteme leicht sinken. Insgesamt ergibt sich laut der Studie ein Einsparpotenzial von rund 1,84 Mrd. € gegenüber einem nicht flexiblen Betrieb. Die Ergebnisse verdeutlichen damit, dass Wärmepumpen nicht nur zusätzliche elektrische Lasten verursachen, sondern bei geeigneter Steuerung auch aktiv zur Systemstabilisierung beitragen können. Gleichzeitig zeigt die Studie, dass Flexibilität Netzausbau nicht vollständig ersetzt, sondern dessen Umfang und zeitlichen Druck reduziert, wenn Flexibilitätspotenziale gehoben werden.

6.8 Einfluss der Vorlauftemperatur

Wie die Analyse der Vorlauftemperaturverteilung in unterschiedlichen Szenariojahren der Simulation des Gebäudemodells in beiden Szenarien (Abbildung 74) zeigt, werden in beiden Szenarien mittelfristig mehr Wärmepumpen in unsanierten Altbauten mit höheren mittleren Vorlauftemperaturen eingesetzt. Langfristig sinken diese jedoch wieder, da ein zunehmender Anteil der Gebäude energetisch saniert und mit Niedertemperatur-Heizsystemen ausgestattet wird. Zwischen den Szenarien zeigen sich nur geringe Unterschiede, da die Auswertung auf durchschnittlichen Gebäudeeigenschaften basiert und nicht heizlastgewichtet erfolgt. Wie bereits erwähnt, ergibt sich in der Fragestellung des Zusammenhangs von energetischer Sanierung und Niedertemperaturfähigkeit weiterer Forschungsbedarf.

²⁹ https://reiner-lemoine-institut.de/wp-content/uploads/2023/12/394_wp_flex_final_report-2.pdf

Abbildung 74: Relative Verteilung an Gebäuden mit Wärmepumpe nach Vorlauftemperatur für das Hoch- und Niedrigeffizienzzenario



Quelle: Eigene Darstellung IREES

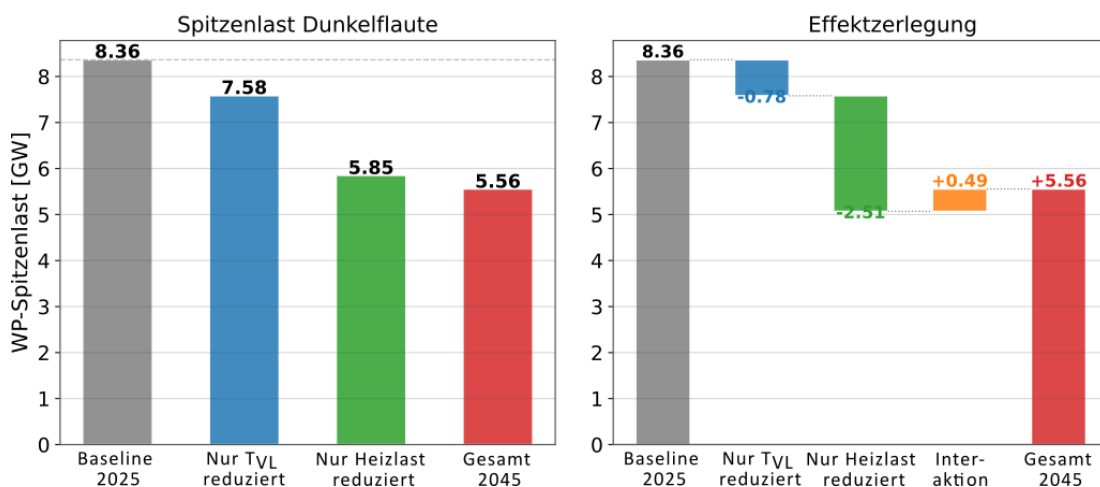
Eine reduzierte Vorlauftemperatur führt, wie in Kapitel 6.3.5 gezeigt, zu höheren Leistungszahlen und somit zu einer geringeren Belastung des Stromnetzes. Gleichzeitig reduziert sich die Netzlast zusätzlich durch eine reduzierte Heizlast infolge von energetischen Sanierungen. Zur Einordnung des Einflusses von verringerter Vorlauftemperatur und verringerter Heizlast infolge von energetischen Sanierungen wurde eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt, in der beide Effekte getrennt werden. Dazu wurde die Strom-Spitzenlast durch Wärmepumpen während der Dunkelflautenwoche in vier Varianten mit synthetischen Datensätzen gerechnet:

- Baseline 2025: Heizlast 2025 | COP mit Vorlauftemperatur 2025
- Nur T_VL: Heizlast 2025 | COP mit Vorlauftemperatur 2045
- Nur Heizlast: Heizlast 2045 | COP mit Vorlauftemperatur 2025
- Gesamt 2045: Heizlast 2045 | COP mit Vorlauftemperatur 2045

Die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse sind in Abbildung 75 dargestellt. Dabei zeigt sich, dass eine Reduktion der Heizlast durch energetische Sanierung einen deutlich stärkeren Effekt auf die Spitzenlast hat als eine alleinige Verbesserung der Leistungszahl (COP) infolge niedrigerer Vorlauftemperaturen. Konkret sinkt die Spitzenlast von 8,36 GW (Ausgangszustand 2025) auf 7,58 GW bei alleiniger COP-Verbesserung, während sie bei reduzierter Heizlast auf 5,85 GW fällt. Die Kombination beider Effekte führt zu einer geringeren Reduktion auf 5,56 GW. Dies verdeutlicht, dass die Effekte nicht additiv wirken: Ist die Heizlast bereits reduziert, fällt der zusätzliche Nutzen einer verbesserten Effizienz (durch geringere Vorlauftemperaturen) geringer aus.

Zwar ist der Effekt einer reduzierten Vorlauftemperatur um etwa den Faktor 3 geringer als die Reduktion der Heizlast, jedoch nicht in jedem Fall mit ähnlich hohen Kosten verbunden. Während eine neue Fußbodenheizung häufig Investitionen in der Größenordnung von Sanierungsmaßnahmen an der Gebäudehülle notwendig macht, kann die Vorlauftemperatur auch durch geringinvestive Maßnahmen wie dem Anpassen der Heizkurve, dem Austausch einzelner Heizkörper oder dem Einsatz von Heizkörperventilatoren reduziert werden.

Abbildung 75: Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse zum Einfluss von Heizlast- und Vorlauftemperaturreduktion bei Gebäuden mit Wärmepumpe



Quelle: Eigene Darstellung IREES

Felduntersuchungen des Fraunhofer ISE (Bongs u. a. 2022) zeigen, dass auch in Bestands-Mehrfamilienhäusern deutliche Absenkungen der Systemtemperaturen mit geringem Eingriff möglich sind. In einem Gebäude aus den 1960er Jahren konnte gezeigt werden, dass die Auslegung von 75/60 °C auf 60/50 °C bzw. 55/45 °C reduziert werden kann, indem lediglich rund 2 % bzw. 7 % der Heizkörper ausgetauscht werden. Alternativ kann die Leistung bestehender Heizkörper durch den Einsatz von leisen Ventilatoren („Heizkörperverstärker“) unterhalb der Heizkörper erhöht werden, wodurch sich die Wärmeübertragung deutlich, um bis zu 50 % verbessern lässt.

6.9 Zwischenfazit aus der Analyse der systemischen Auswirkungen

Die Analyse der Systemauswirkungen verdeutlicht, dass die Elektrifizierung des Wärmesektors nicht isoliert betrachtet werden kann, sondern signifikante Auswirkungen auf das gesamte Energiesystem hat. Energetische Sanierungen reduzieren einerseits den Wärmebedarf, senken elektrische Spitzenlasten von Wärmepumpen und erhöhen das Potenzial für Lastflexibilisierung. Damit fungiert Effizienz im Gebäudebereich teilweise als Substitut für Infrastrukturinvestitionen im Stromsystem. Diese systemische Verschiebung wird auch in der Literatur bestätigt, wonach geringere Sanierungsraten zu höheren Anforderungen an Erzeugung, Netze und Speicher führen, während sich die Gesamtkosten zwischen den Szenarien teilweise angleichen.

Die Ergebnisse zeigen, dass nicht die Jahresenergiemengen, sondern wenige Extremstunden die Systemauslegung dominieren. In kalten Dunkelflauten erhöht sich die elektrische Last von den mengenmäßig dominierenden Luft-Wasser-Wärmepumpen überproportional, da sinkende Quelltemperaturen die Effizienz reduzieren, um den Gefrierpunkt der Abtaubetrieb einsetzt und unterhalb des Bivalenzpunkts (typisch -7 °C) der zusätzliche Heizstabbetrieb zu sprunghaften Leistungsanstiegen führt. Demgegenüber wirken Sole/Wasser-Wärmepumpen systemisch stabilisierend, da sie aufgrund konstanterer Quelltemperaturen auch bei Kälte effizient arbeiten und keine vergleichbaren Lastspitzen erzeugen.

Die Belastung der Verteilnetze zeigt sich dabei als lokal und zeitlich konzentriertes Phänomen. Bereits bei vergleichsweise geringen Wärmepumpenanteilen können in kritischen Situationen Überlastungen auftreten, insbesondere durch die witterungsbedingte Synchronisierung der Lasten. In Extremfällen, wie während Dunkelflauten, nähert sich der Gleichzeitigkeitsfaktor dabei eins an, wodurch die Netzbelastung deutlich verschärft wird.

Flexibilitätsoptionen wie steuerbare Wärmepumpen oder netzdienliche Betriebsweisen können diese Spitzen und den dadurch notwendigen Netzausbau zwar um bis zu 25 % reduzieren, erweisen sich jedoch allein als nicht ausreichend, um strukturelle Engpässe bei hoher Durchdringung zu vermeiden. Mit wachsender Elektrifizierung gewinnen daher zeitliche Ausgleichsmechanismen, Speicher und steuerbare Nachfrage an Bedeutung.

Insgesamt zeigt sich, dass insbesondere Langzeitspeicher eine zentrale Rolle im zukünftigen Energiesystem einnehmen werden. Die Energiesystemkosten unterscheiden sich zwischen dem Hoch- und Niedrigeffizienzscenario insbesondere in den Speicherkosten, die nötig wären, eine Dunkelflautenwoche zu überbrücken. Hier zeigt das Niedrigeffizienzscenario bis zu 14 % höhere Kosten.

Neben der Reduktion der Heizlast durch kapitalintensive Sanierungen der Gebäudehülle können auch geringinvestive Maßnahmen zur Reduktion der Vorlauftemperatur einen deutlichen Einfluss auf Lastspitzen und den gesamten Jahresenergieverbrauch haben.

7 Umsetzungshürden, Lösungsansätze und Handlungsempfehlungen

Die folgenden Abschnitte verbinden die wichtigsten Ergebnisse der quantitativen Analyse mit bestehenden Herausforderungen bei der Umsetzung. Daraus werden konkrete Empfehlungen abgeleitet, die sich auf die zentrale Frage konzentrieren: Wie lässt sich ein angemessenes Verhältnis zwischen Effizienz und erneuerbaren Energien für die Wärmeversorgung erreichen? Die Handlungsempfehlungen zielen insbesondere darauf ab, begrenzte Fördermittel optimal zu nutzen, um den Dekarbonisierungspfad im Gebäudesektor schneller zu beschreiten und dabei Auswirkungen auf das Energiesystem zu berücksichtigen. Diese Darstellung erhebt keinen Anspruch auf eine vollständige Diskussion aller möglichen und nötigen Maßnahmen im Gebäudesektor. Besonders die Weiterentwicklung der rechtlichen Rahmenbedingungen angesichts geplanter Änderungen des Gebäudemodernisierungsgesetzes und dem Wegfall verbindlicher Vorgaben für Wärmeversorgungssysteme ist nicht Teil der Analyse. Für zusätzliche Empfehlungen wird auf einschlägige aktuelle Studien verwiesen (vgl. Deurer et al., 2024; Mellwig & Pehnt, 2025)

7.1 Fazit mit Relevanz für die Handlungsempfehlungen

Die Dekarbonisierung des Gebäudesektors erfordert eine substantielle Steigerung der CO₂-Reduktion. Zur Zielerreichung sind die Reduzierung des Wärmebedarfs durch Effizienzmaßnahmen an der Gebäudehülle, die Optimierung der Wärmeverteilung sowie die Umstellung auf erneuerbare Energien in der Wärmeversorgung erforderlich.

Je nach Gebäudetyp und Siedlungsstruktur bieten sich verschiedene Lösungen für die Dekarbonisierung der Wärmeversorgung an. Zu diesen zählen dezentrale Wärmepumpen, Biomassekessel, der Ausbau und die Dekarbonisierung von Wärmenetzen sowie der Einsatz biogener gasförmiger und flüssiger Brennstoffe. Aus einzelwirtschaftlicher Sicht stellen in der dezentralen erneuerbaren Wärmeversorgung Wärmepumpen in den meisten Gebäuden die wirtschaftlich sinnvollste Option. In dicht besiedelten Regionen mit Mehrfamilienhäusern und größeren Liegenschaften stellen Wärmenetze die bevorzugte Lösung dar, sofern ausreichend lokale erneuerbare Energiepotenziale vorhanden sind. Andere Szenarienstudien (Agora Think Tanks 2024; Förster u. a. 2025; Mellwig und Blömer 2024; Steinbach u. a. 2021; Wehnemann u. a. 2026) bestätigen, dass Wärmepumpen im Gebäudesektor mittel- bis langfristig die zentrale Lösung für die Dekarbonisierung darstellen, gefolgt von Wärmenetzen. Dezentrale brennstoffbasierte Systeme kommen lediglich ergänzend zum Einsatz, dort wo weder Wärmepumpen noch Wärmenetze realisierbar sind.

Aus Einzelgebäudeperspektive stellt sich die Frage, welches Maß an Energieeffizienz notwendig ist, um eine wirtschaftliche und effektive Dekarbonisierung zu erreichen. Systemisch betrachtet führt die Elektrifizierung der Wärmeversorgung zu einem steigenden Strombedarf. Somit entsteht die Frage, welchen Einfluss die Gebäudeeffizienz auf die Dekarbonisierung des Stromsystems und die Infrastruktur hat. Die Strategie „Energy Efficiency First“ kann aus Perspektive des Stromsystems

begründet werden, da sie zukünftige Energiepreissrisiken senkt, den Ausbau erneuerbarer Energien im Stromsektor reduziert und die Netzplanung optimiert.

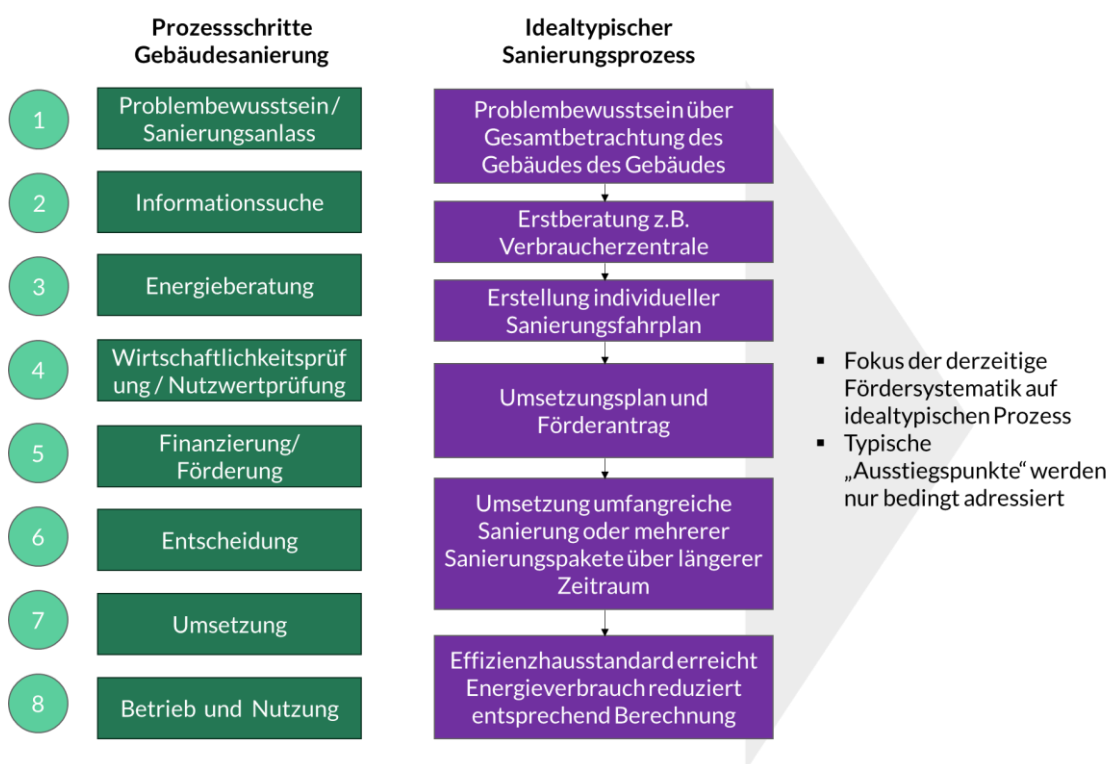
Auf Einzelgebäudeebene zeigen die Ergebnisse, dass ambitionierte Effizienzstandards (EH 55, EH 40) zwar deutlich die Verbrauchskosten mindern, jedoch durch höhere Investitionen in die Gebäudehülle über die Lebensdauer hinweg zu höheren Gesamtkosten führen. Aus einzelwirtschaftlicher ist eine Wirtschaftlichkeit unter Berücksichtigung zusätzlicher Förderung gegeben. Wärmepumpen können in vielen Gebäuden bereits ohne umfassende Sanierungen wirtschaftlich eingesetzt werden. Niederschwellige und gering investive Maßnahmen haben hohe Wirksamkeit und ermöglichen eine effiziente sowie wirtschaftliche Dekarbonisierung der Wärmeversorgung.

Die vorliegenden Ergebnisse stellen die Bedeutung von Energieeffizienzmaßnahmen für die Dekarbonisierung des Gebäudesektors nicht grundsätzlich infrage. Allerdings verdeutlichen sie die hohe Heterogenität des Gebäudebestands hinsichtlich des energetischen Zustands, Sanierungspotenzialen und Kostenstrukturen. Vor diesem Hintergrund erscheint ein pauschaler Fokus auf maximale Energieeffizienzstandards nicht zielführend. Vielmehr sollten Maßnahmen unter Berücksichtigung ihrer jeweiligen Kostenwirksamkeit und ihres Beitrags zur Emissionsminderung priorisiert werden. Ein differenzierter Ansatz kann dazu beitragen, die für die Dekarbonisierung erforderlichen Investitionen zu begrenzen und die Gesamtkosten sowohl aus einzelwirtschaftlicher als auch aus volkswirtschaftlicher Perspektive zu optimieren. Zudem zeigen die Ergebnisse, dass aus Energiesystemsicht nicht in allen Fällen eine weitgehende Reduktion des Endenergiebedarfs erforderlich ist, sofern die verbleibende Energienachfrage durch klimaneutrale Energieträger und eine entsprechend ausgestaltete Energieinfrastruktur gedeckt werden kann. Daher sollte die Dekarbonisierungsstrategie für den Gebäudebestand gebäudespezifisch ausgestaltet werden, anstatt auf maximale Effizienzsteigerungen auszurichten.

7.2 Umsetzungshürden

Abbildung 76 stellt die verschiedenen Schritte einer Gebäudesanierung aus der Perspektive von Eigentümerinnen und Eigentümern dar und beschreibt den idealtypischen Ablauf des Sanierungsprozesses. Für jeden dieser Schritte gibt es unterschiedliche regulatorische und förderpolitische Maßnahmen wie beispielsweise die BEG, die Bundesförderung für Energieberatung, Erstberatungsangebote sowie das GEG. Ziel dieser Instrumente ist es, Eigentümerinnen und Eigentümer zum idealtypischen Prozess zu motivieren und sie auf dem Weg zu ambitionierten Effizienzstandards umfassend zu unterstützen.

Abbildung 76: Prozessschritte bei der Gebäudesanierung aus Perspektive von Eigentümerinnen und Eigentümern und idealtypischer Sanierungsprozess



Quelle: Eigene Analyse IREES

Der idealtypische Sanierungsprozess wird in der Realität jedoch nur teilweise beschrrieben. Zu jedem Schritt lassen sich typische Ausstiegspunkte identifizieren, die je nach Akteursgruppe – selbstnutzende Eigentümerinnen und Eigentümer, private Vermieterinnen und Vermieter, Wohnungsgesellschaften etc. – unterschiedlich stark ausgeprägt sind. Tabelle 6 ordnet den einzelnen Prozessschritte, die jeweiligen Einstiegs- und typischen Ausstiegspunkte zu.

Tabelle 6: Prozesskette energetische Sanierung

Prozessschritt	Einstiegspunkt/ Auslöser	Häufige Ausstiegspunkte	Zentrale Barrieren
Problem-bewusstsein	hohe Heizkosten, alter Heizkessel, Feuchte, Verkauf/Kauf, GEG-Pflichten	Fehlende Problem-wahrnehmung über Instandsetzungs-notwendigkeit	Gegenwarts-präferenz, geringe wahrgenommene Dringlichkeit
Informationssuche	Internet, Handwerk, Bekannte, Energieausweis	Überforderung durch widersprüchliche Infos	Informationsdefizit, Vertrauensmangel, Angst vor Fehlentscheidung

Energieberatung	Erstberatung, individueller Sanierungsfahrplan,	Beratung wird nicht beauftragt oder bleibt folgenlos,	Kosten, Wartezeiten, Zweifel an Neutralität
Wirtschaftlichkeitsprüfung	Vergleich Dämmung, Fenster, Heizung, PV, Lüftung	Maßnahme erscheint „rechnet sich nicht“	Energiepreisunsicherheit, lange Amortisation, Komfortnutzen schwer quantifizierbar
Finanzierung/ Förderung	BEG, KfW, BAFA, Bankkredit	Antrag wird nicht gestellt oder Projekt verschoben	Liquiditätsengpass, Förderkomplexität, Angst vor Regeländerungen
Entscheidung	Haushalts-/WEG-/Unternehmensbeschluss	„Noch abwarten“	Status-quo-Bias, Verlustaversion, politische/regulatorische Unsicherheit
Planung/ Angebote	Energieberater, Architekt, Fachplaner, Handwerk	kein belastbares Angebot, Preis zu hoch	Angebotsknappheit, Koordinationsaufwand, fehlende/unzureichende technische Schnittstellen
Umsetzung	Baustelle, Handwerker Förderung, Kontrolle	Verzögerung, Reduktion auf Einzelmaßnahme	Angebotsknappheit, Fachkräftemangel, Koordinierungsaufwand
Betrieb/Nutzung	Heizkurve, Lüftung, Monitoring	Einsparung bleibt hinter Erwartung	Rebound, falsche Einstellungen, fehlende Einweisung, Nutzerverhalten

Quelle: Eigene Darstellung basierend (Baginski und Weber 2017; Chen u. a. 2025; Dolšak 2023; Economidou u. a. 2020; European Environment Agency 2023; Fisk u. a. 2020; Galvin 2023; Johansson u. a. 2023; Klemm u. a. 2025; McGinley u. a. 2025; Renz und Hacke 2016; Stieß u. a. 2010; vom Hofe 2018; Weiß und Pfeifer 2020)

Die Ausstiegspunkte im Verlauf der Sanierung führen entweder zu Verzögerungen bei der Umsetzung oder dazu, dass lediglich einfache Instandsetzungen vorgenommen werden – was einen Dekarbonisierungspfad des Gebäudesektors bis zum angestrebten Zieljahr 2045 unwahrscheinlich macht. Aus technischer und energiesystemischer Perspektive (Stromsektor) ist eine hohe Energieeffizienz des Gebäudebestands zwar wünschenswert und langfristig erstrebenswert. Allerdings machen die Komplexität der Vorhaben, hohe Investitionskosten, ein begrenztes Förderbudget sowie die finanziellen Möglichkeiten der Eigentümerinnen und Eigentümer es unrealistisch, innerhalb der erforderlichen Umsetzungsrate ausschließlich auf eine reine „Efficiency-first“-Strategie zu setzen.

Der individuelle Sanierungsfahrplan bricht zwar den Sanierungsprozess über einen längeren Zeitraum auf, fokussiert im Kern aber auch auf hochinvestive bauliche Maßnahmen, die auf ein bestimmtes Hüllenniveau hinführen. Der Sanierungsfahrplan ist in diesem Sinn nicht der Fahrplan der Eigentümerinnen und Eigentümer, sondern des Fördergebers, der den gesamten Gebäudebestand auf ein sehr gutes Niveau bringen will. Aufgrund hoher Investitionen und Komplexität sind viele Eigentümerinnen und Eigentümer überfordert, so dass geplante Maßnahmen gar nicht umgesetzt werden und im schlechtesten Fall eine ablehnende Haltung entwickelt und weiter auf (kurzfristig) günstige fossile Energieträger gesetzt wird.

Die Dekarbonisierung der Wärmeversorgung in Gebäuden erfordert grundsätzlich die Umstellung auf erneuerbare Energien. Eine umfassende Sanierung allein kann dieses Ziel nicht erreichen, wenn der Restwärmebedarf weiterhin aus fossilen Quellen gedeckt wird. Aus der Perspektive des Einzelgebäudes sind zunächst jene Maßnahmen notwendig, die eine effiziente und wirtschaftliche Nutzung einer Niedertemperaturwärmeversorgung ermöglichen. Der Schwerpunkt sollte daher auf Mindesteffizienzmaßnahmen liegen, welche mit geringen Investitionen umgesetzt werden können und den Gebäudebestand auf Niedertemperaturwärme vorbereiten. Diese Maßnahmen sind in der Regel wirtschaftlich mit kurzen Amortisationszeiten und benötigen meist keine Förderung. Allerdings werden sie bislang nicht ausreichend adressiert, da der gesamte Sanierungsprozess von Beratung bis Umsetzung überwiegend auf Förderprogramme ausgerichtet ist.

Die derzeitige Förderstruktur differenziert lediglich anhand des angestrebten Endzustands und berücksichtigt nicht den energetischen Ausgangszustand der Gebäude sowie die räumlichen und siedlungsstrukturellen Rahmenbedingungen. Dadurch erfolgt die Vergabe der Fördermittel pauschal und nicht gezielt auf die höchste Treibhausgasminderung.

7.3 Handlungsempfehlungen

Quick-Wins: Gering-investive und niederschwellige Maßnahmen zur Erreichung eines Niedertemperatur-Mindeststandards mit wirtschaftlichen Einsparungen forcieren

Ausgangslage:

„Effizienzprodukte“ am Markt und in der Beratung definieren sich ausschließlich an den vom Fördergeber vorgegebenen Definitionen und Grenzwerten, die aber die individuellen Voraussetzungen der einzelnen Gebäude und deren Eigentümer nicht differenziert adressieren können.

Maßnahmenempfehlung: Reform der Anforderungen und Vorgaben zur Durchführung der Vor-Ort Energieberatung

Mit gezielter Integration von „Quick-Wins“ in Energieberatung und Umsetzungsunterstützung können zentrale Ausstiegspunkte im Sanierungsprozess insbesondere der selbstnutzenden Eigentümerinnen und Eigentümer adressiert werden:

- Problembewusstsein - Gegenwartspräferenz: Maßnahmen adressieren sichtbare oder einfach zu erklärende Schwachstellen im Gebäude, die zu unmittelbaren

messbaren Einsparungen führen und die zentralen Komfortaspekte einer energetischen Sanierung bereits spürbar machen.

- **Entscheidung / Wirtschaftlichkeitsprüfung:** Die Maßnahmen sollten sich in wenigen Jahren amortisieren. Aufgrund der geringen Investitionshöhe fällt das Investitionsrisiko weitaus geringer aus als bei umfangreicheren Sanierungsmaßnahmen.
- **Informationssuche / Umsetzung weiterführende Schritte:** Die Umsetzung einfacher Maßnahmen mit unmittelbaren wirtschaftlichen Erfolgen schafft Vertrauen dafür, um weitere Schritte zur Dekarbonisierung durchzuführen und umzusetzen.

Im Rahmen der Vor-Ort-Energieberatung sollte ein besonderer Schwerpunkt auf **gering-investitive, niederschwellige Maßnahmen** sowie deren konkrete Umsetzung gelegt werden (vgl. Exkurs in Kapitel 4.4.3). Der individuelle Sanierungsfahrplan kann diese Maßnahmen verpflichtend als erstes Maßnahmenpaket unter dem Titel „Quick-Wins und Niedertemperatur-ready“ aufführen, wobei Investitionskosten minimiert und die Anforderungen an ein Niedertemperatur-ready-Niveau adressiert werden.

Ist bereits ohne zusätzliche Maßnahmen eine effiziente Lösung auf Basis erneuerbarer Energien realisierbar, so sollte die Dekarbonisierung der Wärmeversorgung vorrangig umgesetzt werden. Bei der Auswahl geeigneter Wärmeversorgungslösungen sind zudem standortbezogene und systemische Faktoren einzubeziehen, wie sie beispielsweise durch die kommunale Wärmeplanung bereitgestellt werden (etwa Fernwärmeverfügbarkeit, potenzielle Einschränkungen beim Einsatz von Wärmepumpen oder lokale Biomassepotenziale).

Der Hauptnutzen der Energieberatung besteht derzeit darin, Gebäudedaten zu erfassen und softwaregestützt den Ist-Zustand sowie mögliche Einsparungen durch Sanierungsmaßnahmen detailliert zu berechnen. Zukünftig sollte der Schwerpunkt auf die Identifizierung und Ausarbeitung von schnell realisierbaren Maßnahmen sowie die dazugehörige Kommunikation und Information der Eigentümerinnen und Eigentümer gelegt werden. Um dies zu erreichen, müssen die Fördervorgaben für den individuellen Sanierungsfahrplan angepasst werden, damit eine flexiblere Umsetzung möglich ist:

- Anstelle der Vorgabe einer verbindlichen Effizienzhaussanierung als Ziel eines Sanierungsfahrplans sollte ausschließlich die Klimaneutralität als Ziel definiert werden, wobei die von den Eigentümerinnen und Eigentümern vorgegebenen Nebenbedingungen als Anforderungen berücksichtigt werden. Beispiele für solche Nebenbedingungen sind die Minimierung der Investitionskosten, die Reduktion der Gesamtkosten über einen bestimmten Zeitraum oder die Maximierung der Energieeinsparung. Gesetzliche Standards sowie Förderprodukte sind weiterhin zu berücksichtigen, insbesondere wenn sie Teil eines potenziellen Maßnahmenpakets darstellen.
- Energieberatende sollten bei der Durchführung geförderter Energieberatungen flexibel auf die spezifischen Anforderungen von Gebäuden und Zielsetzungen reagieren können. Bei komplexen Sanierungsvorhaben sind detaillierte Berechnungen und Energiebilanzen notwendig, um gesetzliche und förderrechtliche Effizienzstandards zu erfüllen. Wenn jedoch vor allem erste Maßnahmen umgesetzt werden sollen, ist es oft effektiver, dass

Energieberaterenden direkt vor Ort mit den Eigentümerinnen und Eigentümern arbeiten, statt sich auf softwarebasierte Berechnungen zu konzentrieren. Denn normbasierte Berechnungen weichen häufig erheblich von den tatsächlich erzielten Einsparungen ab und erfassen besonders gering-investitive Maßnahmen nur eingeschränkt.

Maßnahmenempfehlung: Umsetzung gering-investiver Maßnahmen forcieren

Neben der Energieberatung ist es entscheidend, gering-investitive und niederschwellige Maßnahmen auch in der praktischen Umsetzung durch ausführende Handwerksbetriebe gezielt zu forcieren. Optimalerweise sollten die Ergebnisse der Energieberatung als Basis für die Durchführung dieser Maßnahmen dienen. In der Praxis stellt der Energieberatungsbericht jedoch oftmals lediglich eine Orientierungshilfe für Eigentümerinnen und Eigentümer dar. In der Regel erfordert dieser weitere Übersetzungen und Konkretisierungen und kann im ungünstigsten Fall wenig praktikabel sein. Die Schnittstelle zwischen Energieberatung und Ausführung sollte daher grundsätzlich optimiert werden. Für umfangreiche Sanierungsmaßnahmen steht mit der geförderten Baubegleitung bereits ein geeignetes Instrument zur Verfügung. Gering-investitive Maßnahmen hingegen benötigen meist keine komplexen baulichen Eingriffe, sodass eine rasche Umsetzung teilweise auch durch Eigenleistung erfolgen kann. An dieser Stelle könnte ein Energieberatungsbericht einen tatsächlichen Mehrwert bieten, indem er klare Handlungsempfehlungen für die Durchführung liefert. Ergänzend könnten standardisierte gering-investitive Maßnahmen sowie digitale Schulungsprogramme für Energieberaterenden sowie Eigentümerinnen und Eigentümer zur weiteren Unterstützung bereitgestellt werden.

Da die Maßnahmen oft klein und wenig umfangreich sind, sind sie im derzeitigen Handwerkermarkt mit Kapazitätsengpässen für viele Umsetzungsakteure wenig attraktiv. Je nach Art der Maßnahme könnten sie jedoch auch von Heizungsinstallateuren und Schornsteinfegerinnen und Schornsteinfeger im Rahmen von Wartungsarbeiten übernommen werden.

Worst-first: Fokus auf Worst-Performing-Buildings – schnell und tief sanieren

Ausgangslage:

Die Förderung der Gebäudesanierung unterscheidet sich je nach angestrebtem Zielzustand. Dabei bleibt der Ausgangszustand des jeweiligen Gebäudes sowie das daraus resultierende Einspar- und Emissionsminderungspotenzial unberücksichtigt. Besonders Gebäude mit dem schlechtesten energetischen Zustand eignen sich für eine umfassende Sanierung, wie sie derzeit als idealtypischer Prozess für den gesamten Gebäudebestand vorgesehen ist. In diesen Fällen sind ohnehin umfangreiche Instandsetzungsarbeiten an den einzelnen Bauteilen erforderlich.

Obwohl ambitionierte Sanierungsmaßnahmen in solchen Gebäuden aufgrund signifikanter Einsparungen und Verbesserungen der Gebäudesubstanz meist wirtschaftlich sind, existieren erhebliche Hemmnisse. Diese resultieren insbesondere aus den hohen Investitionskosten, der Lebenssituation der Eigentümerinnen und

Eigentümer (beispielsweise Alter und verfügbare finanzielle Mittel) sowie dem zeitlichen Umfang der Maßnahmenumsetzung, was sowohl Belastung als auch Leerstand, insbesondere im vermieteten Bereich, zur Folge haben kann.

Maßnahmenempfehlung: Differenzierung der Fördersystematik mit Bezug auf den energetischen Ausgangszustand der Gebäude

Eine zielgerichtete Förderung von Gebäuden mit dem niedrigsten energetischen Standard („Worst-Performing Buildings“) ermöglicht es, unter Berücksichtigung des jeweiligen Ausgangszustands eine höhere Effizienz bei der Reduzierung von THG-Emissionen innerhalb eines festgelegten Förderbudgets zu erzielen. Dabei sollte die Förderung den jeweiligen energetischen Ausgangszustand berücksichtigen und insbesondere Eigentümerinnen und Eigentümer beim Eigentumsübergang unterstützen, wenn ältere Gebäude ohnehin instandgesetzt oder modernisiert werden. Energetische Sanierungsmaßnahmen sollten gezielt mit ohnehin anstehenden Instandsetzungsarbeiten verknüpft werden, um Synergien zu nutzen und zusätzliche Kosten zu begrenzen.

Die Differenzierung der Fördersystematik nach dem „Worst-First“-Prinzip impliziert, dass bei Gebäuden mit bereits ausreichendem (z.B. niedertemperatur-ready) Effizienzstandard vorrangig die Dekarbonisierung der Wärmeversorgung unterstützt werden sollte, wohingegen umfassende Sanierungsmaßnahmen nur begrenzt gefördert werden. Dadurch lässt sich das verfügbare Fördervolumen optimal nutzen, um eine möglichst große Anzahl an Gebäuden zu dekarbonisieren. Es bleibt jedoch festzuhalten, dass Effizienzsteigerungen bei diesen Gebäuden auch zu einem späteren Zeitpunkt sinnvoll sein können und dann gezielt berücksichtigt werden sollten (z.B. im Sanierungsfahrplan).

Maßnahmenempfehlungen: Akteursspezifische Hemmnisse adressieren

Die Förderung adressiert lediglich einen Teil der umfangreichen Hemmnisse, die durch gezielte Ansprache und kommunikative Maßnahmen unter Einbeziehung von Best-Practice-Beispielen weiter aufgegriffen werden können. Instrumente wie der **Sanierungssprint**³⁰ für selbstgenutztes Eigentum sowie die **serielle Sanierung** im vermieteten Mehrfamilienhausbestand bieten die Möglichkeit, Belastungen durch eine signifikante Reduktion der Bauzeit erheblich zu mindern. Durch die Bundesförderung serielle Sanierung werden bereits zusätzliche Zuschüsse für serielle Sanierungsprojekte gewährt, womit sich die Pilotierung in Deutschland auf dem Weg zum Breitenmarkt befindet (dena 2025b). Ebenso befindet sich der Sanierungssprint nach den ersten Pilotprojekten in einer Entwicklungsphase. Es empfiehlt sich, beide Instrumente durch geeignete Kommunikationsstrategien weiter zu unterstützen. Eine Integration in die Wärmeplanung und deren Umsetzung erscheint besonders sinnvoll, um regionale Sanierungsvorhaben größerer Bestände (serielle Sanierung) zu fördern

³⁰Der Sanierungssprint ist ein Konzept zur energetischen Komplettsanierung von Ein- und Zweifamilienhäusern in einer extrem kurzen Bauzeit von maximal 22 Werktagen. Ziel ist es, den Sanierungsprozess durch Standardisierung, minutengenaue Planung und parallele Abläufe effizient, planbar zu machen. Siehe: <https://www.zukunftaltbau.de/fachleute/netzwerk-service/sanierungssprint/>

und über kommunale Pilotprojekte die energetische Sanierung mittels Sanierungssprints erlebbar zu machen.

Differenzierung der Gebäudeförderung mit Blick auf das gesamte Energiesystem

Ausgangslage:

Die Analyse im Rahmen der Studie sowie andere wissenschaftliche Untersuchungen zeigen den Wert der Energieeffizienz für das Energiesystem. Allerdings erfordert dies nicht nur eine integrierte und sektorübergreifende Betrachtung, sondern auch in der Regulatorik und Förderung eine höhere Differenzierung. Kommunale Wärmepläne und Netzausbaupläne (NAP) liefern heute bereits eine planerische Grundlage. Eine Verzahnung mit Förderinstrumenten bzw. eine räumliche Differenzierung von Anforderungen im Gebäudesektor gibt es jedoch nicht.

Eine zielkonforme Weiterentwicklung der Gebäudeförderung sollte daher stärker systemisch und räumlich differenziert erfolgen. Förderprogramme sollten damit stärker an den Anforderungen des jeweiligen lokalen Energiesystems ausgerichtet werden, was zu räumlich differenziert zu unterschiedlichen Schwerpunkten in den Förderprodukten führt. Dadurch könnten Energiesystemkosten reduziert, Netzengpässe vermieden und die Integration erneuerbarer Energien effizienter unterstützt werden.

Maßnahmenempfehlung

Konkret sollte eruiert werden, inwieweit die Förderung künftig stärker an der lokalen Wärme- und Netzsituation ausgerichtet wird. In Stromnetzengpassgebieten könnten beispielsweise netzdienliche und besonders effiziente Technologien wie Erdwärmepumpen oder intelligente Wärmepumpensysteme gezielt höher gefördert werden, da sie geringere Lastspitzen verursachen und systemdienlicher betrieben werden können³¹. Gleichzeitig sollten Förderanreize für flexible und steuerbare Verbrauchseinrichtungen sowie Wärmespeicher ausgebaut werden, um die Integration erneuerbarer Stromerzeugung zu verbessern.

Umgekehrt sollte in Gebieten mit bestehender oder geplanter Wärmenetzversorgung keine Förderung für dezentrale Einzeltechnologien gewährt werden. Stattdessen sollte dort der Anschluss an effiziente Wärmenetze gefördert werden. Dadurch könnten Doppelinvestitionen vermieden und der koordinierte Ausbau kommunaler Wärmestrukturen unterstützt werden.

Voraussetzung hierfür ist eine stärkere Verzahnung der Gebäudeförderung mit der kommunalen Wärmeplanung sowie mit regionalen Stromnetz- und Infrastrukturplanungen. Förderkulissen sollten künftig auf Basis kommunaler Wärmepläne, Netzkapazitäten und regionaler Dekarbonisierungspfade differenziert ausgestaltet werden. Dies würde nicht nur die Systemeffizienz erhöhen, sondern auch zu einer besseren Allokation begrenzter Fördermittel beitragen.

³¹ Hierbei wird weiterhin von einer bundeseinheitlichen Regelung ausgegangen. D.h. es könnte z.B. anhand von definierten Kriterien eine räumliche Differenzierung der Förderung erzielt werden.

Überdimensionierung vermeiden – Normen und Haftungsrahmen für kosteneffiziente Wärmepumpen reformieren

Ausgangslage:

Der wirtschaftliche Einsatz erneuerbarer Wärmeversorgungssysteme und insbesondere von Wärmepumpen als zentrale Dekarbonisierungstechnologie hängt maßgeblich von der Höhe der Investitionskosten ab, die deutlich über denen konventioneller Heizsysteme liegen und mit zunehmender Leistung stärker steigen.

Maßnahmenempfehlung

Die Investitionskosten von Wärmepumpen sollten gezielt durch eine Überprüfung technischer Auslegungsstandards und regulatorischer Rahmenbedingungen reduziert werden. Heute werden Wärmepumpen in der Praxis häufig überdimensioniert, was zu unnötig hohen Investitionskosten, ineffizientem Betrieb und höheren Anforderungen an Netzanschlüsse führt. Ein zentraler Grund hierfür liegt in konservativen Normen zur Heizlastberechnung sowie in haftungsbezogenen Fehlanreizen für Planerinnen und Planer sowie Installationsbetriebe.

Insbesondere die derzeitige Anwendung der Normheizlastberechnung nach DIN EN 12831 kann vielfach zu deutlich höher angesetzten Heizlasten führen als im realen Gebäudebetrieb tatsächlich auftreten. Die Norm basiert auf extremen Auslegungsbedingungen und berücksichtigt reale Nutzerprofile, interne Wärmegewinne oder tatsächliche Betriebsdaten nur unzureichend. Die Heizlast wird auf einen sehr seltenen Extremfall ausgelegt, der auf historischen Wetterdaten beruht. Mit der DIN/TS DIN/TS 12831-1 sind seit 2020 zwar aktuelle und räumlich differenziertere Klimadaten eingeführt worden, allerdings ermittelt sich die Norm-Außentemperatur immer noch auf den statischen Extremfall. In der Folge werden Wärmepumpen häufig größer dimensioniert als technisch erforderlich.

Gleichzeitig besteht für Installationsbetriebe ein erheblicher Haftungs- und Gewährleistungsdruck: Wird eine Anlage kleiner ausgelegt und treten später Komforteinbußen oder Temperaturprobleme auf, tragen häufig die ausführenden Unternehmen das Risiko. Dies schafft einen systematischen Anreiz zur sicherheitsorientierten Überdimensionierung

Vor diesem Hintergrund sollte der regulatorische Rahmen gezielt weiterentwickelt werden. Dazu gehören:

- die Überprüfung und Modernisierung der Normheizlastberechnung mit stärkerer Berücksichtigung realer Verbrauchs- und Betriebsdaten,
- die Ermöglichung vereinfachter oder datenbasierter Auslegungsverfahren im Gebäudebestand,
- die stärkere Nutzung gemessener Verbrauchsdaten und digitaler Lastprofile zur Dimensionierung,
- sowie die Schaffung rechtlicher Klarheit und Haftungssicherheit für Installateur:innen und Planer:innen bei der Anwendung reduzierter, praxisnaher Heizlastansätze.

Ergänzend könnten Förderprogramme gezielt effiziente und bedarfsgerechte Auslegungen incentivieren, beispielsweise durch Boni für nachweislich optimierte Systemdimensionierung oder Monitoring im Betrieb. Nicht nur die Investitionskosten für Wärmepumpen könnten damit gesenkt werden, sondern auch Materialeinsatz, Anschlussleistungen und Stromnetzbelastungen reduziert und damit die gesamtwirtschaftliche Effizienz der Wärmewende verbessert werden.

Literaturverzeichnis

- Agora Think Tanks. 2024. „Klimaneutrales Deutschland“. <https://www.agora-energiewende.de/publikationen/klimaneutrales-deutschland-studie>.
- Bafa/ S4F, Peter Klafka, und Christoph Albinger. 2025. „Liste förderfähiger Wärmepumpen vom 01.09.2025 ausgewertet von Scientist for Future Regionalgruppe Aachen“. <https://cloud.skip.scientists4future.org/s/LJ3ocot2PJH8xMy>.
- Baginski, Jan Paul, und Christoph Weber. 2017. „A Consumer Decision-Making Process? Unfolding Energy Efficiency Decisions of German Owner-Occupiers“. *HEMF Working Paper No. 08/2017*, Online-Vorab-Publikation. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3023997>.
- BBSR. 2026. „Nutzungsdauern von Bauteilen - Informationsportal Nachhaltiges Bauen“. Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung. <https://www.nachhaltigesbauen.de/austausch/nutzungsdauern-von-bauteilen/>.
- Bergmann, Janis, und Julika Weiß. 2025. *Die Rolle der Gebäudeeffizienz für die Wärmewende*. (Berlin).
- BMWE. 2024. „Fakten zur Wärmepumpe“. *Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWE)*.
- Bongs, Constanze, Jeannette Wapler, Arnulf Dinkel, u. a. 2022. *Abschlussbericht LowEx-Bestand Analyse LowEx-Konzepte für die Wärmeversorgung von Mehrfamilien-Bestandsgebäuden*.
- Chen, Linyan, Amos Darko, Mayowa I. Adegioriola, Albert P. C. Chan, Jackie Y. Yang, und Mershack O. Tetteh. 2025. „Review of Challenges to Energy Efficiency Retrofitting of Existing Building Stock“. In *Creating Capacity and Capability: Embracing Advanced Technologies and Innovations for Sustainable Future in Building Education and Practice*, herausgegeben von Monty Sutrisna, Mostafa Babaeian Jelodar, Niluka Domingo, An Le, und Ravindu Kahandawa. Springer Nature. https://doi.org/10.1007/978-981-96-2904-6_12.
- Cischinsky, Holger, Nikolaus Diefenbach, und Markus Rodenfels. 2018. *Datenerhebung Wohngebäudebestand 2016. Anleitung zur Durchführung von Auswertungen mit der Auswertungsdatenbank*. Bd. 49. Nr. 0. Institut für Wohnen und Umwelt (IWU).
- dena. 2025a. „KWW-Technikkatalog Wärmeplanung“. Deutsche Energie-Agentur GmbH (Hrsg.). <https://www.kww-halle.de/praxis-kommunale-waermewende/bundesgesetz-zur-waermeplanung>.
- dena. 2025b. *Marktüberblick Serielle Sanierung Ergebnisse der Evaluation 2025*. https://www.energiesprong.de/fileadmin/Downloads/Energiesprong/Ergebnisse_Evaluation_2025.pdf.
- Deurer, Jana, Jan Steinbach, Malte Bei der Wieden, u. a. 2024. *Maßnahmenkonzepte für einen klimaneutralen Gebäudebestand bis 2045*.

- https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/veroeffentlichungen/bbsr-online/2024/bbsr-online-105-2024-dl.pdf;jsessionid=BD4FE17F70E62FF2741BE24BD5A70915.live21324?__blob=publicationFile&v=2.
- Deurer, Jana, Jan Steinbach, Benjamin Krick, Burkhard Schulze-Darup, und Bernd Steinmüller. 2025. *Der kumulierte Energieaufwand als Förderkriterium im Gebäudebereich*. Texte Nr. 71. Mit Umweltbundesamt. Umweltbundesamt. 160. <https://doi.org/10.60810/OPENUMWELT-7701>.
- Deutsche Energie-Agentur, Hrsg. 2024. *Aufbau und Finanzierung von Wasserstoffspeichern in Deutschland*.
- DGNB, Hrsg. 2025. *Klimawirkung von Sanierungen - Eine lebenszyklusbasierte Analyse*. Stuttgart. <https://www.dgnb.de/?eID=dumpFile&t=f&download=1&f=11776&token=449df ee69e41bc4028ffa8b155cc3a7f5901bf8b>.
- Diefenbach, Nikolaus, Holger Cischinsky, Markus Rodenfels, und Klaus-Dieter Clausnitzer. 2010. *Datenbasis Gebäudebestand - Datenerhebung zur energetischen Qualität und zu den Modernisierungstrends im deutschen Wohngebäudebestand*. Nr. 0049. Institut Wohnen und Umwelt (IWU).
- Discher, Henning, Eberhard Hinz, und Dr. Andreas Enselig. 2010. „dena-Sanierungsstudie. Teil 1: Wirtschaftlichkeit energetischer Modernisierung im Mietwohnungsbestand.“ Dezember 8. <https://www.dena.de/infocenter/dena-sanierungsstudie-teil-1/>.
- Dolšak, Janez. 2023. „Determinants of energy efficient retrofits in residential sector: A comprehensive analysis“. *Energy and Buildings* 282 (März): 112801. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.112801>.
- Economidou, M., V. Todeschi, P. Bertoldi, D. D'Agostino, P. Zangheri, und L. Castellazzi. 2020. „Review of 50 years of EU energy efficiency policies for buildings“. *Energy and Buildings* 225 (Oktober): 110322. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110322>.
- Eicke-Hennig, W. 2011. „Kleine Geschichte der Dämmstoffe, Zweiter Teil“. *Zeitschrift für Wärmeschutz, Kälteschutz, Schallschutz, Brandschutz (WKS)* 56 (66): 6–34.
- Enselig, Andreas. 2003. *Leitfaden zur Beurteilung der Wirtschaftlichkeit von Energiesparinvestitionen im Gebäudebestand*. Institut Wohnen und Umwelt (IWU).
- European Environment Agency. 2023. *Accelerating the Energy Efficiency Renovation of Residential Buildings: A Behavioural Approach*. EEA Briefing. Publications Office. <https://doi.org/10.2800/273495>.
- Fisk, William J., Brett C. Singer, und Wanyu R. Chan. 2020. „Association of residential energy efficiency retrofits with indoor environmental quality, comfort, and health: A review of empirical data“. *Building and Environment* 180 (August): 107067. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107067>.

- FNR. 2020. *Absatzvolumen von Dämmstoffen in Deutschland*. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR). <https://mediathek.fnr.de/absatzvolumen-von-dammstoffen-in-deutschland-2019.html>.
- Förster, Hannah, Julia Repenning, Kerstin Borkowski, u. a. 2025. *Treibhausgas-Projektionen 2025 für Deutschland (Projektionsbericht 2025)*. Mit Umweltbundesamt. Umweltbundesamt. 334. <https://doi.org/10.60810/OPENUMWELT-7906>.
- Galvin, Ray. 2023. „Do Housing Rental and Sales Markets Incentivise Energy-Efficient Retrofitting of Western Germany’s Post-War Apartments? Challenges for Property Owners, Tenants, and Policymakers“. *Energy Efficiency* 16 (4): 25. <https://doi.org/10.1007/s12053-023-10102-y>.
- Heinrich, Stephan, Nora Langreder, Anna-Maria Grodeke, u. a. 2025. *Förderwirkungen BEG WG 2023*.
- Herbert, Carsten. 2023. *Alles, was Sie über Energiesparen wissen müssen: Erklärungen und Tipps vom Energiesparkommissar*. Verlag Herder GmbH.
- Herbert, Carsten. 2024. *Alles, was Sie über Wärmepumpen wissen müssen: Kompaktes Wissen für Laien und Profis vom Energiesparkommissar*. Herder.
- Hinz, Eberhard. 2011. *Untersuchung zur weiteren Verschärfung der energetischen Anforderungen an Wohngebäude mit der EnEV 2012 - Kosten energierelevanter Bau- und Anlagenteile bei der energetischen Modernisierung von Altbauten*. Nr. Xx. Institut für Wohnen und Umwelt (IWU) im Auftrag des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR).
- Hinz, Eberhard. 2015. *Kosten energierelevanter Bau- und Anlagenteile bei der energetischen Modernisierung von Altbauten Endbericht*. Herausgegeben von Institut Wohnen und Umwelt (IWU).
- Hofe, Moritz vom. 2018. „Energetische Sanierung von Einfamilienhäusern: Drei Essays über Motive, Entscheidungsprozesse und Aktivierungsmöglichkeiten im Kontext von Privateigentum“. Technische Universität Dortmund. https://eldorado.tu-dortmund.de/server/api/core/bitstreams/324e7e42-44ad-40cf-bbda-6a85930aac43/content?utm_source=chatgpt.com.
- Icha, Petra, und Thomas Lauf. 2025. *Entwicklung der spezifischen Treibhausgas-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 - 2024*. Mit Umweltbundesamt. Umweltbundesamt. 39. <https://doi.org/10.60810/OPENUMWELT-7844>.
- IWU (Institut für Wohnen und Umwelt (IWU), Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung, Bergische Universität Wuppertal gefördert durch BMWi). 2021. „ENOB DataNWG: Forschungsdatenbank“. <https://www.datanwg.de/forschungsdatenbank/>.
- Jank, Reinhard, Manuel Lämmle, Stefan Hess, und Michael Kropp. 2020. *Verbundprojekt Smartes Quartier Karlsruhe-Durlach (SQ-Durlach): Projektbericht Phase A: Konzeptentwicklung EnEff:Stadt - FKZ 03ET1590*. Ein Verbundprojekt von KES Karlsruher Energieservice GmbH Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme

- ISE, Freiburg Universität Freiburg, Institut für Nachhaltige Technische Systeme (INATECH) gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie.
- Johansson, Erik, Davidsson Henrik, E. Mlecnik, u. a. 2023. *Barriers and drivers for energy efficient renovation at district level*. University of Minho.
- Kemmler, Andreas, Sven Kreidelmeyer, Jan Limbers, Sebastian Lübbers, und Fabian Muralter. 2026. *Rahmendaten und Endverbrauchspreise für die Treibhausgas-Projektionen 2026*. Mit Umweltbundesamt, Kai Wehnmann, Marcel Koßmann, Maximilian Pagel, und Karlotta Schultz. Umweltbundesamt. 51. <https://doi.org/10.60810/OPENUMWELT-8270>.
- Kienzlen, Volker, Veit Bürger, Peter Schossig, u. a. 2019. *Grundlegende Empfehlungen für Sanierung und Erneuerung von Heizungsanlagen - Hinweise und Empfehlungen für Hausbesitzer, Investoren sowie Fachplaner und Handwerk Stand 01/2019*. KEA BW, Öko-Institut, Fhg-ISE, IREES, ifeu, IGTE, Hochschule Bieberrach. https://www.kea-bw.de/fileadmin/user_upload/Publikationen/058_Positionspapier_Heiztechnik_der_Zukunft_190306.pdf.
- Klemm, Celine, Mark Boulet, Diki Tsering, und Liam Smith. 2025. „Home energy efficiency upgrades are easy right?! A systematic review of factors influencing homeowner behaviour across multiple levels“. *Energy Research & Social Science* 127 (September): 104322. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2025.104322>.
- Kost, Christoph (Fraunhofer-Institut für Solare ISE). 2024. „Stromgestehungskosten erneuerbare Energien“. <https://www.ise.fraunhofer.de/de/veroeffentlichungen/studien/studie-stromgestehungskosten-erneuerbare-energien.html>.
- Kranzl, Lukas, Marcus Hummel, Andreas Müller, und Jan Steinbach. 2013. „Renewable heating: perspectives and the impact of policy instruments“. *Energy Policy* 59: 44–58.
- Lämmle, Manuel, Constanze Bongs, Jeannette Wapler, u. a. 2022. „Performance of Air and Ground Source Heat Pumps Retrofitted to Radiator Heating Systems and Measures to Reduce Space Heating Temperatures in Existing Buildings“. *Energy* 242 (März): 122952. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122952>.
- Lauf, Dr Thomas, Michael Memmler, und Sven Schneider. 2023. „Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger“. *Umweltbundesamt* (Dessau-Roßlau).
- Lawless, Jerald F. 2003. *Statistical Models and Methods for Lifetime Data*. Wiley-Interscience. <http://www.amazon.de/Statistical-Models-Methods-Lifetime-Data/dp/0471372153>.
- Loga, Tobias, Marc Großklos, und Jens Knissel. 2003. *Der Einfluss des Gebäudestandards und des Nutzerverhaltens auf die Heizkosten*. Institut für Wohnen und Umwelt (IWU). Eine Untersuchung im Auftrag der Viterra Energy Services AG.
- Luderer, Gunnar, Frederike Bartels, Tom Brown, u. a. 2025. *Die Energiewende kosteneffizient gestalten: Szenarien zur Klimaneutralität 2045*. Potsdam

- Institute for Climate Impact Research. Application/pdf, 106 pages, 33,7 MB.
<https://doi.org/10.48485/PIK.2025.003>.
- Mahmud, Zabir, Kenji Shiraishi, Mahmoud Y. Abido, Pedro Andrés Sánchez-Pérez, und Sarah R. Kurtz. 2022. „Hierarchical approach to evaluating storage requirements for renewable-energy-driven grids“. *iScience* 26 (1): 105900.
<https://doi.org/10.1016/j.isci.2022.105900>.
- Makhorin, Andrew. 2013. *GNU Linear Programming Kit (GLPK) for Windows*. Released.
<http://sourceforge.net/projects/winglpk/>.
- Manteuffel, Bernhard von, und Markus Offermann. 2022. *Realitätsnahe Berechnung des Energiebedarfs*. Ad-hoc Papier. Umweltbundesamt.
- McGinley, Orlaith, Paul Moran, Victoria Haines, und Jamie Goggins. 2025. „Householders’ energy efficiency retrofit decisions – A review of the evidence“. *Journal of Building Engineering* 114 (November): 113838.
<https://doi.org/10.1016/j.jobe.2025.113838>.
- Mellwig, Peter, und Sebastian Blömer. 2024. *Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland 3. O45-Welten. Gebäudesektor*. Ifeu.
https://langfristszenarien.de/enertile-explorer-wAssets/docs/20240924_Gebaeudebericht.pdf.
- Mellwig, Peter, und Dr Martin Pehnt. 2025. *Mit guten Gebäuden zum Ziel: Wie Klimaschutz im Gebäudebestand zu schaffen ist*.
- Meyer, Paul, Max Büchler, Kurt Christen, und Andreas Waibel. 1994. *Alterungsverhalten von Bauteilen und Unterhaltskosten. Grundlagen für den Unterhalt und die Erneuerung von Wohnbauten*. Bundesamt für Konjunkturfragen.
<http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Alterungsv+erhalten+von+Bauteilen+und+Unterhaltskosten#0>.
- Müller, Andreas. 2015. „Energy Demand Assessment for Space Conditioning and Domestic Hot Water: A Case Study for the Austrian Building Stock“. Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der technischen Wissenschaften, Technischen Universität Wien Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik.
https://www.invert.at/Dateien/Dissertation_AndreasM.pdf.
- „Netzentwicklungsplan Strom 2035“. o. J. Version Version 2021. 1. Entwurf.
- Pickert, Lena, Max Gierkink, Amir Ashour Novirdoust, Pia Willers, und Leon Langerhans. 2022. „Wirtschaftlichkeit von energetischen Sanierungsmaßnahmen“. EWI.
<https://www.ewi.uni-koeln.de/de/publikationen/wirtschaftlichkeit-von-energetischen-sanierungsmassnahmen/>.
- Prognos, Stiftung Klimaneutralität. 2025. „Sensitivitätsanalyse: Auswirkungen unterschiedlicher Sanierungsraten auf das Energiesystem und seine Kosten“. Prognos, Stiftung Klimaneutralität, Dezember.
- Rau, Dominik, Frederik Lettow, und Nils Thamling. 2024. „WWF Sanierungsstudie: Auf die Zukunft bauen. So rechnen sich Sanierungen“. WWF Deutschland, Prognos.

- <https://www.wwf.de/fileadmin/fm-wwf/Publikationen-PDF/Klima/studie-auf-die-zukunft-bauen-so-rechnen-sich-sanierungen.pdf>.
- Renz, Ina, und Ulrike Hacke. 2016. *Einflussfaktoren auf die Sanierung im deutschen Wohngebäudebestand*. Institut Wohnen und Umwelt (IWU) im Auftrag der KfW Bankengruppe.
https://www.iwu.de/forschung/handlungslogiken/einflussfaktoren-auf-die-sanierung-im-deutschen-wohngebaeudebestand/?utm_source=chatgpt.com.
- Sandia National Laboratories. 2013. *Coopr Pyomo - The Python Optimization Modeling Objects package*. Released.
<https://software.sandia.gov/trac/coopr/wiki/Licensing>.
- Spalthoff, Christian, Jan Ulffers, Erik Prade, Tanja Kneiske, Matthias Lenz, und Martin Braun. 2022. *FLEXIBLE WÄRMEPUMPEN IM VERTEILNETZ*. August.
- Spalthoff, Christian, Jan Ulffers, Erik Prade, Tanja Kneiske, Matthias Lenz, und Martin Braun. o. J. *FLEXIBLE WÄRMEPUMPEN IM VERTEILNETZ*.
- Staniaszek, Dan, Filippos Anagnostopoulos, Ralf Lottes, Lukas Kranzl, Agne Toleikyte, und Jan Steinbach. 2015. *Die Sanierung des deutschen Gebäudebestandes - Eine wirtschaftliche Bewertung aus Investorensicht*. Building Performance Institute Europe (BPIE).
- Statistische Ämter des Bundes und der Länder. 2024. „Die Ergebnisse des Zensus - Gebäude mit Wohnraum nach überwiegender Heizungsart in Gitterzellen“. Version 3: 04.11.2024. https://www.zensus2022.de/DE/Ergebnisse-des-Zensus/_inhalt.html.
- Statistisches Bundesamt (Statistisches Bundesamt). 2025. „Zensus 2022 - Gebäude nach Baujahr (Jahrzehnte) in Gitterzellen“.
- Steinbach, Jan. 2016. *Modellbasierte Untersuchung von Politikinstrumenten zur Förderung erneuerbarer Energien und Energieeffizienz im Gebäudebereich*. Herausgegeben von Fraunhofer ISI. Dissertation bei Fakultät für Wirtschaftswissenschaften des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) 2015.
<https://www.verlag.fraunhofer.de/bookshop/buch/Modellbasierte-Untersuchung-von-Politikinstrumenten-zur-Förderung-erneuerbarer-Energien-und-Energieeffizienz-im-Gebäudebereich/245046>.
- Steinbach, Jan, Jana Deurer, Charlotte Senkpiel, u. a. 2021. *Wege zur Erreichung eines klimaneutralen Gebäudebestandes 2050*. BBSR-Online-Publikation. IREES, Fraunhofer ISE im Auftrag des Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR).
- Steinbach, Jan, und Frank Schultmann. 2015. „Sanierung des deutschen Gebäudebestandes auf unterschiedliche Effizienzstandards – gesamtwirtschaftliche Investitionen und Energieeinsparungen“. *IEWT 2015, 9. Internationale Energiewirtschaftstagung an der TU Wien* (Wien, Austria), 1–17.
- Stieß, Immanuel, Victoria van der Land, Babara Birzle-Harder, und Jutta Deffner. 2010. *Handlungsmotive, -hemmnisse und Zielgruppen für eine energetische Gebäudesanierung - Ergebnisse einer standardisierten Befragung von Eigenheimsanierern*. Frankfurt am Main.

- Sunikka-Blank, Minna, und Ray Galvin. 2012. „Introducing the prebound effect: the gap between performance and actual energy consumption“. *Building Research & Information* 40 (3): 260–73. <https://doi.org/10.1080/09613218.2012.690952>.
- Umweltbundesamt (Umweltbundesamt). 2024. „Indikator: Emission von Treibhausgasen“.
- Umweltbundesamt (Umweltbundesamt). 2026. „Emissionsfaktoren zur Treibhausgasbilanzierung von Organisationen“. März 25. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/wirtschaft-konsum/wirtschaft-umwelt/umwelt-energiemanagement/emissionsfaktoren-zur-treibhausgasbilanzierung-von>.
- Wehnemann, Kai, Marcel Koßmann, Katja Purr, u. a. 2026. *Treibhausgas-Projektionen 2026 – Ergebnisse kompakt*. Mit Umweltbundesamt, Kerstin Berger, Timo Köhler, und Kirsten op de Hipt. Umweltbundesamt. 43. <https://doi.org/10.60810/OPENUMWELT-8361>.
- Weiß, Dr Julika, und Lena Pfeifer. 2020. *Energetische Sanierungen in Wohnungseigentümer-Gemeinschaften*. Institut für ökologische Wirtschaftsforschung (IÖW) gefördert im Rahmen der Nationalen Klimaschutzinitiative (NKI).
- Wenderoth, Friederike, Katharina Umpfenbach, Philipp Heilmaier, u. a. 2025. *dena-Verteilnetzstudie II – Weichenstellungen bei Verteilnetzbetreibern für Klimaneutralität – eine spartenübergreifende Perspektive*. Deutsche Energie-Agentur.
- Wüest, Hannes. 1994. *Basisdaten und Perspektiven zur Entwicklung des Gebäudeparks 1990-2030: Arbeitsbericht 30. August 1994*. Wüest & Partner. <http://books.google.de/books?id=uYTKYgEACAAJ>.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Projektstruktur, zentrale Methoden und Ergebnisse.....	6
Abbildung 2: Energiepreisprojektion Endverbraucherpreise Wärmeversorgung.....	12
Abbildung 3: Spezifische Investitionskosten (netto) für verschiedene Wärmeerzeugungssysteme in Abhängigkeit von der installierten Leistung.....	13
Abbildung 4: Unterscheidung des deutschen Gebäudebestandes in Referenzgebäudeklassen	17
Abbildung 5: Untersuchte Effizienzstandards mit Bezug auf die Mindesteffizienz der Gebäudehülle	18
Abbildung 6: Differenzierung des Gebäudebestandes über Referenzgebäudeklassen	21
Abbildung 7: Anzahl und Bruttogrundfläche nach Gebäudetyp und Baualtersklassen im Wohngebäudebestand	22
Abbildung 8: Bruttogrundfläche und Anzahl nach Gebäudetyp und Baualtersklasse im Nichtwohngebäudebestand.....	22
Abbildung 9: U-Werte Außenwand und Fenster nach GEG-Anforderungen und in den Referenzgebäuden des Gebäudebestandes.....	23
Abbildung 10: Resultierender Zielwert für die Gesamteffizienz der Gebäudehülle für die untersuchten Effizienzstandards in den einzelnen Referenzgebäudeklassen- teilweise Überlappung der Datenpunkte bei gleichem Zielwert.....	24
Abbildung 11: Erforderliche spezifische Investitionen für Effizienzmaßnahmen an der Gebäudehülle zur Erreichung der Effizienzstandards – teilweise Überlappung der Datenpunkte.....	25
Abbildung 12: Spezifische Investitionen zum Erreichen des Effizienzstandards GEG Bestand	25
Abbildung 13: Spezifische Investitionen zum Erreichen des Effizienzhausstandards EH 55.....	26
Abbildung 14: Spezifische „Ohnehin-Kosten“ der jeweiligen Maßnahmen.....	28
Abbildung 15: Effektiver Nutzwärmebedarf pro Gebäude für die Einfamilienhaus- Referenzgebäude nach Effizienzstandards.....	29
Abbildung 16: Effektiver Nutzwärmebedarf pro Gebäude für die Reihenhäuser- Referenzgebäude nach Effizienzstandards.....	30
Abbildung 17: Effektiver Nutzwärmebedarf pro Gebäude für die Kleinen Mehrfamilienhäuser-Referenzgebäude nach Effizienzstandards.....	31
Abbildung 18: Effektiver Nutzwärmebedarf pro Gebäude für die mittleren Mehrfamilienhäuser-Referenzgebäude nach Effizienzstandards.....	31

Abbildung 19: Effektiver Nutzwärmebedarf pro Gebäude für die großen Mehrfamilienhäuser-Referenzgebäudeklassen nach Effizienzstandards	32
Abbildung 20: Energieeinsparkosten: Annuität der Investitionen pro eingesparte Kilowattstunden Nutzwärme [EURO/kWh] bei einer Abschreibungsdauer von 60 Jahren – Einfamilienhäuser und Reihenhäuser (ohne Förderung).....	35
Abbildung 21: Energieeinsparkosten: Annuität der Investitionen pro eingesparte Kilowattstunden Nutzwärme [EURO/kWh] bei einer Abschreibungsdauer von 60 Jahren–Mehrfamilienhäuser (ohne Förderung)	36
Abbildung 22: Zusammenfassung Anteil wirtschaftlicher Effizienzmaßnahmenpakete bei unterschiedlichen Energiepreisen und einer Abschreibungsdauer von 60 Jahren	37
Abbildung 23: Energieeinsparkosten: Annuität der Investitionen pro eingesparte Kilowattstunde Nutzwärme [EURO/kWh] – Einfamilienhäuser und Reihenhäuser (inkl. Förderung)	38
Abbildung 24: Energieeinsparkosten: Annuität der Investitionen pro eingesparte Kilowattstunde Nutzwärme [EURO/kWh] –Mehrfamilienhäuser (inkl. Förderung)	38
Abbildung 25: Energieeinsparkosten Sensitivitäten: Annuität der Investitionen pro eingesparte Kilowattstunde Nutzwärme [EURO/kWh] – Einfamilienhäuser und Reihenhäuser.....	39
Abbildung 26: Abhängigkeit Effizienz der Wärmeversorgung von der Temperatur der Wärmeverteilung.....	40
Abbildung 27: Einflussfaktoren auf die Vorlauftemperatur	41
Abbildung 28: Übersicht geringinvestive Maßnahmen für „Niedertemperatur-/Wärmepumpen ready“	42
Abbildung 29: Relevanz von Effizienzmaßnahmen in Gebäuden für die Effizienz und Auslegung von Wärmepumpen.....	43
Abbildung 30: Vergleich Investitionskosten Luft-Wasser Wärmepumpen und Gaskessel in Abhängigkeit von der thermischen Leistung (inkl. MwSt.).....	44
Abbildung 31: Maximale Heizlast Referenzgebäudeklassen der Gebäudetypen Einfamilienhaus und Reihenhäuser vor und nach Sanierung.....	44
Abbildung 32: Heizlast eines Mehrfamilienhaus-Referenzgebäude vor und nach Sanierung	45
Abbildung 33: Analyse der Barrieren von Luftwärmepumpen aufgrund von Schallemissionen an Nachbargebäuden in einem realen Quartier.....	45
Abbildung 34: Seasonal Coefficient of Performance aktueller Wärmepumpensysteme	46

Abbildung 35: Modellierung der Heizungsvorlauftemperatur und resultierende JAZ für den Standort Berlin im Gebäudebestand	47
Abbildung 36: Jahresgesamtkosten aus Effizienzmaßnahmen und Wärmeversorgung ausgewählte Referenzgebäudeklassen im Einfamilienhausbestand...	48
Abbildung 37: Jahresgesamtkosten aus Effizienzmaßnahmen und Wärmeversorgung ausgewählte Referenzgebäudeklassen im Mehrfamilienhäuserbestand	50
Abbildung 38: Direkte THG-Emissionseinsparungen Referenzgebäudeklasse Einfamilienhäuser 1958 – 1968	51
Abbildung 39: Direkte THG-Emissionseinsparungen Referenzgebäudeklasse kleine Mehrfamilienhäuser 1958 – 1968.....	51
Abbildung 40: THG-Vermeidungskosten für die untersuchten Varianten in den ausgewählten Referenzgebäudeklassen der Einfamilienhäuser	52
Abbildung 41: Spezifische THG-Emissionen in der Herstellungs- und Rückbauphase bei Komplettsanierung eines Einfamilienhauses auf EH55-Niveau [Baujahr 1969-1978]	53
Abbildung 42: Spezifische THG-Emissionen über den gesamten Lebenszyklus bei Komplettsanierung verschiedener Gebäudetypen auf EH55-Niveau...	54
Abbildung 43: Spezifische THG-Emissionen über den Lebenszyklus der Sanierungsmaßnahmen bei Komplettsanierung verschiedener Gebäudetypen auf EH55-Niveau nach verschiedenen Dämmstoffarten	55
Abbildung 44: Spezifische THG-Emissionen über den Lebenszyklus der Sanierungsmaßnahmen bei Komplettsanierung eines Einfamilienhauses auf verschiedene Effizienzniveaus [Baujahr 1969-1978].....	56
Abbildung 45: Spezifische THG-Emissionen über den Lebenszyklus der Sanierungsmaßnahmen bei Komplettsanierung eines Einfamilienhauses auf verschiedene Effizienzniveaus inkl. Wechsel auf Wärmepumpe mit dynamischem Emissionsfaktor [Baujahr 1969-1978]	57
Abbildung 46: Struktur des Simulationsmodells Invert/ee-Lab	60
Abbildung 47: Beispielhafte Darstellung der berechneten kumulierten Austausch- / Sanierungsraten.....	62
Abbildung 48: Sanierungsrate für Wohngebäude in den beiden Szenarien.....	64
Abbildung 49: Differenz des Nutzwärmebedarfs der beiden Szenarien.....	65
Abbildung 50: Differenz des effektiven Nutzwärmebedarfs der beiden Szenarien.....	66
Abbildung 51: Entwicklung des Endenergieverbrauchs nach Energieträgern und der THG-Emissionen in beiden Szenarien.....	67

Abbildung 52: Marktanteile neu installierter Wärmeversorgungssysteme in beiden Szenarien [5-Jahres-Mittelwerte].....	68
Abbildung 53: Laufende Energiekosten für den Wohngebäudebestand nach Wärmeversorgungssystemen (netto).....	69
Abbildung 54: Jährliche Investitionen in Effizienzmaßnahmen und Wärmeversorgung im Wohngebäudebestand (netto).....	70
Abbildung 55: Annuierte Gesamtkosten über Betrachtungszeitraum von 2025 bis 2045 in beiden Szenarien	71
Abbildung 56: Übersicht der angewendeten Methodik zur Abschätzung der systemischen Auswirkungen verschiedener Gebäudeeffizienzen.....	74
Abbildung 57: Anzahl der Gebäude mit Wärmepumpen nach Gebäudetyp, nach Vorlauftemperatur und nach Leistungsklasse wie im Gebäudemodell Invert/ee-Lab für das Basisjahr 2025 implementiert.....	78
Abbildung 58: Anzahl und thermische Leistung installierter Wärmepumpen in beiden Effizienzszenerarien im Simulationszeitraum 2025 bis 2045.....	79
Abbildung 59: Technologieverhalten bei Kälte: Leistungszahl (COP) und spezifischer Gesamtstrombedarf (rechts) abhängig von der Außentemperatur	80
Abbildung 60: Deutschland-gemittelte Außentemperaturen und Wind- sowie PV-Produktion in ausgewählten Wochen mit Dunkelflaute	82
Abbildung 61: Leistungszahl (COP) von Wärmepumpensystemen abhängig von der Außentemperatur und der Auslegungs-Vorlauftemperatur.....	83
Abbildung 62: Auswirkungen verschiedener Vorlauftemperaturen auf die Stromlast von Wärmepumpen.....	85
Abbildung 63: Jahresarbeitszahlen je Typgebäude und Szenariojahr	86
Abbildung 64: Jahresarbeitszahlen von Wärmepumpensystemen in Abhängigkeit der Vorlauftemperatur in einer Feldstudie des Fraunhofer ISE (Lämmle u. a. 2022)	87
Abbildung 65: Vergleich der gesamten Stromlast durch Wärmepumpen im Jahr 2025 bei Annahme der Wetterdaten der gewählten Dunkelflaute-Wochen.....	88
Abbildung 66: Stromlast durch Wärmepumpen und resultierende Residuallast während der Dunkelflaute 1	89
Abbildung 67: Vergleich der Strom-Lastspitzen und maximalen Residuallasten durch Wärmepumpen beider Effizienzszenerarien.....	91
Abbildung 68: Vergleich der WP-Stromlasten zwischen den Effizienzszenerarien während einer Dunkelflautenwoche	92
Abbildung 69: Speicherkapazitätsbedarf auf verschiedenen Zeitskalen, bestimmt nach der „Wasserfallmethode“ in Anlehnung an (Mahmud u. a. 2022)	94

Abbildung 70: Vergleich des Speicherbedarfs in beiden Effizienzscenarien bei Annahme eines vollständigen Ausgleichs der Residuallast durch saisonale Speicher.....	95
Abbildung 71: Modellierte Stunden mit einer Transformator-Auslastung > 80 % für drei typische Verteilnetze, verschiedene Wärmepumpen-Diffusionsraten (Anteil der Gebäude) und das Hoch- und Niedrigeffizienzscenario während der Dunkelflautenwoche.....	98
Abbildung 72: Vergleich der geschätzten jährlichen Kosten aufseiten des Stromsystems durch unterschiedliche Wärmepumpen-Stromlasten zwischen beiden Effizienzscenarien.....	100
Abbildung 73: Relative Verteilung der thermischen Zeitkonstanten von Gebäuden mit Wärmepumpe für das Hoch- und Niedrigeffizienzscenario.....	101
Abbildung 74: Relative Verteilung an Gebäuden mit Wärmepumpe nach Vorlauftemperatur für das Hoch- und Niedrigeffizienzscenario	103
Abbildung 75: Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse zum Einfluss von Heizlast- und Vorlauftemperaturreduktion bei Gebäuden mit Wärmepumpe.....	104
Abbildung 76: Prozessschritte bei der Gebäudesanierung aus Perspektive von Eigentümerinnen und Eigentümern und idealtypischer Sanierungsprozess.....	108
Abbildung 77: Modellübersicht Invert/ee-Lab	130
Abbildung 78: Modellierung der Gebäudeeigentümer als Investor-Agenten.....	131
Abbildung 79: Schematische Darstellung der Modellierung von Politikinstrumente in <i>Invert-Agents</i>	132

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Kostenkurvenparameter für Gesamtinvestitionskosten (brutto) und Anteil Ohnehin-Kosten.....	14
Tabelle 2: Ohnehin anfallende Maßnahmen bei Instandsetzung von Gebäuden.....	27
Tabelle 3: Lebensdauern von Baukonstruktionen.....	33
Tabelle 4: Verwendete Parameter für die Wirtschaftlichkeitsberechnung.....	34
Tabelle 5: Entwicklung des Flexibilitäts-Fensters.....	101
Tabelle 6: Prozesskette energetische Sanierung.....	108
Tabelle 7: Entscheidungsvariablen im Investitionsberechnungsmodell.....	134
Tabelle 8: Verwendete Parameter im Investitions-Berechnungsmodell.....	135

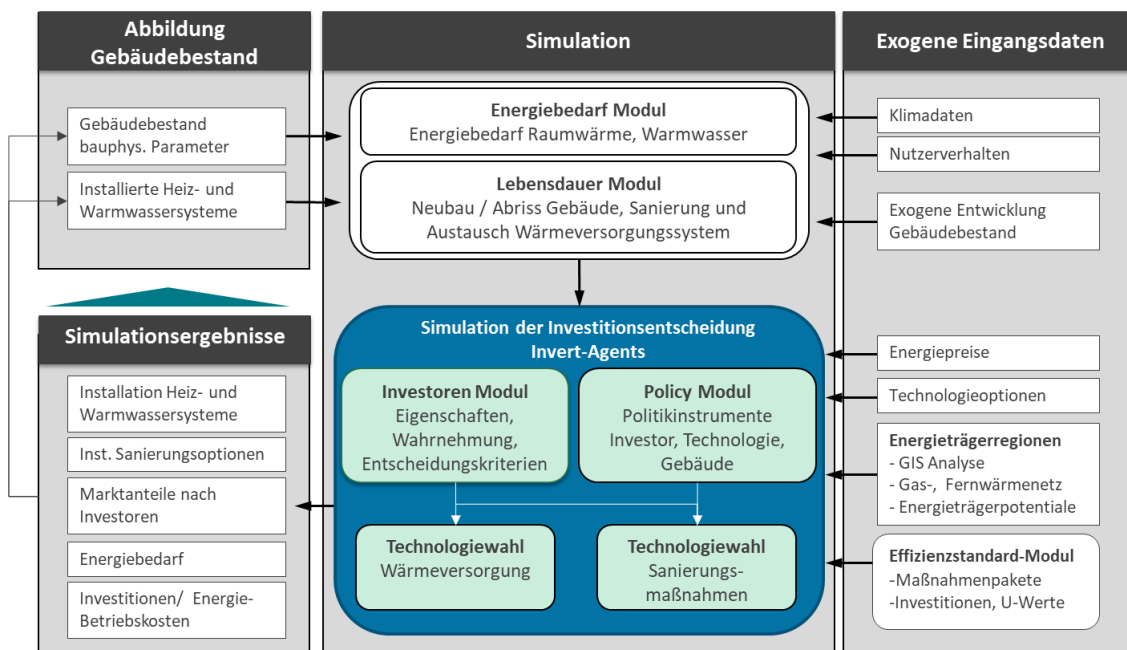
Anhang

Kurzbeschreibung Modell Invert/ee-Lab und Teilmodell zu Effizienzmaßnahmenpaketberechnung

Methodisch stellt Invert/ee-Lab ein dem Bottom-up-Ansatz folgendes, technoökonomisches Simulationsmodell dar, mit dem Optionen des Energiebedarfs und dessen Deckung für Wärme (Raumwärme und Warmwasser) sowie Klimatisierung von Wohn- und Nichtwohngebäuden ermittelt und die Auswirkungen verschiedener Förderinstrumente in Jahresschritten abgebildet werden können. Grundlage des Modells ist eine detaillierte Darstellung des Gebäudebestands nach Gebäudetypen, Baualterklassen und Sanierungszuständen mit relevanten bauphysikalischen und ökonomischen Parametern einschließlich der Technologien zur Bereitstellung von Raumwärme, Warmwasser und Klimatisierung. Darauf aufbauend wird der Heiz- und Kühlenergiebedarf unter Einbeziehung von Nutzerverhalten und Klimadaten ermittelt. Die Investitionsentscheidung in Technologien und Effizienzmaßnahmen wird unter Berücksichtigung von investorenspezifischen Entscheidungskalkülen und Hemmnissen sowie Energieträgerpotentialen im Modul INVERT-Agents ermittelt.

Mit INVERT/ee-Lab ist es möglich, die Auswirkung unterschiedlicher Politikinstrumente und Ausgestaltungsvarianten auf den Ausbau der Erneuerbaren Energien im Gebäudebereich in Szenarien zu analysieren.

Abbildung 77: Modellübersicht Invert/ee-Lab



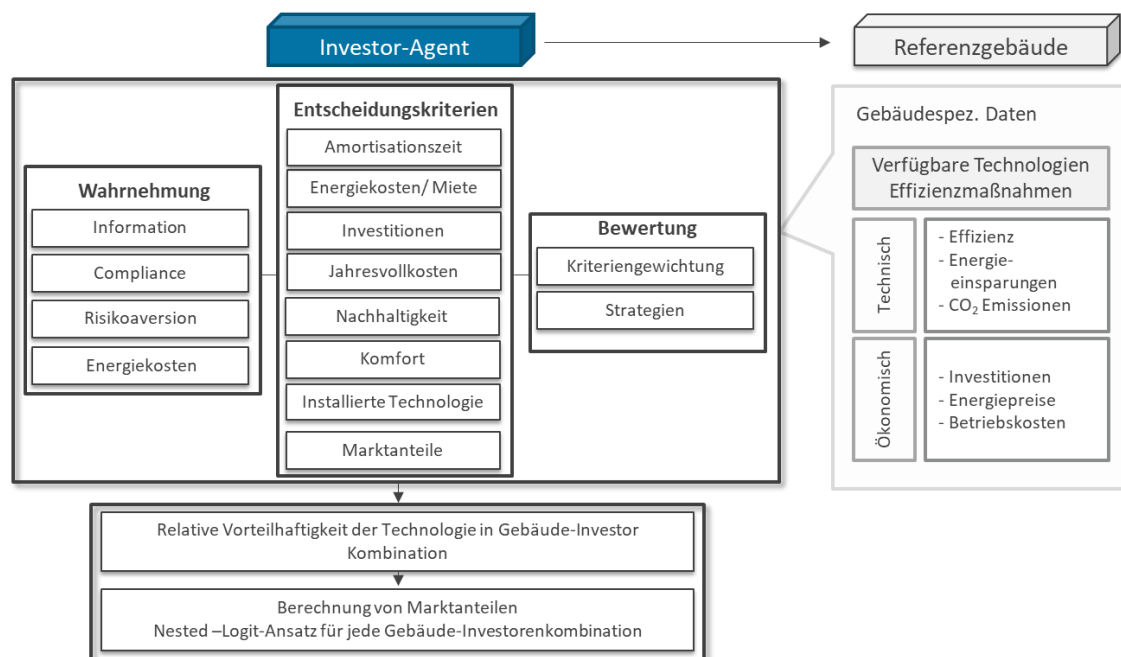
Quelle: Steinbach 2016

Modellierung von Investoren im Gebäudebereich und der Investitionsentscheidung

Im Modell können einzelne Investorentypen implementiert werden, welche den Referenzgebäudesegmenten anteilig als Besitzer zugeordnet werden. Diese Anteile sind zeitabhängig und können somit exogen über den Simulationszeitraum verändert werden. Das Modell erlaubt die Definition beliebig vieler Investorenagenten, welche

jeweils Instanzen einer von fünf möglichen Agentenklassen darstellen – *Selbstnutzende Eigentümer, Private Vermieter, Eigentümergemeinschaften, Wohnungsbaugesellschaften, gewerbliche Gebäudebesitzer*. Als Grundlage der Investitionsentscheidung werden verschiedene ökonomische und nicht – ökonomische Entscheidungskriterien definiert, die für jede Kombination von Investoren, Referenzgebäudesegmenten und Technologieoptionen individuell ermittelt werden. Die Eigenschaften einer Investoreninstanz werden als Eingangsdaten definiert, womit einerseits die Relevanz unterschiedlicher Entscheidungskriterien über Gewichte bestimmt werden, andererseits auch die Ausprägung der Kriterien beeinflusst werden. Somit wird sowohl die Art der Investitionsentscheidung – Berücksichtigung unterschiedlicher Kriterien – als auch die Wahrnehmung der Technologieoptionen und der damit verbundenen Parameterausprägungen unterschieden. Für jede zur Verfügung stehende Technologieoption werden in jedem Referenzgebäudesegment aus Sicht jeder Investoreninstanz Nutzwerte berechnet, auf deren Basis die Marktanteile mit einem *Nested-Logit-Modell* ermittelt werden.

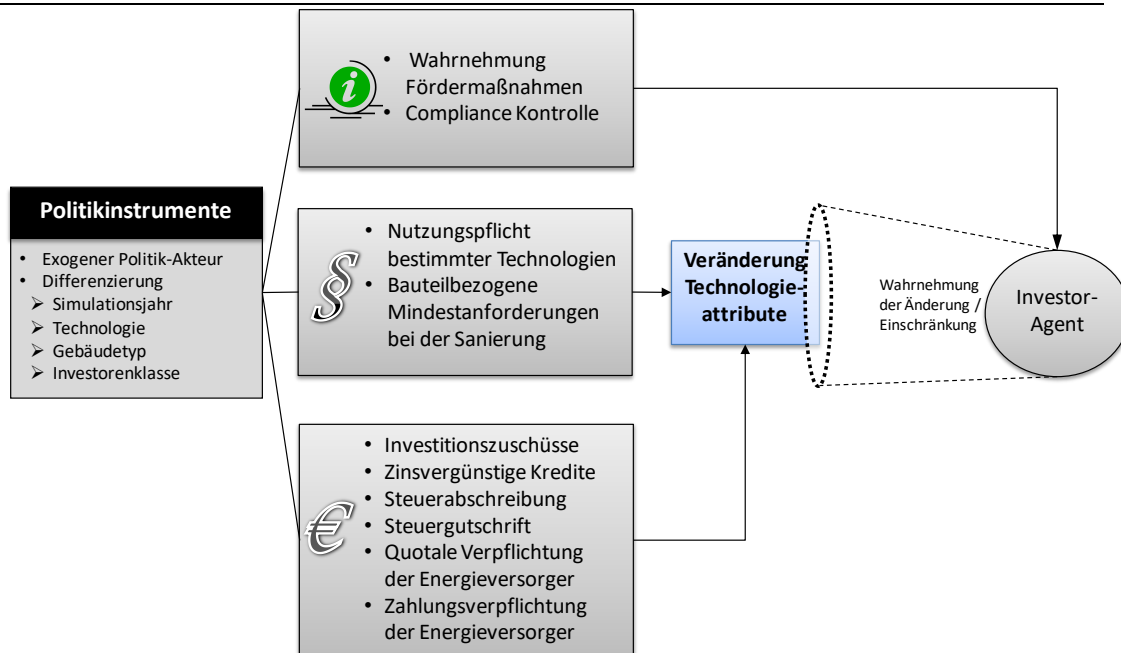
Abbildung 78: Modellierung der Gebäudeeigentümer als Investor-Agenten



Modellierung von Politikinstrumenten

Um die Wirkung der Politikinstrumente auf die Investitionsaktivität in Energieeffizienzmaßnahmen und Wärmeversorgungssysteme zu untersuchen, werden diese explizit im Modell abgebildet. Dies geschieht als integrale Modellierung von Politikinstrumenten und Investoren, die eine aktEURSSPEZIFISCHE Untersuchung der Wirkungen der Instrumente ermöglichen sollen.

Abbildung 79: Schematische Darstellung der Modellierung von Politikinstrumente in *Invert-Agents*



Quelle: Steinbach (2015)

Die Politikinstrumente und deren Ausgestaltung werden zunächst aus Sicht eines Politik-Akteurs für jedes Simulationsjahr exogen definiert. Dabei werden Förder- und Anforderungsbedingungen nach den adressierten Technologien und Maßnahmen sowie den Adressaten – Investorenklassen und Gebäudetypen differenziert. Ordnungsrechtliche und finanzielle Fördermaßnahmen verändern die Attribute der Technologiealternativen oder schränken die Wahlmöglichkeiten durch Nutzungspflichten oder Mindestanforderungen ein. In Abhängigkeit der definierten Investor-Agenten werden diese Veränderungen oder Einschränkungen bei der Investitionsentscheidung berücksichtigt. Ein Investitionszuschuss beispielsweise verändert die relative Vorteilhaftigkeit einer Technologie hinsichtlich des Attributes Investitionen, wobei dies nicht zwangsläufig der wahrgenommenen Attributausprägung eines Investor-Agenten entspricht. Informatorische Maßnahmen wiederum wirken indirekt auf die Attribute der Wahlmöglichkeiten, indem die investorenspezifische Wahrnehmung verändert wird.

Teilmodell zur Berechnung von Effizienzmaßnahmenpakete, Baustoffvolumina und Investitionen

Das Modell berechnet zunächst, welche Effizienzmaßnahmen erforderlich sind, um die vorgegebenen Energiestandards mit Bezug auf die Gesamtenergieeffizienz der Gebäudehülle zu erreichen³². Dies ist modelltechnisch über ein lineares Optimiermodell implementiert, wobei die Auswahl der zu sanierenden Bauteile (die Auswahl der zu sanierenden Bauteile (Außenwand, Dach, Keller/Bodenplatte, Fenster)

³² Das Berechnungsmodell setzt dabei auf dem von (Steinbach 2016) und Steinbach und Schultmann (2015) entwickelten Modell zur Berechnung von Maßnahmenpaketen und Investitionskosten für die energetische Sanierung auf und erweitert dieses um die Möglichkeit, unterschiedliche Baukonstruktionsvarianten zu ermitteln. Das Modell ist in Python mit dem Paket Pyomo für die Optimierung programmiert.

und die jeweiligen Sanierungstiefe (Dämmdicke, Fenster) unter Minimierung der erforderlichen Außenwand, Dach, Keller/Bodenplatte, Fenster) und die jeweilige Sanierungstiefe (Dämmdicke, Fenster) unter Minimierung der erforderlichen Investitionen berechnet werden. Dies ist modelltechnisch über ein lineares Optimiermodell implementiert, wobei Investitionen berechnet werden (Steinbach und Schultmann 2015; Steinbach 2016). Der spezifische Transmissionstransferwärmekoeffizient (Ht') des jeweiligen Energiestands geht somit als Nebenbedingung in die Optimierung ein. Das Modell führt die Optimierung separat für jedes Referenzgebäude und für jeden vorgegebenen Energiestandard durch. Im Resultat ergeben sich für jedes Referenzgebäude damit Unterschiede in dem zu sanierenden Bauteil bzgl. der Sanierungstiefe und damit verbundenen U-Wert des Bauteils nach der Sanierung. Dabei werden alle nachträglich aufgebrachten Materialien (Dämmmaterial, Putz, Armierung, Fensterglas, Rahmen etc.) berücksichtigt. Bei der Quantifizierung wird stets die gesamte Baumaßnahme betrachtet. Im zweiten Schritt werden die Materialmengen (Schichtdicke, Volumen und Gewicht) unterschiedlicher Konstruktionsvarianten für die zu sanierenden Komponenten und die damit verbundenen energetischen Kennwerte und THG-Emissionen durch direkte Kopplung mit der ÖKOBAUDAT ermittelt. Der Aufbau der Konstruktionsvarianten und die erforderlichen Materialien werden als Input im Modell vorgegeben, wobei je nach Material unterschieden wird, inwieweit die jeweilige Schichtdicke als feste Größe eingeht oder vom Modell in Abhängigkeit des zu erreichenden U-Wertes und der jeweiligen Wärmeleitfähigkeit bestimmt wird.

Der zu erreichende Standard wird über den spezifischen, auf die wärmeübertragende Gebäudefläche bezogenen Transmissionstransferwärmekoeffizienten definiert. Die mit den Effizienzmaßnahmenpaketen verbundenen Investitionen und Dämmstoffvolumina hängen im Falle von Bestandsgebäuden vom energetischen Ausgangszustand des jeweiligen Referenzgebäudes ab. Zudem bestehen Freiheitsgrade bei der Erreichung der Standards hinsichtlich der Auswahl der zu sanierenden Gebäudekomponente und der jeweiligen Sanierungstiefe (Dicke der Dämmschicht, Fensterqualität). Aufgrund dieser Komplexität und der Relevanz der Investitionen bei der Entscheidungsfindung wird ein separates Berechnungsmodell entwickelt, welches die Investitionen für die einzelnen Referenzgebäude unter der Annahme einer kostenoptimalen Kombination der zu sanierenden Gebäudebauteile berechnet.

Als Datengrundlage für die Berechnung dienen die durch (Hinz 2011) ermittelten Investitionskurven für die verschiedenen Gebäudekomponenten/ Bauteile (Außenwand, oberer Gebäudeabschluss, Kellerdecke, Fenster) in Abhängigkeit der verwendeten Dämmstoffdicke bzw. des U-Wertes bei Fenstern. Die spezifischen Investitionskostenkurven sind mittels des Baupreisindex auf das Jahr 2018 skaliert. Zur Berechnung der Gesamtinvestitionen und der verwendeten Baustoffvolumina eines Effizienzmaßnahmenpaketes in den jeweiligen Referenzgebäuden wird ein ganzzahliges lineares Optimierungsproblem formuliert. Für jede mögliche Sanierungsausprägung in Form von Dämmstoffdicke und Fensterqualität der einzelnen Gebäudekomponenten wird jeweils eine binäre Entscheidungsvariable benötigt (Tabelle 7). Bei den opaken Bauteilen werden Dämmstoffdicken zwischen z.B.

6 und 40 Zentimeter als diskrete Optionen berücksichtigt³³; bei Fenstern ($X_{bu,j}^{WI}$) stehen Zweifach- oder Dreifachwärmeschutzverglasung zur Auswahl. Des Weiteren gibt es für jede Gebäudekomponente die Option, keine Sanierung durchzuführen – Dämmung mit null Millimetern, Fenster werden im Ausgangszustand belassen. Bei der Sanierung der Außenwand und des Daches ist zudem die Aufstellung eines Gerüsts erforderlich, welches mit zusätzlichen Ausgaben verbunden ist, die in den Gesamtinvestitionen berücksichtigt werden müssen. Daher wird neben den Entscheidungsvariablen für die Sanierungsoptionen der vier Gebäudekomponenten eine weitere Binärvariable für die Aufstellung eines Gerüsts beinbezogen³⁴.

Tabelle 7: Entscheidungsvariablen im Investitionsberechnungsmodell

Variable/	Typ	Einheit	Beschreibung
$X_{bu,j}^{WA}$	binär	-	Sanierungsoptionen für die Außenwand
$X_{bu,j}^{RO}$	binär	-	Sanierungsoptionen des oberen Gebäudeabschlusses (Dach, obere Geschossdecke)
$X_{bu,j}^{FL}$	binär	-	Sanierungsoptionen für die Kellerdecke
$X_{bu,j}^{WI}$	binär	-	Sanierungsoptionen für die Fenster
X_{bu}^{SC}	binär	-	Gerüst für Sanierungsoption erforderlich

Zur besseren Übersicht werden in Tabelle 8 den verwendeten Parameter im Investitionsberechnungsmodell dargestellt, bevor die Zielfunktion und die Nebenbedingungen erläutert werden.

³³ Die maximalen Dämmstoffdicken variieren zwischen den Gebäudekomponenten (Hinz 2011). Die maximalen Dämmstoffdicken variieren zwischen den Gebäudekomponenten (Hinz 2011).

³⁴ Die Kosten zur Einrüstung des Gebäudes werden nach (Hinz 2011) mit 11 Euro pro Quadratmeter Wohnfläche angesetzt. Die Kosten zur Einrüstung des Gebäudes werden nach (Hinz 2011) mit 11 Euro pro Quadratmeter Wohnfläche angesetzt.

Tabelle 8: Verwendete Parameter im Investitions-Berechnungsmodell

Parameter	Einheit	Beschreibung
a_{bu}^{WA}	m ²	Fläche der Außenwände
a_{bu}^{RO}	m ²	Fläche des oberen Gebäudeabschlusses
a_{bu}^{FL}	m ²	Fläche der Kellerdecke
a_{bu}^{WI}	m ²	Fensterfläche
a_{bu}^w	m ²	Wohnfläche
c_j^{WA}	EUR/ m ²	Spez. Investitionen der Außenwandsanierungsoption j
c_j^{RO}	EUR/ m ²	Spez. Investitionen der Sanierungsoption j des ob. Gebäudeabschlusses
c_j^{FL}	EUR/ m ²	Spez. Investitionen der Kellerdeckensanierungsoption j
c_j^{WI}	EUR/ m ²	Spezifische Investitionen der Fenstersanierungsoption j
c^{SC}	EUR/ m ²	Spezifische Kosten der Gerüstaufstellung
$u_{bu,j}^{WA}$	W/(m ² K)	Resultierender U-Wert der Außenwand mit Sanierungsoption j
$u_{bu,j}^{RO}$	W/(m ² K)	Resultierender U-Wert des oberen Gebäudeabschluss mit Sanierungsoption j
$u_{bu,j}^{FL}$	W/(m ² K)	Resultierender U-Wert der Kellerdecke mit Sanierungsoption j
$u_{bu,j}^{WI}$	W/(m ² K)	Resultierender U-Wert bei Austausch der Fenster mit Sanierungsoption j
ht_{bu}^{ref}	W/(m ² K)	Zielwert des spezifischen, auf die wärmeübertragende Umfassungsfläche bezogenen Transmissionstransferwärmekoeffizienten

Die Zielfunktion stellt eine Minimierung der Investitionen für den jeweils zu erreichenden Effizienzstandard dar. Als Parameter gehen darin die spezifischen Investitionen der möglichen Sanierungsoptionen sowie die Flächen der Gebäudekomponenten ein.

$$\text{Min} \left(\begin{array}{l} \sum_j a_{bu}^{WA} \cdot c_j^{WA} \cdot X_{bu,j}^{WA} + \sum_j a_{bu}^{RO} \cdot c_j^{RO} \cdot X_{bu,j}^{RO} \\ + \sum_j a_{bu}^{FL} \cdot c_j^{FL} \cdot X_{bu,j}^{FL} + \sum_j a_{bu}^{WI} \cdot c_j^{WI} \cdot X_{bu,j}^{WI} + X_{bu}^{SC} \cdot c^{SC} \cdot a_{bu}^w \cdot \end{array} \right) \quad (1)$$

Für jede Gebäudekomponente ist jeweils eine Nebenbedingung erforderlich, welche garantiert, dass pro Komponente nur eine Sanierungsoption³⁵ gezogen wird.

³⁵ Dies beinhaltet, wie oben dargestellt, die Option nichts zu verändern.

$$\sum_j X_{bu,j}^{WA} = 1; \quad (2)$$

$$\sum_j X_{bu,j}^{RO} = 1 \quad (3)$$

$$\sum_j X_{bu,j}^{FL} = 1; \quad (4)$$

$$\sum_j X_{bu,j}^{WI} = 1 \quad (5)$$

Eine weitere Nebenbedingung wird mit der Setzung der Variable zur Einrüstung des Gebäudes aufgestellt. Dadurch wird garantiert, dass diese Ausgaben nur im Falle einer Dach- oder Außenwandsanierung anfallen.

$$\sum_j X_{bu,j}^{WA} - X_{bu}^{SC} + \sum_j X_{bu,j}^{WA} - X_{bu}^{SC} \leq 0 \quad (6)$$

Der zu erreichende Energieeffizienzstandard des Maßnahmenpaketes wird in Form des spezifischen Transmissionstransferwärmekoeffizienten vorgegeben. Dieser wird, wie in der *EnEV* in Abhängigkeit des Gebäudetyps definiert. Alternativ können auch Ziel-U-Werte für die einzelnen Gebäudekomponenten vorgegeben werden, aus denen der spezifische Transmissionstransferwärmekoeffizient ermittelt wird. Folgende Nebenbedingung garantiert, dass der Zielstandard erreicht wird.

$$\begin{aligned} & \sum_j a_{bu}^{WA} \cdot u_{bu,j}^{WA} \cdot X_{bu,j}^{WA} + \sum_j a_{bu}^{RO} \cdot u_{bu,j}^{RO} \cdot X_{bu,j}^{RO} \\ & + \sum_j a_{bu}^{FL} \cdot u_{bu,j}^{FL} \cdot X_{bu,j}^{FL} + \sum_j a_{bu}^{WI} \cdot u_{bu,j}^{WI} \cdot X_{bu,j}^{WI} \leq ht_{bu}^{ref} \cdot a_{bu}^{Tot} \end{aligned} \quad (7)$$

Die resultierenden U-Werte der opaken Komponenten in der Nebenbedingung werden aus den U-Werten im Ausgangszustand und der Dämmstärke der jeweiligen Sanierungsoptionen ermittelt³⁶.

$$u_{bu,j}^{opak} = \left(\frac{1}{u_{bu}^{opak}} + \frac{d_j}{\kappa} \right)^{-1} \quad (8)$$

Das Berechnungsmodell wird als *Python*-Programm mit dem Optimierungspaket *Coopr-Pyomo* implementiert (Sandia National Laboratories 2013) unter Verwendung des *GLPK Solver* (Makhorin 2013)

³⁶ Es wird eine Wärmeleitfähigkeit (κ) des Dämmmaterials von 0,035 W/(mK) angenommen, Dies entspricht der durchschnittlichen Wärmeleitfähigkeit von Mineralfaserdämmstoffen, welche die am meisten verwendeten Dämmstoffe darstellen (Eicke-Hennig 2011). Es wird eine Wärmeleitfähigkeit (κ) des Dämmmaterials von 0,035 W/(mK) angenommen, Dies entspricht der durchschnittlichen Wärmeleitfähigkeit von Mineralfaserdämmstoffen, welche die am meisten verwendeten Dämmstoffe darstellen (Eicke-Hennig 2011).

