



Bundesinstitut
für Bau-, Stadt- und
Raumforschung

im Bundesamt für Bauwesen
und Raumordnung



Autorinnen und Autoren

Dr. Jan Steinbach
Jana Deurer
Charlotte Senkpiel
Julian Brandes
Judith Heilig
Jessica Berneiser
Dr. Christoph Kost

Wege zur Erreichung eines klima- neutralen Gebäudebestandes 2050

BBSR-
Online-Publikation
23/2021

Wege zur Erreichung eines klimaneutralen Gebäudebestandes 2050

Das Projekt des Forschungsprogramms „Zukunft Bau“ wurde vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Auftrag des Bundesministeriums des Innern, für Bau und Heimat (BMI) durchgeführt.

IMPRESSUM

Herausgeber

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR)
im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR)
Deichmanns Aue 31–37
53179 Bonn

Wissenschaftliche Begleitung

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung
Referat WB 2 „Energieeinsparung, Klimaschutz“
Nicolai Domann
nicolai.domann@bbr.bund.de

Begleitung im Bundesministerium

Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat
Referat BW I 3
Dr. Eva Maria Kasperek
eva.kasperek@bmi.bund.de

Auftragnehmer

IREES – Institut für Ressourceneffizienz und Energiestrategien GmbH, Karlsruhe
Dr. Jan Steinbach
Jana Deurer

Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme ISE, Freiburg
Charlotte Senkpiel
Julian Brandes
Judith Heilig
Jessica Berneiser
Dr. Christoph Kost

Stand

Mai 2021

Bildnachweis

Titelbild: JoachimKohlerBremen, CC-BY-SA-4.0

Vervielfältigung

Alle Rechte vorbehalten

Der Herausgeber übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie für die Beachtung privater Rechte Dritter. Die geäußerten Ansichten und Meinungen müssen nicht mit denen des Herausgebers übereinstimmen.

Zitierweise

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR) (Hrsg.):
Wege zur Erreichung eines klimaneutralen Gebäudebestandes 2050. BBSR-Online-Publikation 23/2021, Bonn, August 2021.



Foto: privat

Liebe Leserinnen und Leser,

Deutschland soll gemäß der Novelle des Klimaschutzgesetzes bis 2045 klimaneutral werden. Um dieses Ziel zu erreichen, müssen die Treibhausgasemissionen (THG-Emissionen) in allen Sektoren stark zurückgehen. Ein wichtiges Zwischenziel ist das Jahr 2030. Für den Zeitraum bis 2030 legt das Gesetz für die einzelnen Sektoren maximale Jahres-Emissionsmengen fest. Der Gebäudesektor ist derzeit für rund 16 % der THG-Emissionen in Deutschland nach dem Quellprinzip verantwortlich.

Wenn die aktuellen Randbedingungen so bleiben, werden die Ziele im Gebäudesektor deutlich verfehlt. Die vorliegende Studie stellt dar, welche Lücke sich für den Sektor unter Beibehaltung des aktuellen Rechts- und Förderrahmens ergibt. Darüber wird anhand eines Szenarios gezeigt, wie die vollständige Reduktion der THG-Emissionen bis 2050 gelingen kann.

Obgleich die Studie auf der ursprünglichen Zielvorgabe des Klimaschutzgesetzes 2019 für eine vollständige Reduktion der THG-Emissionen bis 2050 basiert, wird darin ebenfalls aufgezeigt, dass eine Klimaneutralität auch bis 2045 gelingen kann. Um das zu erreichen, sind sowohl eine Erhöhung der Sanierungsaktivität als auch eine Wärmewende hin zu einer strombasierten Wärmebereitstellung mit Wärmepumpen erforderlich. Die Autoren weisen diesbezüglich auf die Notwendigkeit hin, den Fachkräfte- und Weiterbildungsbedarf zukünftig noch stärker in den Fokus zu rücken. Daneben verdeutlicht die Studie, dass eine klimaneutrale Zukunft in Bezug auf alle Sektoren nur bei einer emissionsfreien Stromerzeugung durch einen massiven Ausbau der erneuerbaren Energien möglich ist.

Die Ergebnisse der Forschungsarbeit sind insbesondere für die Anpassung des bestehenden Rechts- und Förderrahmens im Gebäudebereich relevant. Zusätzlich können sie als Grundlage dienen, um notwendige neue Anreizinstrumente für eine weitere Minderung der THG-Emissionen im Gebäudebereich zu entwickeln. Deshalb richtet sich diese Studie insbesondere an Personen, welche sich mit der Weiterentwicklung von ordnungsrechtlichen und förderrechtlichen Maßnahmen des klimaneutralen Bauens auseinandersetzen, aber auch an alle interessierten Leserinnen und Leser mit gebäudetechnischem Hintergrund.

Ich wünsche eine erkenntnisreiche Lektüre.

Dr. Robert Kaltenbrunner
Stellvertretender Leiter des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR)

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	V
Tabellenverzeichnis	X
Kurzfassung	1
Executive summary	3
Zusammenfassung	5
1 Hintergrund und Zielsetzung	12
1.1 Klimaneutralität als politisches Ziel in Deutschland und der EU.....	12
1.2 Zielsetzung und Vorgehen.....	12
1.3 Abgrenzung Gebäudebereich	13
2 Beschreibung des methodischen Vorgehens	16
2.1 Analyse bestehender Studien für den Gebäudebereich	16
2.2 Szenarienentwicklung	16
2.3 Modellierung eines Trendszenario	18
2.4 Modellierung eines Zielszenarios	18
3 Bestehende Ziel- und Referenzszenarien für den Gebäudesektor	21
3.1 Vergleich aktueller Referenzszenarien und ESG-Referenz	21
3.2 Auswertung von Zielszenarien für den Gebäudebereich	25
3.3 Zusammenfassung	42
4 Rahmendaten für die Szenarienentwicklung	43
4.1 Allgemeine Rahmendaten	43
4.2 Rahmendaten für das Trendszenario	52
4.3 Rahmendaten für das Zielszenario.....	59
5 Ergebnisse Trendszenario	63
5.1 Endenergiebedarf und THG-Emissionen im Gebäudesektor	63
5.2 Sanierungsmaßnahmen und Neubauten	66
5.3 Marktanteile der primären Wärmeversorgungssysteme im Gebäudesektor	71
5.4 Investitionen in Wärmeversorgung	77

5.5	Sensitivität - Berücksichtigung technologischer Lerneffekte bei Wärmeversorgungssystemen	77
5.6	Zusammenfassung und Fazit	81
6	Ergebnisse Zielszenario	85
6.1	Energiebedarf und THG-Emissionen im Gebäudesektor	85
6.2	Sanierungsmaßnahmen und Neubauten	87
6.3	Zusammensetzung der Wärmeversorgungstechnologien im Gebäudesektor	94
6.4	Entwicklung der Wärmebereitstellung in Wärmenetze	101
6.5	Energiebedingte THG-Emissionen aller Sektoren im Vergleich.....	102
6.6	Entwicklung des Energiesystems	106
6.7	Zusammenfassung und Fazit	110
7	Vergleich Trend- und Zielszenario	112
7.1	Einordnung der Ergebnisse unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Untersuchungsansätze.....	112
7.2	Vergleich der Ergebnisse	113
7.3	Anforderungen und Hemmnisse zur Realisierung des Zielpfades.....	114
	Literaturverzeichnis	118
	Anhang	123

Abkürzungsverzeichnis

BAK	Baualtersklassen
BBSR	Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung
BDI	Bundesverband der Deutschen Industrie e.V.
BEG	Bundesförderung energieeffiziente Gebäude
BEHG	Brennstoffemissionshandelsgesetz
BGF	Bruttogeschossfläche
BHKW	Blockheizkraft
BMI	Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
BTL	Biomass to liquids
CO ₂	Kohlendioxid
CO ₂ e	Kohlendioxid – Äquivalent
Dena	Deutsche Energie-Agentur
DWD	Deutscher Wetterdienst
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
EFZH	Ein- und Zweifamilienhaus
EnEV	Energieeinsparverordnung
ESG	Energieeffizienzstrategie Gebäude
FuE	Forschung und Entwicklung
GEG	Gebäudeenergiegesetz
GHD	Gewerbe, Handel und Dienstleistungen
GJ	Giga Joule (10 ⁹ Joule)
KFW	Kreditanstalt für Wiederaufbau
KWKG	Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz
kWh	Kilowattstunde
KWK	Kraftwärmekopplung
KSP	Klimaschutzplan
LNG	Liquidified Natural Gas (verflüssigtes Erdgas)
LULUCF	Land use and forestry regulation

MAP	Marktanreizprogramm
MENA	Region Mittlerer Osten und Nordafrika
MFH	Mehrfamilienhaus
MW	Megawatt
MWh	Megawattstunde
NAPE	Nationaler Aktionsplan Energieeffizienz
NECP	Nationaler Energie- und Klimaschutzplan
NWG	Nichtwohngebäude
PE	Primärenergiebedarf
PJ	Petajoule (10^{15} Joule)
PtG	Power-to-Gas
PtL	Power-to-Liquid
PPM	Parts per million
SNG	Substitute Natural Gas
THG	Treibhausgase
TWh	Terawattstunde (10^{12} Wattstunden)
UBA	Umweltbundesamt
WG	Wohngebäude
ZHK	Zentralheizkessel

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Zusammenfassung und Vergleich Ziel- und Trendszenario.....	9
Abbildung 2:	Abgrenzung des Gebäudebereichs im Klimaschutzplan 2050 und der Energieeffizienzstrategie Gebäude.....	15
Abbildung 3:	Modellvergleich Variante "Vergleich kostenminimiertes Zielsystem mit explorativer Simulation"	17
Abbildung 4:	Modellkopplung Variante „Disaggregation der REMod Zielsystemzusammensetzung mit Invert/EE-Lab und Zielanpassung“	18
Abbildung 5:	Endenergiebedarf für Raumwärme und Warmwasser für Wohngebäude und Nichtwohngebäude in Referenzszenarien.....	22
Abbildung 6:	Vergleich des Energieträgereinsatzes im Jahr 2030 in den Referenzszenarien	23
Abbildung 7:	Endenergiebedarf im Gebäudesektor in ESG-Referenz und NECP-KSPr Szenario im Jahr 2050	24
Abbildung 8:	Vergleich des Endenergiebedarfs der 95%-Szenarien nach Energieträger ..	26
Abbildung 9:	Endenergiebedarf im Szenario „Fokus PtG“ und Zusammensetzung nach Energieträger.....	28
Abbildung 10:	Anteil der Wärmeversorgungssysteme an der beheizten Gebäudefläche im Szenario „Fokus PtG“	29
Abbildung 11:	Endenergiebedarf im Szenario „Fokus Strom“ und Zusammensetzung nach Energieträger.....	30
Abbildung 12:	Anteil der Energieträger an der beheizten Gebäudefläche im Szenario „Fokus Strom“	31
Abbildung 13:	Wärmeversorgungssysteme im Referenzszenario SysWärme	33
Abbildung 14:	Endenergiebedarf des Referenzzielpfad und der Sensitivitäten in SysWärme	34
Abbildung 15:	Energiebedingte CO ₂ -Emissionen des Referenzzielpfades und der Sensitivitäten in SysWärme	35
Abbildung 16:	Endenergiebedarf und THG-Emissionen im 95%-Klimapfad und Zusammensetzung nach Energieträger	36
Abbildung 17:	Anteile der Wärmeversorgungssysteme am Endenergiebedarf im 95%-Klimapfad	37
Abbildung 18:	Endenergiebedarf und THG-Emissionen in 95%-Szenarien und Zusammensetzung nach Energieträger	38
Abbildung 19:	Verwendete Wärmeversorgungssysteme in Mio. Stück in 95%-Szenarien..	39
Abbildung 20:	Klimaneutrales Deutschland (Agora) – Endenergiebedarf und THG-Emissionsminderungen	40

Abbildung 21:	Klimaneutrales Deutschland (Agora) – Anteil der beheizten Wohnfläche ...	41
Abbildung 22:	Aktuelle Bevölkerungsprojektionen im Vergleich	44
Abbildung 23:	Angenommene Entwicklung der Wohnfläche im Zeitraum 2018 bis 2050...	45
Abbildung 24:	Mittelwerte der Außentemperatur und Heizgradtage nach Monaten im Jahr 2018	46
Abbildung 25:	Jährliche Entwicklung der Heizgradtage im Zeitraum 2018 bis 2050.....	47
Abbildung 26:	Endverbraucherpreise Haushalte Biomasse und Biogas (inkl. MwSt.).....	47
Abbildung 27:	Endverbraucherpreise Haushalte Strom (inkl. MwSt.).....	48
Abbildung 28:	Endverbraucherpreise Haushalte fossile Brennstoffe und Fernwärme	48
Abbildung 29:	Preisprojektionen der Großhandels-Importpreise für synthetisches Methan, synthetische Kraftstoffe und synthetischen Wasserstoff	49
Abbildung 30:	Kostenpotenziale für Biomasse im Trendszenario	50
Abbildung 31:	Installierte Wärmeversorgungstechnologien im Gebäudebestand in Deutschland differenziert nach Baualtersklasse der Gebäude.....	51
Abbildung 32:	Annahme zur Entwicklung der CO ₂ -Preise für Verkehr und Wärme im BEHG	54
Abbildung 33:	Spezifische Investitionen für Wärmeversorgungssysteme bis 30 kW	55
Abbildung 34:	Spezifische Investitionen für Wärmeversorgungssysteme ab 50 kW.....	56
Abbildung 35:	Spezifische Investitionen für Effizienzmaßnahmen differenziert nach Effizienzstandards und Referenzgebäuden im Modell Invert/EE-Lab.....	57
Abbildung 36:	Kostendegressionen für EE-Wärmeversorgungstechnologien.....	59
Abbildung 37:	Entwicklung des Endenergiebedarfs für Raumwärme und Warmwasser in Wohngebäuden und Nichtwohngebäuden (GHD) im Trendszenario.....	63
Abbildung 38:	Treibhausgasemissionen des Trendszenarios nach Energieträgern	64
Abbildung 39:	Monatliche Durchschnittstemperaturen im Zeitraum 2018 bis 2050.....	65
Abbildung 40:	Einfluss des Klimateffektes, der Gebäudesanierung und des Heizungsaustauschs auf den Endenergiebedarf im Trendszenario.....	66
Abbildung 41:	Durchschnittliche Sanierungsrate im Trendszenario nach Dekaden	67
Abbildung 42:	Anzahl der jährlichen Gebäudesanierungen nach Baualtersklassen über den Zeitraum 2020 bis 2050 im Trendszenario	68
Abbildung 43:	Anzahl der nicht im Simulationszeitraum sanierten Gebäude nach Baualtersklassen über den Zeitraum 2020 bis 2050 im Trendszenario	69
Abbildung 44:	Entwicklung der sanierten Gebäudeflächen im Trendszenario über den Zeitraum 2018 bis 2050.....	70
Abbildung 45:	Kumulierte Anzahl durchgeführter Sanierungsmaßnahmen und errichteter Neubauten im Trendszenario.....	71

Abbildung 46:	Neuinstallationen von Wärmeversorgungsstechnologien im Trendszenario im Zeitraum 2020 bis 2050	72
Abbildung 47:	Kumulierte Neuinstallationen von Wärmeversorgungsstechnologien im Trendszenario bis 2050	73
Abbildung 48:	Neuinstallationen von Wärmeversorgungssystemen nach Gebäudetyp im Trendszenario	74
Abbildung 49:	Anzahl der vorrangig installierten Wärmeversorgungssysteme nach Baualtersklassen über den Zeitraum 2020 bis 2050 im Trendszenario	75
Abbildung 50:	Anteil der Wärmeversorgungssysteme am gesamten Investitionsvolumen im Zeitraum 2020 bis 2050 im Trendszenario	77
Abbildung 51:	Entwicklung des Endenergiebedarfs für Raumwärme und Warmwasser in Wohngebäuden und Nichtwohngebäuden (GHD) in der Sensitivität des Trendszenarios	78
Abbildung 52:	Treibhausgasemissionen nach Energieträgern bei der Sensitivität des Trendszenarios	79
Abbildung 53:	Neuinstallationen von Wärmeversorgungssystemen im Zeitraum 2020 bis 2050 in der Sensitivität des Trendszenarios	80
Abbildung 54:	Entwicklung der Marktanteile für Wärmepumpen im Trendszenario und der Sensitivität des Trendszenarios unter Berücksichtigung der Kostendegressionen	84
Abbildung 55:	Endenergiebedarf des Zielszenarios für Raumwärme und Warmwasser in Wohngebäuden (Private Haushalte) und Nichtwohngebäuden (GHD).....	85
Abbildung 56:	Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Gebäudesektor im Zielszenario	87
Abbildung 57:	Durchschnittliche Sanierungsrate nach Dekaden im Zielszenario	88
Abbildung 58:	Sanierungstiefe des Zielszenarios für den gesamten Transformationspfad anteilig für alle Gebäude	89
Abbildung 59:	Anzahl Gebäude mit reduzierter Vorlauftemperatur von 65°C auf 35°C durch den Einsatz eines anderen Wärmeübertragers (Beispielsweise Umstellung von Radiatorheizung auf Fußbodenheizung)	90
Abbildung 60:	Entwicklung der sanierten Gebäudeflächen im Zielszenario über den Zeitraum 2018 bis 2050.....	91
Abbildung 61:	Kumulierte Anzahl durchgeführter Sanierungsmaßnahmen und errichteter Neubauten im Zielszenario	92
Abbildung 62:	Anzahl der jährlichen Gebäudesanierungen nach Baualtersklassen über den Zeitraum 2020 bis 2050 im Zielszenario.....	93
Abbildung 63:	Anzahl der nicht im Simulationszeitraum sanierten Gebäude nach Baualtersklassen über den Zeitraum 2020 bis 2050 im Zielszenario.....	94

Abbildung 64:	Entwicklung der Wärmeversorgungssysteme für die Bereitstellung von Raumwärme und Warmwasser	95
Abbildung 65:	Entwicklung der kumulierten Neuinstallationen (Brutto) der Wärmeversorgungstechnologien im Zielszenario	96
Abbildung 66:	Neuinstallationen von Wärmeversorgungstechnologien im Zielszenario im Zeitraum 2020 bis 2050	97
Abbildung 67:	Neuinstallationen von Wärmeversorgungssystemen nach Gebäudetyp im Zeitraum 2020 bis 2050 im Zielszenario	98
Abbildung 68:	Anzahl der vorrangig installierten Wärmeversorgungssysteme nach Baualter über den Zeitraum 2020 bis 2050 im Zielszenario	99
Abbildung 69:	Anzahl Neuinstallationen von Wärmeversorgungssystemen nach Gebäudekategorien im Zielszenario	100
Abbildung 70:	Entwicklung des Energieträgereinsatzes in Wärmenetzen.....	102
Abbildung 71:	Entwicklung der Treibhausgasemissionen des Verkehrssektors im Zielszenario	104
Abbildung 72:	Entwicklung der Treibhausgasemissionen der Industrie im Zielszenario...	105
Abbildung 73:	Entwicklung der Treibhausgasemissionen der Energiewirtschaft im Zielszenario	106
Abbildung 74:	Entwicklung der installierten Leistung von Windenergie- und Photovoltaikanlagen von 2020 bis zum Jahr 2050 in GW	107
Abbildung 75:	Stromerzeugung im Zielszenario aufgeteilt nach Energieträgern in TWh _{el}	108
Abbildung 76:	Stromverwendung der Jahre 2030, 2040 und 2050 für die einzelnen Sektoren sowie die Umwandlung in TWh _{el}	109
Abbildung 77:	Entwicklung des Endenergiebedarfs im Gebäudebereich im Referenzszenario der Energieeffizienzstrategie Gebäude.....	123
Abbildung 78:	Zusätzliche und geänderte energie- und politische Maßnahmen im Vergleich zum ESG Referenzszenario	124
Abbildung 79:	Endenergiebedarf für Raumwärme und Warmwasser für Wohngebäude und Nichtwohngebäude in Referenzszenarien.....	127
Abbildung 80:	Vergleich des Energieträgereinsatzes im Jahr 2030 in den Referenzszenarien	127
Abbildung 81:	Endenergiebedarf im Gebäudesektor in ESG-Referenz und NECP-KSP-Referenzszenario im Jahr 2050	128
Abbildung 82:	Technologien zur Umwandlung von Biomasse in Wasserstoff, Biodiesel oder CH ₄ von 2020 bis 2050 in GW _{el}	129
Abbildung 83:	Entwicklung des LKW-Verkehrs im Zielszenario von 2020 bis 2050 in Mio. Fahrzeuge	129

Abbildung 84:	Entwicklung des PKW-Verkehrs im Zielszenario von 2020 bis 2050 in Mio. Fahrzeuge	130
Abbildung 85:	Entwicklung der Technologien zur industriellen Prozesswärmebereitstellung von 2020 bis 2050	130
Abbildung 86:	Struktur des Simulationsmodells Invert/EE-Lab	132
Abbildung 87:	Struktur der hinterlegten Gebäudetypologie in Invert/ EE-Lab	133
Abbildung 88:	Modellierung der Gebäudeeigentümer:innen als Investor-Agenten	134
Abbildung 89:	Schematische Darstellung der Modellierung von Politikinstrumenten in Invert-Agents	134
Abbildung 90:	Schematische Darstellung des in REMod-D abgebildeten Energiesystems ohne die Darstellung der Subsysteme für Wärmeversorgung von Gebäuden und Verkehr	137
Abbildung 91:	Schematische Darstellung der Funktionsweise von REMod-D	139
Abbildung 92:	Schematischer Aufbau der Heizungssysteme am Beispiel einer erdreichgekoppelten, elektrischen Wärmepumpe	140
Abbildung 93:	Betriebsführungsreihenfolge bei positiver (links) und negativer (rechts) Residuallast	141

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Parametrierung des Referenzzielpfades und drei Risikosensitivitäten	32
Tabelle 2:	Übersicht der Rahmenbedingungen	43
Tabelle 3:	Spezifische Fördersätze Wärmeversorgungssysteme entsprechend der geltenden Förderrichtlinie	52
Tabelle 4:	Spezifische Fördersätze für energetische Sanierungsmaßnahmen.....	53
Tabelle 5:	Effizienzen der Wärmeversorgungstechnologien in Invert/ee-lab.....	57
Tabelle 6:	Annahmen zu CO ₂ -Zielwerten des Zielszenarios für energiebedingte CO ₂ -Emissionen	60
Tabelle 7:	Nicht-energiebedingte THG-Emissionen nach Quellen.....	61
Tabelle 8:	Annahmen der energetischen Sanierungspakete in REMod.....	62
Tabelle 9:	Ergebnisse des Trendszenarios im Vergleich zu anderen Referenzszenarien	82
Tabelle 10:	Durchschnittliche jährliche Anzahl ausgewählter Wärmeversorgungssysteme für den Transformationspfad des Gebäudesektors.....	95
Tabelle 11:	Prozentuale und absolute Reduktion der CO ₂ -Emissionen der Sektoren in den Jahren 2020, 2030, 2040 und 2050 im Vergleich zu 1990.....	103
Tabelle 12:	Durchschnittlicher jährlicher Zubau von Photovoltaik, Wind Onshore und Wind Offshore nach Dekaden in GW _{el}	108
Tabelle 13:	Unterschiede im Untersuchungsansatz und der berücksichtigten Treiber in den Szenarien	113
Tabelle 14:	In REMod hinterlegte Heizungstechnologien - Wärmenetze.....	143
Tabelle 15:	In REMod hinterlegte Stromerzeuger	144
Tabelle 16:	Energiewandler- und Speicher	147
Tabelle 17:	Biomassewandler.....	151
Tabelle 18:	Industrie (Prozesswärmeerzeugung) Niedertemperatur (NT)	154
Tabelle 19:	Industrie (Prozesswärmeerzeugung) Hochtemperatur (HT).....	157

Kurzfassung

Ausgangslage und Ziel

Die Vision für eine klimaneutrale Zukunft bis 2050 umfasst nahezu alle Sektoren und steht mit den Zielen des Übereinkommens von Paris im Einklang. Die Klimaneutralität ist dabei mit einem Rückgang der Treibhausgasemissionen (THG-Emissionen) von 95 % gegenüber 1990 über alle Sektoren verbunden. Für den Gebäudebereich existiert bisher keine offizielle Definition für Klimaneutralität. Die bisherige Zieldefinition eines „nahezu klimaneutralen Gebäudebestandes“ ist durch die Energieeffizienzstrategie Gebäude (ESG) im Jahr 2015 mit der Zielsetzung einer 80 % Reduktion des nicht-erneuerbaren Primärenergiebedarfs für den Zeitraum 2008 bis 2050 definiert und in Szenarien untersucht worden. Das Sektorziel des Klimaschutzplans 2050 für das Jahr 2030, welches aus der Zieldefinition der ESG abgeleitet ist, sieht eine Reduktion der Treibhausgasemissionen bis 2030 (gegenüber 1990) von 67 % vor. Aufgrund der EU-Zielsetzung der Klimaneutralität ist nun auch eine neue Zieldefinition für den klimaneutralen Gebäudebestand erforderlich, der mit dem Rückgang von 95 % der gesamten Treibhausgasemissionen gegenüber 1990 kompatibel ist.

Vor diesem Hintergrund wird im Rahmen dieses Vorhabens untersucht, welche Ziellücke bis zum Jahr 2050 mit Bezug auf die Klimaneutralität besteht und mit welchem kostenoptimalen Zielpfad aus Gesamtsystemsicht eine vollständige Reduktion der THG-Emissionen im Gebäudebereich erreicht werden kann.

Vorgehen

Dazu werden im Rahmen dieser Untersuchung ein Trend- und ein Zielszenario mit spezifischen Energiesystemmodellen modelliert. Mit den eingesetzten Energiesystemmodellen wird nicht nur der Gebäudebereich und die damit verbundenen Investitionsentscheidungsprozesse detailliert abgebildet, sondern auch die erforderlichen Entwicklungen in den anderen Energieverbrauchs- und Energieangebotssektoren zur Erreichung einer vollständigen Dekarbonisierung untersucht. Das Trendszenario bildet die explorative Entwicklung des Gebäudebestandes auf Basis der gegebenen politischen Rahmenbedingungen und der dadurch beeinflussten Investitionsentscheidungen ab. Hierfür wird das hoch aufgelöste Gebäude- und Investitionsentscheidungsmodell Invert/ee-Lab verwendet. Das Zielszenario wird mit dem Energiesystemmodell REMod bestimmt, welches das gesamte Energiesystem abbildet. Das Modell ermittelt unter Vorgabe von jahresscharfen CO₂-Minderungszielen eine kostenoptimale Systemzusammenstellung unter Betrachtung der Sektoren Gebäude, Industrie, Verkehr sowie Energiewirtschaft und bestimmt dadurch ein Zielsystem unter der Einhaltung der stündlichen Versorgungssicherheit.

Im Rahmen des Projektes dient der Modellverbund zwei unterschiedlichen Zielen: Der Ansatz ermöglicht einen Vergleich zwischen der explorativen Simulation von Akteursentscheidungen (Mikro-Perspektive) der Gebäudeeigentümer:innen und der daraus resultierenden Technologiediffusion von Wärmeversorgungssystemen und Gebäudesanierung mit dem kostenoptimalen Zielsystem aus Makro-Perspektive. Diese Herangehensweise ermöglicht es, mögliche Handlungslücken zur Erreichung der CO₂-Minderungsziele unter gesetztem politischem Rahmen zu identifizieren und zu analysieren.

Ergebnisse

Die Ergebnisse des Trendszenarios zeigen, dass für die Erreichung des Sektorziels laut Klimaschutzgesetz (KSG) im Jahr 2030 eine Ziellücke von rund 18 Mio. Tonnen CO₂e besteht - die THG-Emissionen des Gebäudesektors betragen im Jahr 2030 rund 88 Mio. Tonnen CO₂e. Die derzeitigen Maßnahmen reichen demnach bei Weitem nicht aus, um die Ziele 2030 zu erreichen. Bis 2030 ist im Trendszenario weiterhin die fossile Wärmeversorgung die zentrale Technologie. Bis zum Jahr 2050 können jedoch schon mit den bestehenden Maßnahmen sehr hohe Einsparungen realisiert werden. Im Jahr 2050 betragen die THG-Emissionen nur noch 19 Mio. Tonnen CO₂e, was bereits einem Rückgang von rund 91 % gegenüber 1990 entspricht. Ursache für diese zunehmende Dynamik ist insbesondere die Steigerung der Energiepreise aufgrund der steigenden CO₂-Preise. Mit Bezug auf die Installation erneuerbarer Energien spielen Wärmepumpen eine entscheidende Rolle. Während heute der Heizungsmarkt durch Gas- und Heizöl betriebene Wärmeversorgungssysteme mit über 90 % Marktanteil dominiert wird, sinkt der Marktanteil dieser Technologien auch im Trendszenario bis 2050. Im Gegenzug werden bis 2050 insgesamt rund 7 Mio. zusätzliche Wärmepumpen installiert und 6 Mio. Anschlüsse an Wärmenetze vorgenommen. Die Sanierungsaktivität wird im Trendszenario durch die natürlichen Austausch- und Instandsetzungszyklen, die bestehenden Förderinstrumente sowie die Energie- und CO₂-Preisentwicklung bestimmt. Bis 2030 steigt die Sanierungsrate auf 1,5 %, nach 2030 steigt die Sanierungsaktivität und es wird eine Sanierungsrate von 2,5 % erreicht. Es werden zum größten Teil Standardsanierungen entsprechend den Anforderungen des Gebäudeenergiegesetzes (GEG) durchgeführt. Der Anteil der KfW₅₅ Sanierungen steigt im Zeitraum nach 2030 aufgrund der höheren Energie- und CO₂-Preise deutlich an.

Das Zielszenario zeichnet einen kostenoptimalen Pfad zur Erreichung einer vollständigen Dekarbonisierung des Gebäudebestandes bis 2050. Im Jahr 2030 betragen die THG-Emissionen nur noch 52 Mio. Tonnen CO₂e, womit eine Übererfüllung des Sektorziels laut KSG um 18 Mio. Tonnen CO₂e erreicht wird. Aufgrund der gesamtsystemischen Betrachtung wird ein nahezu klimaneutraler Gebäudebestand im Zielszenario bereits im Jahr 2045 erreicht. Die Zielerreichung erfolgt insbesondere durch eine konsequente Umstellung auf erneuerbare Wärmeversorgung und Wärmenetze beim Heizungstausch. Bis zum Jahr 2050 steigt die Zahl der installierten Wärmepumpen auf 19 Millionen. Die Wärmebereitstellung über synthetische Gase oder Biogas erfolgt nur zu marginalen Anteilen, da diese Energieträger vorrangig in anderen Sektoren Verwendung findet und vor dem Hintergrund einer kostenoptimalen Optimierung nicht zu relevanten Anteilen im Gebäudebereich gezogen wird. Mit Bezug auf die Sanierungsmaßnahmen sind am Anfang höhere Sanierungsraten erforderlich, um das Sektorziel zu erreichen - bis 2030 steigt die Sanierungsrate auf durchschnittlich 1,6 %. Aufgrund der erzielten Fortschritte bei der Dekarbonisierung der Wärmeversorgung ist allerdings eine weitere Steigerung der Sanierungsaktivität nach 2030 nicht mehr erforderlich. Eine ambitionierte Sanierungstiefe wird auch im Zielszenario nicht erreicht, da ambitionierte Sanierungsmaßnahmen ohne Förderung und ohne Steuern und Abgaben auf die Energiepreise dabei im Vergleich zu alternativen Maßnahmen „teurer“ sind. Die notwendige THG-Einsparung ist bei der ohnehin erforderlichen Umstellung der Wärmeversorgung günstiger. Erneuerbare Energietechnologien sind das Rückgrat zur Erreichung eines klimaneutralen Energiesystems. Durch die zunehmende Sektorenkopplung ist eine isolierte Betrachtung der Sektoren daher nur bedingt sinnvoll und der frühe Ausbau dieser Technologien essenziell.

Executive summary

Current situation and objectives

The vision for a climate-neutral future by 2050 covers almost all sectors and is in line with the goals of the Paris Agreement. Climate neutrality is associated with a reduction in greenhouse gas emissions (GHG emissions) of 95 % compared to 1990 across all sectors. So far, there is no official definition of climate neutrality for the building sector. The existing target definition of a "nearly climate-neutral building stock" was defined by the Energy Efficiency Strategy for Buildings (ESG) in 2015 with the objective of an 80% reduction in non-renewable primary energy demand for the period 2008 to 2050 and was examined in scenarios. The sector target of the Climate Protection Plan 2050 for the year 2030, which is derived from the target definition of the ESG, envisages a reduction of greenhouse gas emissions of 67% by 2030 (compared to 1990). Due to the EU target of climate neutrality, a new target definition for the climate-neutral building stock is now also required, which is compatible with the reduction of 95% of total greenhouse gas emissions compared to 1990 and with the sector target for 2030 as it defined in the German Climate Change Act.

Against this background, this project investigates which target gap exists by the year 2050 with regard to climate neutrality and with which cost-optimal trajectory a complete reduction of GHG emissions in the building sector can be achieved from an overall system perspective.

Methodology

For this purpose, a trend scenario and a target scenario are modelled with specific energy system models within the scope of this study. With the energy system models used, not only the building sector and the associated investment decision processes are mapped in detail, but also the necessary developments in the other energy consumption and energy supply sectors to achieve complete decarbonisation are examined. The trend scenario maps the exploratory development of the building stock on the basis of the given political framework conditions and the investment decisions influenced by them. For this purpose, the bottom-up building and investment decision model Invert/ee-Lab is used. The target scenario is calculated with the energy system model REMod, which represents the entire energy system. The model determines a cost-optimal system composition under the specification of annual CO₂ reduction targets, taking into account the sectors of buildings, industry, transport and the energy industry, and thereby determines a target system in compliance with hourly supply security.

In the context of the project, coupling these two energy models serves the following objectives: the approach enables a comparison between the explorative simulation of actors' decisions (micro-perspective) of building owners and the resulting technology diffusion of heat supply systems and building renovation with the cost-optimal target system from a macro-perspective. This approach allows to identify and analyse possible action gaps to achieve the CO₂ reduction targets under the set political framework.

Results

The results of the trend scenario show that for achieving the sector target according to the Climate Change Act in 2030 there is a target gap of around 18 million tonnes of CO_{2e} - the GHG emissions

of the building sector amount to around 88 million tonnes of CO_{2e} in 2030. The current measures are therefore far from sufficient to achieve the 2030 targets. Until 2030, fossil heat supply remains the central technology in the trend scenario. By 2050, however, very high savings can already be realised with the existing measures. In 2050, GHG emissions will only amount to 19 million tonnes of CO_{2e}, which already corresponds to a reduction of around 91% compared to 1990. The reason for this increasing momentum is in particular the increase in energy prices due to rising CO₂ prices. With regard to the installation of renewable energies, heat pumps play a decisive role. While today the heating market is dominated by gas- and fuel oil-fired heat supply systems with a market share of more than 90 %, the market share of these technologies also decreases in the trend scenario until 2050. At the same time, a total of about 7 million additional heat pumps will be installed and 6 million connections to heat grids will be made until 2050. The refurbishment activity in the trend scenario is determined by the natural replacement and maintenance cycles, the existing funding instruments and the energy and CO₂ price development. By 2030, the refurbishment rate increases to 1.5 %, after 2030 the refurbishment activity increases and a refurbishment rate of 2.5 % is reached. For the most part, standard renovations are carried out in accordance with the requirements of the German building code. The share of ambitious renovation measures leading to KfW55 standard increases significantly in the period after 2030 due to higher energy and CO₂ prices.

The target scenario outlines a cost-optimal path to achieve complete decarbonisation of the building stock by 2050. In 2030, GHG emissions amount to only 52 million tonnes CO_{2e}, which exceeds the sector target by 18 million tonnes CO_{2e} according to the German Climate Change Act. Due to the overall systemic view, a nearly climate-neutral building stock is already achieved in 2045 in the target scenario. The target will be achieved in particular through a consistent change to renewable heat supply and heat grids when replacing heating systems. By 2050, the number of installed heat pumps will increase to 19 million. Only marginal shares of heat are provided via synthetic gases or biogas, as these energy sources are primarily used in other sectors and, against the background of cost-effective optimisation, are not drawn to relevant shares in the building sector. With regard to the renovation measures, higher refurbishment rates are required at the beginning in order to achieve the sector target - by 2030, the refurbishment rate increases to an average of 1.6 %. However, due to the progress made in decarbonising the heat supply, a further increase in refurbishment activity is no longer necessary after 2030. An ambitious refurbishment rate is also not achieved in the target scenario, as ambitious refurbishment measures without subsidies and without taxes and levies on energy prices are "more expensive" in comparison to alternative measures. The necessary GHG savings are more advantageous since existing fossil fuel fired heating systems need to be replaced with renewable heating systems anyway. Thus, Renewable energy heating technologies are the backbone for achieving a climate-neutral energy system. Due to the increasing sector coupling, an isolated analysis of the sectors therefore only makes limited sense and the early expansion of these technologies is essential.

Zusammenfassung

Diese Studie zeigt, welche Entwicklungen notwendig sind, um einen klimaneutralen Gebäudebestand bis 2050 zu erreichen. Dafür werden ein Trendszenario unter Berücksichtigung des aktuellen Rechts- und Förderrahmens sowie ein zielkompatibles Szenario (Zielszenario) unter der Prämisse einer Gesamtsystemoptimierung aller Sektoren entwickelt. Unter der Annahme eines verschärften Klimaziels werden im Zielszenario die energiebedingten CO₂-Emissionen um 65% bis 2030 und um 100 % bis 2050 gegenüber 1990 reduziert.

Methodik

Das **Trendszenario** verfolgt einen explorativen Ansatz, um zu untersuchen, wie sich der Gebäudereich unter den derzeitigen Rahmenbedingungen entwickelt. Die Betrachtungsweise liegt dabei auf den Entscheidungskalkülen der Gebäudeeigentümer:innen für die Investitionen in Gebäudetechnik und Effizienzmaßnahmen, welche mit den jeweiligen technischen und ökonomischen Gegebenheiten sowie individuellen Einstellungen und Hemmnissen konfrontiert sind. Methodisch wird dazu mit dem Gebäudemodell Invert/ee-Lab ein Simulationsansatz angewendet, der Investitionsentscheidungen unter realen Bedingungen modelliert.

Für das **Zielszenario** wird hingegen ein normativer Ansatz verfolgt, welcher untersucht, wie Zielvorgaben aus Sicht des Gesamtsystems kostenoptimal erreicht werden können. Die Betrachtungsweise liegt dabei nicht auf Ebene der Gebäudeeigentümer:innen, sondern im Sinne eines zentralen Planers auf der gesamtwirtschaftlichen Ebene. Methodisch wird dazu das Energiesystemmodell REMod verwendet, welches nicht nur den Gebäudereich, sondern auch die anderen Energieverbrauchssektoren (Industrie und Verkehr) sowie die Energiewirtschaft (Strom- und Fernwärmebereitstellung) abbildet und eine Optimierung der Transformationskosten des Gesamtsystems verfolgt.

Zentrale Ergebnisse

Aus dem Vergleich von Trend- und Zielszenario lassen sich wichtige Erkenntnisse mit Bezug auf die mittelfristige Entwicklung und Zielerreichung des Sektorziels bis 2030 sowie auf die erforderlichen Maßnahmen für den Pfad zum klimaneutralen Gebäudebestand 2050 ableiten.

Entwicklung der Treibhausgasemissionen

Die derzeitigen Maßnahmen reichen bei Weitem nicht aus, um die Ziele von 2030 zu erreichen. Allerdings können auch im Trendszenario bis 2050 bereits sehr hohe Treibhausgasminderungen erzielt werden, während im Zielszenario die Klimaneutralität bereits nahezu im Jahr 2045 erreicht ist.

- Die Ergebnisse des Trendszenarios zeigen, dass die THG-Emissionen des Gebäudesektors im **Jahr 2030 rund 88 Mio. Tonnen CO₂equivalent (CO₂e)** betragen. Für die Erreichung des Sektorziels laut Klimaschutzgesetz im Jahr 2030 resultiert im Trendszenario damit eine **Zielverfehlung von rund 18 Mio. Tonnen CO₂e** gegenüber dem Sektorziel von 70 Mio. Tonnen CO₂e (laut Klimaschutzgesetz vom 12.12.2019).
- Bis 2050 können jedoch mit den bestehenden Instrumenten und der Annahme einer steigenden CO₂ Preisentwicklung sehr hohe Einsparungen bereits im Trendszenario realisiert werden. **Im Jahr 2050 betragen die THG-Emissionen im Trendszenario nur noch 19 Mio.**

Tonnen CO₂e, was bereits einem Rückgang von rund 91 % gegenüber 1990 entspricht, jedoch das Ziel der Klimaneutralität verfehlt.

- Das Zielszenario betrachtet das gesamte Energiesystem unter der Prämisse der Zielerreichung von -65% bis zum Jahr 2030 gegenüber 1990 sowie der Klimaneutralität im Jahr 2050. Unter diesen Voraussetzungen reduzieren sich in der Modellierung eines kostenoptimalen Pfades für das gesamte Energiesystem die THG-Emissionen des Gebäudesektors auf **52 Mio. Tonnen CO₂e** bis zum Jahr 2030.
- Im Zielszenario wird ein nahezu **klimaneutraler Gebäudebestand** (mit Restemissionen kleiner als 0,1 Mio. Tonnen CO₂e) **bereits 2045** erreicht.

Entwicklung der Sanierungsraten und Sanierungstiefen

*Mit Bezug auf die erforderliche Transformation von einer Trendentwicklung unter Berücksichtigung und Fortschreibung der schon bestehenden Maßnahmen zu einem kostenoptimal ermittelten Zielpfad 2030 und 2050 liegt der signifikanteste Unterschied in der schnelleren **Umstellung der Wärmeversorgung auf erneuerbare Energien**. Wird dies erreicht, ist mit Bezug auf die **Sanierungsaktivität** nur eine etwas höhere Sanierungsrate für die Zielerreichung 2030 erforderlich als die resultierende Sanierungsaktivität im Trendszenario.*

- Im Zielszenario ist dabei das Erreichen des Klimaschutzziels 2030 der Treiber, während im Trendszenario die Sanierungsaktivität durch die natürlichen Austausch- und Instandsetzungszyklen, die bestehenden Förderinstrumente sowie die Energie- und CO₂-Preisentwicklung bestimmt wird. Die Sanierungsrate steigt im Zielszenario auf durchschnittlich 1,6 % für den Zeitraum 2021 bis 2030, während diese im Trendszenario auf 1,5 % steigt.

Nach 2030 steigt die Sanierungsaktivität im Trendszenario deutlich. Im Zielszenario ist aufgrund der im Szenario erzielten Fortschritte bei der Dekarbonisierung der Wärmeversorgung eine weitere Steigerung der Sanierungsaktivität nach 2030 nicht mehr erforderlich, unter der Annahme, dass auch die anderen Sektoren die THG-Emissionen kostenoptimal reduzieren.

- Im Zeitraum nach 2030 zeigt der Vergleich der Sanierungsrate größere Unterschiede zwischen Trend- und Zielszenario. Während im Zielszenario aufgrund der Dekarbonisierung der Wärmeversorgung keine höhere Sanierungsrate mehr erforderlich ist, steigt die Sanierungsrate im Trendszenario aufgrund des steigenden CO₂-Preises weiter an. Die **Sanierungsrate beträgt im Zeitraum 2031 bis 2050 im Zielszenario 1,3 %**, im Trendszenario **steigt diese auf 2,5 % an**.

Bis 2050 werden im Zielszenario 87% des Gebäudebestands energetisch saniert. Das Sanierungsniveau entspricht dabei einer durchschnittlichen Reduktion des Wärmebedarfs um 50%, was mittel- bis langfristig für den Gesamtgebäudebestand in etwa einem Effizienzhausstandard von 55 entspricht. Im Trendszenario hingegen werden vor allem Standardsanierungen (GEG) durchgeführt, der Anteil der KfW 55 Sanierungen bis 2050 beträgt nur rund 5% der Bestandssanierungen.

- Die durchschnittliche Sanierungstiefe ist im Ziel- und Trendszenario vergleichbar. Ein direkter Vergleich der Anteile bei den Sanierungstiefen ist aufgrund der unterschiedlichen

Abbildung in den Modellen jedoch nur bedingt möglich. Als Ambitionsniveau wird im kostenoptimalen Zielsystem das Sanierungspaket mit einer Reduktion des Heizwärmebedarfs um 50 % (~KfW70 bis KfW55 (mittelfristig)) im Modell gezogen. Eine ambitioniertere Sanierungstiefe wird in der Optimierung hingegen nicht erreicht, da Sanierungsmaßnahmen mit höheren Reduktionen in der Gesamtsystembetrachtung ohne Förderung sowie ohne Steuern und Abgaben auf die Energiepreise im Vergleich zu alternativen Maßnahmen „teurer“ sind.

- Im Trendszenario werden zum größten Teil Standardsanierungen entsprechend den Anforderungen des Gebäudeenergiegesetzes durchgeführt. Der Anteil der KfW55 Sanierungen steigt im Zeitraum nach 2030 aufgrund der höheren Energie- und CO₂-Preise deutlich an.

Entwicklung des Endenergieverbrauchs im Gebäudesektor

Im Trendszenario resultiert bis 2050 eine höhere Reduktion des Endenergieverbrauchs als im Zielszenario aufgrund der höheren Sanierungsaktivität.

- Der Endenergieverbrauch im Zielszenario sinkt bis 2030 um 20 % und bis 2050 um 30 % gegenüber 2018. Im Trendszenario beträgt der Rückgang des Endenergieverbrauchs 13 % bis 2030. Aufgrund der höheren Sanierungsaktivität nach 2030 sinkt der Endenergieverbrauch von 2018 bis 2050 um 43 %.
- Dabei kann die Reduktion des Endenergieverbrauchs im Trendszenario anhand der Modellierungsergebnisse folgendermaßen aufgeschlüsselt werden:
 - 186 TWh der Endenergieverbrauchsreduktion sind auf energetische Gebäudesanierungsmaßnahmen zurückzuführen
 - 126 TWh entfallen auf den Austausch der Wärmeversorgungssysteme
 - 53 TWh sind auf steigende durchschnittliche Temperaturen aufgrund des Klimawandels zurückzuführen

Entwicklung der Wärmeversorgung und Marktanteile

Im Trendszenario wird durch Fortschreibung der derzeitigen Förderinstrumente und unter Annahme eines steigenden CO₂-Preises eine Trendwende im Heizungsmarkt erst deutlich nach 2030 erreicht.

- Der Heizungsmarkt wird derzeit noch durch Gas- und Heizöl betriebene Wärmeversorgungssysteme mit über 90 % Marktanteil bei den Neuinstallationen dominiert. Im Trendszenario sinkt deren Marktanteil bis 2050 auf 14 %.
- Im Jahr 2030 haben gasbetriebene Wärmeversorgungssysteme mit 55 % immer noch den höchsten Marktanteil bei den Neuinstallationen.
- Ab dem Jahr 2040 sind Wärmepumpen im Trendszenario die dominierende Technologie mit Marktanteilen von 30 bis 40 %. Bis zum Jahr 2050 werden insgesamt rund 7 Mio. zusätzliche Wärmepumpen installiert und 12,5 Millionen fossile Wärmeversorgungssysteme.
- Mit Bezug auf die Marktanteile der Technologien in den verschiedenen Baualtersklassen der Gebäude werden Gaskessel in allen Gebäuden gleichermaßen installiert. Der größte Anteil der Gaskessel wird aufgrund der Fördermaßnahmen als Hybridsysteme in Kombi-

nation mit Solarthermie installiert. Der Anteil der Hybridheizungen an den neu installierten Gaskesseln steigt von 75 % im Zeitraum 2020 bis 2030 auf 86 % im Zeitraum nach 2030 bis 2050.

- Bei Wärmepumpen entfällt der größte Anteil auf Neubauten, die im Zeitraum bis 2050 errichtet werden. Insgesamt werden in diesen Gebäuden rund 2 Mio. Wärmepumpen installiert. Im Bereich des Heizungstausches werden die meisten Wärmepumpen (rund 1,7 Mio.) in jüngeren Gebäudebeständen mit Baualtersklassen ab dem Jahr 1995 installiert. Allerdings werden Wärmepumpen im Szenario auch im sanierten Gebäudebestand vor 1978 installiert. So entfallen auf Gebäude mit Baualtersklasse 1949 bis 1978 insgesamt 1,4 Mio. neu installierte Wärmepumpen.
- Biomassekessel werden dagegen zu höheren Anteilen in älteren Gebäuden installiert. Der höchste Anteil entfällt auf den Austausch in Gebäuden mit Baualtersklasse 1949 bis 1978 mit rund 1,5 Mio. neu installierten Biomassekesseln bis 2050.

Die Ergebnisse des Zielszenarios zeigen, dass die zentrale Stellschraube zur Schließung der aus dem Trendszenario resultierenden Ziellücke in der Transformation der Wärmeversorgung liegt.

- Das Ergebnis einer kostenoptimalen Wärmeversorgung des Gebäudebestands aus Gesamtsystemperspektive erfolgt **zu 56 % aus Wärmepumpen** (Strom und Umweltwärme) und **zu 25 % über Wärmenetze** im Jahr 2050. Die **Wasserstoffbrennstoffzelle spielt mit 6%** der Wärmeversorgungssysteme eine untergeordnete Rolle, während deren Rolle im Gebäudesektor durch die Abhängigkeit der Infrastruktur noch genauer untersucht werden muss.
- Die Wärmebereitstellung über **synthetische EE-Gase oder Biogas** erfolgt im Zielsystem nur zu marginalen Anteilen, da diese Energieträger vorrangig in den anderen Verbrauchssektoren Verwendung finden.
- **Wärmepumpen** haben im Zielszenario bereits ab 2025 bei allen Gebäudetypen **Marktanteile von über 65 %**.
- Bis zum Jahr 2030 **werden im Bestand rund 6 Mio. Wärmepumpen** erreicht. Bis zum Jahr 2050 steigt die Zahl der installierten **Wärmepumpen auf 19 Millionen**. Notwendige Voraussetzung hierfür sind Maßnahmen zur Reduktion der Heizkreistemperaturen in Bestandsgebäuden, sowie ein gezielter Austausch von Radiatoren sowie (Teil-) Sanierungen.

Relevanz der Technologie- und Marktentwicklung für die Ergebnisse

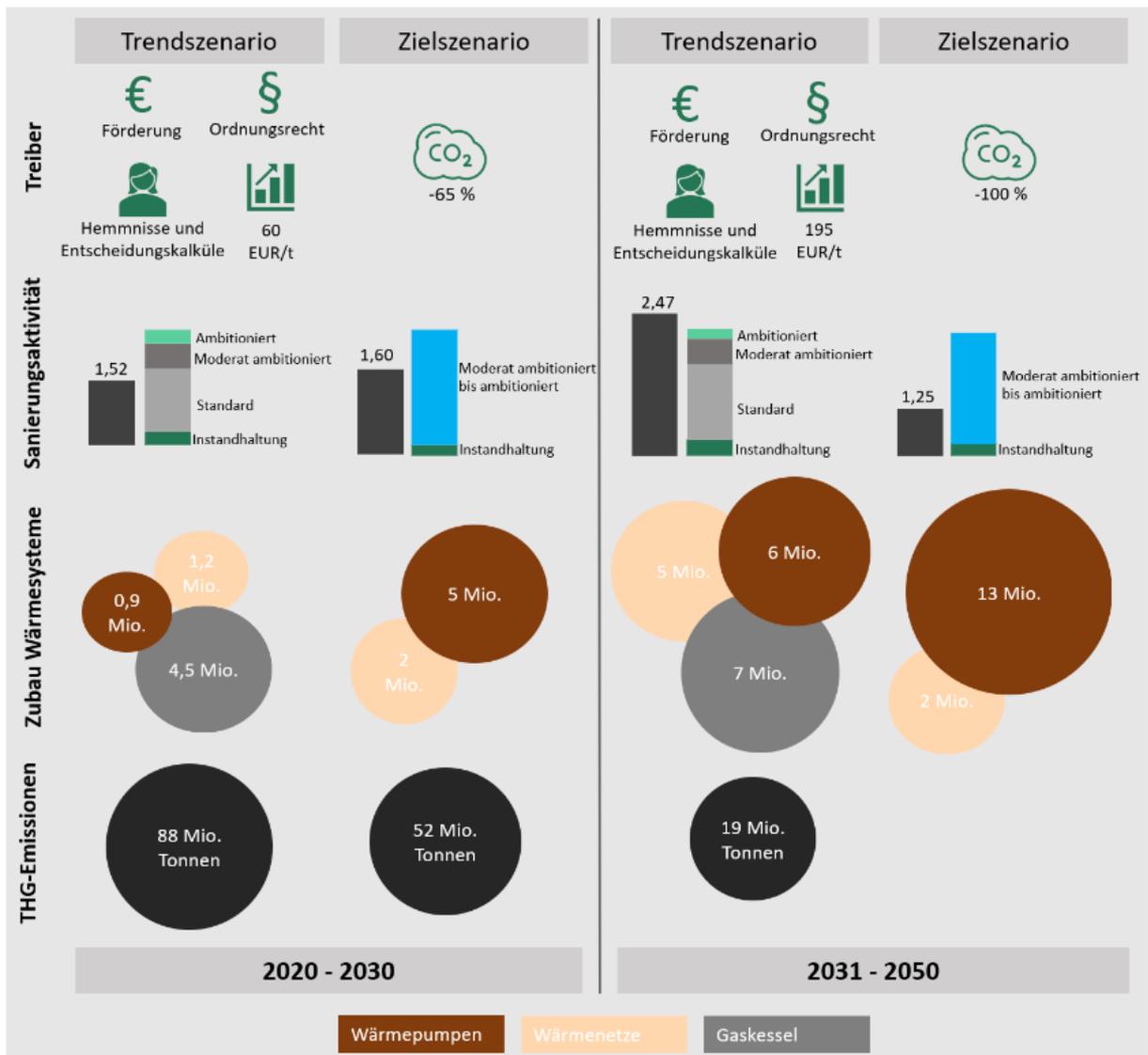
Eine Reduktion der Investitionskosten durch technologischen Fortschritt und Marktentwicklung auf Ebene der Handwerker:innen hat einen signifikanten Einfluss auf die resultierenden THG-Emissionen im Gebäudebereich.

- Im Zielszenario wird angenommen, dass technische Entwicklungen bei erneuerbaren Wärmeversorgungssystemen realisiert werden können und am Markt durch geringere Investitions- und Installationskosten weitergegeben werden.
- Im Trendszenario wird hingegen unterstellt, dass die spezifischen Investitionen für Wärmeversorgungssysteme über den Simulationszeitraum konstant bleiben. Um den Einfluss von technologischem Wandel und Marktentwicklung auf Ebene der Handwerker:innen zu

untersuchen, wird eine Sensitivität mit Bezug auf einen Rückgang der spezifischen Investitionen modelliert. Hierbei resultiert ein deutlich schnellerer Umstieg auf erneuerbare Energien Wärmeversorgungssysteme bereits vor dem Jahr 2030. Diese erreichen in der Sensitivitätsrechnung **bereits im Jahr 2025 einen Marktanteil bei den Neuinstallationen von über 70 %**. Dadurch werden bis zum Jahr 2030 zusätzlich 8 Mio. t CO₂e im Trendszenario eingespart.

Abbildung 1 fasst noch einmal wichtige Ergebnisse des Trend- und Zielszenarios zusammen und verdeutlicht die unterschiedliche Fragestellung anhand der zentralen Treiber für die Entwicklung des Gebäudebestandes.

Abbildung 1: Zusammenfassung und Vergleich Ziel- und Trendszenario



Einordnung der Ergebnisse

Relevanz der Sanierungsrate und Sanierungstiefe aus gesamt- und einzelwirtschaftlicher Perspektive

Die Ergebnisse zur Sanierungsrate zeigen, dass in beiden Szenarien eine höhere Dynamik bei der Sanierungsrate resultiert als derzeit beobachtet. Der Vergleich aus Trend- und Zielszenario zeigt dabei, dass mit den bereits bestehenden Instrumenten und einem steigenden CO₂-Preis hohe Sanierungsraten erreicht werden können. Bei der Entwicklung eines kostenoptimalen Transformationspfades aus gesamtwirtschaftlicher Perspektive im Zielszenario resultiert jedoch eine insgesamt geringere Steigerung der Sanierungsrate. Die durchschnittliche Sanierungstiefe liegt zwar über dem derzeitigen Sanierungsniveau, allerdings kommen sehr ambitionierte Sanierungstiefen in dem Szenario nicht zum Tragen. Das ist dadurch bedingt, dass eine vollständige Dekarbonisierung der Wärmeversorgung erreicht werden muss und auch bei einer hohen Sanierungstiefe am Ende der Restwärmebedarf gedeckt werden muss. Damit resultiert die Transformation der Wärmeversorgung als zentrale Maßnahme in der Optimierung. Einfach ausgedrückt, fehlt dann für die Gebäude, die auf klimaneutrale Wärmeversorgung umgestellt werden, die Notwendigkeit noch ambitioniertere Sanierungsmaßnahmen durchzuführen. Da alle Gebäude klimaneutral werden müssen, ändert sich damit auch die Bewertung der Maßnahmen gegenüber einem Szenario, welches nur eine 80%ige Reduktion der THG-Emissionen erreichen muss. Eine sehr ambitionierte Sanierungstiefe ist aus Optimiermodellperspektive nur dann erforderlich, wenn es gesamtwirtschaftliche Vorteile mit sich bringt. Da jedoch in der gesamtwirtschaftlichen Betrachtung Großhandelsenergiepreise ohne Steuern, Umlagen und Abgaben in der Bewertung angesetzt werden und bestehende Förderungen ebenfalls nicht berücksichtigt werden, rechnen sich sehr ambitionierte Sanierungsmaßnahmen nicht. Aus einzelwirtschaftlicher Perspektive stellt sich die Bewertung von Sanierungsmaßnahmen jedoch anders da, was die Ergebnisse des Trendszenarios zeigen, insbesondere mit steigenden Energie- und CO₂-Preisen.

In der Realität erfolgt die Entscheidung zu Sanierungsmaßnahmen und der Umstellung der Wärmeversorgung allerdings nicht durch einen zentralen Planer wie in einem normativen Gesamtsystemkontext, sondern auf der einzelwirtschaftlichen Ebene in der die Entscheider:innen mit entsprechenden Endverbraucherpreisen einerseits, und Förderinstrumenten andererseits konfrontiert sind. Da mit Bezug auf die Entwicklung der Energiepreise eine hohe Unsicherheit besteht, sind auch ambitioniertere Sanierungsmaßnahmen, die im Zielszenario nicht gezogen werden, anzustreben und als No-Regret Option zu sehen. Insgesamt sollten die Anlässe für Sanierungsmaßnahmen als auch für die Installation zielkonformer Wärmesysteme konsequent genutzt werden. Dazu sind Instrumente erforderlich, die den Investitionsentscheidungsprozess früh adressieren und nicht erst, wenn eine Investition aufgrund von Mängeln am Gebäude oder der Versorgungstechnik notwendig erscheint. Zudem stellt jede durchgeführte Standard-sanierung eine Opportunität für ambitionierte Sanierungsmaßnahmen dar. Unter Betrachtung der kostenoptimalen Transformation ist dies zwar nicht notwendig, jedoch gilt dies nur unter der Prämisse, dass frühzeitig Dekarbonisierungsmaßnahmen auch in den anderen Sektoren (wie der Ausbau erneuerbarer Energietechnologien, die Dekarbonisierung des Industrie- und Verkehrssektors) schnell genug voran geht. Daher kann der Schluss gezogen werden, dass die „Windows of opportunity“ bei Sanierungsmaßnahmen auch direkt die Potenziale einer ambitionierteren Sanierung heben sollten,

da sonst diese Potentiale bis 2050 nicht mehr genutzt werden können. Instrumente, mit denen technisch machbare und etablierte ambitionierte Sanierungspakete angereizt werden, könnten dieses Potential heben.

Machbarkeit der aufgezeigten Dekarbonisierung der Wärmeversorgung unter Berücksichtigung angebots- und nachfrageseitiger Hemmnisse

Für die Zielerreichung 2050 und insbesondere 2030 ist eine sehr schnelle Umstellung der Wärmeversorgung auf erneuerbare Energien und Wärmenetze die zentrale Stellschraube. Aus den Ergebnissen des Trendszenarios zeigt sich, dass der bis 2030 anvisierte CO₂-Preis nicht ausreicht, um fossilen Brennstoffen und insbesondere Gas signifikant Marktanteile zu nehmen. Der Vergleich zwischen Ziel- und Trendszenario zeigt, dass Neuinstallationen fossil betriebener Gas- und Ölkesel, – auch als Hybridheizung - einer Zielerreichung 2030 unter Berücksichtigung der Gesamtenergiesystemkosten entgegenwirken.

Bei der Transformation des Gebäudesektors ergeben sich eine Vielzahl von angebots- und nachfrageseitigen Hemmnissen bei der Steigerung der Sanierungsrate und der Installation zielkonformer dezentraler Wärmeversorgungssysteme. Unter anderem ist die Geschwindigkeit bei der Diffusion von Wärmepumpen sowie die Verfügbarkeit und die Technologiepräferenz von Handwerker:innen zu berücksichtigen. Im Zielszenario haben Wärmepumpen bereits im Jahr 2025 einen Marktanteil von 65 %. Ob dieser Wärmepumpenhochlauf realistisch ist, kann an dieser Stelle nicht abgeschätzt werden. Jedoch ist es für die Umsetzungswahrscheinlichkeit essenziell, dass Handwerker:innen und Energieberater:innen entsprechend ausgebildet sind, und ausreichende Produktionskapazitäten zur Verfügung stehen.

1 Hintergrund und Zielsetzung

1.1 Klimaneutralität als politisches Ziel in Deutschland und der EU

Die aktuellen Klima- und Energieziele der Europäischen Union (EU) setzen einen Rahmen, um die Notwendigkeit weiterer politischer Maßnahmen in den Sektoren Energiewirtschaft, Industrie, Gebäude, Verkehr und Landwirtschaft abzuleiten. Der im Rahmen des Green Deals vorgelegte Entwurf zum Europäischen Klimaschutzgesetz¹ sieht vor, dass die Europäische Union zum ersten „klimaneutralen Kontinent“ wird (Europäische Kommission, o. J.). Die Vision für eine klimaneutrale Zukunft bis 2050 umfasst nahezu alle Sektoren und steht mit den Zielen des Übereinkommens von Paris im Einklang, den Temperaturanstieg deutlich unter 2°C zu halten und Anstrengungen zu unternehmen, um ihn auf 1,5°C zu begrenzen. Die Klimaneutralität ist dabei mit einem Rückgang der Treibhausgasemissionen (THG-Emissionen) von 95 % gegenüber 1990 über alle Sektoren verbunden. Das Europäische Klimaschutzgesetz soll das Klimaneutralitätsziel in europäisches Recht verankern.

Für den Gebäudebereich existiert bisher keine offizielle Definition für die Klimaneutralität. Die bisherige Zieldefinition eines „nahezu klimaneutralen Gebäudebestandes“ ist durch die **Energieeffizienzstrategie Gebäude (ESG)** im Jahr 2015 mit der Zielsetzung einer 80 % Reduktion des nicht-erneuerbaren Primärenergiebedarfs für den Zeitraum 2008 bis 2050 definiert und in Szenarien untersucht worden. Das Sektorziel des **Klimaschutzplans 2050** für das Jahr 2030, welches in das **Klimaschutzgesetz (KSG)** Ende 2019 überführt wurde, ist aus der Zieldefinition der ESG abgeleitet. Dieses sieht eine Reduktion der Treibhausgasemissionen bis 2030 (gegenüber 1990) von 67 % vor.

Aufgrund der EU-Zielsetzung der Klimaneutralität ist nun auch eine neue Zieldefinition für den klimaneutralen Gebäudebestand erforderlich, der mit dem Rückgang von 95 % der gesamten Treibhausgasemissionen gegenüber 1990 kompatibel ist. Unter der Annahme, dass das Reduktionsziel von 95 % auch für den Gebäudesektor gilt, ist eine Restmenge von maximal 14,5 Mio. Tonnen CO₂e noch zulässig. Wird jedoch berücksichtigt, dass die Restemissionen insbesondere auf nicht-energetische Bereichen wie der Landwirtschaft entfallen, ist eine Emissionsreduktion auf null für alle Energiesektoren und damit auch den Gebäudesektor erforderlich.

1.2 Zielsetzung und Vorgehen

Vor diesem Hintergrund wird im Rahmen dieses Vorhabens untersucht, wie sich der Gebäudebereich entwickeln muss, um mit der Zielsetzung einer 100 % Reduktion der THG-Emissionen kompatibel zu sein. Im Rahmen dieser Studie werden dazu folgende Schritte durchgeführt:

- **Studienauswertung:** Analyse und Vergleich bestehender Studien zur Dekarbonisierung des Gebäudebereichs
- **Entwicklung eines Trendszenario für den Gebäudesektor:** Modellierung eines Trendszenarios unter Berücksichtigung des aktuellen Rechts- und Förderrahmens

¹ Entwurf der Verordnung zur Verwirklichung der Klimaneutralität (Europäisches Klimaschutzgesetz)

- **Entwicklung eines Zielszenarios für den Gebäudesektor:** Modellierung eines zielkompatiblen Szenarios unter der Prämisse einer Gesamtsystemoptimierung aller Sektoren

In einem ersten Schritt wird ein Vergleich bestehender Studien zur Dekarbonisierung des Gebäudesektors durchgeführt. Im Anschluss wird mit dem bottom-up Gebäudesektor-Modell *Invert/ee-Lab* ein Trendszenario bis zum Jahr 2050 gerechnet. Dieses dient dazu, die Wirkung der aktuell geltenden politischen Instrumente auf die Diffusion von Wärmeversorgungstechnologien sowie energetischer Gebäudesanierung aus einzelwirtschaftlicher Perspektive der Gebäudeeigentümer:innen zu untersuchen. Im Modell wird dazu der Gebäudebereich hinsichtlich des energetischen Zustands der Bestandsgebäude und der installierten Wärmeversorgungstechnologien detailliert abgebildet. Die Veränderung des Gebäudebestandes wird dabei anhand einer agenten-basierten Simulation der Investitionsentscheidungen der unterschiedlichen Gebäudeeigentümer:innen modelliert.

Die Entwicklung des Zielszenarios wird hingegen aus einer gesamtwirtschaftlichen Perspektive entwickelt. Dieses wird mit dem Modell *REMod* modelliert, welches die erforderliche Diffusion der verschiedenen Wärmeversorgungstechnologien und Gebäudeenergiestandards untersucht, um einen klimaneutralen Gebäudesektor zu erreichen. Die Perspektive liegt dabei nicht auf der Entscheidung der einzelnen Gebäudeeigentümer:innen, sondern auf der Optimierung des gesamten Energiesystems. Dabei wird auch die Dekarbonisierung der leitungsgebundenen Energieträger Gas, Fernwärme und Strom und deren Beitrag zur Zielerreichung im Gebäudesektor untersucht.

1.3 Abgrenzung Gebäudebereich

Der „Gebäudebereich“ stellt keinen Wirtschaftssektor im Sinne der allgemeinen Statistik dar und ist somit in der Energiebilanz auch nicht als Energieverbrauchssektor definiert. Durch die Relevanz des Energieverbrauchs in Gebäuden wird dieser jedoch durch sektorspezifische Ziele und Politikinstrumente adressiert und in unterschiedlichen Szenarienanalysen zur langfristigen Untersuchung des Energieverbrauchs und der Treibhausgasemissionen untersucht. Die Abgrenzung des Gebäudebereichs ist in den einzelnen Studien und auch mit Bezug auf die politischen Ziele jedoch unterschiedlich (Abbildung 2).

Dem Ziel der Energiewende zur Reduktion des Primärenergiebedarfs (PE-Bedarf) von 80 % bis 2050 in Gebäuden liegt der Bilanzraum der Energieeinsparverordnung (EnEV)² zugrunde (BMU & BMWI, 2011; Löschel et al., 2014). Dieser umfasst den Energiebedarf thermisch konditionierte Gebäude (Raumwärme, Warmwasser, Lüftung und Kühlung) sowie den Strombedarf für eingebaute Beleuchtung in Nichtwohngebäuden. Dabei werden die Sektoren Haushalte (Wohngebäude), GHD und Industrie (Nichtwohngebäude) betrachtet. Die Sektorziele für den Gebäudesektor aus dem Klimaschutzgesetz basieren hingegen nicht auf der Abgrenzung EnEV Bilanzraum, sondern auf Grundlage der sektoralen Emissionsbilanzierung, welches im Rahmen der Berichterstattung zum Kyoto-Protokoll erstellt wird³. Der „Gebäudebereich“ umfasst die direkten Emissionen der

² Die EnEV ist zusammen mit dem Energieeinsparungsgesetz (EnEG) und dem Erneuerbaren-Wärmeengesetz in das Gebäudeenergiegesetz zusammengeführt worden, welches am 1. November 2020 in Kraft getreten ist.

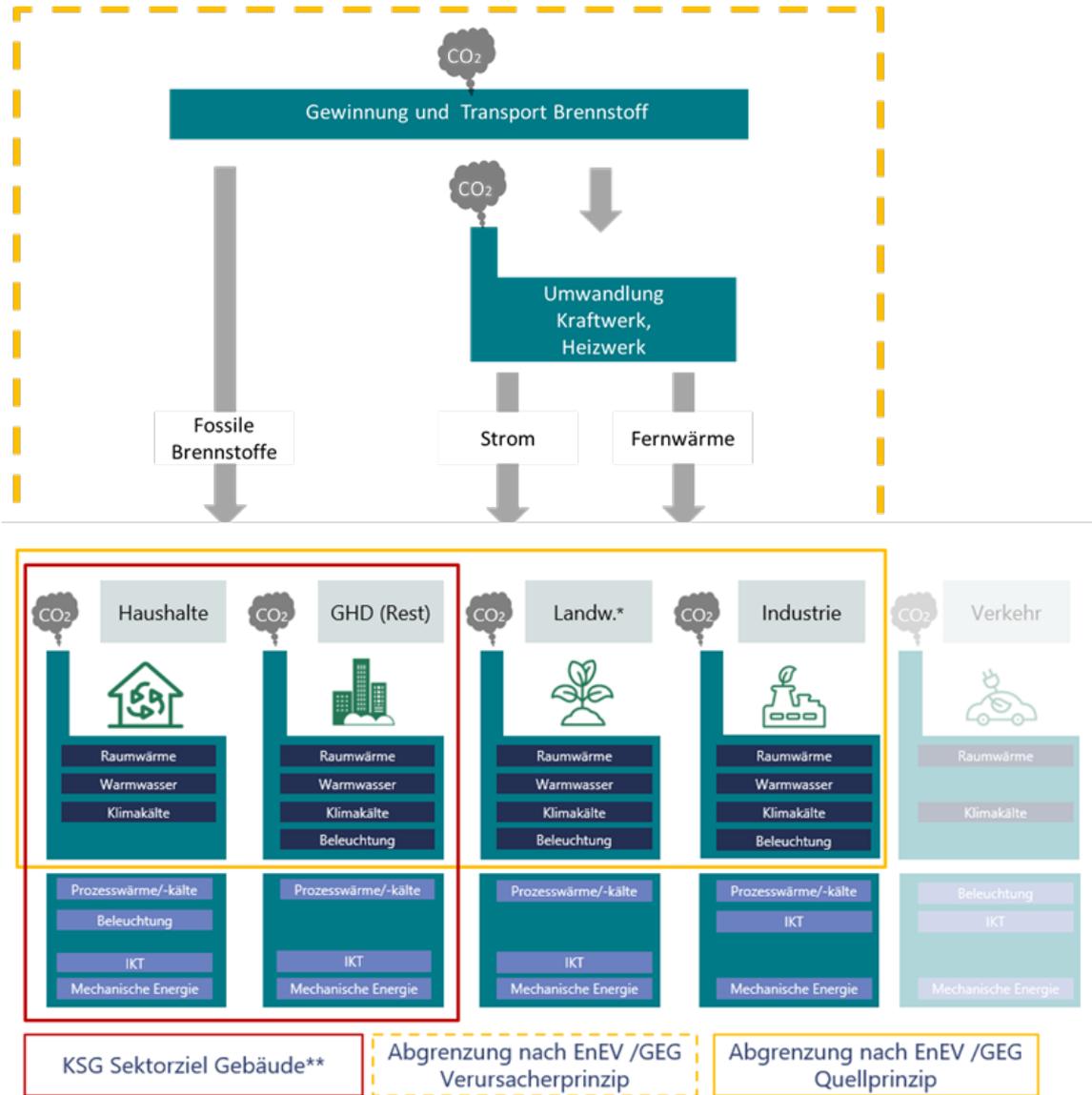
³ Vergleiche Harthan et al. (2017) für eine detaillierten Abgrenzung aller Sektoren im Klimaschutzplan

Sektoren Haushalte und GHD ohne die Bereiche Landwirtschaft, Fischerei und Forstwirtschaft⁴. Neben der separaten Bilanzierung der Landwirtschaft werden auch noch die THG-Emissionen mobiler Quellen herausgerechnet, was die Verwendung von Kraftstoffen der Haushalte und des GHD Sektors umfasst. Zudem erfolgt die Bilanzierung entsprechend dem Quellenprinzip der THG-Emissionen, so dass die Energieverbräuche von Strom und Fernwärme in Gebäuden im Klimaschutzplan der Energiewirtschaft zugeschrieben werden.

Im Rahmen dieses Vorhabens wird mit Bezug auf die Zielerreichung der Gebäudebereich entsprechend dem Klimaschutzplan 2050 und dem Klimaschutzgesetz abgegrenzt. In der Modellierung werden jedoch alle Energieverbräuche und Wärmeversorgungstechnologien berücksichtigt, die der thermischen Konditionierung des Gebäudebestandes zuzuschreiben sind, so dass auch der Vergleich zum Bilanzraum nach ESG möglich ist.

⁴ Im Weiteren als „Landwirtschaft“ bezeichnet

Abbildung 2: Abgrenzung des Gebäudebereichs im Klimaschutzplan 2050 und der Energieeffizienzstrategie Gebäude



*Landwirtschaft, Fischerei, Forstwirtschaft

** Im Gebäudesektor nach KSG werden nur die fossilen Brennstoffe der einzelnen Anwendungen bilanziert. So ist beispielsweise der Energieverbrauch für Beleuchtung nicht enthalten, da dieser fast ausschließlich mit Strom bereitgestellt wird

2 Beschreibung des methodischen Vorgehens

2.1 Analyse bestehender Studien für den Gebäudebereich

In diesem Kapitel wird zunächst ein Vergleich bestehender Studien zur Dekarbonisierung des Gebäudesektors durchgeführt. Dabei werden sowohl Referenzszenarien, basierend auf einer Fortschreibung derzeitiger Maßnahmen und Entwicklungen, als auch Zielszenarien mit dem Ziel einer 95-prozentigen Reduktion der Treibhausgasemissionen betrachtet. Ziel dieses Arbeitsschrittes ist es, zunächst das Referenzszenario der Energieeffizienzstrategie Gebäude einzuordnen und aktuelle Referenzszenarien für den Vergleich mit dem in dieser Studie entwickelten Trendszenario aufzuarbeiten. Im zweiten Schritt werden aktuelle Zielszenarien ausgewertet, die in der Regel nicht spezifisch für den Gebäudesektor ermittelt werden. Der Vergleich dieser Studien dient dazu, den möglichen Lösungsraum für das Zielszenario aufzuspannen und insbesondere auch Rahmendaten für die eigene Modellierung des Zielszenarios im Rahmen dieser Studie zu identifizieren.

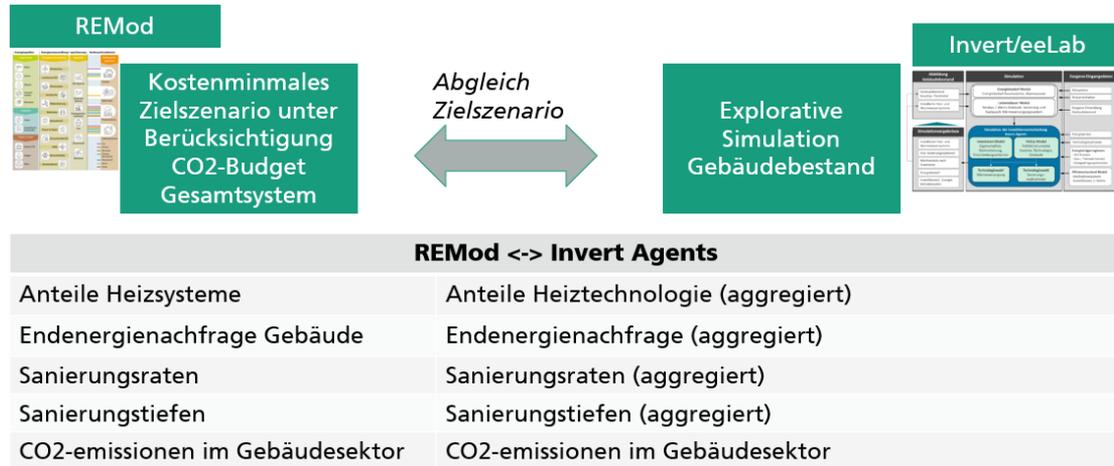
2.2 Szenarientwicklung

Für die Bestimmung des Trendszenarios und des Zielszenarios werden zwei unterschiedliche Modelle verwendet.

Das Trendszenario bildet die explorative Entwicklung des Gebäudebestandes auf Basis der gegebenen politischen Rahmenbedingungen und der dadurch beeinflussten Investitionsentscheidungen ab. Hierfür wird das hoch aufgelöste Gebäude- und Investitionsentscheidungsmodell Invert/ee-Lab verwendet. Im Gegensatz dazu wird das Zielszenario mit dem Energiesystemmodell REMod bestimmt. Das Modell ermittelt unter Vorgabe von jahresscharfen CO₂-Minderungszielen eine kostenoptimale Systemzusammenstellung unter Betrachtung der Sektoren Gebäude, Industrie, Verkehr sowie Energiewirtschaft und bestimmt dadurch ein Zielsystem unter der Einhaltung der stündlichen Versorgungssicherheit.

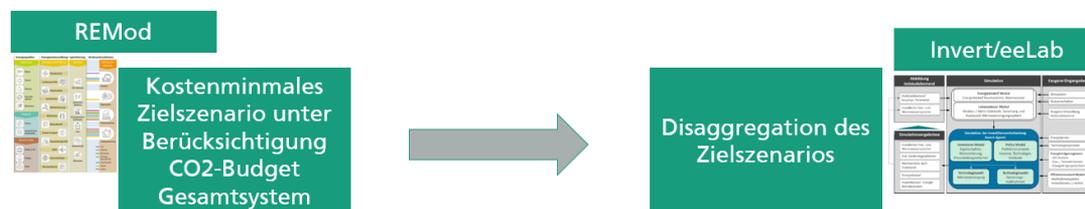
Im Rahmen des Projektes dient der Modellverbund zwei unterschiedlichen Zielen: Der Ansatz ermöglicht einen Vergleich zwischen der explorativen Simulation von Akteursentscheidungen (Mikro-Perspektive) der Gebäudeeigentümer:innen und der daraus resultierenden Technologiediffusion von Wärmeversorgungssystemen und Gebäudesanierung mit dem kostenoptimalen Zielsystem aus Makro-Perspektive. Diese Herangehensweise ermöglicht es, mögliche Handlungslücken zur Erreichung der CO₂-Minderungsziele unter gesetztem politischem Rahmen zu identifizieren und zu analysieren.

Abbildung 3: Modellvergleich Variante "Vergleich kostenminimiertes Zielsystem mit explorativer Simulation"



Zum anderen bildet das Modell Invert/ee-Lab den Gebäudebestand sehr detailliert ab, während dieser in REMod in aggregierter Form betrachtet wird. Um gebäudespezifische Aussagen zum Zielszenario treffen zu können werden daher in einer zweiten Variante des Modellvergleichs Zielsystemdaten in das Invert/ee-Lab Modell gespeist, um diese zu disaggregieren. Hierfür wird das Accounting Modul des Invert/ee-Lab Modells angewandt, wodurch die Marktanteile, Sanierungsraten und –tiefen nicht modellendogen simuliert werden, sondern durch REMod vorgegeben werden können. Neben der Disaggregation nach Gebäudetypen und Baualtersklassen (BAK) werden die CO₂-Emissionen des Gebäudesektors mit REMod bestimmt. Diese werden jedoch nicht als Zielgröße in das Modell gegeben. Modelleingangsgröße in REMod ist die Vorgabe des jährlichen CO₂-Budgets über alle Sektoren, gemäß Klimaschutzgesetz und eine 100%- Reduktion der Emissionen im Jahr 2050 gegenüber 1990. Dies kann im Ergebnis dazu führen, dass das sektorspezifische Ziel des Gebäudesektors (nach Definition des Klimaschutzgesetzes) nicht erfüllt wird, weil in einem anderen Sektor mehr CO₂ eingespart wird.

Abbildung 4: Modellkopplung Variante „Disaggregation der REMod Zielsystemzusammensetzung mit Invert/EE-Lab und Ziellanpassung“



REMod -> Invert	Output Invert (Accounting Modus)
Anteile Heizsysteme	Anteile Heiztechnologie nach Gebäudetyp/BAK
Endenergienachfrage Gebäude	Endenergienachfrage nach Gebäudetyp/BAK
Sanierungsraten	Sanierungsraten nach Gebäudetyp/BAK
Sanierungstiefen	Sanierungstiefen nach Gebäudetyp/BAK
CO2-emissionen im Gebäudesektor	CO2-emissionen im Gebäudesektor

Das Vorgehen zur Simulation des Trendszenarios mit Invert/ee-Lab ist in Abschnitt 5.1 beschrieben, das Vorgehen zur Bestimmung des Zielszenarios mit REMod in Abschnitt 5.2.

2.3 Modellierung eines Trendszenario

Das Trendszenario wird mit dem Modell Invert/ee-Lab modelliert. Das Modell ist ein agentenbasiertes bottom-up Simulationsmodell, welches den Gebäudebestand hochaufgelöst darstellt. Eine ausführliche Modellbeschreibung ist in Anhang C zu finden.

Grundlage des Modells ist eine detaillierte Darstellung des Gebäudebestands nach Gebäudetypen, Baualtersklassen 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 (Steinbach, 2015). 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. Im Trendszenario werden die derzeitigen ordnungsrechtlichen und finanziellen Maßnahmen wie in 4.2.1 dargestellt abgebildet.

2.4 Modellierung eines Zielszenarios

Zur Quantifizierung des Zielszenarios wird das Energiesystemmodell REMod verwendet. Das Energiesystemmodell nutzt eine metaheuristische Optimierung, um unter Berücksichtigung einer CO₂-Zielvorgabe das systemische Kostenminimum zu bestimmen. Die Stärke des Modells liegt in der gleichzeitigen Darstellung der Sektoren Gebäude, Energiewirtschaft, Verkehr und Industrie sowie der Eigenschaft, ein zukünftiges Energiesystem auf dem Transformationspfad zu optimieren – jedes Jahr bis 2050, wobei die Energiebilanz stundenscharf eingehalten wird. Optimiert wird

die kostenminimale Systemzusammensetzung unter den Randbedingungen Versorgungssicherheit und Klimaschutz (abgebildet durch das CO₂-Minderungsziel). Die Sektorkopplung wird, verglichen mit den meisten Modellen, in besonderer Weise abgebildet. In einem großen Teil anderer Energiesystemmodelle fließt z.B. die Stromnachfrage elektrischer Wärmepumpen lediglich als vorgegebene Zeitreihe ein. Dagegen wird in REMod beispielsweise der Anlagenpark der Heizungstechnologien, Technologien zur Bereitstellung von Prozesswärme oder die Anzahl batterieelektrischer Fahrzeuge mit optimiert und dadurch das Profil modellendogen beeinflusst. Zudem wird die Stromnachfrage der elektrischen Wärmepumpe durch einen optionalen (also mit-optimierten) thermischen Speicher, welcher wiederum durch einen Heizstab Überschussstrom aufnehmen kann, oder durch den optionalen Einsatz von Solarthermieranlagen beeinflusst. Auf diese Weise sind im Modell viele relevante koppelbaren Technologien miteinander verknüpft und Wechselwirkungen zwischen den Sektoren beeinflussen das Ergebnis der Optimierung.

Im Bereich der Gebäude werden zum einen die Sanierungstiefe und die Sanierungsrate modellendogen ermittelt, als auch der Zubau von Wärmeversorgungssystemen. Dabei orientiert sich der Ersatz oder die Erneuerung von Technologien jeweils an der technischen Lebensdauer. Durch die Eigenschaften des Systemmodells werden die Technologien so gewählt, dass die kostenoptimale Systemlösung resultiert. Das bedeutet, dass Ausgleichsoptionen durch Strom- und Wärmespeicher oder die Produktion von flüssigen oder gasförmigen Power2X Technologien bei Stromüberschüssen, aber auch der Im- und Export von Energieträgern so dimensioniert werden, dass sich eine kostenoptimale Technologiezusammensetzung ergibt. Eine ausführliche Modellbeschreibung sowie Veröffentlichungen sind in Kapitel 6.2. dargestellt.

Zur Bestimmung des Zielszenarios werden folgende Schritte durchgeführt:

1. Bestimmung der Rahmenannahmen für das Zielszenario (vgl. Kapitel 0)
2. Optimierung des Zielszenarios mit REMod.
3. Auswertung der Modellergebnisse für die Zieljahre 2030, 2040 und 2050 hinsichtlich Technologien zur Wärmebereitstellung, Sanierungsraten, Sanierungstiefe, Treibhausgasemissionen und Energieträgern inklusive erneuerbaren Energietechnologien sowie der Rolle der leitungsgebundenen Energieträger.
4. Disaggregation des Zielsystems mit Invert/EE-Lab: Basierend auf den Szenarioergebnissen von REMod für das gesamte Energiesystem ergeben sich spezifische CO₂-Emissionen für die Energieträger (Strom, Gas, Fernwärme) und Anforderungen an den Rückgang des Energiebedarfs im Gebäudesektor bis zum Jahr 2050. Diese Ergebnisse werden in das Simulationsmodell Invert/EE-Lab übernommen, um die Ergebnisse detaillierter auf den Gebäudesektor herunterzubrechen und Transformationspfade bis 2050 zu simulieren. Damit erfolgt eine Aufschlüsselung der Sanierungsraten und -tiefen nach Gebäudetypen.
5. Vergleich des Zielszenarios mit dem Trendszenario: Quantifizierung der Ziellücke und deren Analyse aus technischer, wirtschaftlicher und gesellschaftlicher Sicht. Hierzu werden weiterführende Literatur sowie Experteneinschätzungen herangezogen. Zudem wird bewertet, ob neue innovative Techniken zur Zielerreichung notwendig werden. Die Modellergebnisse erlauben eine Einordnung der Realisierbarkeit des Zielszenarios, insbesondere in Bezug auf die notwendigen Austauschraten von Wärmeversorgungssystemen und Sanierungsraten vor dem Hintergrund der bestehenden Reinvestitionszyklen. Zudem wird

analysiert, ab welchem Zeitpunkt entsprechende Festlegungen zur Weiterentwicklung der Energiestandards in Gebäuden getroffen werden müssen, um das Ziel bis 2050 zu erreichen.

3 Bestehende Ziel- und Referenzszenarien für den Gebäudesektor

Ziel des ersten Arbeitspaketes im Rahmen dieser Studie ist es, den möglichen Lösungsraum aus bestehenden Langfristszenarien zu analysieren und mit den Ergebnissen aus Referenz- und Zielszenarien aus der Energieeffizienzstrategie Gebäude (ESG) zu vergleichen. Die ESG ist bereits im Jahr 2015 verabschiedet worden, allerdings gibt es für den Gebäudebereich für 2050 bisher keine anderen Ziele. Auch die Sektorziele des Klimaschutzplans 2050 und des KSG für das Jahr 2030 basieren auf dem vorbereitenden Szenariengutachten der ESG.

Eine ausführliche Analyse und Vergleich der ESG mit aktuellen Referenzszenarien, die bereits die zusätzlichen energie- und klimapolitischen Rahmenbedingungen berücksichtigen, erfolgte bereits im Zwischenbericht genau wie die Auswertung bestehender Zielszenarien. An dieser Stelle werden nur die zentralen Ergebnisse dargestellt. Für die ausführliche Darstellung wird auf den Anhang verwiesen (siehe Anhang A).

3.1 Vergleich aktueller Referenzszenarien und ESG-Referenz

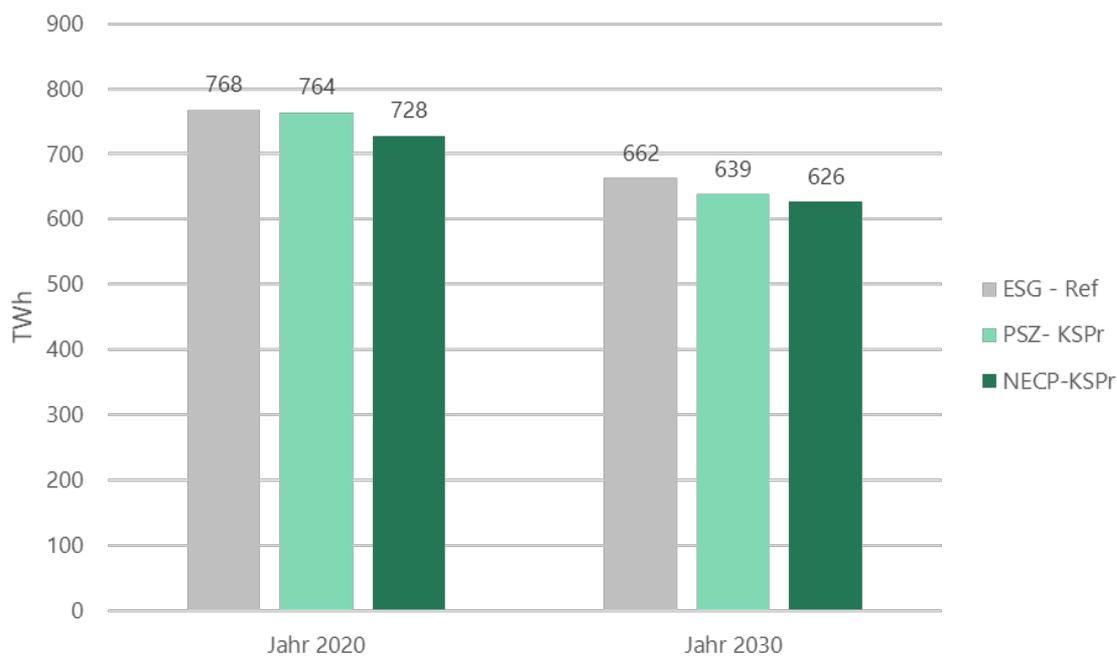
Um die Wirkung des ESG Referenzszenarios vor dem Hintergrund der geänderten energie- und klimapolitischen Rahmenbedingungen einzuordnen, wird es mit aktuellen Referenzentwicklungen verglichen, die bereits die Wirkungen der zusätzlichen Maßnahmen des Klimaschutzprogramms 2030 beinhalten. Hier sind derzeit zwei Szenariestudien verfügbar:

- Im Rahmen des Projektes Politikszenerarien IX ist im Auftrag des Umweltbundesamtes (UBA) die Wirkung des Klimaschutzprogramms 2030 für alle Sektoren in einer Szenarioanalyse bis zum Jahr 2035 untersucht worden (UBA (Hg.), 2020). Die Forschungsnehmer für die Studie „Treibhausgasminde rungswirkung des Klimaschutzprogramms 2030“ sind Öko-Institut, Fraunhofer ISI und IREES. Die Ergebnisse für den Gebäudebereich sind dabei mit dem Modell Invert/ee-Lab durch IREES modelliert worden. Im Folgenden wird das Szenario als *PSZ-KSPr* referenziert.
- Im Rahmen der Studie „Energiewirtschaftliche Projektionen und Folgeabschätzungen 2030/2050“ ist im Auftrag des BMWi auch ein Szenario inklusive der Wirkungen des Klimaschutzprogramms 2030 berechnet worden. Die Ergebnisse der Studie sind in den Nationalen Energie- und Klimaschutzplan (NECP) eingeflossen. Forschungsnehmer für die Studie sind PROGNO S und Fraunhofer ISI. Im Folgenden wird das Szenario als *NECP-KSPr* referenziert.

Da die Abgrenzung des Gebäudebereichs im Rahmen der Politikszenerarien IX nach der Systematik des KSG erfolgt, werden die Ergebnisse für den Bilanzraum Raumwärme und Warmwasser für Wohngebäude und Nichtwohngebäude (GHD) verglichen. Abbildung 5 zeigt, dass sich bereits für das Jahr 2020 Unterschiede zwischen den Szenarien zeigen. Auffällig ist, dass ESG-Referenz und PSZ-KSPr mit Bezug auf den Endenergiebedarf eine gleiche Größenordnung haben, während das *NECP-KSPr* Szenario rund 36 TWh bzw. 40 TWh niedriger liegt. Der Unterschied zwischen PSZ-KSPr und NECP ist jedoch nicht nur auf die unterschiedliche Entwicklung des Endenergiebedarfs,

sondern auch auf die Unterschiede in der Temperaturbereinigung zurückzuführen⁵. Insofern ist zur Beurteilung der Szenarien und Einordnung des ESG Referenzszenarios insbesondere der relative Rückgang beim Endenergiebedarf als geeigneter Indikator zu wählen.

Abbildung 5: Endenergiebedarf für Raumwärme und Warmwasser für Wohngebäude und Nichtwohngebäude in Referenzszenarien



Quelle: Eigene Darstellung; (Kemmler et al., 2020; UBA (Hg.), 2020); Eigene Datenauswertung Politiksznarien; persönliche Informationen (PROGNOS) zu Detailauswertung NECP-KSPR Szenario

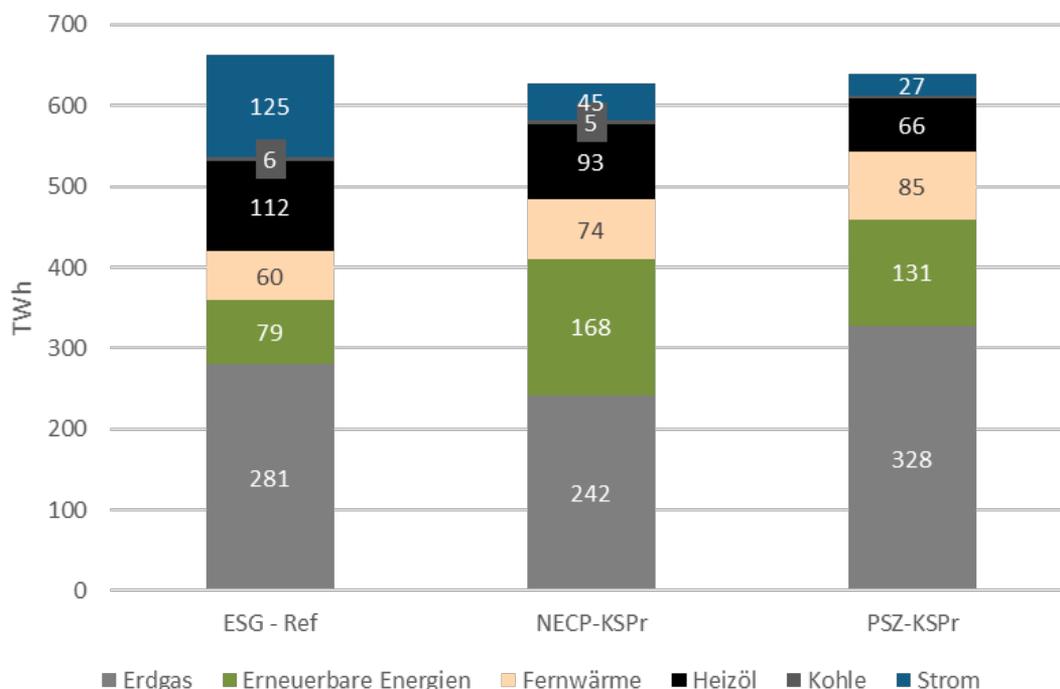
Der Rückgang beim Endenergiebedarf von 2020 bis 2030 liegt mit 16 % in dem Bereich der anderen beiden Szenarien - im PSZ-KSPR Szenario resultieren 20 % und im NECP-KSPR Szenario beträgt der Rückgang ebenfalls 16 %. Im ESG Referenzszenario sind jedoch die zusätzlichen Instrumente, die nach 2014 in Kraft getreten sind – insbesondere die Beschlüsse des Klimaschutzprogramms 2030 – noch nicht berücksichtigt. Daraus kann man einerseits schlussfolgern, dass das ESG Referenzszenario im Vergleich zu den neueren Studien und auch der realen Entwicklung zwischen 2016 und 2020 eine optimistischere Wirkung der bestehenden Politiken angenommen hat. Andererseits liegen den Szenarien andere externe Rahmenbedingungen wie Bevölkerungs- und Wohnflächenentwicklung zugrunde.

Mit Bezug auf die verwendeten Energieträger für die Raumwärme- und Warmwasserbereitstellung zeigen sich deutliche Unterschiede (Abbildung 6). So beträgt der dezentrale EE-Wärme Anteil im ESG-Referenzszenario im Jahr 2030 12 % im Vergleich zu 20 % im PSZ-KSPR und 27 % im NECP-

⁵ Das PSZ-KSPR Szenario ist auf das Basisjahr 2018 bezüglich des realen Verbrauchs kalibriert. Das NECP-KSPR Szenario hat das Jahr 2016 als Basisjahr. Die genaue Temperaturbereinigung ist nicht bekannt. Es wird vermutet, dass die Werte auf ein langjähriges Mittel der Wetterjahre korrigiert sind.

KSPR⁶. Die Unterschiede beim Stromverbrauch zwischen ESG und den beiden anderen Szenarien ist auf eine andere Abgrenzung des Stromverbrauchs in der ESG zurückzuführen und vermutlich auch nachträgliche statische Anpassungen in der Anwendungsbilanz der AG Energiebilanzen, die zum damaligen Zeitpunkt noch nicht vorlagen.⁷

Abbildung 6: Vergleich des Energieträgereinsatzes im Jahr 2030 in den Referenzszenarien



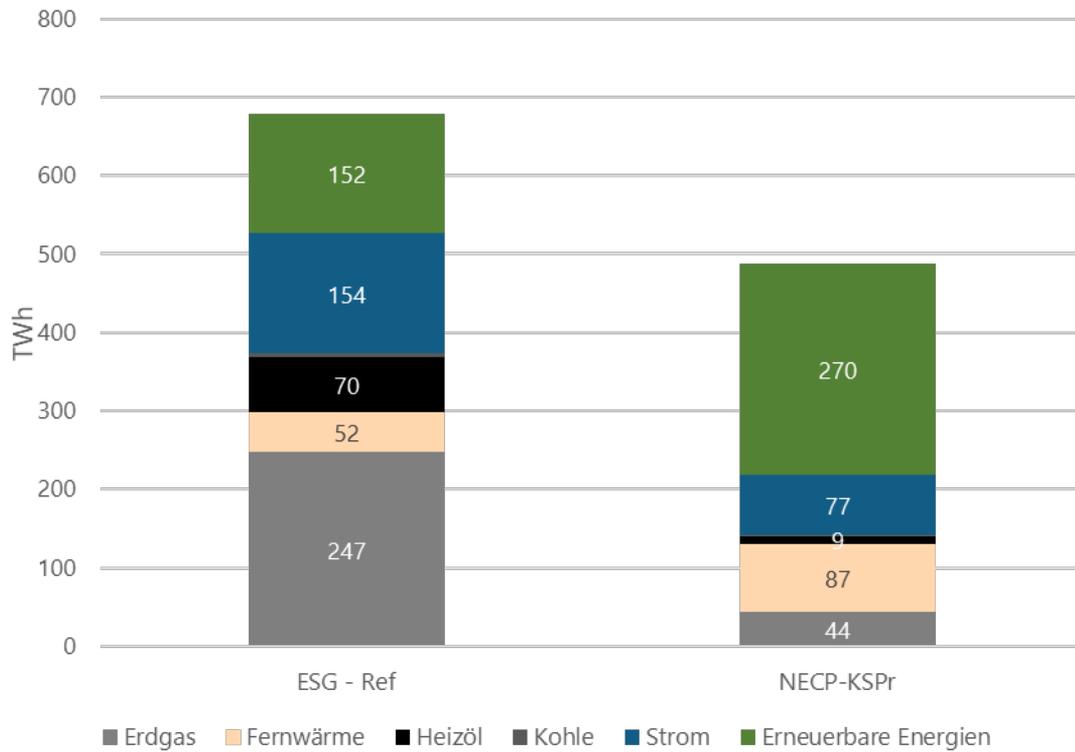
Quelle: Eigene Darstellung; (Kemmler et al., 2020; Thamling et al., 2015; UBA (Hg.), 2020); Eigene Datenauswertung Politikszenerien; persönliche Informationen (PROGNOS) zu Detailauswertung NECP-KSPr Szenario

Für den Vergleich bis zum Jahr 2050 kann nur das NECP-KSPr Szenario herangezogen werden, da der Betrachtungszeitraum in den Politikszenerien nur bis zum Jahr 2035 geht. Für den Vergleich zwischen ESG-Referenz und NECP-KSPr wird im Jahr 2050 der Gebäudebereich entsprechend dem Bilanzraum der ESG für beide Szenarien dargestellt. Abbildung 7 verdeutlicht, dass im NECP-Szenario mit Berücksichtigung der neu eingeführten Politikinstrumente und unter Annahme einer dynamischen Entwicklung der CO₂-Bepreisung sowohl eine signifikantere Reduktion des Endenergiebedarfs als auch ein stärkerer Umstieg zu erneuerbarer Wärme resultiert.

⁶ Im PSZ-KSPr Szenario sind biogene Nahwärmenetze der Fernwärme zugerechnet, die in der Statistik als dezentrale Biomasse im GHD Sektor bilanziert sind, was teilweise den Unterschied zum NECP-KSPr für Fernwärme und erneuerbare Energien erklärt. Das NECP-KSPr Szenario unterstellt zudem eine höhere CO₂-Preisentwicklung im BEHG

⁷ Nach den aktuellen Daten der AG Energiebilanzen (BMWi Energiedaten Stand 5.3.2021) wird der Stromverbrauch für die Anwendungen Raumwärme und Warmwasser in den Sektoren Haushalte und GHD für das Jahr 2008 (Ausgangsjahr der ESG Szenarien) mit 46 TWh bilanziert. In der ESG werden hierfür 109 TWh im Jahr 2008 als Ausgangswert des Szenarios angesetzt. Zu beachten ist, dass in der Energiebilanz regelmäßig auch nachträgliche Anpassungen durchgeführt werden, die zu absoluten Änderungen der Verbräuche und insbesondere zu Verschiebungen zwischen Sektoren und Energieanwendungen führen. So ist nicht auszuschließen, dass dem ESG Szenario eine andere statistische Basis für das Jahr 2008 zugrunde lag, die sich in Szenarienanalyse bis 2030 dann fortsetzt.

Abbildung 7: Endenergiebedarf im Gebäudesektor in ESG-Referenz und NECP-KSPr Szenario im Jahr 2050



Quelle: Eigene Darstellung; (Kemmler et al., 2020; Thamling et al., 2015); persönliche Informationen (PROGNOS) zu Detailauswertung NECP-KSPr Szenario

3.2 Auswertung von Zielszenarien für den Gebäudebereich

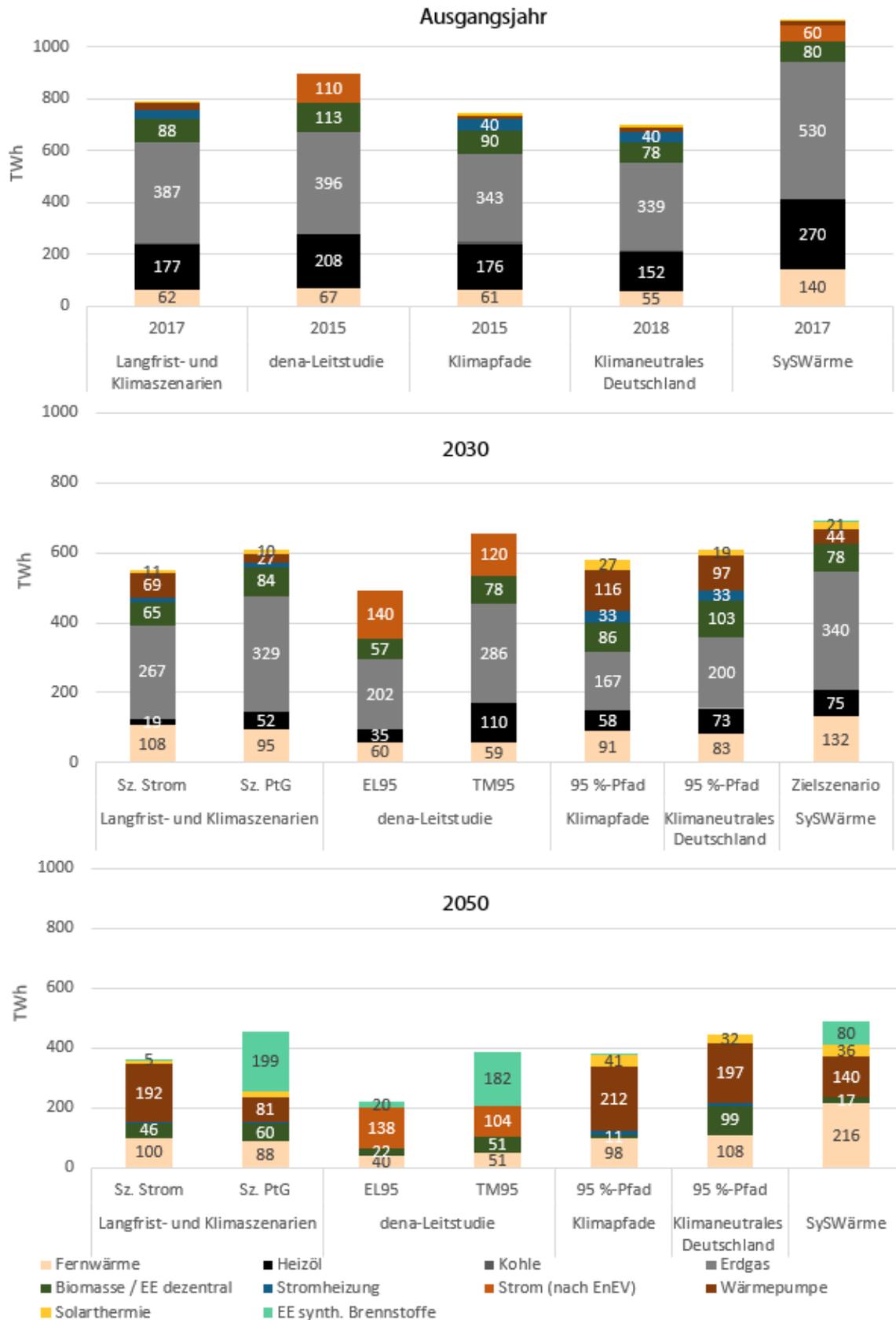
In diesem Kapitel werden die Ergebnisse aktuell vorliegender Szenarien zum Gebäudebereich diskutiert, die eine Reduktion der Treibhausgasemissionen um 95 % in Deutschland vorsehen. Im Folgenden werden die Ergebnisse der verschiedenen Szenarien aus den folgenden Studien dargestellt:

- Langfrist- und Klimaszenarien im Auftrag des BMWi (noch nicht veröffentlicht),
- Systemische Herausforderungen der Wärmewende (SysWärme) im Auftrag des UBA (2021)
- Klimapfade für Deutschland im Auftrag des Bundesverbandes der Deutschen Industrie e. V. (BDI) (2018)
- Dena Leitstudie „Integrierte Energiewende“ im Auftrag der Deutschen Energie-Agentur (dena) (2018)
- Agora Energiewende – Klimaneutrales Deutschland (2020)

Alle Szenarien sind Resultate von sektorübergreifenden Studien und beinhalten die Ergebnisse für alle Energieverbrauchssektoren und den Umwandlungssektor. Für den Zweck dieser Untersuchung werden die Ergebnisse für den Gebäudebereich aus den Studien dargestellt, der sich teilweise jedoch hinsichtlich der Abgrenzung unterscheidet. Es wird versucht, die Unterschiede deutlich zu machen und sofern möglich die Ergebnisse für einen einheitlichen Bilanzraum abzuleiten. Eine zentrale Abweichung ist die Ausweisung des Endenergiebedarfs nach EnEV in der dena-Leitstudie, weshalb Umgebungswärme und Solarthermie nicht gesondert ausgegeben werden.

Abbildung 8 gibt einen Überblick über alle analysierten Szenarien nach Bilanzjahren und vergleicht die Entwicklung des Endenergiebedarfs nach Energieträgern im Gebäudebereich. Dabei ist festzustellen, dass die Bandbreite des im Jahr 2050 verbleibenden Endenergiebedarfs in den Szenarien sehr hoch ist. Dies liegt an unterschiedlichen unterstellten Sanierungsraten und -effizienzen sowie eingesetzten Energieträgermixen. In den Elektrifizierungsszenarien findet aufgrund höherer Sanierungsraten und der Umwandlung der Wärmeversorgungssysteme auf Wärmepumpen eine höhere Reduktion des Endenergiebedarfs statt. Demgegenüber wird in den Szenarien mit einem Mix an Energieträgern eine geringere Sanierungsrate unterstellt, da mit dem Einsatz von synthetischen Brennstoffen gerechnet wird. Darüber hinaus unterscheiden sich die Szenarien hinsichtlich des Einsatzes von Biomasse.

Abbildung 8: Vergleich des Endenergiebedarfs der 95%-Szenarien nach Energieträger



3.2.1 BMWi – Langfrist- und Klimaszenarien

Die 95%-Szenarien der Studie Langfrist- und Klimaszenarien werden von einem Konsortium unter Leitung vom Fraunhofer ISI und Consentec im Auftrag des BMWi erstellt. Die Studie ist bisher noch nicht veröffentlicht. Es werden zwei mögliche Transformationspfade für das Energiesystem untersucht, die einerseits den Fokus auf eine hohe Elektrifizierung („Fokus-Strom“) und andererseits auf die Nutzung von Wasserstoff und synthetischen erneuerbaren Brennstoffen im Gasnetz setzen („Fokus PtG“).

Szenario Fokus PtG

Im Szenario „Fokus PtG“ wird eine moderate thermische Sanierungsaktivität und -qualität sowie moderat energieeffiziente Neubauten unterstellt, womit relativ geringe Investitionen in den Gebäudebestand sowie niedrige verpflichtende Gebäudestandards einhergehen. Abbildung 9 zeigt die Entwicklung des Endenergiebedarfs im PtG-Szenario nach Energieträgern. Aufgrund geringerer Effizienzanforderungen sinkt der Endenergiebedarf von 2017 bis 2050 um rund 43 % von 787 TWh auf 452 TWh. Der Energieträger Gas ist weiterhin der dominierende Energieträger, im Jahr 2050 jedoch unter Einsatz synthetischer und erneuerbarer Gase. Daneben tragen vor allem Wärmepumpen, Biomasse und Fernwärme zur Wärmebereitstellung bei. Der Anteil von Wärmepumpen steigt im Zeitraum 2020 bis 2050 um 15 %, der Anteil der Nah- und Fernwärme um 10 %. Der Anteil von Biomasse verbleibt in diesem Zeitraum dagegen bei rund 13 %. Der Anteil von Heizöl an der Endenergiebereitstellung reduziert sich von 2017 bis 2040 stark und spielt im Jahr 2050 keine Rolle mehr.

Abbildung 9: Endenergiebedarf im Szenario „Fokus PtG“ und Zusammensetzung nach Energieträger

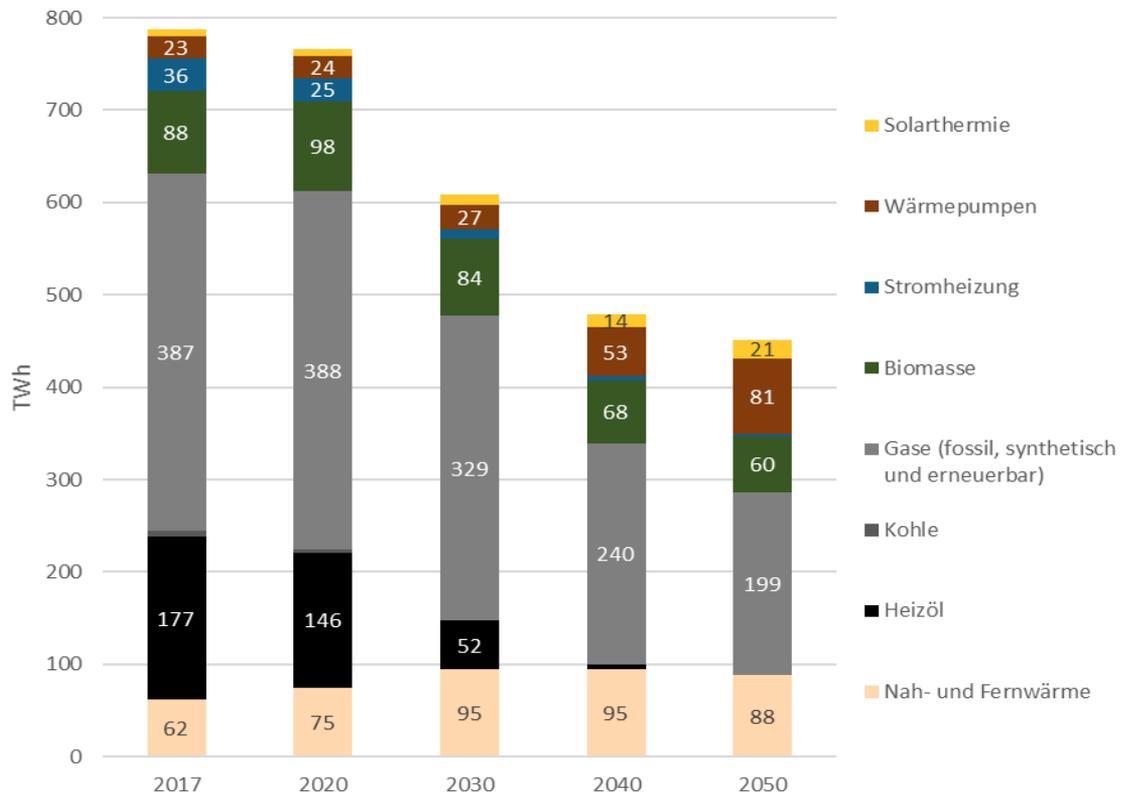
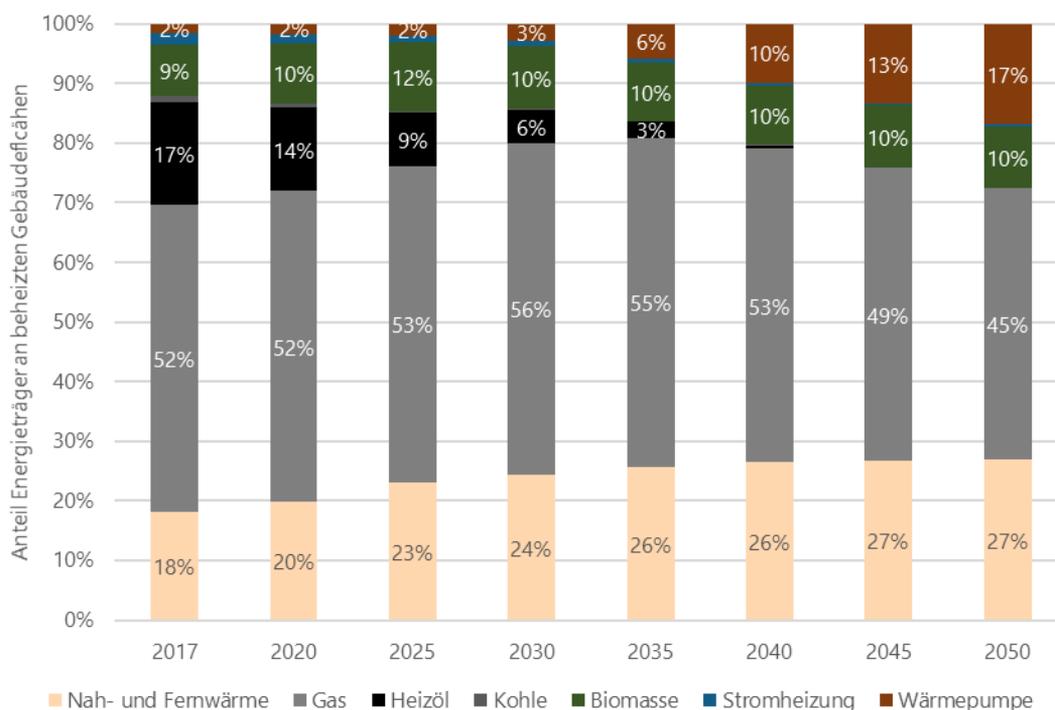


Abbildung 10 zeigt darüber hinaus die Anteile der Energieträger an der beheizten Gebäudefläche im Zeitraum 2017 bis 2050. Gasheizungen sind bis zum Jahr 2050 das zentrale Wärmeversorgungssystem. Im Jahr 2050 haben diese immer noch einen Anteil von 45 % an den gesamten Neuinstallationen. Der Anteil von mit Biomasse betriebenen Anlagen an der beheizten Gebäudefläche verbleibt im gesamten Zeitraum auf gleichem Niveau. Dagegen erfolgt bei der Fernwärme ein deutlicher Zubau im Zeitraum 2017 bis 2050. Anschlüsse an Nah- und Fernwärme haben 2050 einen Anteil von 27 % an der beheizten Gebäudefläche. Wärmepumpen sind bis 2030 keine relevanten Wärmeversorgungssysteme, erst im Zeitraum 2035 bis 2050 werden durchschnittlich 12 Prozent pro Jahr zugebaut. Mit Kohle und Heizöl betriebene Wärmeversorgungssysteme werden bis zum Jahr 2050 installiert, wobei die Anteile in den Jahren 2040 und 2050 marginal sind.

Abbildung 10: Anteil der Wärmeversorgungssysteme an der beheizten Gebäudefläche im Szenario „Fokus PtG“

Szenario Fokus Strom

Das Szenario „Fokus Strom“ erfordert dagegen eine hohe thermische Sanierungsaktivität und -qualität sowie energieeffiziente Neubauten. Fossil betriebene Wärmeversorgungssysteme werden vor allem gegen Nah- und Fernwärmeinstallationen und Wärmepumpen getauscht. Investitionen in die Gebäudehülle sowie die Umstellung der Wärmeversorgungssysteme sollen durch Förderungen, Verschärfung der Gebäudestandards und Ausweitung der Nutzungspflichten für erneuerbare Wärme sowie das Auslaufen von Kohle-, Öl-, und Gasheizungsinstallationen erreicht werden.

Abbildung 11 zeigt den Endenergiebedarf im Strom-Szenario nach Zusammensetzung der Energieträger. Aufgrund hoher Sanierungsraten und hoch energieeffizienter Neubauten reduziert sich der Endenergiebedarf im Strom-Szenario deutlicher als im PtG-Szenario. Im Vergleich zu 2017 findet ein Rückgang um 53 % von 789 auf 363 TWh statt. Fossile Energieträger werden aufgrund des Verbots von Heizöl-Neuinstallationen ab 2020 und Gas-Neuinstallationen ab 2030 nahezu vollständig aus der Endenergiebereitstellung verdrängt. Im Jahr 2050 verbleibt ein marginaler Anteil an Gas am gesamten Endenergiebedarf, welcher jedoch durch synthetische und erneuerbare Gase gedeckt wird. Aufgrund der ambitionierten Effizienzstrategie wird ebenfalls weniger Biomasse beansprucht als im „Fokus PtG“. Im Jahr 2050 hat sich der Anteil am gesamten Endenergiebedarf um 50 % reduziert. Dafür werden Fernwärme und Wärmepumpen stärker genutzt. Diese bestimmen über 80 % der Endenergiebereitstellung im Jahr 2050.

Abbildung 11: Endenergiebedarf im Szenario „Fokus Strom“ und Zusammensetzung nach Energieträger

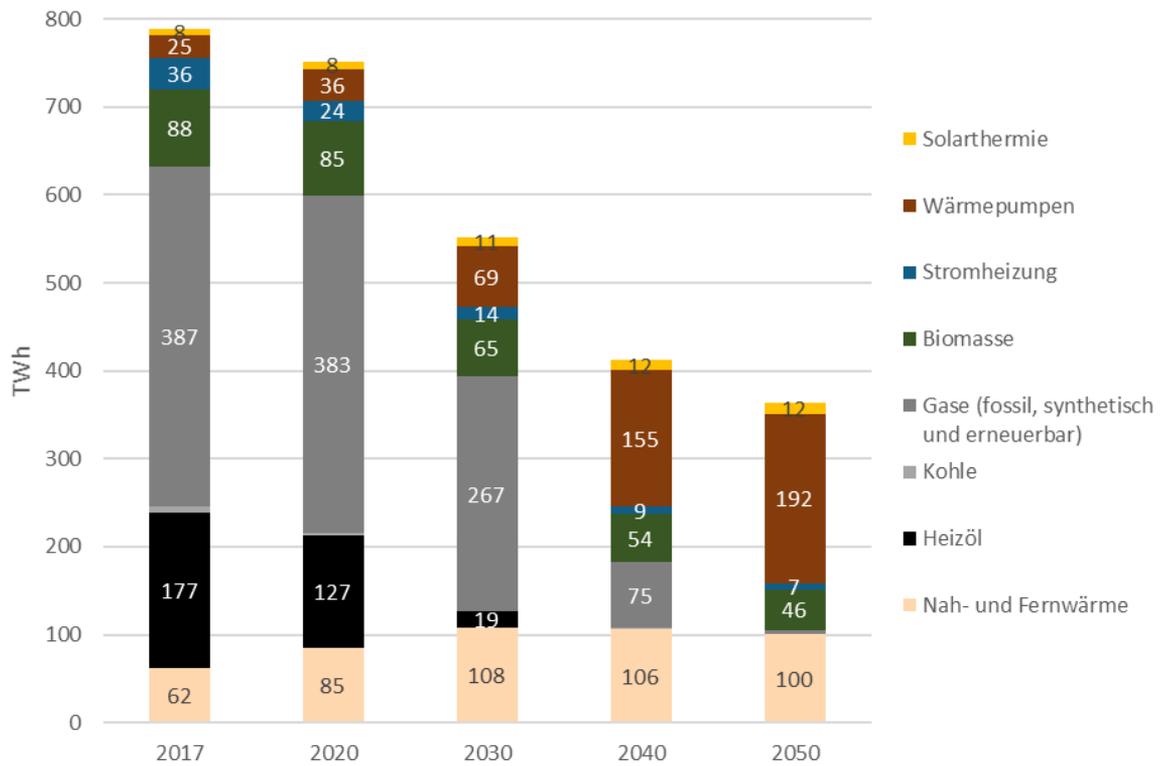
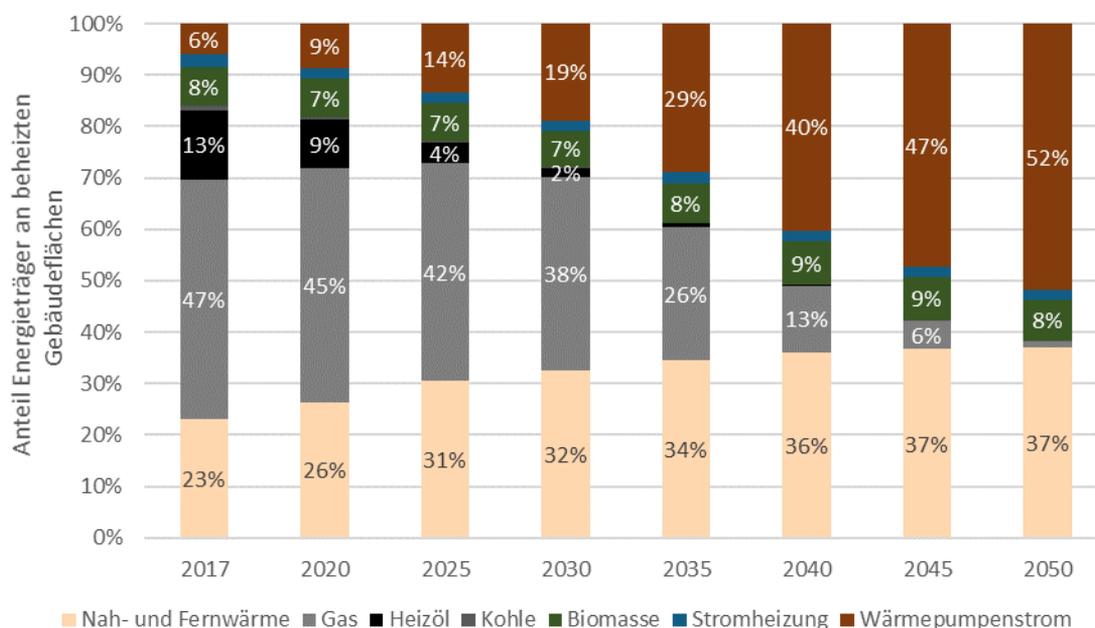


Abbildung 12 zeigt die Anteile der Energieträger an der beheizten Gebäudefläche im Zeitraum 2017 bis 2050. Aufgrund der effizienten Sanierungen ist der Anteil der Biomasseheizungen an den gesamten Heizungssystemen mit 8 % geringer als im PtG-Szenario. Während die Anzahl an Neuinstallationen von Gas- und Ölheizungen kontinuierlich sinkt, steigen die Anschlüsse an Nah- und Fernwärme und installierten Wärmepumpen über den gesamten Zeitraum deutlich. Im Jahr 2050 bestimmen diese knapp 90 % der beheizten Gebäudefläche.

Abbildung 12: Anteil der Energieträger an der beheizten Gebäudefläche im Szenario „Fokus Strom“

3.2.2 SysWärme – Systemische Herausforderung der Wärmewende

In der vom Umweltbundesamt herausgegebenen Studie „Systemische Herausforderungen der Wärmewende“ werden Szenarien aus zwei Zielbereichen analysiert. Zielbereich 1 beschreibt einen nahezu klimaneutralen Gebäudebestand. Das heißt, der nicht-erneuerbare Primärenergiebedarf des gesamten Gebäudebestandes sinkt um mindestens 80 % bezogen auf das Ausgangsjahr 2008 (Bilanzierungsmethodik der EnEV 2014, Primärenergiefaktoren aus der DIN-V 18599 (2016)). Zielbereich 2 befasst sich mit einer THG-Minderung um mindestens 95 % bis 2050, also dem Sinken der äquivalenten CO₂-Emissionen Deutschlands im Vergleich zu 1990 um mindestens 95 %.

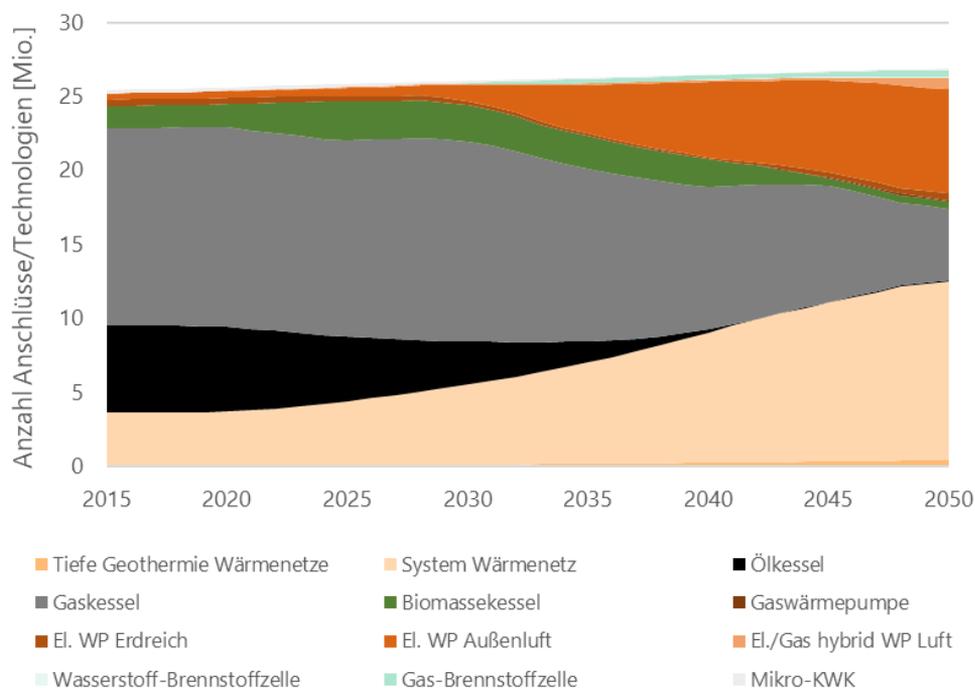
Der Referenzzielpfad in der Studie ist definiert durch eine Reduktion der energiebedingten CO₂-Emissionen um 100% in den Sektoren Energiewirtschaft, Gebäude, Verkehr und Industrie bis zum Jahr 2050. Zusätzlich ist eine CO₂-Minderung um 50% gegenüber 1990 bis zum Jahr 2030 vorgegeben. Im Modell sind drei Sanierungstiefen [unsaniert, vollsaniert (in Anlehnung an das Neubaubniveau der EnEV 2016) und vollsaniert plus (Passivhaus)] abgebildet. Sowohl die Sanierungsrate als auch die Sanierungstiefe sind im Referenzzielpfad vorgegeben (siehe Tabelle 1). Die Zusammensetzung der Wärmeversorgungssysteme wird mit dem Energiesystemmodell REMod optimiert. Wie in der Tabelle dargestellt ist jedoch der Anteil an elektrischen Wärmepumpen auf 32% begrenzt.

Zusätzlich zum Referenzpfad wurden drei Sensitivitäten gerechnet, die identifizierten Risiken (unzureichende Sanierungsrate, unzureichende Sanierungstiefe und unzureichender Fuel-Switch im Gebäudebereich) Rechnung tragen. Nur die in Tabelle 1 angezeigten Parameteranpassungen wurden im Vergleich zum Referenzzielpfad angepasst.

Tabelle 1: Parametrierung des Referenzielpfades und drei Risikosensitivitäten

Referenzielpfad	Risiko	Parametrierung der Sensitivität
Sanierungsrate: 2021 - 2030: 2,3 % 2031 - 2040: 2,5 % 2041 - 2050: 2,6 %	Sensitivität 1: Unzureichende Sanierungsrate	Sanierungsrate: 2021 - 2030: 1,0 % 2031 - 2040: 1,1 % 2041 - 2050: 1,2 %
Sanierungstiefe: 34 % der sanierten Gebäude vollsaniert, 66 % vollsaniert plus; unsanierte Gebäude ergeben sich aus Sanierungsrate	Sensitivität 2: Unzureichende Sanierungstiefe	Niedrigere Sanierungstiefe: mittlere Reduktion des Nutzwärmebedarfs heute unsanierter Gebäude um 13 %
Wärmeversorgungssysteme: Anteil elektrische Wärmepumpen 32 % (Optimierungsergebnis)	Sensitivität 3: Unzureichender Fuel-Switch im Gebäudebereich	Wärmeversorgungssysteme: Anteil elektrische Wärmepumpen: 15 %

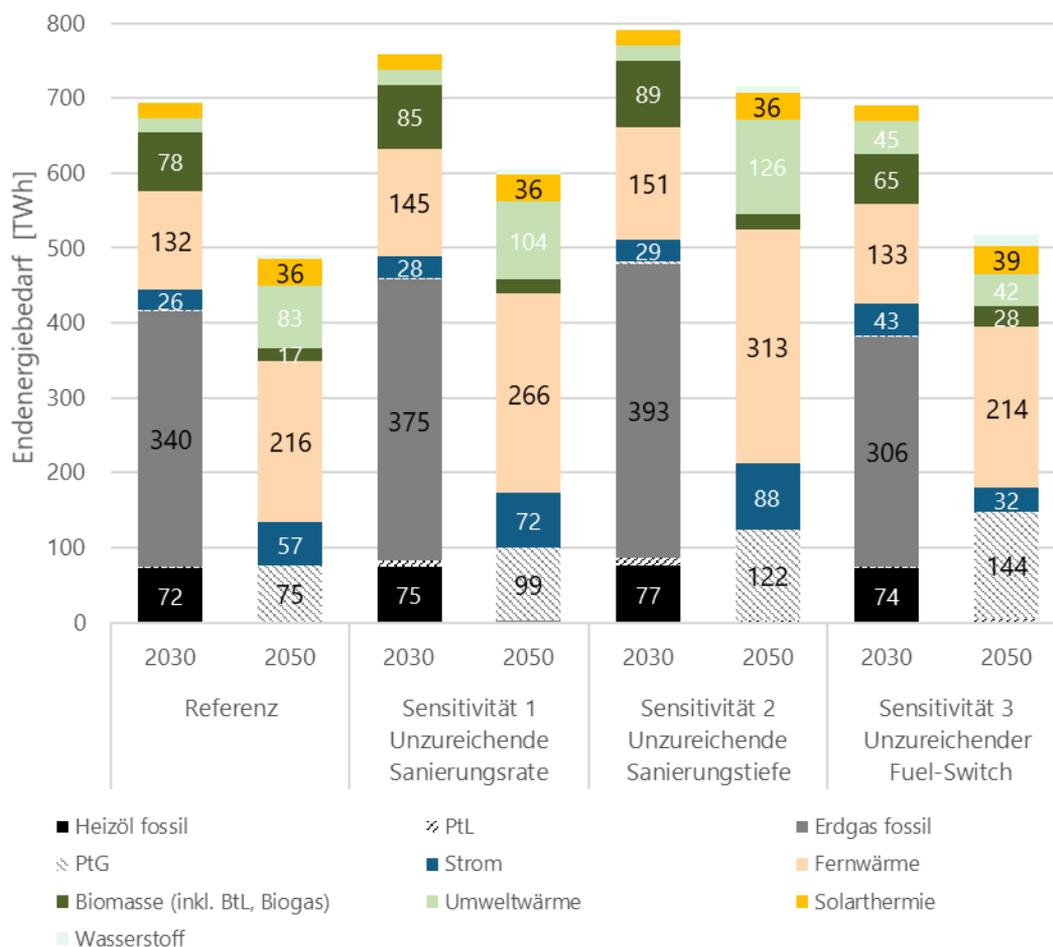
Unter diesen Voraussetzungen ergibt sich für den Referenzielpfad die in Abbildung 13 gezeigte Zusammensetzung der Wärmeversorgungssysteme. Vor allem die Anzahl der Anschlüsse an Wärmenetze sowie elektrische Luftwärmepumpen nehmen stark zu. So sind im Jahr 2050 45 % der Gebäude an ein Wärmenetz angeschlossen, 32 % der Gebäude nutzen elektrische Wärmepumpen. Die Zahl der Ölkessel nimmt beständig ab, 2042 werden sie aus dem Mix der Wärmeversorgungssysteme verdrängt. Auch bei Gaskesseln ist ein Rückgang zu verzeichnen. Die im Jahr 2050 verbliebenen 18 % Gaskessel werden mit „grünem“ Gas (z.B. PtG, Import synthetisches CH₄) betrieben. Die Biomassekessel gehen auf 2 % zurück. Nur eine untergeordnete Rolle spielen Mikro-KWK sowie Gas- und Wasserstoff-Brennstoffzellen.

Abbildung 13: Wärmeversorgungssysteme im Referenzszenario SysWärme

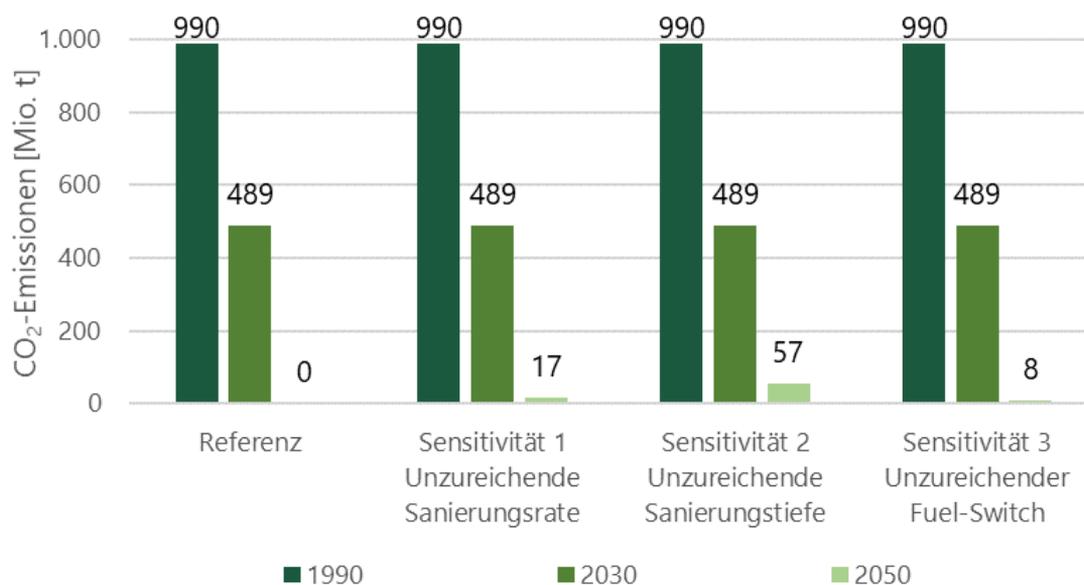
Die Endenergiebedarfe des Referenzzielpfades und der Sensitivitätsuntersuchungen sind in Abbildung 14 abgebildet. Im Referenzszenario halbiert sich der Endenergiebedarf von heute rund 1000 TWh auf circa 490 TWh im Jahr 2050. Im Jahr 2030 weist Sensitivität 3 (unzureichender Fuel-Switch) einen in etwa gleich hohen Endenergiebedarf von knapp 700 TWh wie das Referenzszenario auf, während eine unzureichende Sanierungsrate (Sensitivität 1) zu einem Mehrbedarf von rund 60 TWh und Sanierungstiefe (Sensitivität 2) von 100 TWh führt. 2050 erreicht Sensitivität 3 einen Mehrbedarf von rund 30 TWh. Bei Sensitivität 1 und 2 wird der Unterschied noch deutlicher: hier werden über 100 bzw. 200 TWh mehr Endenergie benötigt.

2030 werden die Mehrbedarfe durch eine unzureichende Sanierungsrate bzw. –tiefe vor allem durch den vermehrten Einsatz von Erdgas sowie einen höheren Bezug aus den Wärmenetzen gedeckt. Dieser Trend besteht auch im Jahr 2050, allerdings nicht mehr mit Erdgas, sondern mit synthetisch hergestelltem Gas. Zudem müssen auch in schlecht sanierten Gebäuden Wärmepumpen verwendet werden, was sich am Anstieg des Bedarfs an Umweltwärme und Strom zeigt.

Abbildung 14: Endenergiebedarf des Referenzzielpfad und der Sensitivitäten in Sys-Wärme



Aus den in den Sensitivitäten vorgenommenen Änderungen der Parametrierung ergeben sich folgende CO₂-Emissionen, wie sie in Abbildung 15 dargestellt sind. Für das Jahr 2030 zeigt sich, dass im Referenzszenario sowie den Sensitivitäten der im Modell vorgegebene Zielwert von 489 Millionen Tonnen CO₂ eingehalten wird. Sensitivität 1 (unzureichende Sanierungsrate) erreicht bis 2050 eine Minderung der CO₂-Emissionen um 98 %, Sensitivität 2 (unzureichende Sanierungstiefe) um 94 % und Sensitivität 3 (unzureichender Fuel-Switch) um 99 %, sodass sich hier zeigt, dass Emissionen verbleiben und unter den getroffenen Annahmen keine Klimaneutralität mit dem Modell bestimmt wird.

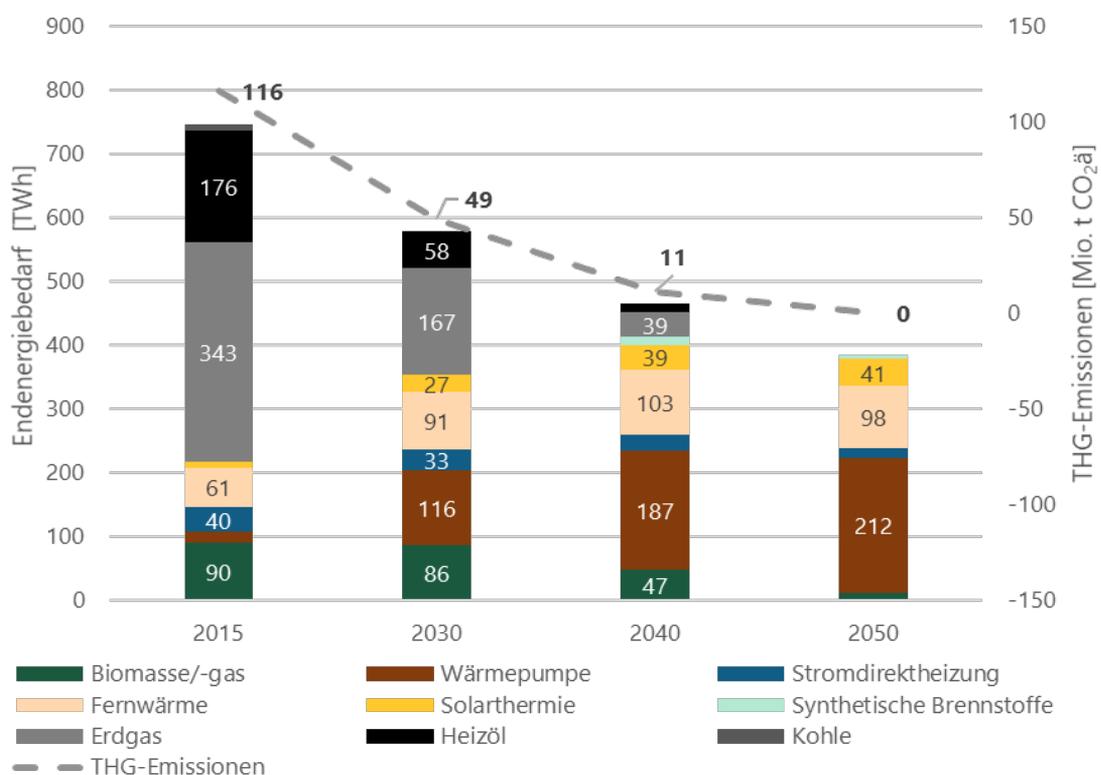
Abbildung 15: Energiebedingte CO₂-Emissionen des Referenzzielpfades und der Sensitivitäten in SysWärme

3.2.3 BDI - Klimapfade für Deutschland

In der Studie im Auftrag des Bundesverbandes der Deutschen Industrie e. V. (BDI) aus dem Jahr 2018 wurden Klimapfade mit unterschiedlichen Ambitionsniveaus und technischen Maßnahmen entwickelt. Der 95%-Pfad beschreibt eine Reduzierung der Treibhausgasemissionen um 95 % bis 2050 gegenüber dem Referenzjahr 1990. Verbleibende THG-Emissionen entstehen im Verkehrssektor und durch Prozessemissionen. Der Gebäudesektor muss im Jahr 2050 Nullemissionen aufweisen. Dafür wird eine erhöhte Sanierungsrate auf 1,9 % bei gleichzeitiger Erhöhung der Sanierungseffizienz (KfW55- und KfW70-Effizienzhaus-Niveau) unterstellt. Daneben ist der Ausbau von Wärmepumpen und Fernwärmenetzen zur Substitution von Öl- und Gaskesseln in der Wärme- und Warmwasserversorgung erforderlich. Die Fernwärmenetze werden im gleichen Zug vollständig auf erneuerbare Energien umgestellt. Wo der Umbau auf Wärmepumpen und Fernwärme nicht möglich ist, werden Biomassekessel und synthetische Brennstoffe (PtG und PtL) eingesetzt. Darüber hinaus werden effizientere Neubauten mit einem Wärmeenergieverbrauch auf KfW 40-Niveau (Passivhaus) unterstellt. Geräte und Prozesse in Haushalten und GHD werden möglichst energieeffizient gestaltet und durch Bestgeräte und Besttechnologien ersetzt.

Abbildung 16 zeigt den Endenergiebedarf und die THG-Emissionen des Reduktionspfades im Gebäudesektor und die Zusammensetzung nach Energieträgern. Der Endenergiebedarf reduziert sich bis 2050 im Vergleich zum Jahr 2015 um 49 %. Die THG-Emissionen reduzieren sich schrittweise bis auf Nullemissionen im Jahr 2050. Abbildung 17 veranschaulicht darüber hinaus die Anteile der Wärmeversorgungssysteme am Endenergiebedarf.

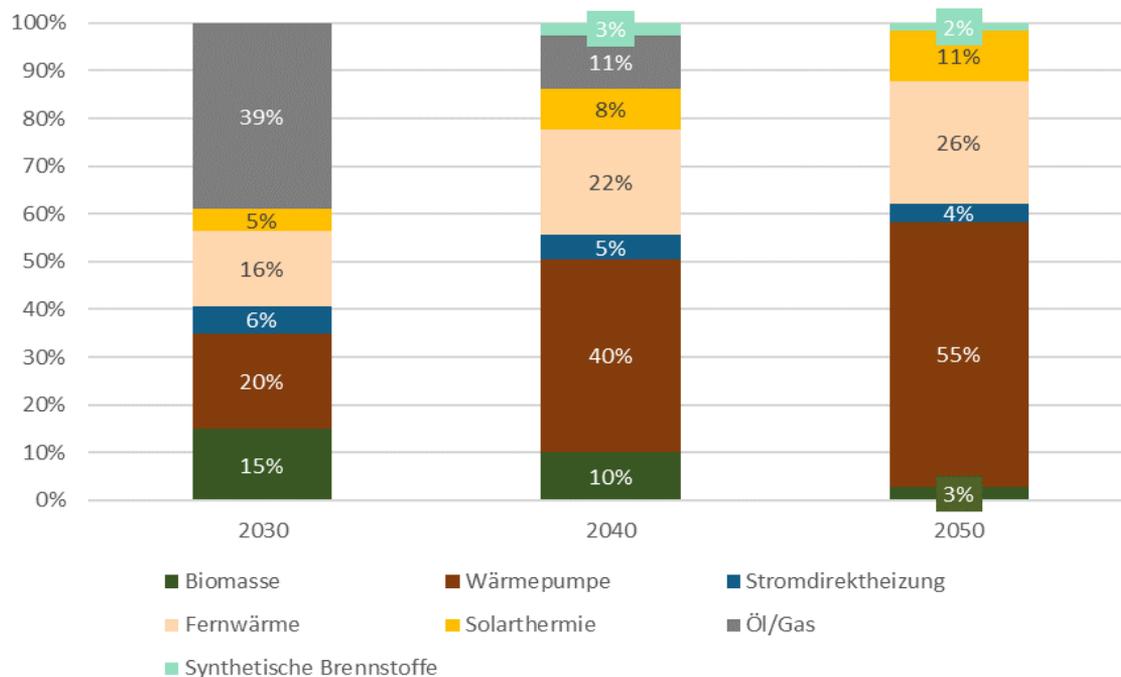
Abbildung 16: Endenergiebedarf und THG-Emissionen im 95%-Klimapfad und Zusammensetzung nach Energieträger



Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von (Gerbert et al., 2018)

Bis zum Jahr 2050 findet ein vollständiger Ersatz fossiler Energieträger statt. Der Einsatz von Erdgas verringert sich von 343 TWh im Jahr 2015 auf 39 TWh im Jahr 2040. Der Anteil von Heizöl am Endenergiebedarf reduziert sich ebenfalls und wird im Jahr 2040 nur noch geringfügig eingesetzt. Mit einem teilweisen Ersatz durch synthetische Brennstoffe, haben die Öl- und Gasheizsysteme 2040 noch einen Anteil von 14 % an der Endenergiebereitstellung. Bis zum Jahr 2050 werden die mit Erdgas betriebenen Anlagen jedoch vollständig durch Fernwärme und Wärmepumpen ersetzt.

Wärmepumpen sind dagegen zentral für die Deckung des Endenergiebedarfs. Der Anteil an der Endenergiebereitstellung steigt kontinuierlich, 2050 decken Wärmepumpen den Endenergiebedarf zu 55 %. Mit einem Anteil von 26 % am Endenergiebedarf sind zudem Fernwärmenetze ein zentrales Element. Biomasse wird dagegen nur in der Transformationsphase eingesetzt und verschwindet im Jahr 2050 nahezu, um überwiegend im Industriesektor eingesetzt zu werden. (Gerbert et al., 2018)

Abbildung 17: Anteile der Wärmeversorgungssysteme am Endenergiebedarf im 95%-Klimapfad

Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von (Gerbert et al., 2018)

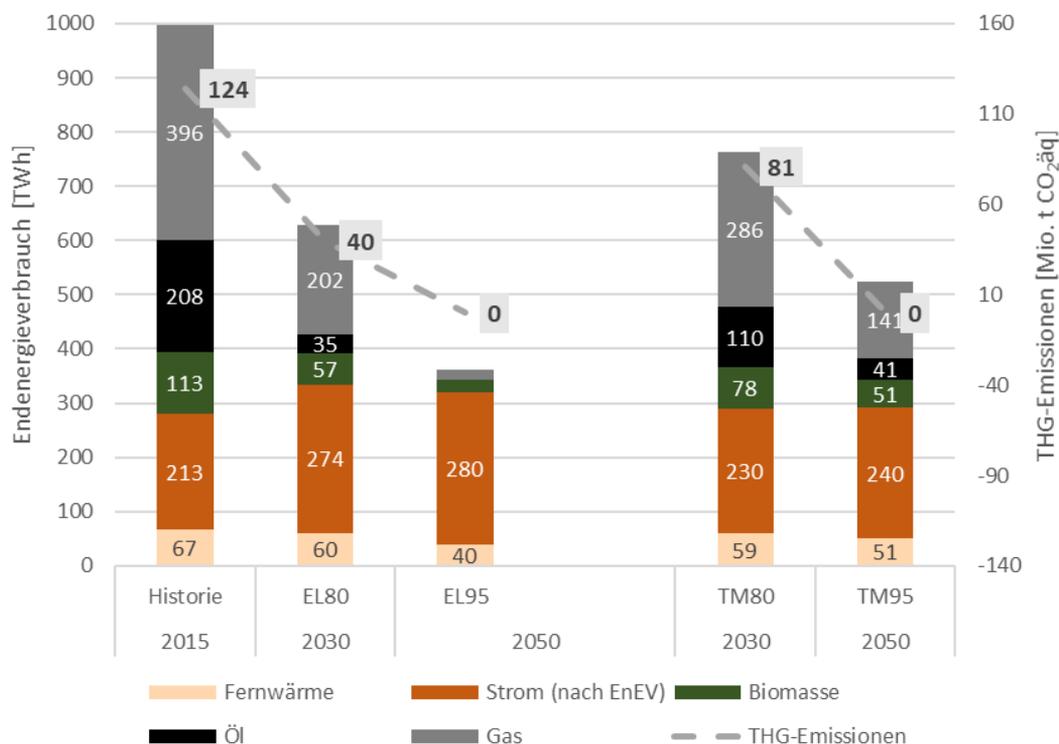
3.2.4 Dena - Integrierte Energiewende

Die Leitstudie „Integrierte Energiewende“ der Deutschen Energie-Agentur (dena) untersucht insgesamt fünf Szenarien. Es werden jeweils ein 80% sowie 95%-Klimaziel in einem Elektrifizierungsszenario und in einem Technologiemijszenario analysiert. Diese werden mit einem Referenzszenario verglichen.

Abbildung 18 zeigt die Entwicklung des Endenergiebedarfs und der THG-Emissionen von 2015 bis 2050 sowie die Zusammensetzung nach Energieträgern in den 95%-Szenarien. Da in der dena-Leitstudie zum Gebäudesektor ebenfalls die Bereitstellung von Raumwärme und Warmwasser für Industrie gezählt wird, ist der Endenergiebedarf insgesamt höher. Darüber hinaus ist unter Strom auch der Bedarf für Prozesse und Geräte aufgeführt.

Die Elektrifizierungsszenarien verlangen eine weitgehende Elektrifizierung der Endenergiebedarfssektoren bis 2050. Im Gebäudesektor bedeutet die maximale Elektrifizierung einen starken Ausbau von Elektrowärmepumpen. Im Technologiemijszenario gibt es dagegen eine breite Variation der eingesetzten Technologien und Energieträgern. Im Gebäudesektor wird ein Mix an Technologien mit Elektrowärmepumpen, Gas- und Ölheizungen eingesetzt. In beiden Szenarien wird darüber hinaus eine steigende Energieeffizienz durch hohe Sanierungsraten und -tiefen sowie hohe Investitionen in moderne Technologien im Anlagenpark unterstellt. In den 95%-Szenarien findet sich im Elektrifizierungsszenario eine Sanierungsquote von durchschnittlich 2,2 %, im Technologiemijszenario von 1,4 %. In beiden Szenarien wird eine Sanierungsquote der Anlagen größer 3,5 % unterstellt.

Abbildung 18: Endenergiebedarf und THG-Emissionen in 95%-Szenarien und Zusammensetzung nach Energieträger

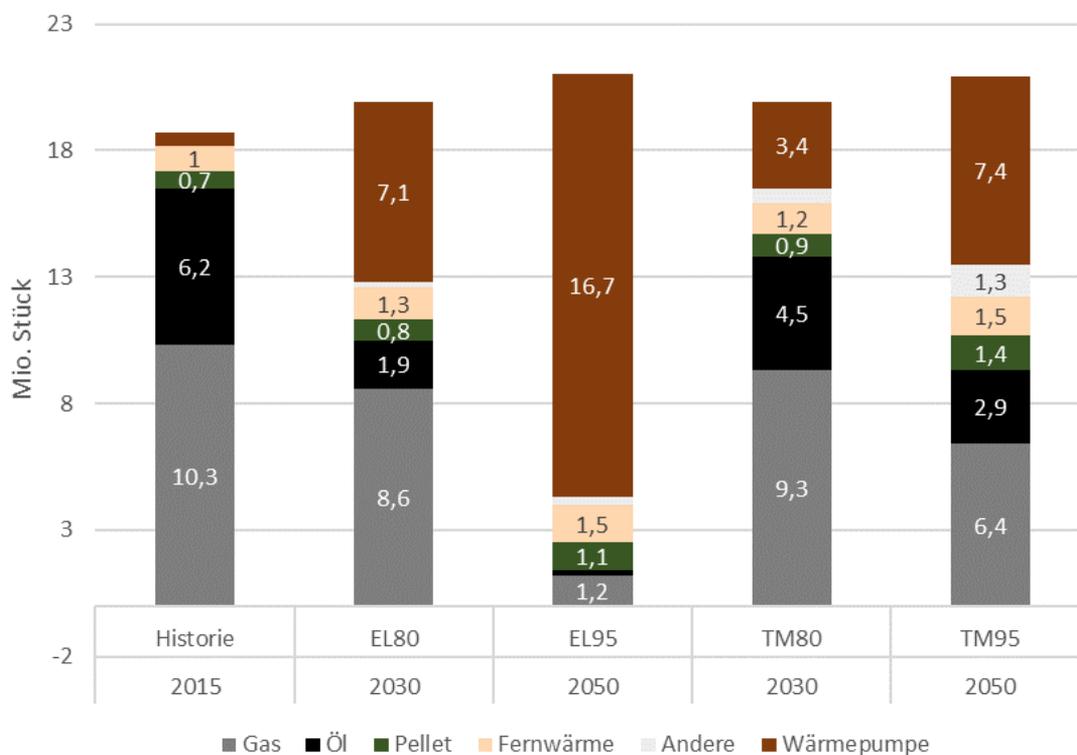


Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von (Bründlinger et al., 2018)

Im Elektrifizierungsszenario reduziert sich die Wärmenachfrage aufgrund hoher Sanierungsraten bei gleichzeitiger Erhöhung der Sanierungstiefe sowie hoher Effizienz der neu installierten Anlagen bis 2050 um 64 %. Bis zum Jahr 2030 sinkt der Einsatz von Öl und Gas bereits deutlich. Dagegen steigt der Strombedarf um fast 30 %. Der Einsatz von Biomasse reduziert sich ebenfalls, der Anteil der Fernwärme am Endenergiebedarf bleibt nahezu konstant. Bis zum Jahr 2050 erhöht sich die Stromnachfrage nochmals geringfügig. Während Gas mit einem geringen Anteil zur Endenergiebereitstellung beiträgt, was im Jahr 2050 allerdings vollständig durch synthetische Brennstoffe gedeckt wird, läuft die Nutzung von Ölheizungen aus.

Im Technologiemiixszenario sinkt der Endenergiebedarf bis 2050 nur um 48 % im Vergleich zu 2015. Durch den Einsatz von synthetischen und biogenen Energieträgern reduziert sich die erforderliche Sanierungsrate. Im Jahr 2030 haben Öl und Gas immer noch einen bedeutenden Anteil am Endenergiebedarf. Der Strombedarf durch den Einsatz elektrischer Wärmepumpen steigt im Vergleich zu 2015 nur geringfügig. Biomasse nimmt im Technologiemiixszenario dagegen eine größere Rolle ein als im Elektrifizierungsszenario ein.

Abbildung 19: Verwendete Wärmeversorgungssysteme in Mio. Stück in 95%-Szenarien



Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von (Bründlinger et al., 2018)

Abbildung 19 veranschaulicht darüber hinaus die Anzahl der Wärmeversorgungssysteme in Mio. Stück von 2015 bis 2050 in den Szenarien. Der prognostizierte Rückgang der Haushaltsgröße, der in einer steigenden Anzahl Haushalte und einer steigenden spezifischen Wohnfläche resultiert, erhöht in beiden Szenarien die Anzahl der eingesetzten Wärmeversorgungssysteme bis 2050 im Vergleich zu 2015.

Im Elektrifizierungsszenario sinkt bis zum Jahr 2030 die Anzahl an Öl- und Gasheizungen. Der steigende Strombedarf ist dem starken Zubau an elektrischen Wärmepumpen von 0,5 Mio. auf 7,1 Mio. Stück zuzuschreiben. Darüber hinaus steigt der Zubau an Pelletöfen und Fernwärme geringfügig an. Bis zum Jahr 2050 findet ein weiterer starker Zubau von Wärmepumpen statt. Im Jahr 2050 sind knapp 80 % der installierten Wärmeversorgungssysteme Wärmepumpen. Obwohl der Endenergiebedarf durch Fernwärme im Jahr 2050 nochmals gesunken ist, ist die Anzahl an Anschlussnehmern um 50 % im Vergleich zu 2015 gestiegen.

Im Technologiemixszenario verändert sich Anzahl an Erdgasheizsystemen bis zum Jahr 2030 nur minimal. Die Anzahl installierter Wärmepumpen erhöht sich von 0,5 Mio. auf 3,4 Mio. Stück. Im Jahr 2050 bestimmen Öl- und Gasheizungen immer noch 44 % der Wärmeversorgungssysteme, welche allerdings mit synthetischen Brennstoffen betrieben werden. Daneben sind die Wärmepumpen mit einem Anteil von 35 % an den installierten Systemen ein weiterer Baustein der Wärmeversorgung (Bründlinger et al., 2018).

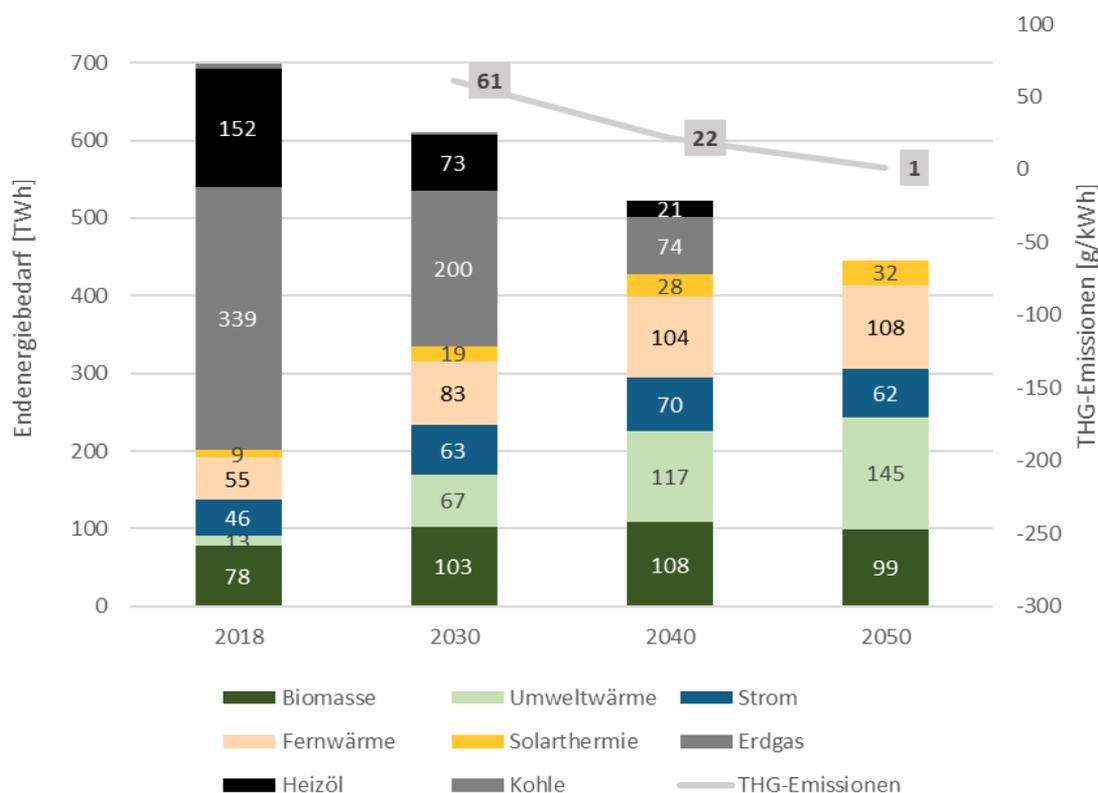
3.2.5 Agora Energiewende – Klimaneutrales Deutschland

Die Studie „Klimaneutrales Deutschland“ aus dem Jahr 2020 im Auftrag der Agora Energiewende, Agora Verkehrswende und Stiftung Klimaneutralität wurde von PROGNOSE, dem Öko-Institut und dem Wuppertal Institut erstellt. Die Studie zeichnet Wege, wie Deutschland bis zum Jahr 2050 unter Berücksichtigung von Umsetzbarkeit und Wirtschaftlichkeit Klimaneutralität erreichen kann. Dafür werden zwei Szenarien betrachtet – das Szenario „Klimaneutral 2050 (KN2050)“ mit einer THG-Emissionsminderung um 65 % bis 2030 und das Szenario „Klimaneutral Minimalvariante (KNmin2050)“ mit einer THG-Emissionsminderung um 60 % bis 2030 (im Vergleich zu 1990). Da unter anderem die spezifische Wohnfläche steigt, die Mobilität nicht eingeschränkt und ein weiterhin hohes Produktionsniveau der Industrie unterstellt wird, werden die Szenarien nach Aussage der Autoren als realistisch-ambitionierte Szenarien beschrieben.

Für eine Minderung der THG-Emissionen um 65 % bis 2030 sind im Gebäudesektor eine Erhöhung der Sanierungsrate auf 1,6 %, sowie ein starker Ausbau der Wärmenetze und der Nutzung von Wärmepumpen notwendig. Im Jahr 2050 sind nahezu alle Gebäude nach höchsten Effizienzstandards gebaut oder saniert. Der weitere Ausbau der Wärmenetze sowie die Umstellung der Wärmerversorgungssysteme ermöglichen eine Reduktion der THG-Emissionen um 95% bis 2050.

Abbildung 20 zeigt den Endenergiebedarf für Raumwärme und Warmwasser sowie die THG-Emissionen der Jahre 2018 bis 2050 bei einer Reduktion der Emissionen um 65% bis 2030 (Basis 1990).

Abbildung 20: Klimaneutrales Deutschland (Agora) – Endenergiebedarf und THG-Emissionsminderungen

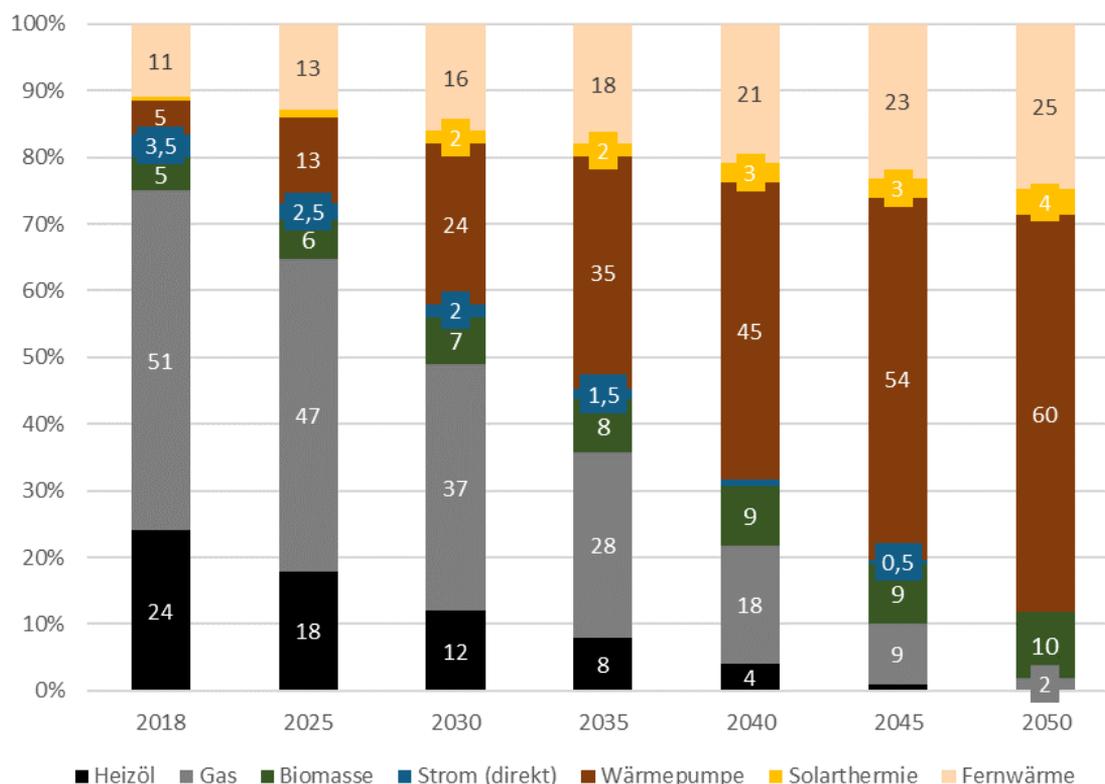


Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von (Agora Energiewende, 2020)

Ausgehend von 2018 sinkt der Endenergiebedarf bis 2030 um 13 % auf 610 TWh, bis 2050 um 36 % auf 446 TWh. Bis 2050 findet ein vollständiger Ersatz fossiler Energieträger statt. Im Jahr 2030 hat Erdgas mit 200 TWh einen Anteil von 33 % am Endenergiebedarf, in den Jahren 2040 und 2050 reduziert sich dieser auf 14 bzw. 6 %. Der Anteil der Fernwärme an der Wärmebereitstellung steigt kontinuierlich. Der größte Zubau erfolgt bis 2030 mit einer Steigerung um 50 % auf 83 TWh, 2050 hat die Fernwärme einen Anteil von 24 % an der Endenergiebereitstellung. Wärmepumpen verzeichnen bis 2030 einen vierfachen Zuwachs auf 68 TWh. 2050 erreicht Umweltwärme einen Anteil von 33 % an der Endenergiebereitstellung (Agora Energiewende, 2020).

Abbildung 21 zeigt die Anteile der eingesetzten Technologien an der beheizten Wohnfläche von 2018 bis 2050. Im Szenario werden jährlich etwa drei bis vier Prozent der Wärmeversorgungssysteme ausgetauscht. Wie in der Abbildung ersichtlich, diffundieren dabei vor allem Wärmepumpen in den Anlagenbestand. Außerdem steigt die Anschlussrate der Fernwärmenetze. Der Anteil von Gasheizungen ist dagegen rückläufig und im Jahr 2050 nur noch marginal.

Abbildung 21: Klimaneutrales Deutschland (Agora) – Anteil der beheizten Wohnfläche



Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von (Agora Energiewende, 2020)

3.3 Zusammenfassung

Die in diesem Kapitel dargestellten Referenzszenarien basieren auf einer Fortschreibung derzeitiger Maßnahmen und Entwicklungen, welche nicht ausreichend für die Zielerreichung und Reduktion der Treibhausgasemissionen im Gebäudesektor sind. Im Gegensatz zum ESG-Referenzszenario beinhalten die beiden Referenzszenarien PSZ-KSPR und NECP-KSPR die Maßnahmen des Klimaschutzprogramms 2030 und erreichen deshalb eine deutlichere Reduktion des Endenergiebedarfs sowie einen höheren Anteil erneuerbarer Energien im Endenergiebedarf. Nichtsdestotrotz überschreiten die resultierenden THG-Emissionen den Zielpfad des KSG. Die dargestellten Zielszenarien untersuchen dagegen mögliche Pfade zur Zielerreichung und Dekarbonisierung im Gebäudesektor hinsichtlich einer 95% Reduktion der THG-Emissionen im Gesamtsystem. In allen Zielszenarien lässt sich eine Reduktion des Endenergiebedarfs und eine Umstellung der Wärmeversorgung feststellen. Wärmeversorgungssysteme die derzeit vor allem fossile Brennstoffe nutzen, werden bis 2050 auf synthetische Brennstoffe umgestellt, oder gegen Systeme getauscht, die erneuerbare Energie nutzen. Aufgrund der Nutzung effizienterer Wärmeversorgungssysteme und Sanierungsmaßnahmen an Gebäuden, wird die gasnetzbasierende Wärmeversorgung in allen Szenarien reduziert. Dagegen werden Fern- und Nahwärmenetze in allen Szenarien als wichtige Infrastruktur gesehen, da diese höchste Flexibilität und Kombinationsmöglichkeiten für die zukünftige Wärmeerzeugung ermöglichen und neben lokaler EE-Wärme auch strombasierte Wärmeerzeugung oder synthetische EE-Brennstoffe verwendet werden können.

Aus der Analyse lassen sich drei mögliche Pfade ableiten. Zielszenarien mit einer geringen Sanierungsaktivität erreichen eine vollständige Reduktion der Treibhausgasemissionen durch die Nutzung von synthetischen Brennstoffen in Gas- und Ölkesseln. Gasbasierte Technologien sind die zentralen Wärmeversorgungssysteme, bis 2050 finden umfassende Neuinstallationen statt. Daneben erfolgt ein moderater Ausbau von Wärmepumpen und Wärmenetzen.

Bei einer zunehmenden Elektrifizierung der Wärmeversorgung steigt dagegen die Sanierungsaktivität, aus Gründen der Effizienz und Versorgungssicherheit. Es findet ein Austausch von Gas- und Ölheizungen statt, der Ausbau von Wärmepumpen und Wärmenetzen wird forciert. Als dritter Pfad wird darüber hinaus auch die Kombination einer hohen Sanierungsaktivität mit der Fernwärmeversorgung als zentrales Wärmeversorgungssystem analysiert.

Szenarien mit einer kostenbasierten Optimierung des Gesamtsystems führen stärker zu dem Ausbau von Wärmepumpen und Fernwärme. Aufgrund sehr hoher Kosten synthetischer Brennstoffe, werden in diesen Szenarien synthetische Brennstoffe und Biomethan nur dort eingesetzt, wo der Einsatz von Wärmepumpen und Fernwärme nicht wirtschaftlich ist.

4 Rahmendaten für die Szenarientwicklung

In diesem Kapitel werden zunächst allgemeine Rahmendaten für die Modellierung, wie Bevölkerungs- und Wohnflächenentwicklung und die Entwicklung der Endverbraucherpreise erläutert. Darüber hinaus werden spezifische Annahmen für das Trendszenario sowie das Zielszenario beschrieben. Tabelle 2 zeigt eine Übersicht der Rahmenbedingungen mit Angaben zur Herkunft der Daten.

Tabelle 2: Übersicht der Rahmenbedingungen

Rahmendaten	Quelle
Bevölkerungsentwicklung	Projektionsbericht 2021
Wohnflächenentwicklung	Abstimmung mit BBSR
Temperaturentwicklung	Testreferenzjahre (TRY) des Deutschen Wetterdienst
Entwicklung der Endverbraucherenergiepreise	Projektionsbericht 2021
Preisprojektionen für synthetisches Methan, Wasserstoff und synthetische Kraftstoffe	Fraunhofer ISE (basierend auf (Christoph Hank 2020 (submitted)))
BEHG CO ₂ -Preise	Projektionsbericht 2021
Finanzielle Förderung von Wärmeversorgungssystemen und Energieeffizienzmaßnahmen	BEG und MAP
Spezifische Investitionen in Wärmeversorgungstechnologien	Fraunhofer ISE (basierend auf (Sterchele et al. 2020b)), Fichtner et al., 2019; Maas & Schlitzberger, 2017 und eigene Berechnungen
Effizienzen der Wärmeversorgungstechnologien	Fraunhofer ISE (basierend auf (Sterchele et al. 2020b))
Kostendegressionen der Wärmeversorgungstechnologien	Fraunhofer ISE (basierend auf (Sterchele et al. 2020b))

4.1 Allgemeine Rahmendaten

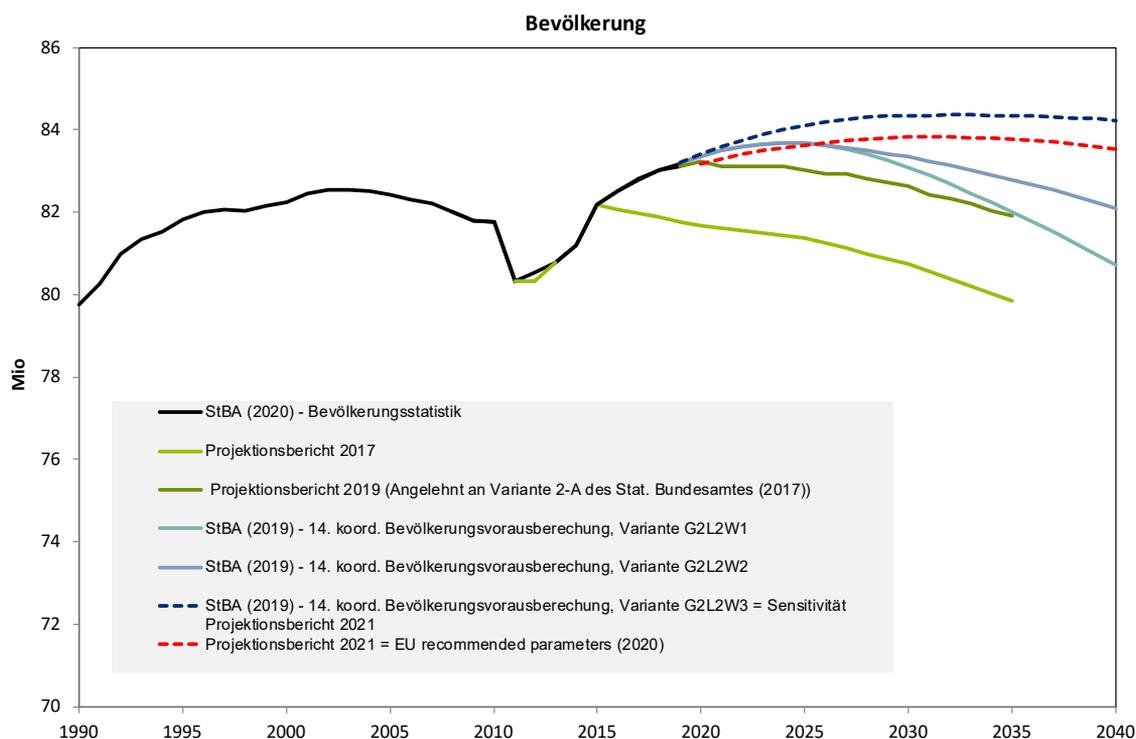
4.1.1 Bevölkerungsentwicklung

Die demographische Entwicklung ist ein entscheidender Faktor bei der antizipierten Berechnung von Treibhausgasemissionen. Zum einen besteht ein direkter Zusammenhang zwischen Bevölkerung und THG-Emissionen bei der Nutzung von Brennstoffen für bspw. Transport. Zum anderen wird die Brennstoffnutzung durch die Erwerbstätigkeit der Bevölkerung beeinflusst.

Abbildung 22 zeigt die aktuellen Projektionen zur Bevölkerungsentwicklung im Vergleich. Im Jahr 2011 wurden die Bevölkerungszahlen nach Veröffentlichung des Zensus 2011 in der Bevölkerungsstatistik des Statistischen Bundesamtes (StBA) um ca. 1,5 Mio. korrigiert. Im Jahr 2019 hat das Statistische Bundesamt die 14. koordinierte Bevölkerungsvorausberechnung veröffentlicht. Die Varianten dieser Berechnung unterscheiden sich durch unterschiedliche Annahmen zur Zuwanderung.

In dieser Studie wird die Prognose des Projektionsbericht 2021 verwendet, die wiederum der EU-Recommendation entspricht. Im Ageing Report veröffentlicht die Europäische Kommission eine Bevölkerungsentwicklung für jedes Land. Die EU-Recommendation entspricht ungefähr der 14. koordinierten Bevölkerungsvorausberechnung des StBA. Für Deutschland wird eine Geburtenrate angenommen, die kontinuierlich auf 1,6 Kinder pro Frau bis zum Jahr 2040 ansteigt, im Jahr 2060 beträgt die Lebenserwartung für Mädchen 88,3 und für Jungen 84,8 Jahre. Die Nettozuwanderung sinkt ausgehend von 316.130 Personen im Jahr 2020 auf 241.000 Personen im Jahr 2040. Die EU-Recommendation liegt damit zwischen den Varianten G2L2W2 und G2L2W3 des Statistischen Bundesamtes.

Abbildung 22: Aktuelle Bevölkerungsprojektionen im Vergleich



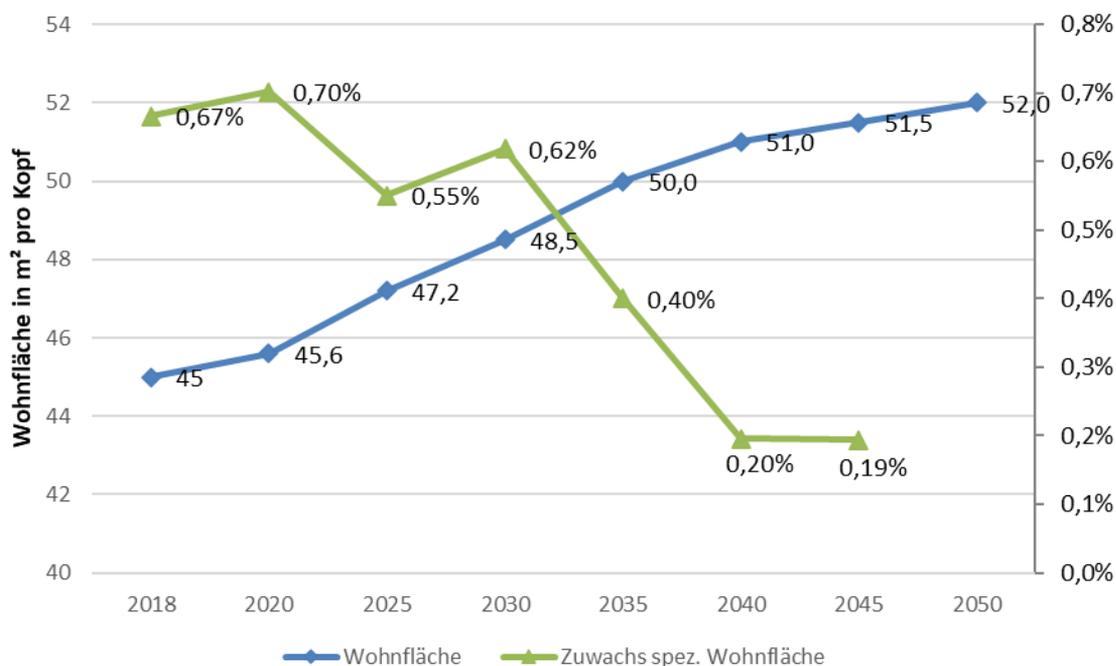
Quelle: (Öko-Institut et al., 2020)

4.1.2 Wohnflächenentwicklung

Selbst in Zeiten einer schrumpfenden Bevölkerung wachsen die für Wohnen genutzten Gebäude- und Freiflächen (Bierwirth 2015) sowie die Anzahl der Haushalte (Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung 2015). Seit 2002 ist die Wohnfläche pro Kopf von 41,4 m² auf 46,7 m² im Jahr 2018 angestiegen (Destatis 2019).

Abbildung 23 zeigt die in der Szenarienanalyse angenommene Entwicklung der spezifischen Wohnfläche im Zeitraum 2018 bis 2050. Bis 2050 steigt die spezifische Wohnfläche um insgesamt 7 auf 52 m² pro Kopf. Bis zum Jahr 2030 entspricht die angesetzte Entwicklung der Wohnungsmarktprognose des BBSR (Bundesinstitut für Bau- Stadt- und Raumforschung, 2015), ab 2030 wird angenommen, dass zwar die spezifische Wohnfläche steigt, sich allerdings die Entwicklung verlangsamt.

Abbildung 23: Angenommene Entwicklung der Wohnfläche im Zeitraum 2018 bis 2050



Quelle: Eigene Darstellung

4.1.3 Temperaturentwicklung

Bei der Berechnung des Endenergiebedarfs des Trend- und Zielszenarios wird der Einfluss des Klimawandels in Form von steigenden Temperaturen berücksichtigt, da dieser bis zum Jahr 2050 Einfluss auf den Wärme- und Kältebedarf hat.

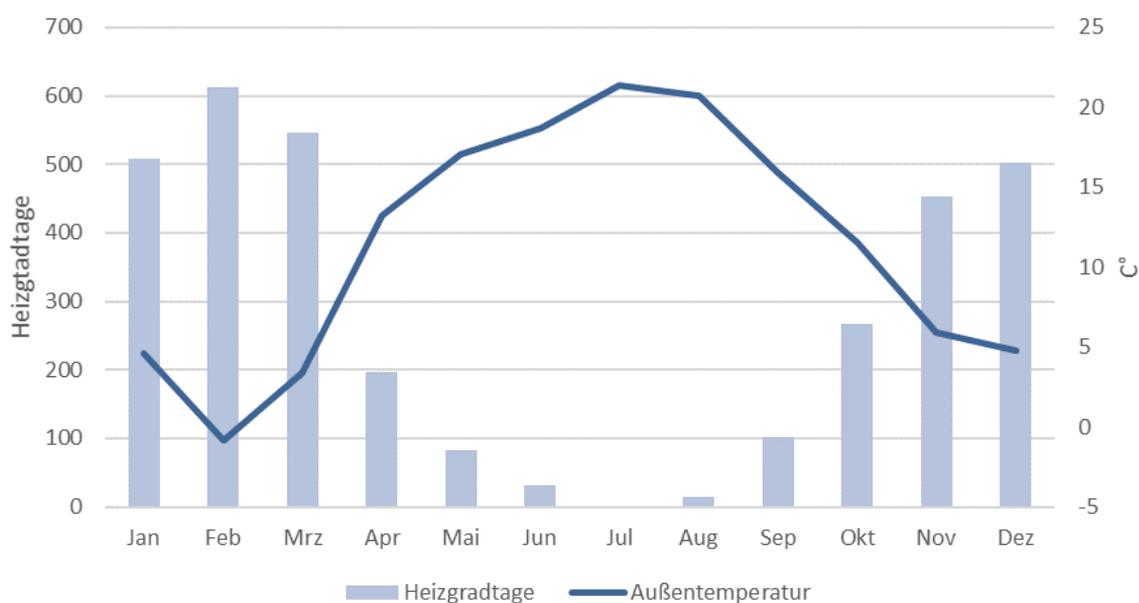
Für die Berechnung der Temperaturentwicklung bis 2050 aufgrund steigender THG-Emissionen werden die Testreferenzjahre des Deutschen Wetterdienstes (DWD) verwendet. Die Testreferenzjahre umfassen Daten für ein mittleres Jahr, sowie für einen extremen Sommer und Winter. Die Berechnung der Klimamodelle basiert auf repräsentativen Konzentrationspfaden (RCPs), die für den fünften IPCC-Bericht definiert wurden. Die RCPs basieren auf Annahmen über die Zunahme der Wärmestrahlung (in Watt) in Folge des Klimawandels und den zugehörigen Emissionspfaden. Die Testreferenzjahre sind eine Kombination aus den Szenarien RCP 4.5 und RCP 8.5. Im Szenario RCP 4.5 steigen die THG-Emissionen bis 2050 und stabilisieren sich dann auf einem Niveau mit 650 ppm CO₂e bei einem Temperaturanstieg von 1,8 bis 2°C bis 2100. Im Szenario RCP 8.5 mit einer Strahlung von 8,5 Watt pro m² steigen die THG-Emissionen kontinuierlich und verursachen bis 2100 eine Konzentration von 1370 ppm CO₂e in der Atmosphäre und einen Temperaturanstieg von 4°C. Nach aktuellen Entwicklungen ist das RCP8.5-Szenario realistischer. Da jedoch zunehmend Anstrengungen unternommen werden, den anthropogenen Einfluss zu reduzieren, stellen die Zukunftsjahre der Testreferenzjahre deshalb eine Kombination aus RCP4.5-sowie RCP-8.5-basierten Szenarien dar (DWD, 2017; Spinoni et al., 2018).

Zur Berechnung in Invert/ee-Lab ist die Entwicklung der Heizgradtage entscheidend. Abbildung 24 zeigt den Mittelwert der in Invert/ee-Lab hinterlegten Temperaturen und Heizgradtage für das Jahr 2018. Insgesamt sind neun Städte in Deutschland hinterlegt, welche sich auf das gesamte

Bundesgebiet verteilen. Als Ausgangswert ergeben sich für das Jahr 2018 im Mittel 3317 Heizgradtage.

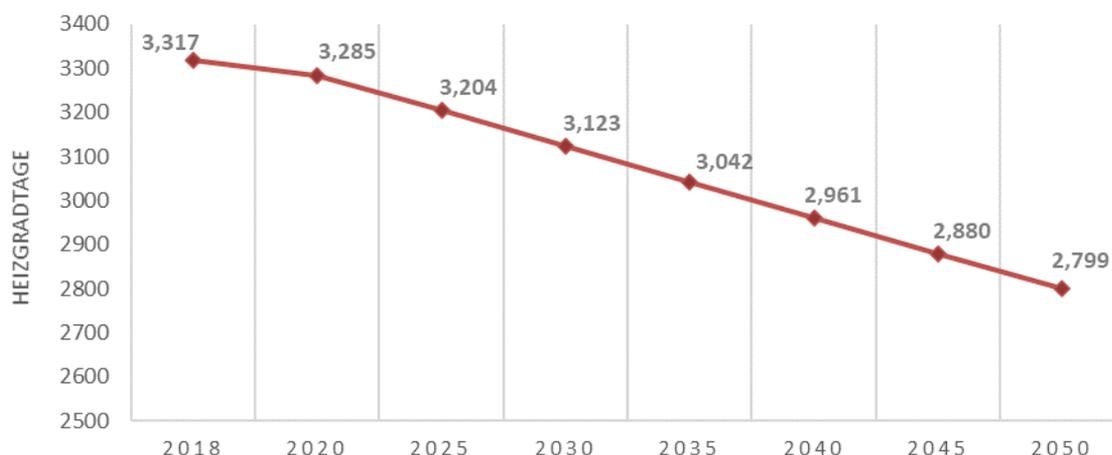
Abbildung 23 zeigt die Mittelwerte der Außentemperatur und Heiztage nach Monaten im Jahr 2018. Die Heizgradtage werden in Tagen angegeben (hinterlegt sind 9 Städte verteilt auf das ganze Bundesgebiet), die Außentemperatur wird in Celsius angegeben.

Abbildung 24: Mittelwerte der Außentemperatur und Heizgradtage nach Monaten im Jahr 2018



Der hinterlegte Konzentrationspfad hat einen Einfluss auf die Temperaturen und somit auch auf die Heizgradtage. Für die Berechnung wird die Temperaturentwicklung der Testreferenzjahre von 2015 bis 2045 (Daten bis 2050 liegen in den Testreferenzjahren nicht vor) in sechs deutschen Städten herangezogen und die Reduktion der Heizgradtage berechnet. Die Differenz aus der Summe der Heizgradtage, die sich für 2015 und 2045 ergeben, wurde schließlich durch die Anzahl an Jahren dividiert, um die jährliche Reduktion der Heizgradtage zu erhalten. Durch den Anstieg der Temperaturen resultiert eine jährliche Reduktion der Heizgradtage um 16 Tage. Abbildung 25 zeigt die jährliche Entwicklung der Heizgradtage im Zeitraum 2018 bis 2050.

Abbildung 25: Jährliche Entwicklung der Heizgradtage im Zeitraum 2018 bis 2050

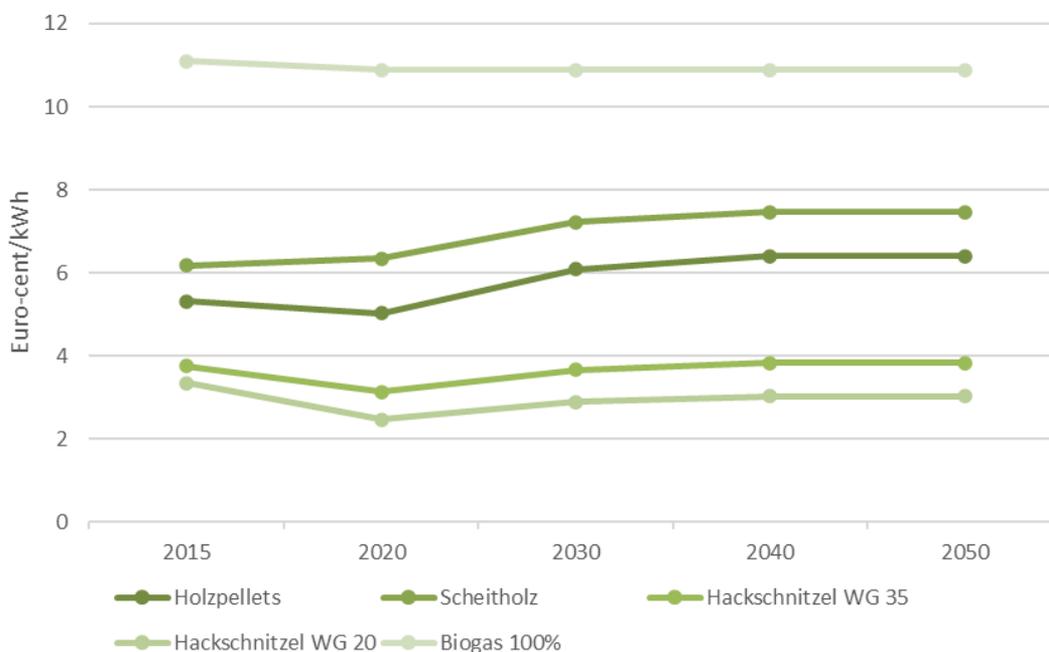


Quelle: Eigene Berechnungen (IREES) auf Basis von (Bundesinstitut für Bau- Stadt- und Raumforschung, 2017)

4.1.4 Entwicklung der Endverbraucherenergiepreise

Die Annahmen zur Entwicklung der Endverbraucherenergiepreise werden aus dem Projektionsbericht 2021 übernommen. Es werden jeweils die Verbraucherpreise für Private Haushalte (PHH) verwendet. In Abbildung 26 sind die Endverbraucherpreise für Haushalte für Biomasse und Biogas dargestellt. Da die Preise für Holzpellets, Scheitholz und Hackschnitzel an den Preis für Öl gekoppelt sind, findet aufgrund der CO₂-Steuer eine Steigerung der Preise von 2020 bis 2030 statt.

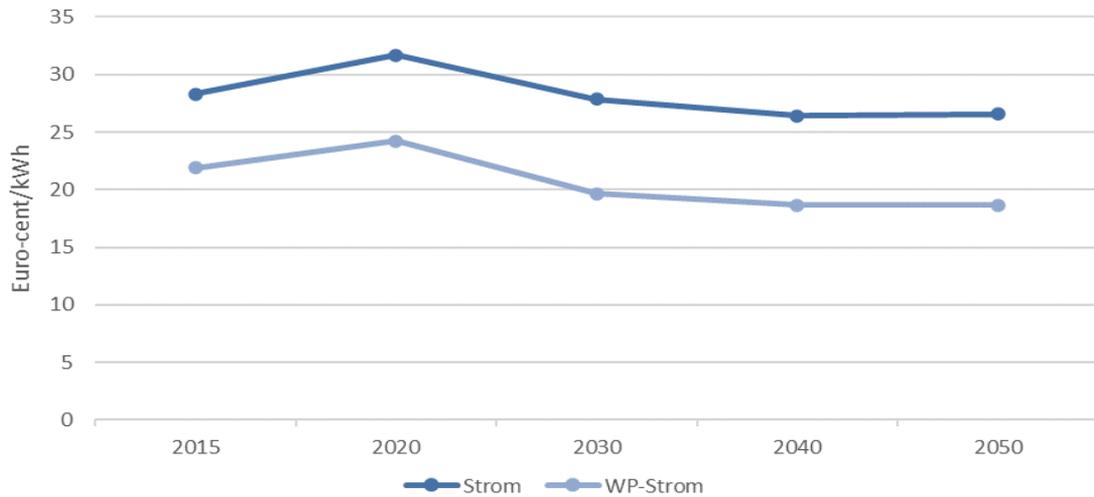
Abbildung 26: Endverbraucherpreise Haushalte Biomasse und Biogas (inkl. MwSt.)



Quelle: (Öko-Institut et al., 2020)

In Abbildung 27 sind die Endverbraucherpreise für Strom für Haushalte dargestellt. Dabei wird in Strom und günstigeren Strom für Wärmepumpen unterschieden.

Abbildung 27: Endverbraucherpreise Haushalte Strom (inkl. MwSt.)

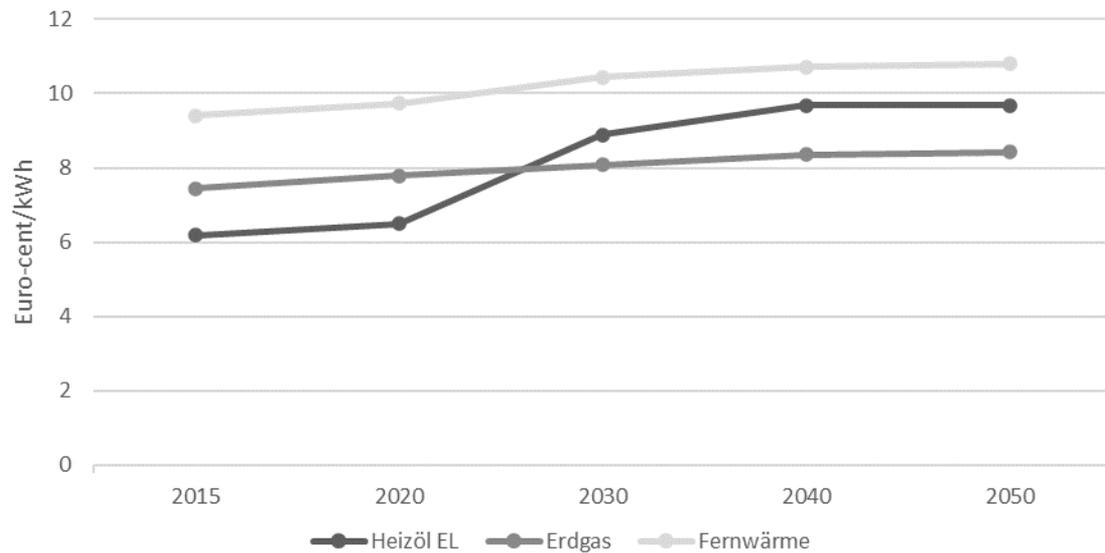


Quelle: (Öko-Institut et al., 2020)

Anmerkung zur Grafik: Vorläufige Endverbraucherpreise aus Politikszenerien IX

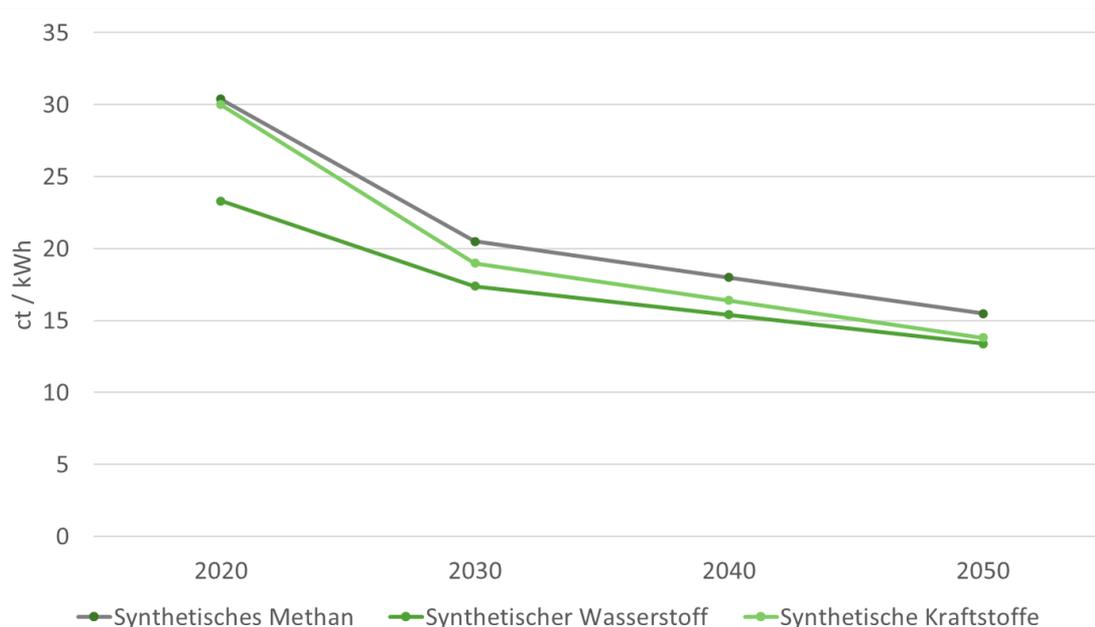
Abbildung 28 zeigt die Endverbraucherpreise für Haushalte für fossile Brennstoffe und Fernwärme. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die dargestellten Endverbraucherpreise keine CO₂-Steuer enthalten.

Abbildung 28: Endverbraucherpreise Haushalte fossile Brennstoffe und Fernwärme



Quelle: (Öko-Institut et al., 2020)

Abbildung 29: Preisprojektionen der Großhandels-Importpreise für synthetisches Methan, synthetische Kraftstoffe und synthetischen Wasserstoff



Quelle: Berechnungsmethode nach (Christoph Hank 2020 (submitted)), Fraunhofer ISE

Die angenommenen Preise für den Import synthetischer Energieträger (Methan, Wasserstoff sowie Kraftstoffe) sind in Abbildung 29 dargestellt. Die Methode zur Bestimmung der Preisannahmen der synthetischen Energieträger beruhen auf Untersuchungen von Hank (Christoph Hank 2020 (submitted)) und wurden mit Expert:innen des Wasserstoffbereichs am Fraunhofer ISE evaluiert. Die Kosten beinhalten die Herstellung, Speicherung sowie den Transport (inkl. Verflüssigung) der synthetischen Kraftstoffe. Allen Kostenprognosen ist eine Lernkurve der für die Herstellung von synthetischen Brennstoffen benötigten Technologien, unterstellt. Ebenso wurden Annahmen für Stromkosten und Transportkosten aus den betrachteten Herstellungsländern in Nordafrika getroffen. Im Zielszenario wurde angenommen, dass ein Import erst ab dem Jahr 2030 möglich ist, da erst dann die benötigte Infrastruktur verfügbar sein kann. Während Wasserstoff als Ausgangsprodukt für die weiteren Syntheseschritte zu diesem Zeitpunkt noch am günstigsten importiert werden kann, gleichen sich die Preise mit denen von synthetischen Kraftstoffen bis zum Jahr 2050 an. Entscheidend für die Verschiebung der Verhältnisse der Energieträger ist hierbei der Verflüssigungsprozess, welcher für den Transport von Wasserstoff aber auch Methan notwendig ist, bei flüssigen Kraftstoffen jedoch entfällt. Generell ist anzumerken, dass die Importpreise zum heutigen Zeitpunkt größeren Unsicherheiten unterliegen.

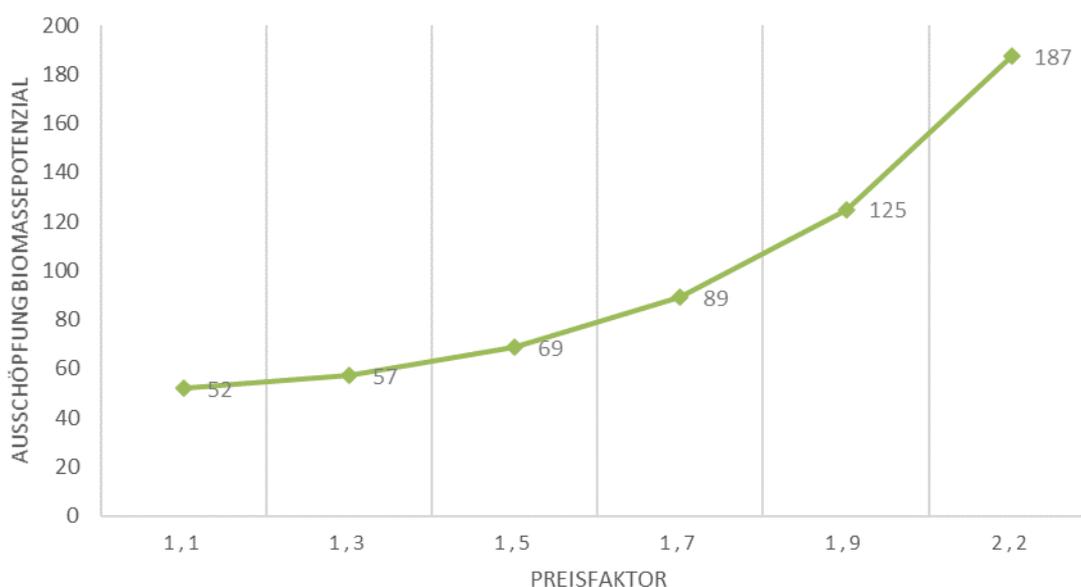
4.1.5 Verfügbarkeit von Biomasse

In beiden Szenarien wird Biomasse nur in begrenztem Umfang und bis 2050 nicht mehr eingesetzt wie heute. Diese Annahme entspricht dem Vorgehen in den Politikszenerarien X. Im Trendszenario ist für den Gebäudesektor ein Potenzial von jährlich 52 TWh hinterlegt. Dieses Potenzial kann überschritten werden, dabei werden vom Modell jedoch steigende Preise berücksichtigt. Abbil-

Abbildung 30 zeigt die Kostenpotenziale für Biomasse im Trendszenario. Bei einer zunehmenden Ausschöpfung des Potenzials wird ein steigender Faktor auf die Energiepreise (siehe 4.1.4) angewendet. Würde das Potenzial an Biomasse 1,5-fach überzeichnet, würden die Preise für Biomasse um den Faktor 2,2 steigen. Darüber hinaus können im Trendszenario anders als im Zielszenario Kaminöfen bzw. Komfortheizungen bis 2050 betrieben werden, insofern sie nicht die Emissionsgrenzwerte überschreiten. Diese Öfen haben ein Potenzial von 45 TWh, die modellexogen berechnet werden.

Für das Zielszenario würde ein Gesamtpotenzial von 293 TWh in 2050 angenommen. Dies steht jedoch dem gesamten Energiesystem zur Verfügung und deren Verwendung kann frei optimiert werden.

Abbildung 30: Kostenpotenziale für Biomasse im Trendszenario

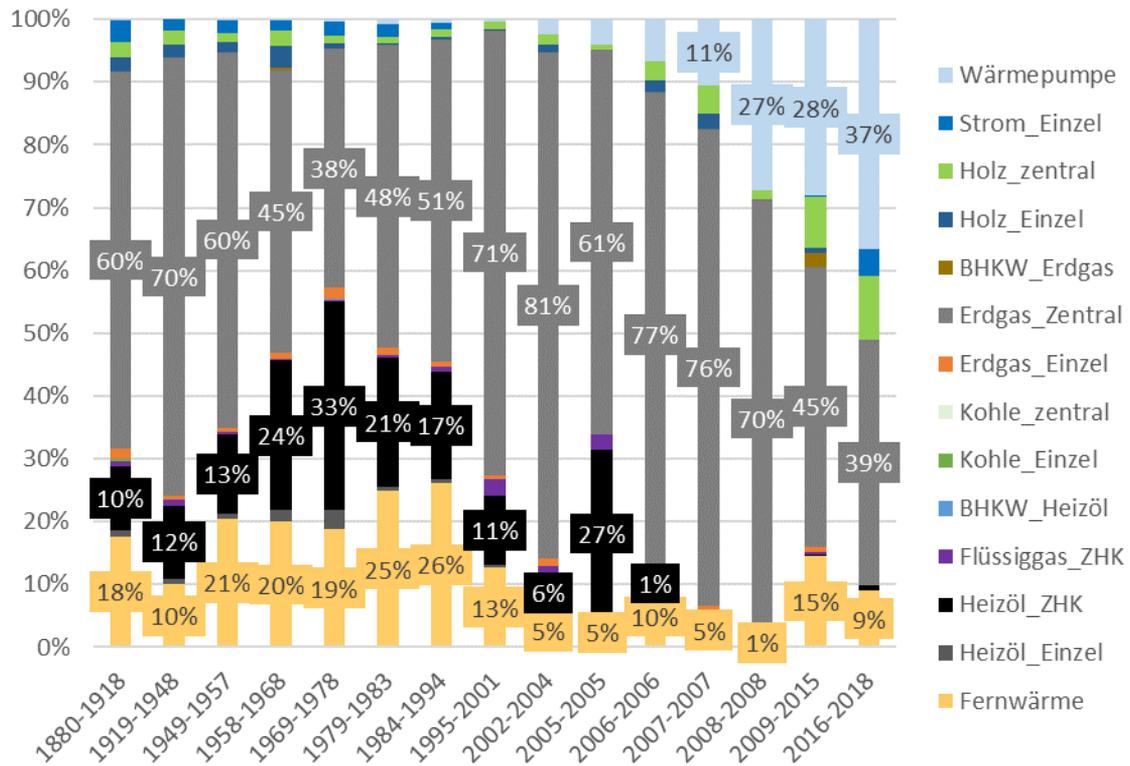


4.1.6 Installierte Wärmeversorgungstechnologien

Im Modell Invert/ee-Lab werden als Eingangsdaten eine gebäudetypologische Abbildung des Gebäudebestandes berücksichtigt (vgl. Anhang C). Das Modell bildet die Referenzgebäude über bauphysikalische Eigenschaften sowie deren Bauperiode und bereits nachträglich erfolgten Sanierungsmaßnahmen ab. Zudem werden der Bestand der installierten Wärmeversorgungstechnologien und deren Verteilung auf die einzelnen Gebäudeklassen berücksichtigt.

Abbildung 31 zeigt die installierten Wärmeversorgungssysteme und deren Verteilung auf Baualterklassen im Wohngebäudebereich.

Abbildung 31: Installierte Wärmeversorgungstechnologien im Gebäudebestand in Deutschland differenziert nach Baualterklasse der Gebäude



Quelle: Eigene Berechnung; (Cischinsky et al., 2018; StaBuA, 2019; Statische Ämter des Bundes und der Länder, 2019)

4.2 Rahmendaten für das Trendszenario

4.2.1 Ausgestaltung zentraler Politikinstrumente

Im Folgenden werden die Annahmen und die Parametrisierung der zentralen Politikinstrumente für den Gebäudebereich für das Trendszenario dargestellt.

Finanzielle Förderung von Wärmeversorgungssystemen und Energieeffizienzmaßnahmen durch die BEG und steuerliche Abschreibung Gebäudesanierung

Im Szenario werden sowohl die jährliche Mittelausstattung (Förderbudget) als auch die spezifischen Fördersätze für die einzelnen Technologien berücksichtigt. Mit Bezug auf die Mittelausstattung werden für das BEG und die steuerliche Förderung der Gebäudesanierung zusammen jährliche Mittel von **5,075 Mrd. EURO** vorgesehen, was der derzeitigen geplanten jährlichen Mittelausstattung (unter Parlamentsvorbehalt) bis zum Jahr 2024 entspricht⁸. Für das Trendszenario wird angenommen, dass die Mittel bis zum Jahr 2050 in gleicher Höhe fortgeschrieben werden.

Die spezifischen Fördersätze werden entsprechend der zum Stand November 2020 geltenden Förderrichtlinien im Markanreizprogramm sowie den KfW-Programmen zur energetischen Gebäudesanierung und zum energieeffizienten Neubau berücksichtigt. Tabelle 3 zeigt die spezifischen Fördersätze für die Wärmeversorgungssysteme, die im Trendszenario berücksichtigt werden.

Tabelle 3: Spezifische Fördersätze Wärmeversorgungssysteme entsprechend der geltenden Förderrichtlinie

Technologien	Investitionszuschuss
Biomasseanlagen	35 %
Wärmepumpen	35 %
Solarthermieanlagen	30 %
Gas-Hybridheizung ⁹	30 %
Renewable Ready Gas Brennwert ¹⁰	20 %
Zusätzliche Austauschprämie Ölheizung	10 %

Quelle: Eigene Darstellung; BAFA

Bei den energetischen Sanierungsmaßnahmen werden im Modell gebäudespezifische Sanierungspakete hinterlegt, mit denen eine Standardsanierung nach GEG oder ambitionierte KfW Sanierung erreicht werden kann. Für jedes Referenzgebäude können jedoch nur zwei KfW Standards direkt hinterlegt werden, so dass nicht alle KfW-Effizienzhausstandards entsprechend Tabelle 4 direkt im Modell hinterlegt sind. Um die Bandbreite abzudecken, werden der KfW 55 und der KfW 100 Standard mit den entsprechenden energetischen Anforderungen an die Gebäudehülle und

⁸ Zum Stand November 2020: Nach Angaben des BMF Referat IIB3 ist eine Mittelausstattung von 20,3 Mrd. EURO im Zeitraum 2021 bis 2024 geplant

⁹ Der EE-Wärmeerzeuger muss mindestens 25 % der Heizlast decken. Berechnung der Heizlast bei Solarthermie: 635 W/m²

¹⁰ Gas-Brennwertkessel mit Regelungs- und Steuertechnik, die eine spätere Einbindung erneuerbarer Energien ermöglicht. Die Umrüstung auf eine Hybridheizung muss spätestens 2 Jahre nach Installation des Gas-Brennwertkessels erfolgen.

den spezifischen Investitionen und Fördersätzen hinterlegt (vgl. 4.2.2). Im Neubau wird KfW 40 und KfW 55 als Standard hinterlegt.

Tabelle 4: Spezifische Fördersätze für energetische Sanierungsmaßnahmen

Wohngebäude

KfW-Effizienzhaus-Standard	Investitions-/ Tilgungszuschuss	Max. Investitions- / Tilgungszuschuss
Sanierung KfW 55	40 %	48.000 €
Sanierung KfW 70	35 %	42.000 €
Sanierung KfW 85	30 %	36.000 €
Sanierung KfW 100	27,5 %	33.000 €
Sanierung KfW 115	25 %	30.000 €
Sanierung KfW Denkmal	25 %	30.000 €
KfW-Einzelmaßnahmen	20 %	10.000 €
Neubau KfW 40 Plus	25 %	30.000 €
Neubau KfW 40	20 %	24.000 €
Neubau KfW 55	15 %	18.000 €

Nichtwohngebäude

KfW-Effizienzhaus-Standard	Investitions-/ Tilgungszuschuss	Max. Investitions- / Tilgungszuschuss
Sanierung KfW 55	27,5 %	275 €/ m ²
Sanierung KfW 100	20 %	200 €/ m ²
Sanierung KfW Denkmal	17,5 %	175 €/ m ²
KfW-Einzelmaßnahmen	20 %	200 €/ m ²
Neubau KfW 55	5 %	50 €/ m ²
Neubau KfW 70	Kein Zuschuss / nur Kredit	

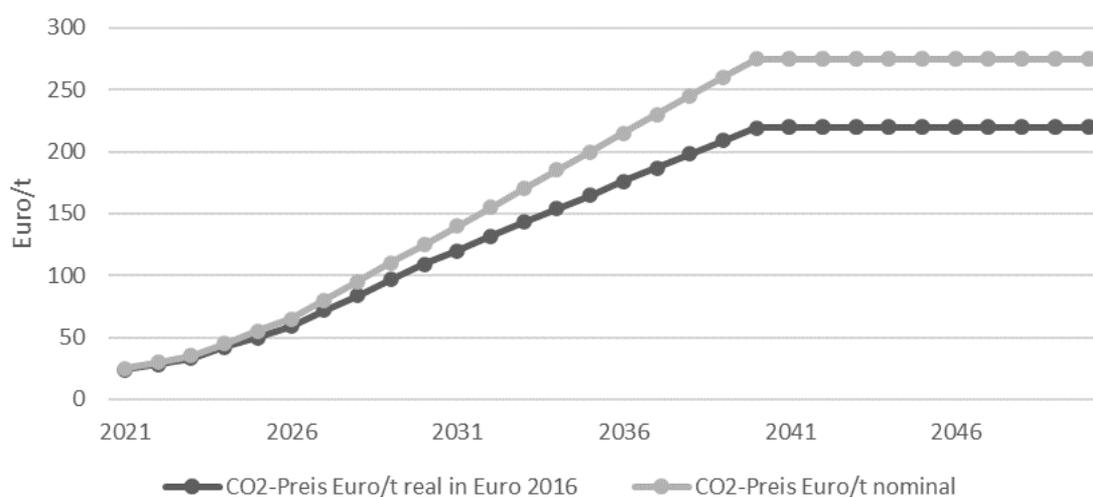
Gebäudeenergiegesetz (GEG)

Die zentralen Anforderungen des Gebäudeenergiegesetzes an den Neubau mit Bezug auf die zu erreichenden Standards der Bauteile und der Mindestanteile zur Nutzung erneuerbarer Energien werden berücksichtigt, genau wie die Mindestanforderungen bei der energetischen Sanierung im Bestand. Zudem werden die geltenden Austauschpflichten und das Verbot für Heizölkessel ab dem Jahr 2026 berücksichtigt. Weitere Verschärfungen des geltenden Standards werden im Trendszenario nicht angenommen.

BEHG: Entwicklung der CO₂ Bepreisung fossiler Brennstoffe für Wärme und Verkehr

Das im Jahr 2019 verabschiedete Brennstoffemissionshandelsgesetz sieht ab 2021 einen festen Preis für eine Tonne CO₂ vor. Unternehmen, die Heiz- und Kraftstoffe in den Verkehr bringen, benötigen für jede Tonne CO₂, die verursacht wird, ein Zertifikat als Verschmutzungsrecht. Im Vermittlungsausschuss einigten sich Bund und Länder, den CO₂-Preis ab Januar 2021 auf 25 Euro festzulegen. Der Preis steigt bis zum Jahr 2025 schrittweise bis zu 55 Euro an. Für das Jahr 2026 soll ein Preiskorridor von mindestens 55 und höchstens 65 Euro gelten. (Bundesregierung, 2020) Im Jahr 2025 soll dann überprüft werden, inwieweit Höchst- und Mindestpreise für die Zeit ab 2027 sinnvoll und erforderlich sind. Die Annahmen zur weiteren Entwicklung der CO₂ Bepreisung bis 2040 werden aus den Rahmendaten zum Projektionsbericht 2021 übernommen (Öko-Institut et al., 2020) Für den Zeitraum ab 2027 wird darin angenommen, dass der Preis jährlich nominal um 15 € ansteigt und im Jahr 2040 275 €/t CO₂ beträgt. Für den Zeitraum 2040 bis 2050 wird angenommen, dass der Preis konstant bleibt. Abbildung 32 stellt die angenommenen CO₂-Preise entsprechend den Rahmendaten aus dem Projektionsbericht 2021 dar.

Abbildung 32: Annahme zur Entwicklung der CO₂-Preise für Verkehr und Wärme im BEHG



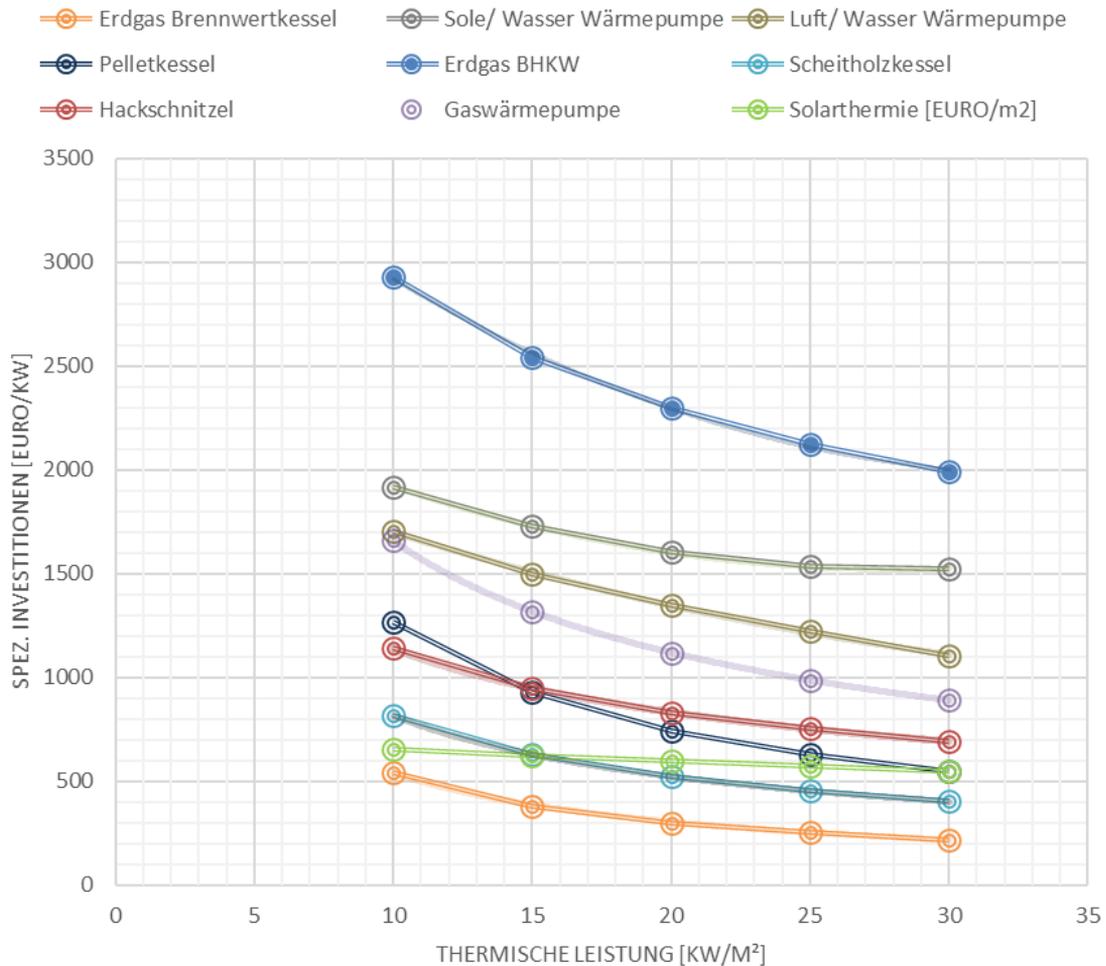
Quelle: (Öko-Institut et al., 2020)

4.2.2 Spezifische Investitionen in Wärmeversorgungssysteme und Effizienzmaßnahmen

Neben den Energiepreisen stellen die Investitionen in Wärmerversorgungssysteme und Effizienzmaßnahmen eine wichtige Eingangsgrößen für die Modellierung dar. Im Modell Invert/ee-Lab erfolgt die Kostenberechnung gebäudespezifisch, so dass die verschiedenen Technologieoptionen entsprechend der erforderlichen thermischen Leistung ausgelegt werden. Abbildung 33 zeigt die

berücksichtigten spezifischen Investitionskosten der verschiedenen primären Wärmeerzeuger in Abhängigkeit der Dimensionierung für den Leistungsbereich bis 30 kW_{th}.

Abbildung 33: Spezifische Investitionen für Wärmeversorgungssysteme bis 30 kW



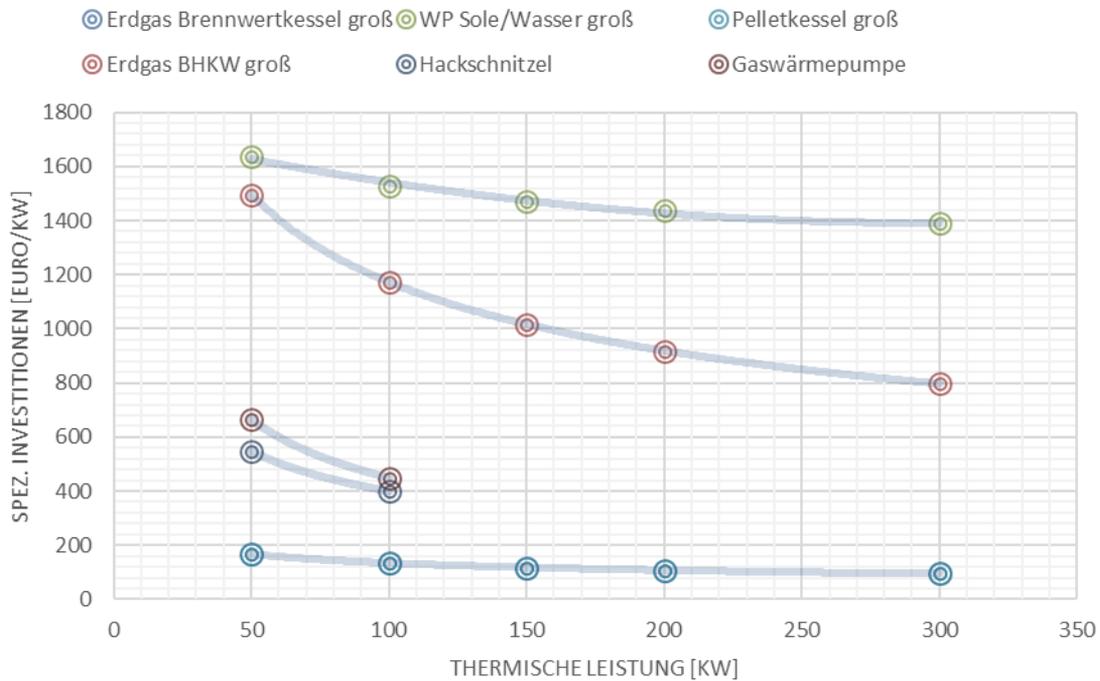
Spezifische Investitionen pro Kilowatt (kW) bei allen Wärmeversorgungssystemen bis auf Solarthermie, wo die Bezugsgröße Quadratmeter (m²) Aperturfläche ist.

Quelle: Eigene Darstellung; (Fichtner et al., 2019; Maas & Schlitzberger, 2017); Gaswärmepumpe Eigene Recherche Hersteller.

Diese beinhalten die Investitionen in Geräte, Peripherie mit thermischem Speicher und Installationskosten. Bei der Sole/Wasserwärmepumpe sind die Kosten für die Erschließung der Wärmequelle mit Bohrkosten ebenfalls enthalten. Darüber hinaus werden im Modell weitere Kosten berücksichtigt, die ggf. bei einem Energieträgerwechsel anfallen, beispielsweise die Kosten für einen Gasanschluss falls vorher noch keine Gastechologie installiert war.

Abbildung 34 zeigt die spezifischen Investitionen für größere Wärmeversorgungssysteme im Leistungsbereich 50 bis 300 kW.

Abbildung 34: Spezifische Investitionen für Wärmeversorgungssysteme ab 50 kW



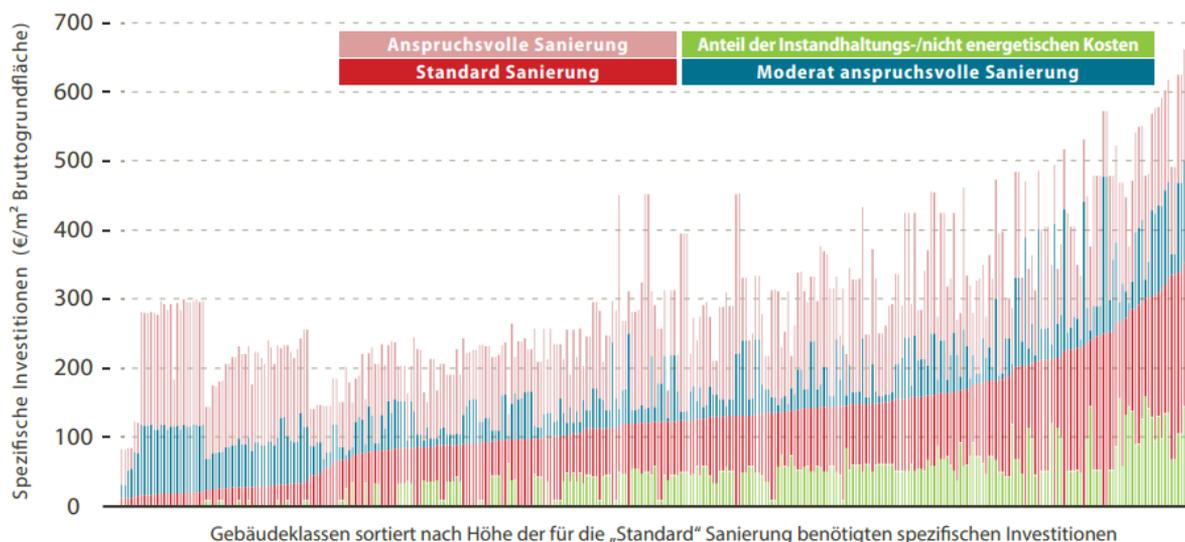
Quelle: Eigene Darstellung; (Fichtner et al., 2019; Maas & Schlitzberger, 2017); Gaswärmepumpe Eigene Recherche Hersteller

Effizienzmaßnahmen an der Gebäudehülle werden im Modell nicht als Einzelmaßnahmen abgebildet, sondern durch Effizienzmaßnahmenpakete, die spezifisch für jedes Referenzgebäude ermittelt werden, und zur Sanierung auf verschiedenen Effizienzstandards führen (Steinbach, 2015). Die zu erreichenden Standards werden jeweils über den spezifischen auf die wärmeübertragende Gebäudefläche bezogenen Transmissionswärmekoeffizienten ($H't$) definiert. Die mit den Effizienzmaßnahmenpaketen verbundenen Investitionen hängen maßgeblich vom energetischen Ausgangszustand des jeweiligen Referenzgebäudes ab. Zudem bestehen Freiheitsgrade bei der Erreichung der Standards hinsichtlich der Auswahl der zu sanierenden Gebäudekomponente (Außenwand, Dach, Keller, Fenster) und der jeweiligen Sanierungstiefe (Dicke der Dämmschicht, Fensterqualität). Die spezifischen Investitionen der Sanierungsmaßnahmen, die zur Erreichung der jeweiligen Standards erforderlich sind, werden spezifisch für jedes Referenzgebäude ermittelt und gehen als Eingangsdaten in die Modellierung ein.

Abbildung 35 zeigt die Bandbreite der spezifischen Investitionen für Effizienzmaßnahmen an der Gebäudehülle für die in Invert/ee-Lab hinterlegten Referenzgebäudeklassen bei den verschiedenen Effizienzstandards. Die X-Achse zeigt dabei die hinterlegten Referenzgebäude sortiert nach der Höhe der spezifischen Investitionen für eine Standardsanierung. Zudem wird ermittelt, welcher Anteil für ohnehin anfallende Investitionen bei Instandsetzung ohne energetische Maßnahmen anfällt. Datengrundlage für die Berechnung der spezifischen Investitionen stellen die von Hinz (2011) entwickelten Kostenkurven für die unterschiedlichen Gewerke dar, die sich im Wesentlichen auf der Primärdatenauswertung real umgesetzter Projekte stützen, die im KfW-Programm Ener-

gieeffizient Sanieren gefördert wurden. Da die Preisbasis der Daten das Jahr 2009 darstellt, werden die Kosten mit dem Baupreisindex des Statistischen Bundesamtes auf das Basisjahr 2018 umgerechnet¹¹.

Abbildung 35: Spezifische Investitionen für Effizienzmaßnahmen differenziert nach Effizienzstandards und Referenzgebäuden im Modell Invert/EE-Lab



Quelle: Eigene Darstellung

4.2.3 Effizienzen der Wärmeversorgungstechnologien

Tabelle 5 zeigt die Effizienzen der Wärmeversorgungstechnologien in Invert/ee-lab. Dargestellt ist der Jahresnutzungsgrad der Technologien bei 35°C Vorlauftemperatur und die Effizienzverluste, die sich bei einer Vorlauftemperatur von 55°C ergeben. Zusätzlich ist der Jahresnutzungsgrad für die Warmwassererzeugung dargestellt.

Tabelle 5: Effizienzen der Wärmeversorgungstechnologien in Invert/ee-lab

Bezeichnung	Jahresnutzungsgrad bei 35 °C VL	Effizienzverluste bei 55°C VL	Jahresnutzungsgrad Warmwassererzeugung
Fernwärme	0.98	0.01	0.931
Heizöl Brennwert	0.97	0.05	0.92
Bio-Heizöl Brennwert	0.97	0.05	0.92
Erdgas Brennwert	0.99	0.05	0.8835
Biogas Brennwert	0.99	0.05	0.8835
BHKW Erdgas	0.91	0	0.85

¹¹ Für Wohngebäude ergibt sich daraus ein Faktor von 1,23. Für Bürogebäude ein Faktor 1,24

Bezeichnung	Jahresnutzungsgrad bei 35 °C VL	Effizienzverluste bei 55°C VL	Jahresnutzungsgrad Warmwassererzeugung
Gaswärmepumpe	1.42	0.07	1.3
Holzpellets Einzel	0.84	0	0.756
Scheitholz zentral	0.85	0	0.85
Hackschnitzel zentral	0.90144	0	0.90144
Holzpellet zentral	0.90144	0	0.90144
Elektrische Einzelheizgeräte	1	0	1
Wärmepumpe Luft	4.5	0.9	3.4
Wärmepumpe Erdreich/Grundwasser	5.1	0.85	4.3

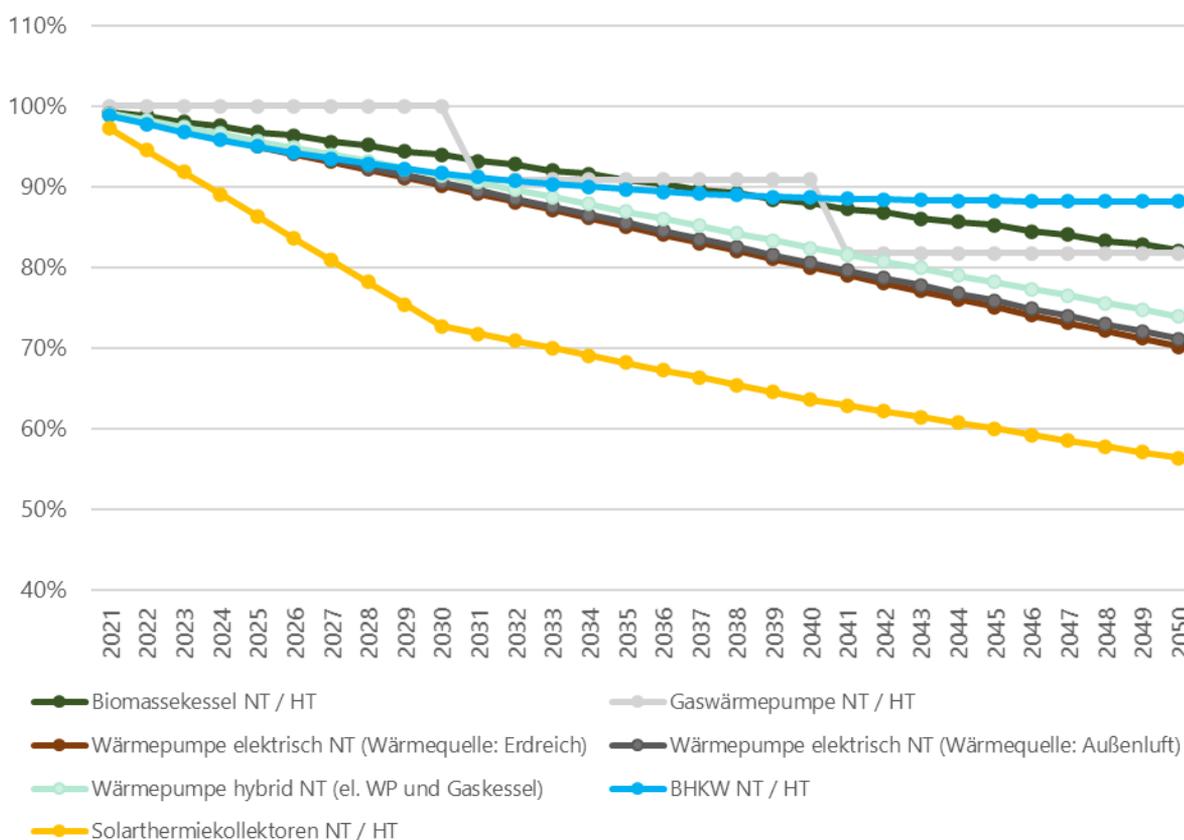
Quelle: Eigene Darstellung,; (Fichtner et al., 2019; Maas & Schlitzberger, 2017); Technologierecherche

4.2.4 Kostendegressionen für Wärmeversorgungstechnologien

Im Trendszenario wird keine Kostendegression für die Wärmeversorgungstechnologien angenommen. Es wird jedoch eine Sensitivität gerechnet, in der die gleichen Kostendegressionen wie im Zielszenario angenommen werden.

Abbildung 36 zeigt die unterstellten Kostendegressionen für die Sensitivität des Trendszenarios. Vor allem Wärmepumpen und Solarthermiekollektoren durchlaufen eine technologische Entwicklung, welche zu niedrigeren Investitionskosten führt.

Abbildung 36: Kostendegressionen für EE-Wärmeversorgungsstechnologien



4.3 Rahmendaten für das Zielszenario

Die Berechnung des Zielszenarios erfolgt mit dem Energiesystemmodell REMod. Im Folgenden werden die Modellannahmen dargestellt, die von denen des Trendszenarios abweichen. Grundsätzlich ist die Parametrierung des Zielszenarios angelehnt an das Referenzszenario aus der Studie *Wege zu einem klimaneutralen Energiesystem* (Sterchele et al. 2020a). Die Studie wurde Anfang des Jahres 2020 veröffentlicht und die techno-ökonomischen Parameter wurden mit Expert:innen abgeglichen und angepasst. Die Parameter sind den nachfolgenden Abschnitten 4.3.1 und 4.3.2 sowie dem Anhang (Tabelle 14 bis Tabelle 19) zu entnehmen. Der Endenergieverbrauch ist auf das Ausgangsjahr 2018 kalibriert.

4.3.1 Verfügbares CO₂-Budget als Zielgröße

Für die Berechnungen mit REMod wird als Nebenbedingung das jährlich verfügbare CO₂-Budget vorgegeben sowie das gesamte CO₂-Budget des Transformationspfades bis zum Jahr 2050. Im Modell werden ausschließlich die energiebedingten CO₂-Emissionen betrachtet. Im Rahmen des Europäischen Green Deals wurde am 17.09.2020 von der EU-Kommission eine Änderung des vorgeschlagenen Europäischen Klimaschutzgesetzes vorgelegt, in der das bisherige CO₂-Emissionsreduktionsziel von 40% auf 55% (inkl. LULUCF) im Jahr 2030 gegenüber 1990 angehoben wird (Europäische Kommission 2020). Das EU-Parlament hat am 07.10.2020 dafür gestimmt, die geplanten 55% CO₂-Emissionsreduktion (ohne LULUCF) gegenüber 1990 auf 60% zu verschärfen

(tagesschau.de 2020). Bis 2050 soll die EU klimaneutral werden. Der EU-Ministerrat muss noch über den Parlamentsbeschluss abstimmen.

In Deutschland ist das bisherige Ziel für das Jahr 2030 eine Reduktion der Treibhausgasemissionen von 55% gegenüber 1990. Diese Zielvorgabe soll jedoch angelehnt an die Verschärfung des EU-Klimaziels angepasst werden. Die Annahme, die hierfür getroffen wird, ist, dass Deutschland die energiebedingten Emissionen (ohne LULUCF) um 65% bis 2030 gegenüber 1990 und 100% bis 2050 reduziert. Durch lineare Interpolation dieser Zwischenziele ergibt sich für die energiebedingten Emissionen in den Sektoren Energiewirtschaft, Industrie, Verkehr und Gebäude für die Jahre 2020 bis 2050 ein CO₂-Budget von etwa 7,45 Gt_{CO₂}, welches sich an der Leitstudie der DENA orientiert (Thomas Bründlinger 2018). Unter diesen Annahmen ergeben sich für das Jahr 2030 sowie das Jahr 2050 maximale CO₂-Emissionen, wie in Tabelle 6 dargestellt.

Tabelle 6: Annahmen zu CO₂-Zielwerten des Zielszenarios für energiebedingte CO₂-Emissionen

Jahr	CO ₂ -Zielwerte	CO ₂ -Zielwerte
2030	346 Tonnen CO ₂	Reduktion ggü. 1990: 65%
2050	0	Reduktion ggü. 1990: 100%

Jahr	CO ₂ -Budget
2020-2050	7,45 Giga Tonnen CO ₂

Sektorspezifische CO₂-Ziele werden dem Modell nicht vorgegeben. Anhand der Ergebnisse der Optimierung können die Emissionen der Sektoren z.B. mit den Zielen des Klimaschutzgesetzes verglichen werden.

Nicht-energiebedingte CO₂-Emissionen

Da im Modell REMod nur energiebedingte Emissionen betrachtet werden, wird im Folgenden ein Überblick der nicht-energiebedingte Emissionen aus anderen Quellen gegeben, die im **Ergebnis- teil nicht dargestellt** werden. Eine Projektion der Emissionen aus Landwirtschaft, Abfall und Sonstige sowie Prozessemissionen (nur 2050) stammt aus der Studie „Klimaneutrales Deutschland“ im Auftrag von Agora Energiewende. Die tatsächlichen Prozessemissionen im Jahr 2018 stammen aus dem Nationalen Treibhausgasinventar 2020, 11/2019 (v 0.6) des Umweltbundesamts (Umweltbundesamt 22.11.2019).

Tabelle 7: Nicht-energiebedingte THG-Emissionen nach Quellen

Emissionen	Einheit	2018	2030	2040	2050
Landwirtschaft	Mio. t CO ₂ e	70	58	52	44
Abfall und Sonstige	Mio. t CO ₂ e	10	5	3	2
Prozessemissionen	Mio. t CO ₂ e	64,8	n.a.	n.a.	13

Quellen: „Klimaneutrales Deutschland“, Agora Energiewende; Nationales Treibhausgasinventar 2020, (Umweltbundesamt 22.11.2019)

Grundsätzlich ist zu beachten, dass die oben aufgeführten Emissionen mitbetrachtet werden müssen, um die gesamten Treibhausgasemissionen darzustellen.

4.3.2 Sanierungstiefen und -raten im Zielszenario

Für die Berechnung des Zielszenarios mit REMod sind für Gebäude im Gegensatz zum Trendszenario modellbedingt nur zwei verschiedene Sanierungsstandards abgebildet¹². Grundlage dieser Sanierungsstandards ist, dass mit dem ersten Sanierungspaket 50% des Wärmebedarfs reduziert wird und mit dem zweiten 64% des Wärmebedarfs. Die Sanierungspakete können annäherungsweise mit folgenden gebräuchlichen Sanierungsstandards übersetzt werden.

- Reduktion des Wärmebedarfs um 50%: Anlehnung an das Neubauniveau der EnEV 2016 entspricht in etwa KfW 70 bis 55 (letzteres mittelfristig)
- Reduktion des Wärmebedarfs um 64%: entspricht in etwa dem Passivhausstandard bzw. dem KfW 40 Standard

Der energetische Standard unsanierter Gebäude kann damit auf eins der beiden Niveaus gehoben werden. Die detaillierten Simulationen für die prozentuale Reduktion des Heizwärmebedarfs wurde in der Studie Klimaneutraler Gebäudebestand 2050 (Bürger et al. 2017) hergeleitet. Als zusätzliche Option kann im Modell REMod als Effizienzmaßnahme die Reduktion der Vorlauftemperatur von 55°C durch den Austausch von Radiator-Heizungen auf Flächenheizung auf 35°C reduziert werden. Die techno-ökonomischen Annahmen hierzu sind in Abbildung 8 dargestellt. Zusätzlich wird ein Korridor der jährlichen Sanierungsrate für die Modellierung angenommen. Die Sanierungsrate spiegelt im Modell den Anteil der Gebäude wider, der saniert wird. Die Sanierungsrate wird mit einem Korridor zwischen 1-3 % angenommen, innerhalb dessen das Optimierungsergebnis liegen kann.

¹² Das Modell REMod bildet im Vergleich zu Invert keine Einzelgebäude inklusive deren Gebäudeeigenschaften ab, sondern den kumulierten Gebäudebestand ab.

Tabelle 8: Annahmen der energetischen Sanierungspakete in REMod

Komponente	Größe	Einheit	Wert 2020-2050
Gebäudesanierung -50% (KfW70 bis KfW55)	Investition	€/m ²	102
Gebäudesanierung -50% (KfW70 bis KfW55)	Lebensdauer	a	50
Gebäudesanierung -50% (KfW70 bis KfW55)	M/O-Kosten	% Invest	1.0
Gebäudesanierung -64% (KfW40/ Passivhausstandard)	Investition	€/m ²	180
Gebäudesanierung -64% (KfW40/ Passivhausstandard)	Lebensdauer	a	50
Gebäudesanierung -64% (KfW40/ Passivhausstandard)	M/O-Kosten	% Invest	1.0
Absenkung der Vorlauftemperatur in Wohngebäuden (z.B. durch Fußbodenheizung)	Investition	€/m ²	60
Absenkung der Vorlauftemperatur in Wohngebäuden (z.B. durch Fußbodenheizung)	Lebensdauer	a	50
Absenkung der Vorlauftemperatur in Wohngebäuden (z.B. durch Fußbodenheizung)	M/O-Kosten	% Invest	1.5

Quelle: (Sterchele et al. 2020b)

Weitere Modellannahmen:

Um einen realistischen Marktzuwachs zu gewährleisten, ist der Zubau der Wärmeversorgungssysteme durch das Potenzial für Wärmepumpen (max. 85 % der Neuinstallationen) und Fernwärmesysteme (max. 50 % der Neuinstallationen) in Absprache mit dem Auftraggeber beschränkt.

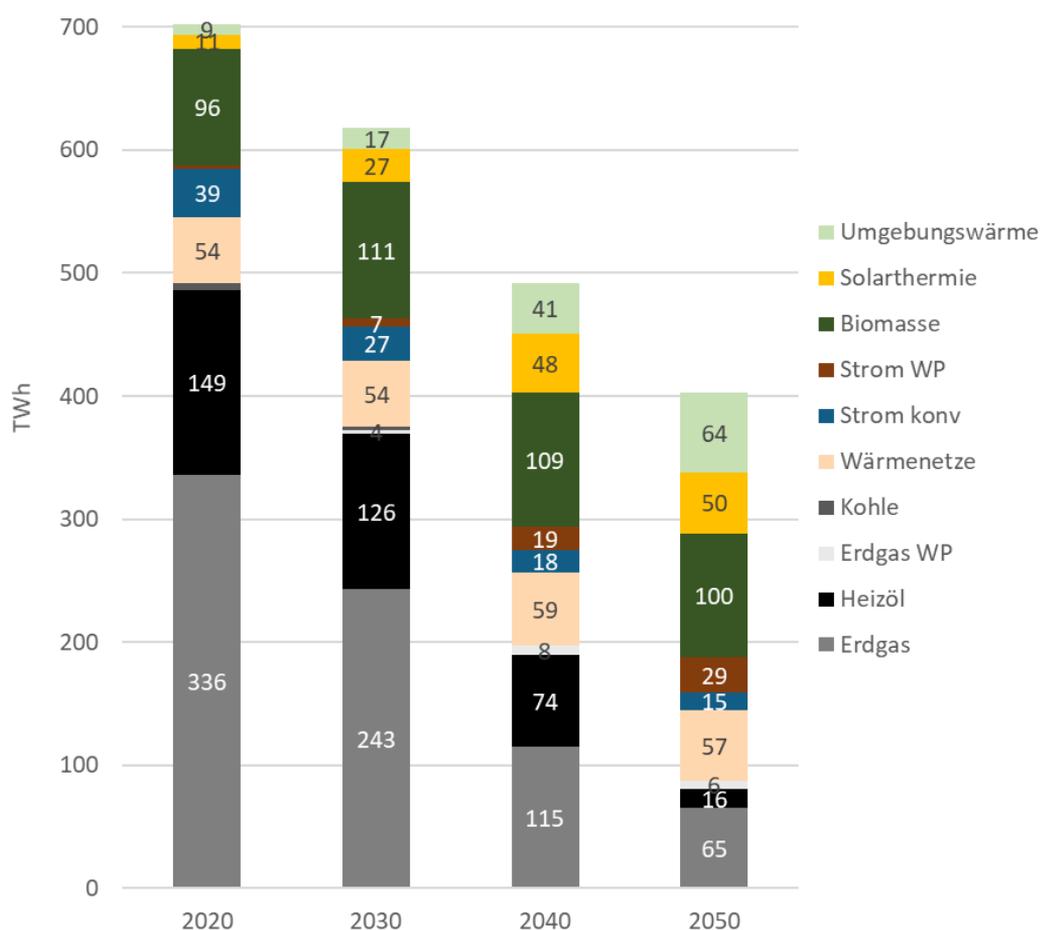
5 Ergebnisse Trendszenario

Im Folgenden werden die Ergebnisse des modellierten Trendszenarios hinsichtlich Endenergiebedarf, Treibhausgasemissionen, Wärmeversorgungssystemen sowie Sanierungsmaßnahmen beschrieben. Im Trendszenario werden keine technologischen Lerneffekte der Wärmeversorgungssysteme angenommen, dafür wird in Kapitel 5.5 eine Sensitivität des Trendszenarios beschrieben, welche diese technologischen Entwicklungen berücksichtigt.

5.1 Endenergiebedarf und THG-Emissionen im Gebäudesektor

Abbildung 37 zeigt die Entwicklung des Endenergiebedarfs nach Energieträgern im Trendszenario im Zeitraum 2020 bis 2050¹³.

Abbildung 37: Entwicklung des Endenergiebedarfs für Raumwärme und Warmwasser in Wohngebäuden und Nichtwohngebäuden (GHD) im Trendszenario

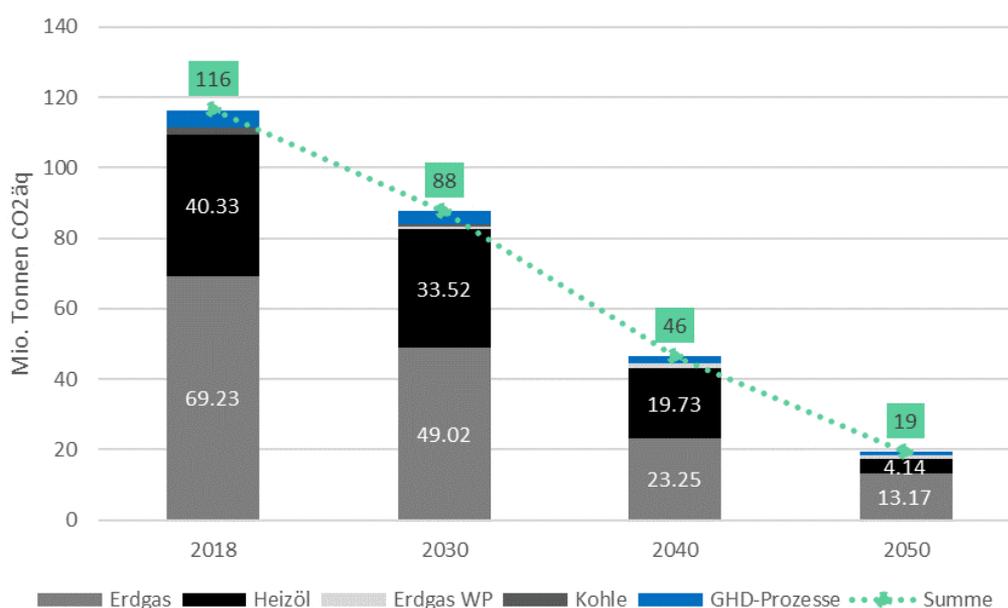


¹³ Bilanzraum ist hierbei der Endenergieverbrauch für Raumwärme und Warmwasser für Wohngebäude (Private Haushalte) und Nichtwohngebäude (GHD)

Der Endenergiebedarf reduziert sich im Zeitraum 2018 bis 2030 um 13 % und von 2018 bis 2050 um 43 %. Mit Bezug auf die eingesetzten Energieträger führen die simulierten Investitionsentscheidungen unter den angenommenen Rahmenbedingungen zu einer Verschiebung von Erdgas zu Wärmepumpen (Umgebungswärme und Strom WP) und Biomassekesseln¹⁴. Auch der Anteil der kombinierten Anlagen mit Solarthermie wächst deutlich und beträgt im Jahr 2050 rund 12 %. Der Anteil von Wärmenetzen ist dagegen konstant. Im Jahr 2030 tragen Wärmenetze zu 9 % und im Jahr 2050 zu 14 % zum Endenergiebedarf bei. Dezentrale EE-Wärme erreicht so bis 2030 einen Anteil von 25 % und bis 2050 einen Anteil von 53 %. Der Anteil fossil betriebener Heizkessel mit Erdgas und Heizöl an der Wärmeerzeugung liegt im Jahr 2050 bei 20 %, Wärmepumpen haben einen Anteil von 23 %.

Abbildung 38 zeigt die Entwicklung der Treibhausgase im Trendszenario nach Energieträgern, entsprechend der Abgrenzung des Gebäudesektors nach der dem KSG zugrundeliegenden THG-Inventarrechnung.

Abbildung 38: Treibhausgasemissionen des Trendszenarios nach Energieträgern



Anmerkung zur Abbildung: 2018er Werte basierend auf AGEB Anwendungsbilanzen (Stand September 2020). Die Jahre 2030, 2040 und 2050 sind Ergebnisse der Berechnung mit Invert/ee-Lab

Die THG-Emissionen umfassen dabei nicht nur die thermische Konditionierung von Gebäuden im Haushalts- und GHD-Sektor, sondern auch weitere Emissionen aus der Verbrennung von Brennstoffen, die nach der Anwendungsbilanz der Energiebilanz dem Prozesswärmebereich im GHD Sektor bzw. im Falle von mobilen Quellen dem Bereich Militär und damit dem Verkehrssektor zugeordnet sind. Diese nicht der thermischen Konditionierung des Gebäudesektors zurechenbaren THG-Emissionen umfassen 4,8 Mio. Tonnen CO₂-Äquivalente im Jahr 2018. Insgesamt sinken die THG-Emissionen für den Gebäudesektor von 116 Mio. Tonnen CO₂-Äquivalenten in 2018 auf 19 Mio. Tonnen CO₂-Äquivalente in 2050.

¹⁴ Bei Biomasse ist ein konstanter Anteil von 45 TWh für Kaminöfen enthalten.

In der Modellierung werden dabei die Auswirkungen des Klimawandels auf die Veränderung der durchschnittlichen Monatstemperaturen berücksichtigt, was zu einer Reduktion der Heizgradtage führt (vgl. Abschnitt 4.1.3). Abbildung 39 zeigt die durch den Klimawandel angenommene Änderung der monatlichen Durchschnittstemperatur im Zeitraum von 2018 bis 2050 und den Mittelwert. Eine Steigerung der Temperaturen ist vor allem in den Wintermonaten von November bis März zu beobachten, während die Änderung der Durchschnittstemperaturen in den Sommermonaten gering ausfällt. Auf Basis der hinterlegten Temperaturen für 2018 und der Reduktion der Heizgradtage berechnet das Modell Invert/ee-Lab die Temperaturen in den Folgejahren.

Abbildung 39: Monatliche Durchschnittstemperaturen im Zeitraum 2018 bis 2050

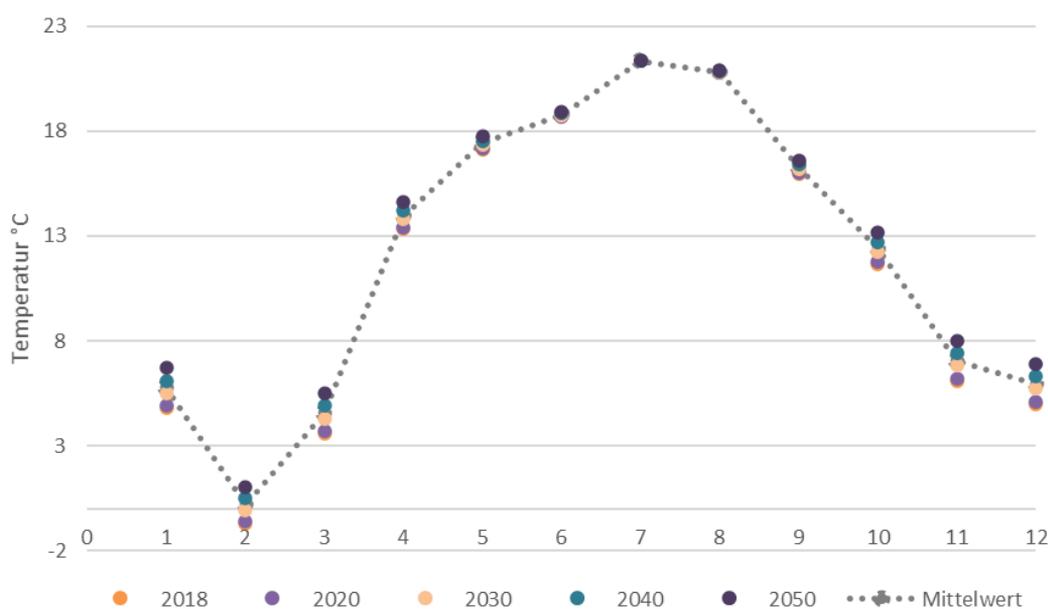
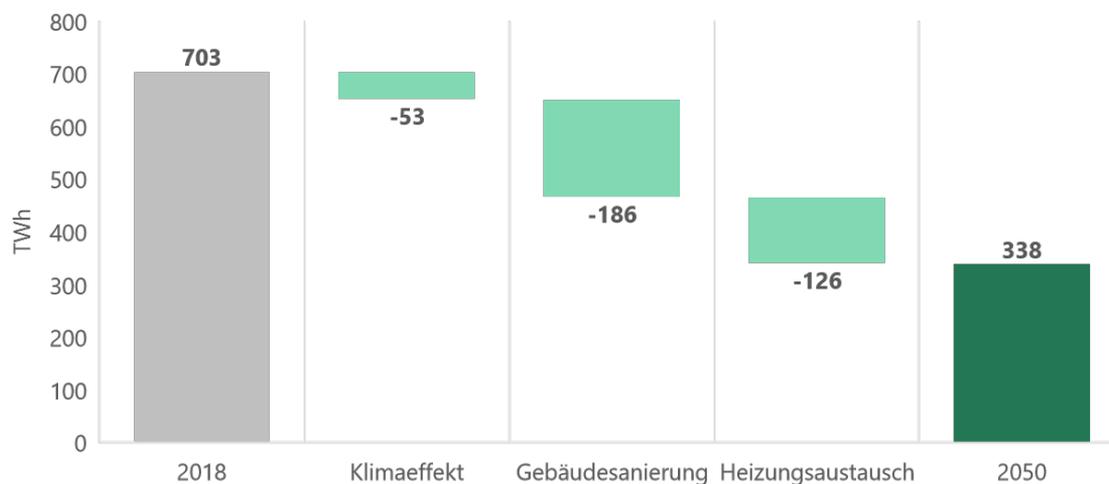


Abbildung 40 zeigt die Dekomposition der Endenergiebedarfsreduktion zwischen 2018 und 2050. Die detaillierte Auswertung der Modellergebnisse zeigt, dass höhere durchschnittliche Temperaturen allein zu einer Einsparung von 53 TWh pro Jahr bis zum Jahr 2050 führen. Der größte Effekt wird durch die durchgeführten Sanierungsmaßnahmen an der Gebäudehülle erreicht, die zu 186 TWh Einsparungen pro Jahr führen. Auch durch den Wechsel der Wärmeversorgungssysteme wird mit 126 TWh eine hohe Wirkung erzielt¹⁵.

¹⁵ Dabei ist zu berücksichtigen, dass bei der Dekompositionsanalyse Umweltwärme und Solarthermie nicht als Energiebedarf verbucht werden, somit führt der Ausbau von Wärmepumpen und Solarthermie als Effizienzmaßnahme zu einem zusätzlichen Rückgang des Endenergiebedarfs, der in der Darstellung unter „Heizungstausch“ bilanziert wird.

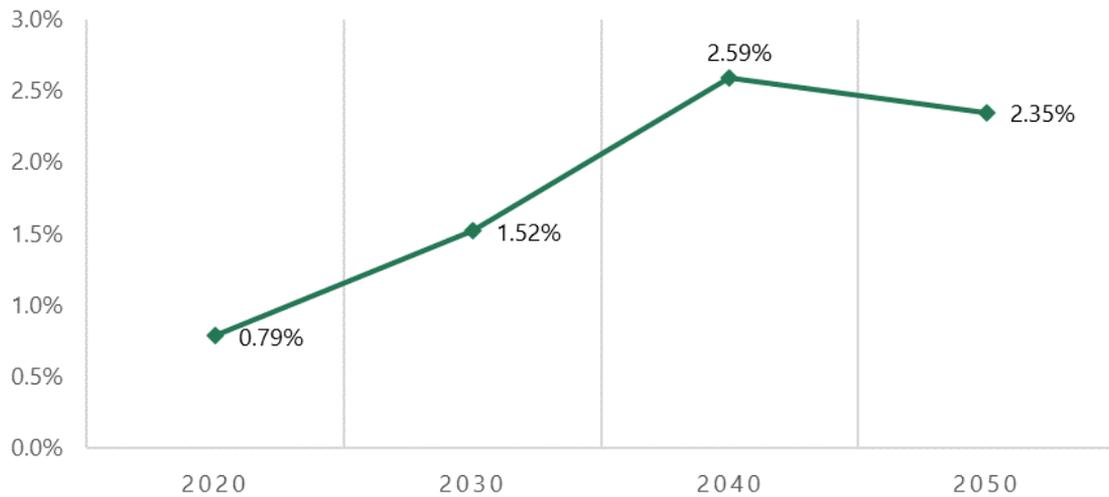
Abbildung 40: Einfluss des Klimateffektes, der Gebäudesanierung und des Heizungsaustauschs auf den Endenergiebedarf im Trendszenario



Anmerkung: Endenergiebedarf ohne Umweltwärme und Solarthermie

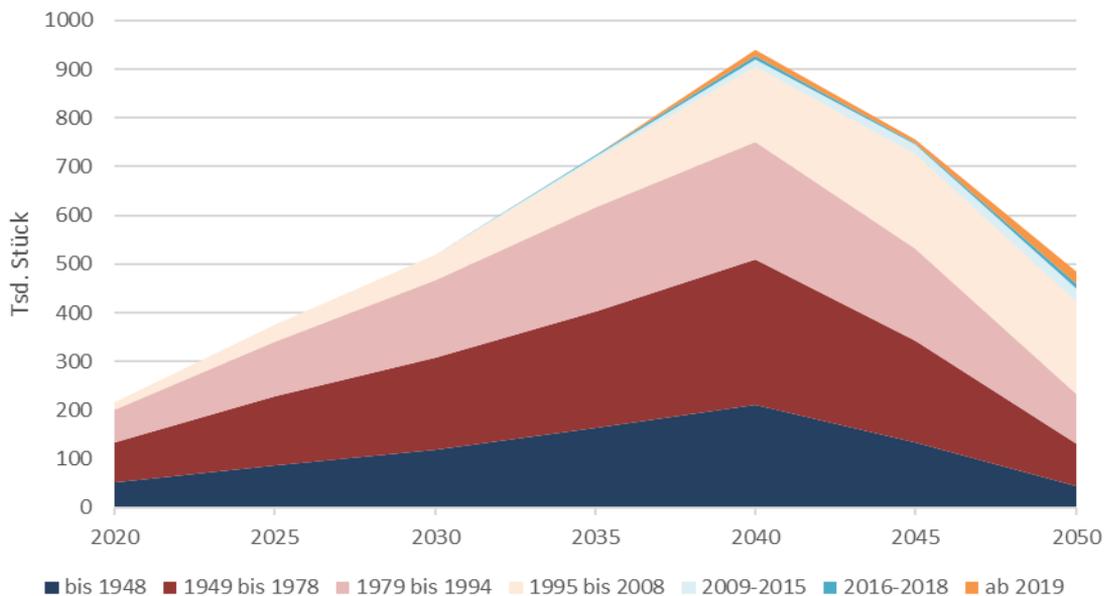
5.2 Sanierungsmaßnahmen und Neubauten

Abbildung 41 zeigt die Entwicklung der Sanierungsrate im Trendszenario. Diese steigt bis zum Jahr 2040 auf 2,6 % an, sinkt im Anschluss jedoch wieder auf 2,3 %. Die Sanierungsrate wird modellendogen ermittelt. Die Veränderungen der Sanierungsrate ergeben sich dabei zum einen durch eine Veränderung der Wirtschaftlichkeitsbedingungen, die im Modell über die Sensitivität mit Bezug auf die Energiekosten abgebildet ist. Die in dem Szenario unterstellte Energiepreisentwicklung mit einer hohen CO₂-Bepreisung führt somit zu einem Anstieg der Sanierungsrate. Zum anderen bildet das Modell die Sanierungszyklen des Gebäudebestandes über eine Verteilungsfunktion in Abhängigkeit des Baualters und der letztmaligen Sanierung der Referenzgebäude in den Eingangsdaten ab. Somit ist die Steigerung der Sanierungsrate nicht primär auf politische Maßnahmen, sondern auf den Instandsetzungszyklus im Gebäudebestand zurückzuführen, der zu der Steigerung der Sanierungsrate bis zum Jahr 2040 führt.

Abbildung 41: Durchschnittliche Sanierungsrate im Trendszenario nach Dekaden

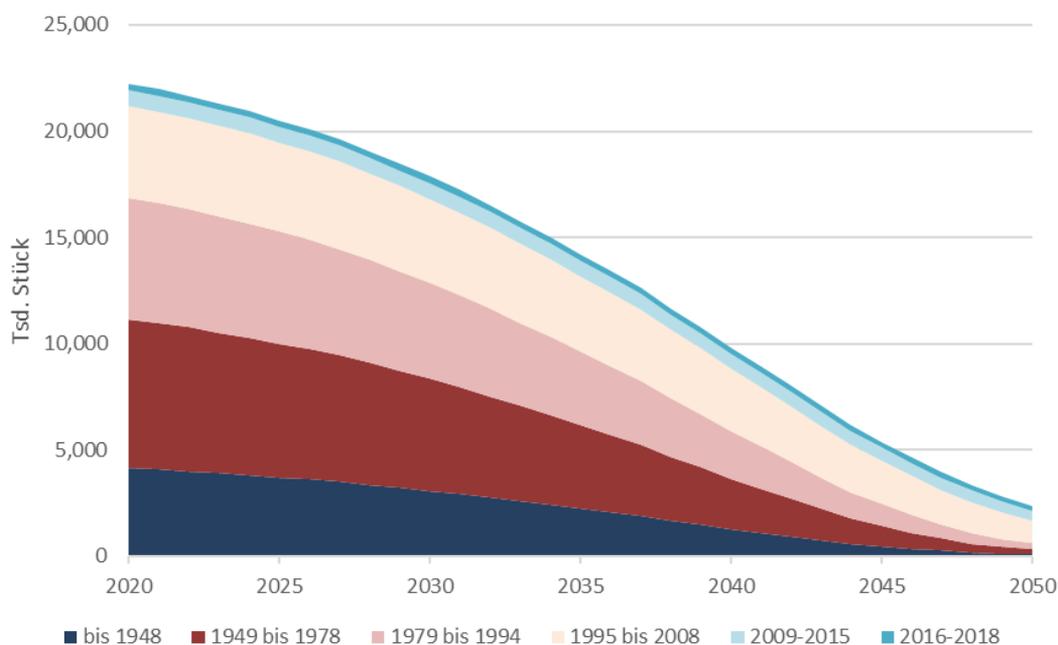
Für eine detailliertere Betrachtung der sanierten Gebäude, zeigt Abbildung 42 die Anzahl sanierter Gebäude nach Baualtersklassen über den Zeitraum 2020 bis 2050. Dem Verlauf der Sanierungsrate folgend, steigt die Anzahl sanierter Gebäude bis 2040 in allen Baualtersklassen. Im Zeitraum 2020 bis 2030 werden überwiegend ältere Gebäude mit Baujahr bis 1994 saniert. Im Zeitraum 2030 bis 2040 gelangen dann auch neuere Gebäude mit Baujahr 1995 bis 2008, 2009 bis 2019 und Neubauten in den Sanierungszyklus. Ab 2040 sinkt die Anzahl sanierter Gebäude wieder deutlich. Dabei ist vor allem ein Rückgang bei den Gebäuden mit Baujahr bis 1948 festzustellen. Die Anzahl Sanierungen bei den im Zeitraum 1995 bis 2008 errichteten Gebäuden bleibt konstant. Dem Sanierungszyklus folgend, gelangen ab 2045 vermehrt neuere Gebäude ab 2009 und Neubauten ab 2019 in den Sanierungszyklus.

Abbildung 42: Anzahl der jährlichen Gebäudesanierungen nach Baualtersklassen über den Zeitraum 2020 bis 2050 im Trendszenario



Zum Vergleich zeigt Abbildung 43 die Anzahl unsanierter Gebäude nach Baualtersklassen. Für die Interpretation ist zu berücksichtigen, dass in der Abbildung die Anteile der Gebäude in den einzelnen Baualtersklassen dargestellt werden, für die innerhalb des Simulationszeitraums keine Sanierungsmaßnahmen durchgeführt werden. Im Modell wird im Ausgangsjahr bereits berücksichtigt, welcher Anteil in den Baualtersklassen bereits vor 2018 Sanierungsmaßnahmen durchgeführt haben. D.h. die hier aufgeführten „unsanierten“ Gebäude sind zum Teil bereits vor 2018 saniert worden. Die im Simulationszeitraum neu gebauten Gebäuden sind in dieser Darstellung nicht enthalten.

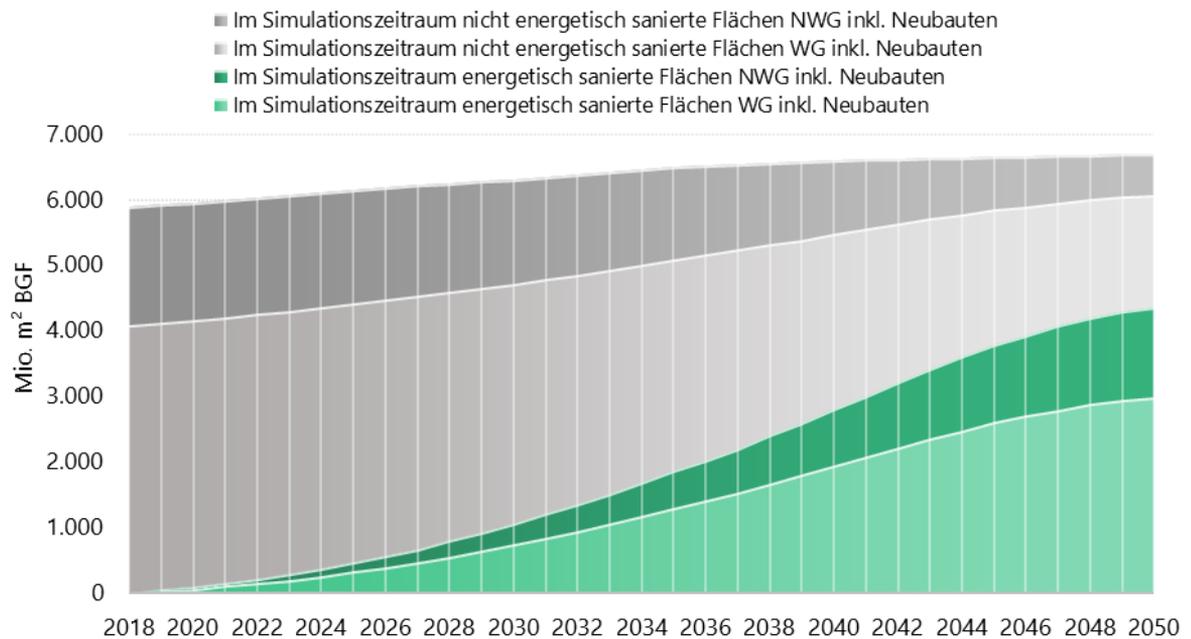
Abbildung 43: Anzahl der nicht im Simulationszeitraum sanierten Gebäude nach Baualtersklassen über den Zeitraum 2020 bis 2050 im Trendszenario



In der Abbildung wird ersichtlich, dass der Gebäudebestand der Baualtersklasse bis 1948 bis zum Jahr 2050 nahezu vollständig saniert wird. Aus den Baualtersklassen 1949 bis 1994 verbleiben wenige unsanierte Gebäude. Das Modell berücksichtigt die Sanierungszyklen über eine Weibull-Verteilung, die die Ausfallwahrscheinlichkeit bzw. Notwendigkeit für Sanierungsmaßnahmen anhand des Gebäudealters modelliert. Damit werden nicht alle Referenzgebäude Segmente einer Baualtersklasse im gleichen Jahr nach Ablauf der mittleren Lebensdauer saniert, sondern mit zunehmendem Gebäudealter nimmt die Wahrscheinlichkeit einer Sanierungsmaßnahme zu. Darüber hinaus wird das Energiepreisniveau berücksichtigt, welches zu einer vorgezogenen Sanierung führen kann. Im Modell wird auch berücksichtigt, dass reine Instandsetzungsmaßnahmen ohne energetische Sanierungsmaßnahmen durchgeführt werden können. Diese sind ebenfalls in den unsanierten Gebäuden in Abbildung 43 enthalten. Analog zu der Entwicklung der sanierten Gebäude verbleiben am Ende des Simulationszeitraumes vor allem Gebäude der Baualtersklasse 1995 bis 2008 im unsanierten Zustand. Die Anzahl der neueren Gebäude bleibt nahezu konstant.

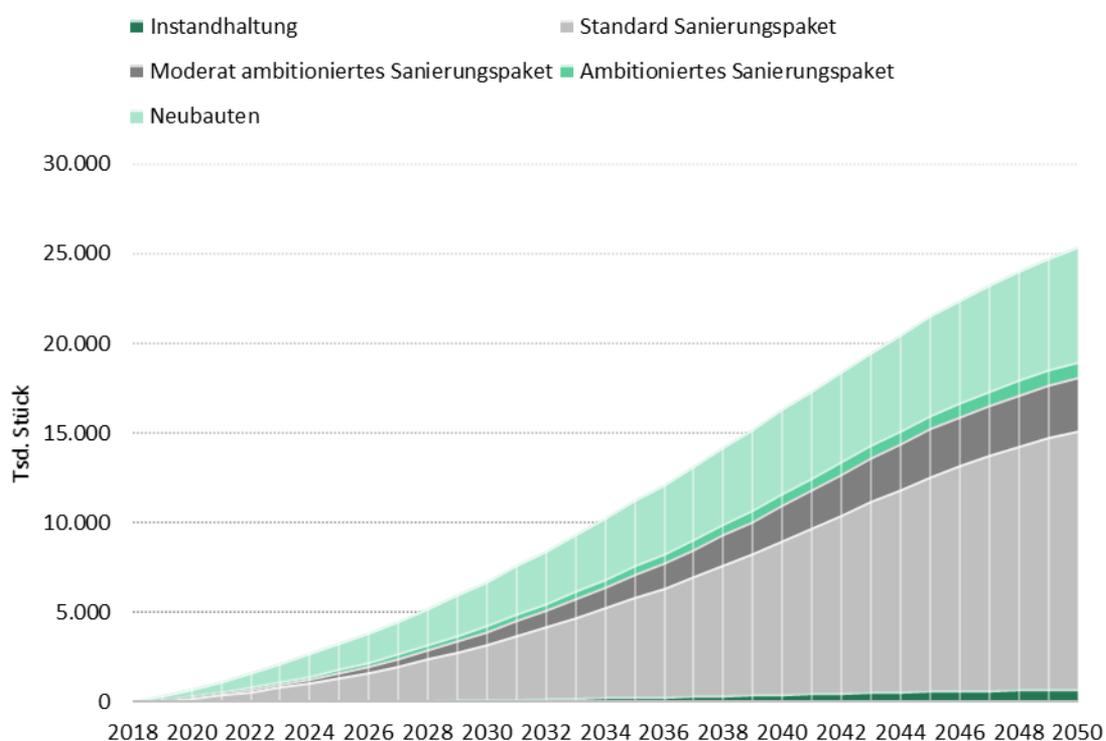
Abbildung 44 zeigt darüber hinaus die kumulierte Entwicklung der Gebäudeflächen (Bruttogeschossfläche, BGF) und den Anteil der sanierten Fläche über den simulierten Zeitraum. In grün ist die kumulierte Fläche sanierter Wohn- und Nichtwohngebäude dargestellt. Es werden im Simulationszeitraum bis zum Jahr 2050 rund 64 % der BGF von Wohngebäuden und 69 % der BGF von Nichtwohngebäuden saniert. Zu beachten ist dabei, dass im Modell der Gebäudebestand in Deutschland im Jahr 2018 abgebildet ist, in welchem bereits sanierte Gebäude enthalten sind. Die grau unterlegte Fläche enthält neben den nicht energetisch sanierten Gebäuden auch die Gebäude, bei denen nur eine Instandsetzung durchgeführt wurde. Zudem sind in der Darstellung auch die im Simulationszeitraum entstanden Neubauten enthalten, die bis 2050 nicht saniert werden.

Abbildung 44: Entwicklung der sanierten Gebäudeflächen im Trendszenario über den Zeitraum 2018 bis 2050



Um die Sanierungsaktivitäten genauer zu analysieren, zeigt Abbildung 45 die kumulierte Anzahl an durchgeführten energetischen und nicht-energetischen Sanierungsmaßnahmen sowie die errichteten Neubauten. Es wird deutlich, dass in dem Szenario vorrangig Standardsanierungsmaßnahmen durchgeführt werden. Sanierungen nach Effizienzhausstandard KfW 55 sind dagegen eher gering. Im Trendszenario finden bis 2050 rund 750.000 Instandhaltungsmaßnahmen, 14,5 Mio. Sanierungen im Standardpaket nach EnEV 2016 /GEG, rund 3 Mio. moderat ambitionierte Sanierungen nach KfW 100 sowie knapp 900.000 ambitionierte Sanierungen nach KfW 55 statt. Die Anzahl errichteter Neubauten beläuft sich bis 2050 auf rund 6 Mio. Stück.

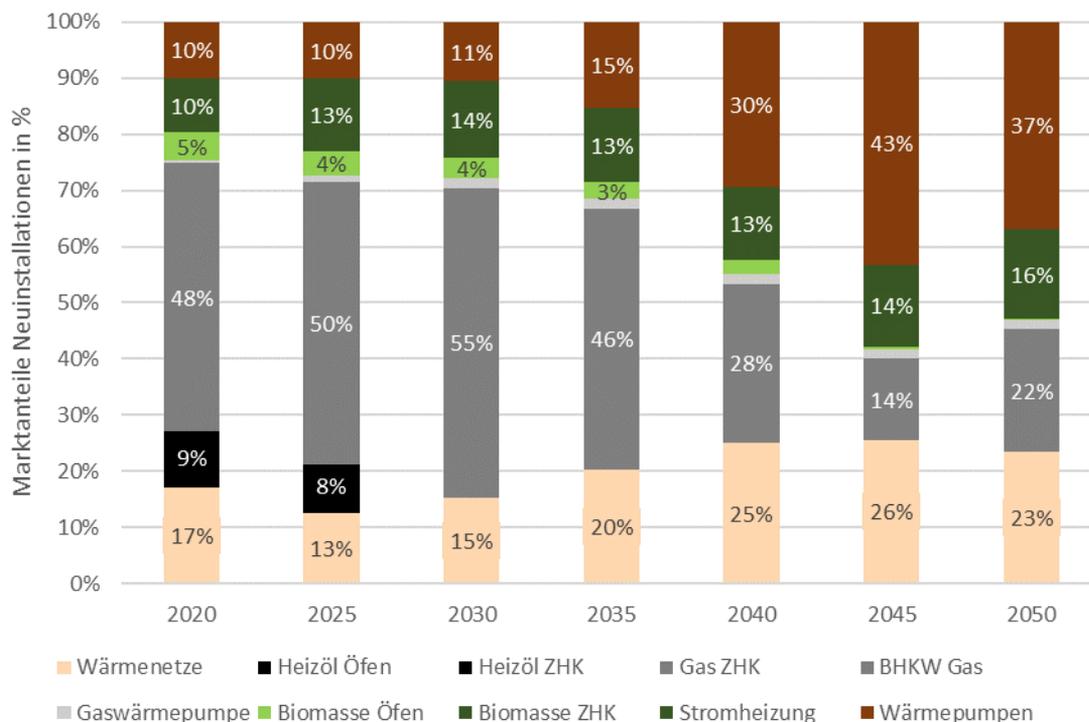
Abbildung 45: Kumulierte Anzahl durchgeführter Sanierungsmaßnahmen und errichteter Neubauten im Trendszenario



5.3 Marktanteile der primären Wärmeversorgungssysteme im Gebäudesektor

Abbildung 46 zeigt die Marktanteile der neuinstallierten Wärmeversorgungssysteme im Zeitraum 2020 bis 2050. Ab 2025 findet aufgrund des Verbots für Neuinstallationen von Ölheizungen kein Zubau mehr dieser Technologie statt. Daraufhin steigt anfangs insbesondere die Installation von Gas-Brennwertkesseln (ZHK/Zentralheizkessel), deren Marktanteil sich jedoch ab dem Jahr 2035 zugunsten von Entscheidungen in Wärmepumpen, Wärmenetze und Biomasse reduziert. Der Zubau von Wärmepumpen steigt kontinuierlich über den gesamten Simulationszeitraum. Im Jahr 2045 sind nahezu die Hälfte aller installierten Systeme Wärmepumpen. Im Jahr 2050 ist der relative Anteil von Wärmepumpen wieder etwas geringer. Die Schwankungen sind jedoch nur auf die unterschiedlichen Gebäude zurückzuführen, bei denen in den jeweiligen Jahren ein Heizungsaustausch durchgeführt wird. Der Marktanteile der Wärmepumpen bleiben auf dem gleichen hohen Niveau. Der Anteil der Biomasseheizungen (Pellets, Scheitholz und Hackschnitzel) am Zubau ist über den Simulationszeitraum kontinuierlich. Dieser ist insbesondere durch die Annahmen und Restriktionen der Biomasseverfügbarkeit für den Gebäudesektor determiniert (vgl. 4.1.5). Die Marktanteile für die Neuanschlüsse an Wärmenetzen steigen bis 2040 und bleiben im Anschluss ungefähr auf diesem Niveau.

Abbildung 46: Neuinstallationen von Wärmeversorgungstechnologien im Trendszenario im Zeitraum 2020 bis 2050



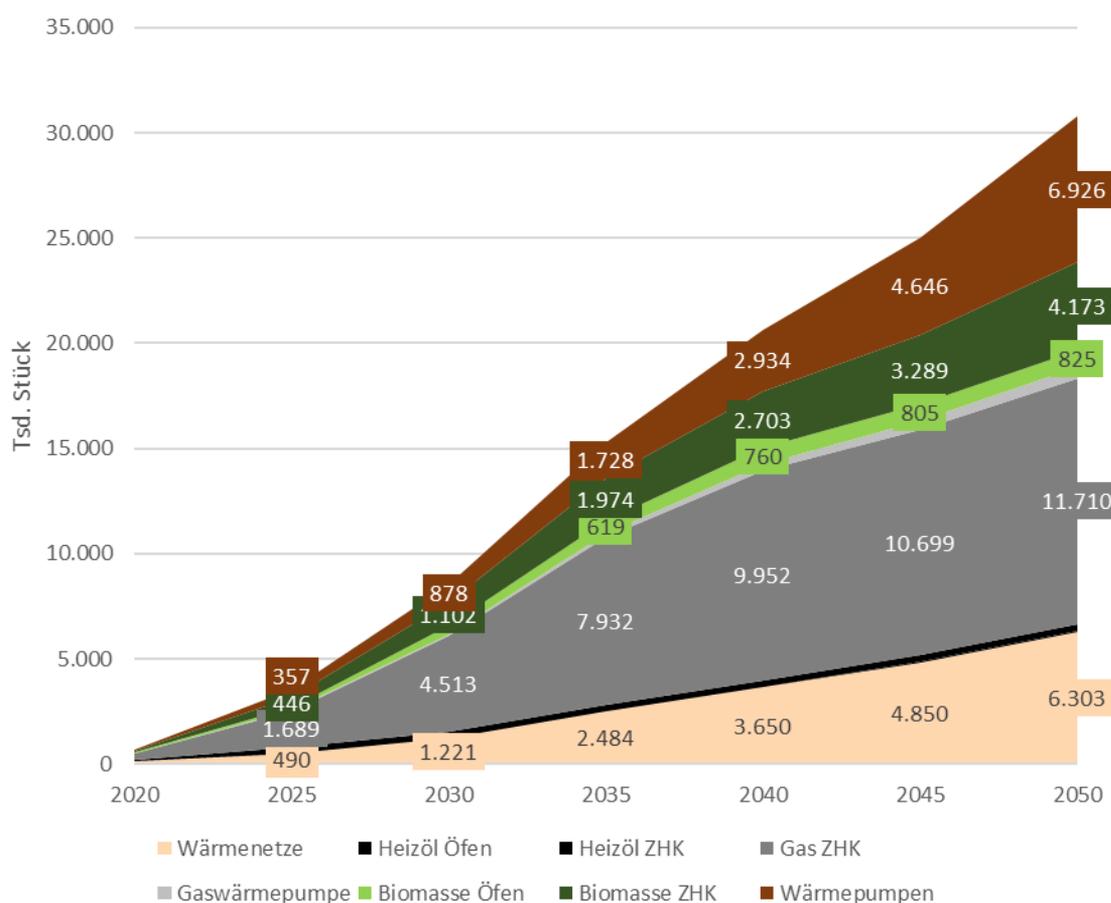
Der Anteil der Wärmeversorgungssysteme, die bei der Neuinstallation mit Solarthermie als Hybrid-systeme kombiniert werden, steigt in dem Szenario von 40 % auf 48 % im Jahr 2050. Der Anteil der Gas- und Heizölkessel, die als Hybridheizungen installiert werden ist besonders hoch. Zwischen 2020 und 2030 werden 75 % der installierten Gasheizungen als Hybridheizungen in Kombination mit Solarthermie ausgeführt. Zwischen 2031 und 2050 steigt der Hybridanteil auf 86 %.

Die Veränderung der Marktanteile zwischen Gas-ZHK und Wärmepumpen lassen sich auf die Veränderung der Energiepreise sowie die Veränderung der Gebäudestruktur zurückführen. Die Effekte können aufgrund des explorativen Ansatzes des Szenarios bzw. des Modells abgebildet werden. Im Modell werden eine Vielzahl von Investitionsentscheidungen in Wärmeversorgung aus den Entscheidungskalkülen der Gebäudeeigentümer:innen in den jeweiligen Jahren modelliert. Die Gebäudeeigentümer:innen kennen dabei nicht die zukünftige Entwicklung der Energiepreise, sondern nur die Energiepreise zum Zeitpunkt der Investition und aus der Vergangenheit. Mit steigendem CO₂-Preis und geringerem Abstand von Gas- und Strompreisen nimmt die Wahrscheinlichkeit zu, dass Wärmepumpen gewählt werden. Unter einer Annahme eines gesamtoptimierenden Akteurs, der die zukünftigen Preise kennt und diese auch in die Investitionsentscheidung einbezieht (perfect foresight), wären die Marktanteile der Wärmepumpen bereits in den Anfangsjahren des Szenarios höher. Der zweite Effekt betrifft die Veränderung der Gebäude, die über den Simulationszeitraum in den Heizungstauschzyklus kommen. Da das Modell den Gebäudebestand hochdisaggregiert abbildet, wird im Szenario berücksichtigt, dass zunehmend die Wärmeversorgung in Gebäuden getauscht wird, die sich aufgrund der energetischen Standards (geringer Wärmeverluste) und der installierten Wärmeverteilung (geringe Vorlauftemperaturen) für eine Versorgung mit Wärmepumpen eignen. Zudem wird die Eignung für einen effizienten und wirtschaftlichen

Einsatz von Wärmepumpen durch zunehmende Sanierungsmaßnahmen in älteren Gebäudebeständen weiter erhöht.

Was die Entwicklung der Marktanteile der jährlichen Neuinstallation mit Bezug für den Heizungsmarkt bedeutet, verdeutlicht Abbildung 47 mit der Darstellung der kumulierten Installationen über den modellierten Zeitraum. So werden bis 2040 knapp 3 Million und bis 2050 knapp 7 Million Wärmepumpen installiert. Trotz einem Rückgang in den Marktanteilen dominieren weiterhin die Gaskessel mit knapp 11,7 Mio. installierten Anlagen bis zum Jahr 2050. Allerdings wird der Großteil der Anlagen bereits bis zum Jahr 2040 installiert. Die kumulierte Anzahl neuer Wärmenetzanschlüssen beträgt 6,3 Mio. bis zum Jahr 2050. Im Folgenden werden die resultierenden Marktanteile detaillierter nach Gebäudetyp und Erbauungsalter der Gebäude analysiert.

Abbildung 47: Kumulierte Neuinstallationen von Wärmeversorgungstechnologien im Trendszenario bis 2050

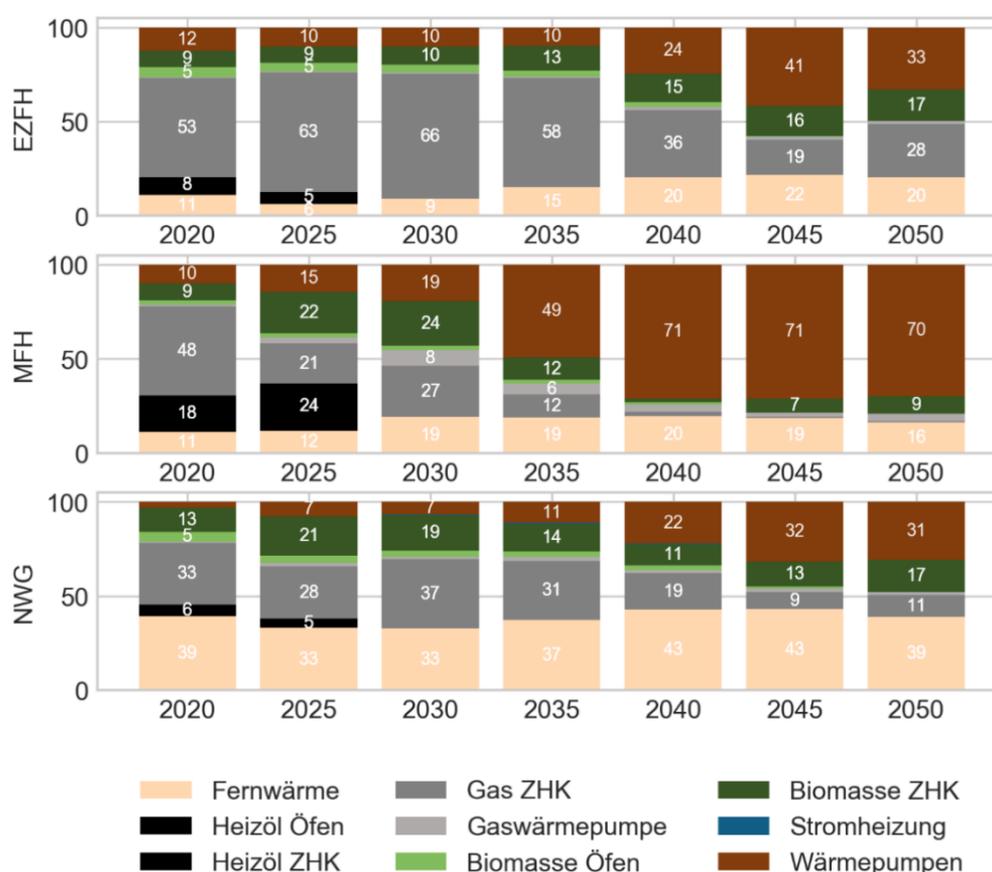


Marktanteile Wärmeversorgung nach Gebäudetyp

Abbildung 48 zeigt die relativen Anteile der installierten Wärmeversorgungssysteme nach Gebäudetyp. Absolut werden in EZFH die meisten Wärmeversorgungssysteme installiert. Bis 2035 sind in EZFH gasbasierte Systeme die vorherrschende Technologie, erst ab 2040 ist ein deutlicher Rückgang der Neuinstallationen zu beobachten. Der Anteil von Wärmenetzanschlüssen steigt bereits

ab 2035 während die Neuinstallationen bei Wärmepumpen erst ab 2040 im Austausch zu Gastech- nologien zunehmen. Bei MFH steigt bis 2025 der Anteil von Installationen in Heizöl-Technologien. Der Wegfall dieser Technologien aufgrund des Neuinstallationsverbotes wird dann durch gasba- sierte Wärmeversorgungssysteme, aber auch Biomasse und geringfügig durch Wärmepumpen ausgeglichen. Ab dem Jahr 2035 steigt der Zubau von Wärmepumpen stark an, während der Zubau von gasbasierten Technologien und Biomasse rückläufig ist. Neben den Wärmepumpen steigen auch die relativen Neuanschlüsse an Nah- und Fernwärme deutlich an. Bei Nichtwohngebäuden haben Wärmenetzanschlüsse einen konstant hohen Marktanteil zwischen 43 und 33 %. Gasbetrie- bene Wärmeversorgungssysteme haben bis 2035 ebenfalls einen hohen Anteil an den Neuinstal- lationen, der sich jedoch bis 2050 zugunsten von Biomasse und Wärmepumpen reduziert.

Abbildung 48: Neuinstallationen von Wärmeversorgungssystemen nach Gebäudetyp im Trendszenario



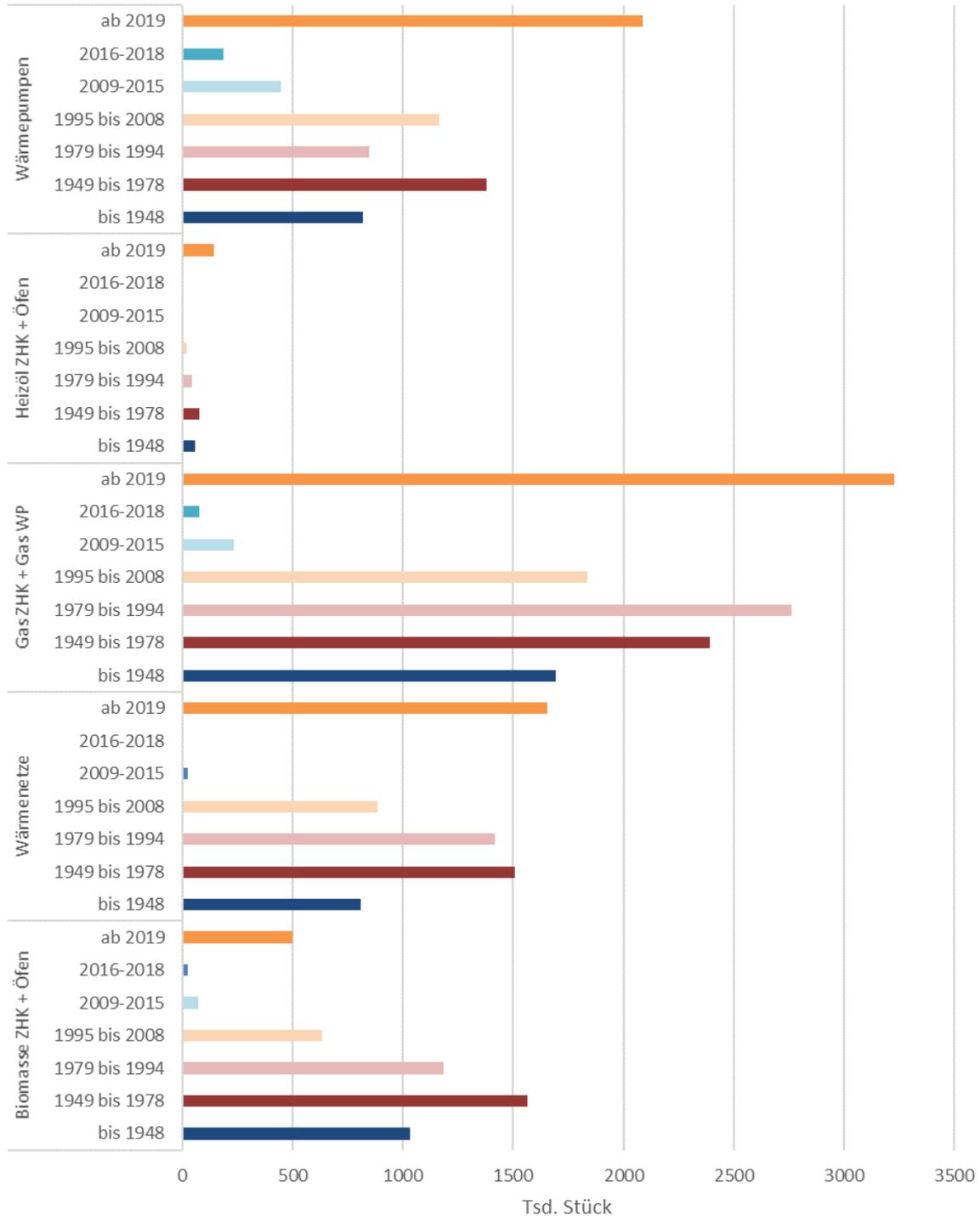
EZFH= Ein- und Zweifamilienhaus, MFH=Mehrfamilienhaus, NWG = Nichtwohngebäude

Marktanteile Wärmeversorgung nach Baualtersklasse der Gebäude

Abbildung 49 zeigt die Anzahl der vorrangig installierten Wärmeversorgungssysteme über den gesamten Simulationszeitraum nach Baualtersklassen. Bei der Darstellung ist zu beachten, dass Neubauten im Vergleich der Baualtersklassen den geringsten Energieverbrauch haben und sich eine Darstellung der Baualtersklassen nach Endenergiebedarf deutlich unterscheiden würde.

Erwartungsgemäß fallen in Gebäuden aus dem Zeitraum 2009 bis 2018 am wenigsten Neuinstallationen an. Die installierten Wärmeversorgungssysteme in diesen Baualtersklassen verteilen sich vorrangig auf Wärmepumpen und gasbasierte Technologien.

Abbildung 49: Anzahl der vorrangig installierten Wärmeversorgungssysteme nach Baualtersklassen über den Zeitraum 2020 bis 2050 im Trendszenario

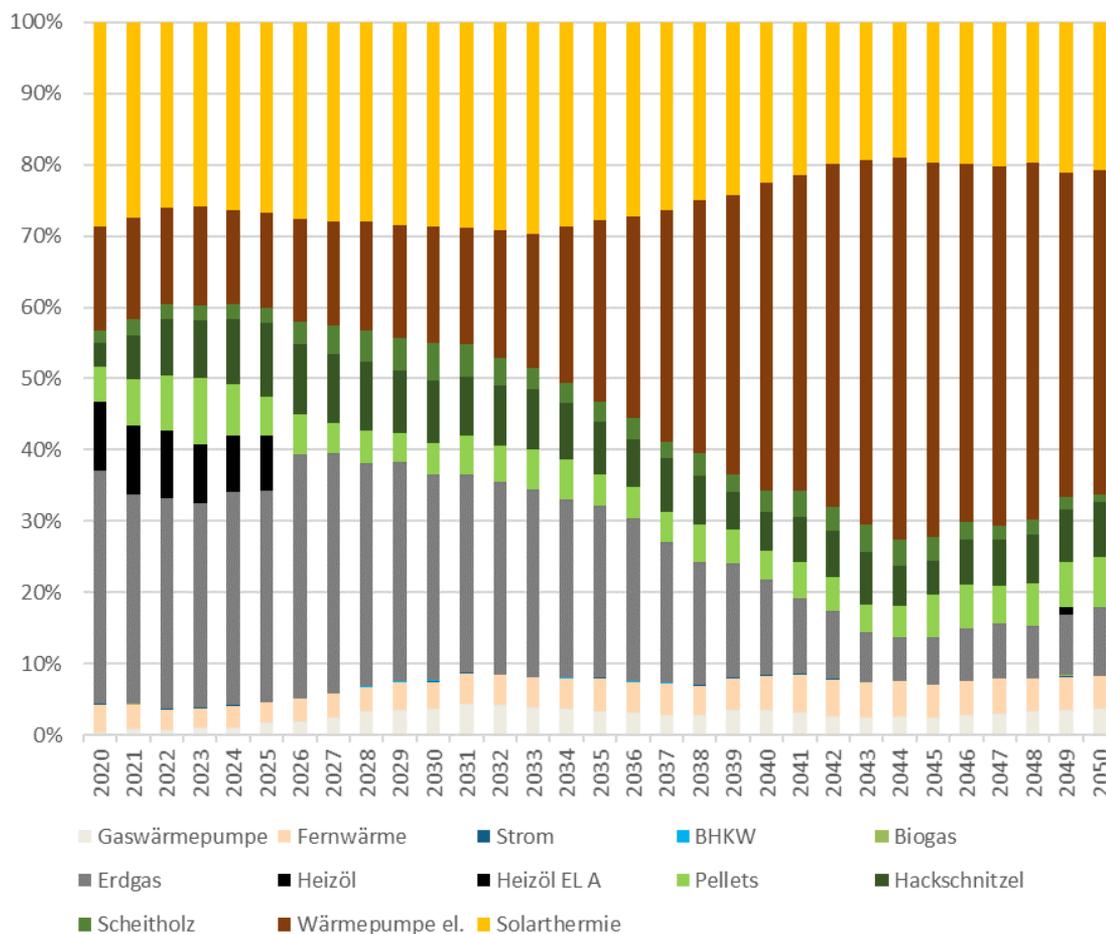


Absolut betrachtet werden Wärmepumpen vorrangig in Neubauten installiert, die ab dem Jahr 2019 bis zum Ende des Simulationszeitraum errichtet werden. Anders als die anderen Baualterklassen, umfassen Neubauten allerdings einen Zeitraum von 30 Jahren und verzerren deshalb die Darstellung. Über den Simulationszeitraum werden in allen Baualterklassen Wärmepumpen installiert, auch in den Gebäuden, die vor 1948 errichtet wurden. Bis zum Neuinstallationsverbot von Heizkesseln ab dem Jahr 2025 werden im Modell noch Heizöl-Technologien installiert. Diese Installationen finden im Modell hauptsächlich in Gebäuden vor 1979 statt, in denen heute schon der größte Teil der Heizkessel installiert ist (vgl. Kapitel 4.1.6). Allerdings werden auch noch in Neubauten Heizkessel in Kombination mit Solarthermie installiert. Gemessen an der Anzahl werden am meisten gasbetriebene Wärmeversorgungssysteme wie Gasbrennwertkessel und Gaswärmepumpen im Simulationszeitraum zugebaut. Der größte absolute Zubau erfolgt mit 3,2 Mio. Anlagen wie bei den Wärmepumpen in Neubauten. In Bezug auf die Baualterklassen 2009 bis 2018 werden weniger gasbetriebene Wärmeversorgungssysteme als Wärmepumpen installiert. Dafür erfolgt ein größerer Zubau in den älteren Baualterklassen (vor 1948 bis 2008). Relativ gesehen werden unter Berücksichtigung der aggregierten Betrachtung der Neubauten in der Baualterklasse 1979 bis 1994 mit 2,7 Mio. Anlagen am meisten Gasbrennwertkessel bzw. Gaswärmepumpen installiert. In Bezug auf die Wärmenetze ist festzustellen, dass ebenfalls in den Neubauten der größte Zubau stattfindet. Bis 2050 werden jedoch auch in den Baualterklassen 1949 bis 1978 und 1979 bis 1994 eine große Anzahl von Gebäuden an Wärmenetze angeschlossen. Bei Gebäuden aus den Jahren 2009 bis 2018 finden nahezu keine Anschlüsse statt. Mit Biomasse betriebene Wärmeversorgungssysteme werden vor allem in älteren Baualterklassen installiert. In Neubauten ist die Anzahl Neuinstallationen dagegen gering.

5.4 Investitionen in Wärmeversorgung

Als Ergänzung zu den Marktanteilen zeigt Abbildung 50 die getätigten Investitionen in Wärmeversorgungssysteme über den Simulationszeitraum.

Abbildung 50: Anteil der Wärmeversorgungssysteme am gesamten Investitionsvolumen im Zeitraum 2020 bis 2050 im Trendszenario



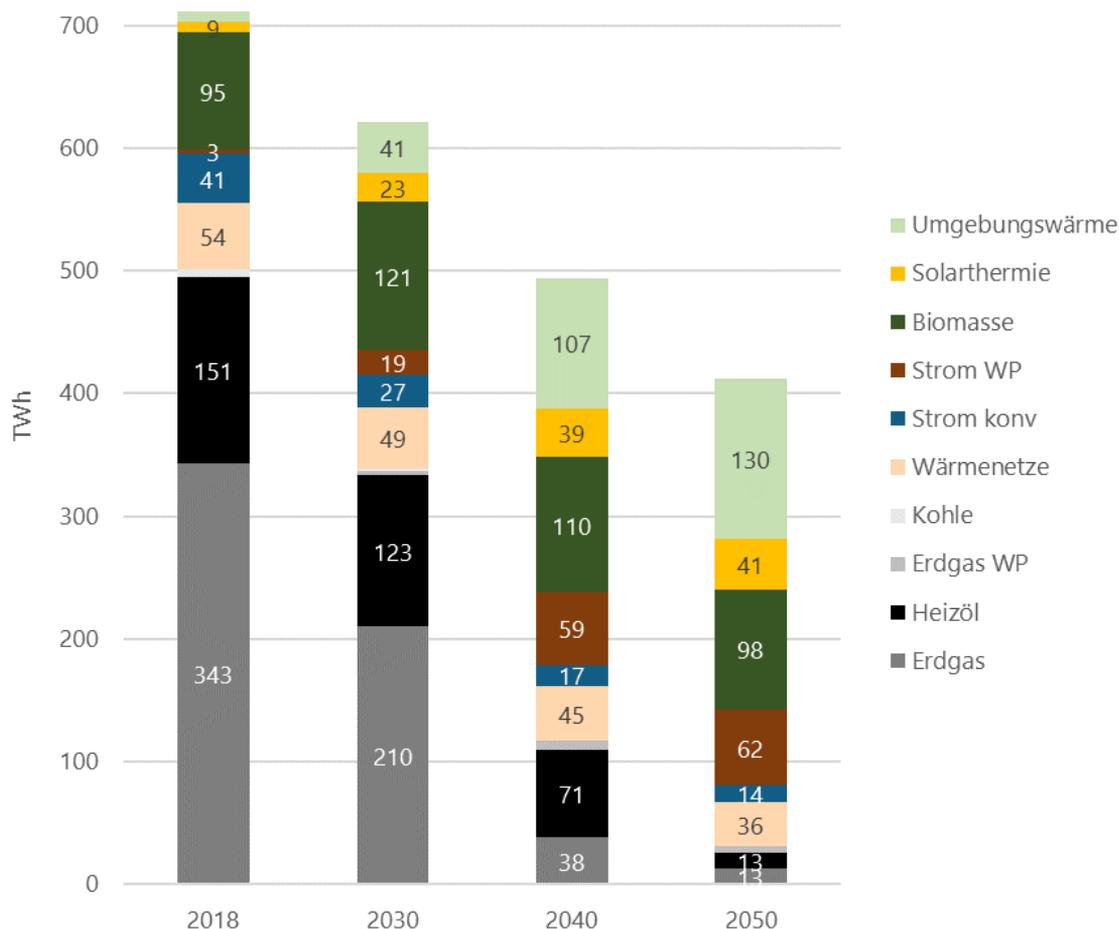
Dabei ist zu beachten, dass das gesamte jährliche Investitionsvolumen von rund 5 Mrd. Euro im Jahr 2020 auf rund 19 Mrd. Euro im Jahr 2050 steigt. Die absoluten Investitionen nehmen bei jeder Technologie zu. Die Verteilung der Investitionen lässt sich mit den Marktanteilen der neuinstallierten Wärmeversorgungstechnologien vergleichen, wobei Wärmepumpen und Biomassekessel bei gleicher thermischer Leistung signifikant höhere Investitionen aufweisen als Gas- oder Heizölkessel. Darüber hinaus ist die Entwicklung der Hybrid-Systeme mit Solarthermie dargestellt. Diese verbleiben bis 2033 auf dem gleichen Niveau, im Anschluss sinken die relativen Investitionen in diese Technologie.

5.5 Sensitivität - Berücksichtigung technologischer Lerneffekte bei Wärmeversorgungssystemen

Dieses Kapitel beschreibt eine Sensitivität des Trendszenarios, in welcher technologische Lerneffekte bei den Technologien berücksichtigt werden (vgl. Abbildung 37). Diese Effekte schlagen sich

bis 2050 in deutlich reduzierten Investitionskosten nieder. Abbildung 51 zeigt die Entwicklung des Endenergiebedarfs nach Energieträgern mit Berücksichtigung technologischer Lerneffekte bei den eingesetzten Wärmeversorgungssystemen.

Abbildung 51: Entwicklung des Endenergiebedarfs für Raumwärme und Warmwasser in Wohngebäuden und Nichtwohngebäuden (GHD) in der Sensitivität des Trendszenarios



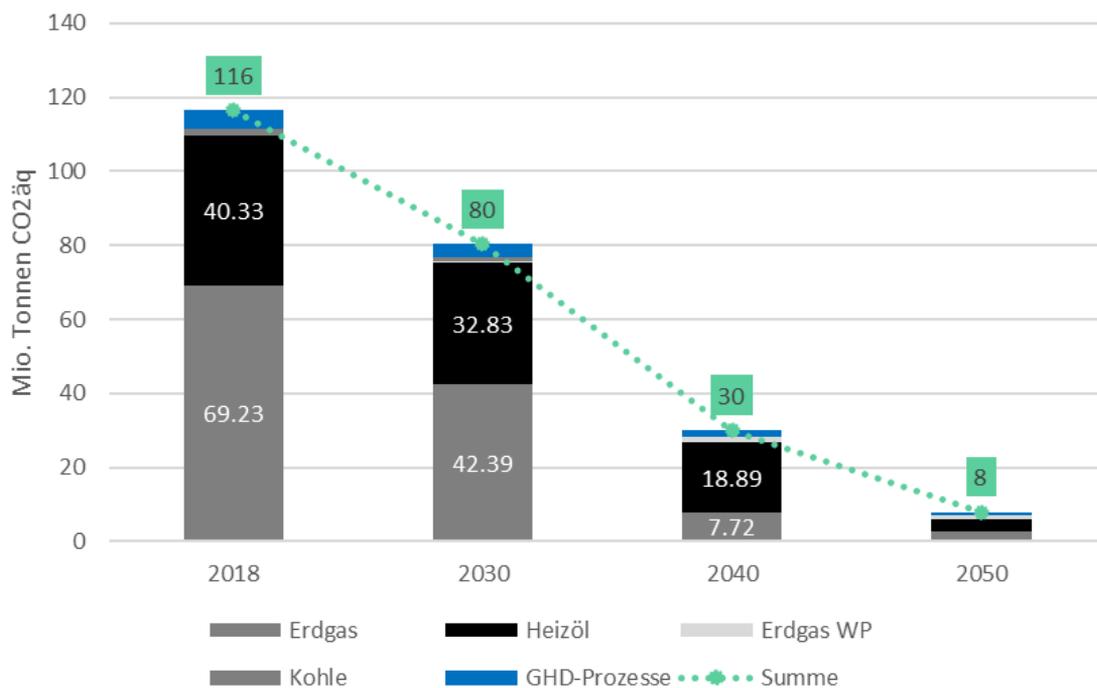
Der Endenergiebedarf reduziert sich im Zeitraum 2018 bis 2030 um 13 % und im Zeitraum 2018 bis 2050 um 42 %. Mit Bezug auf die eingesetzten Energieträger führen die simulierten Investitionsentscheidungen aufgrund der Lerneffekte und daraus resultierenden niedrigeren Kosten zu einer extremen Verschiebung von Erdgas zu Wärmepumpen (Umgebungswärme und Strom WP) und auch Biomassekesseln¹⁶. Im Jahr 2030 findet zunächst ein Ausbau der Biomasse statt, welcher jedoch in den folgenden Jahren wieder zugunsten von Wärmepumpen reduziert wird. Im Vergleich zu Abbildung 37 (ohne technologische Lerneffekte) findet ein deutlich beschleunigter Ausbau der Wärmepumpen statt. Bereits 2030 erreichen Wärmepumpen einen Anteil von 10 % am Endenergiebedarf, 2050 werden 47 % erreicht. Der Ausbau geht jedoch auch zu Lasten der kombinierten Anlagen mit Solarthermie und Wärmenetzen. Der Anteil von Solarthermie beträgt im Jahr 2050

¹⁶ Bei Biomassekesseln ist ein konstanter Anteil von 45 TWh für Kaminöfen enthalten.

nur rund 10 %. Wärmenetze tragen im Jahr 2030 zu 8 % und im Jahr 2050 zu 9 % zum Endenergiebedarf bei. Dezentrale EE-Wärme erreicht bis 2030 insgesamt einen Anteil von 30 % und bis 2050 einen Anteil von 65 %. Der Anteil fossiler Heizkessel mit Erdgas und Heizöl an der Wärmeerzeugung liegt im Jahr 2050 bei nur noch 6 %.

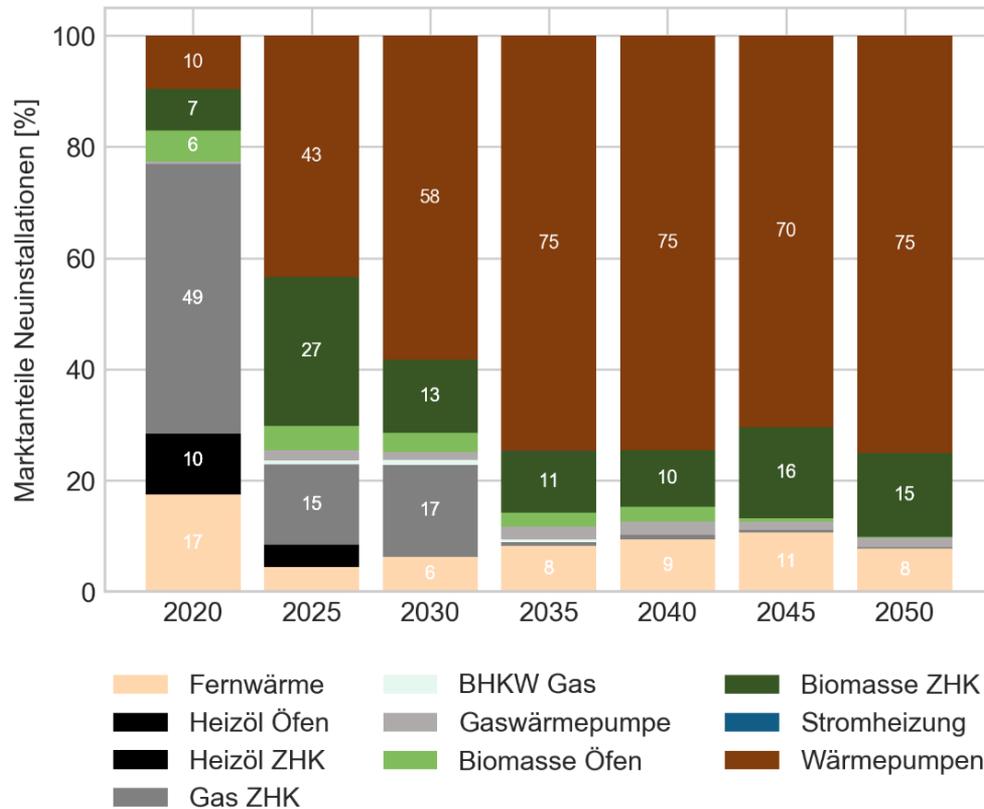
Aufgrund des beschleunigten Ausbaus und höheren Anteils an dezentraler EE-Wärme sinken die THG-Emissionen bis 2050 stärker als im Trendszenario. Ausgehend von 116 Mio. Tonnen CO₂e im Jahr 2018 sinken die Emissionen durch die Kostenreduzierung aufgrund technologischer Entwicklungen von Wärmepumpen bis 2050 auf 8 Mio. Tonnen CO₂e.

Abbildung 52: Treibhausgasemissionen nach Energieträgern bei der Sensitivität des Trendszenarios



Analog zum Trendszenario zeigt Abbildung 53 die Marktanteile der neuinstallierten Wärmeversorgungssysteme in Wohngebäuden und Nichtwohngebäuden über den Simulationszeitraum. In dieser Abbildung wird deutlich, dass Wärmepumpen ab 2035 die zentralen Wärmeversorgungssysteme im Gebäudesektor darstellen.

Abbildung 53: Neuinstallationen von Wärmeversorgungssystemen im Zeitraum 2020 bis 2050 in der Sensitivität des Trendszenarios



Wie im Trendszenario werden Ölheizungen ab 2025 nicht mehr neu installiert. Im Austausch steigen die Anteile von Gasheizungen, Wärmenetzanschlüssen und Wärmepumpen. Der Anteil an gasbasierten Technologien reduziert sich jedoch deutlich schneller als im Trendszenario. Bereits im Jahr 2035 werden Gasheizungen beinahe vollständig aus den Neuinstallationen verdrängt, zugunsten von Hybrid-Systemen mit Solarthermie und Wärmepumpen. Im Jahr 2050 wird in 75 % der Fälle eine Entscheidung zugunsten der Wärmepumpe getroffen. Die Anteile von Wärmenetzen sind dagegen geringer als im Trendszenario und die Anteile von Biomasse ZHK mit dem Trendszenario vergleichbar.

5.6 Zusammenfassung und Fazit

Die Ergebnisse des Trendszenarios zeigen, dass für die Erreichung des Sektorziels im Jahr 2030 eine **Ziellücke von rund 18 Mio. Tonnen CO₂e** besteht. Die THG-Emissionen des Gebäudesektors betragen im **Jahr 2030 rund 88 Mio. Tonnen CO₂e**. Das bedeutet, dass die derzeitigen Maßnahmen bei Weitem nicht ausreichen, um die Ziele für 2030 zu erreichen. Zusätzliche Maßnahmen, die ab 2022 Wirkung zeigen, müssten zusätzliche jährliche Einsparungen von **2,25 Mio. Tonnen CO₂e** induzieren.

Die Ergebnisse zeigen jedoch auch, dass mit den bestehenden Maßnahmen bis zum Jahr 2050 bereits sehr hohe THG-Emissionseinsparungen realisiert werden können. Die THG-Emissionen betragen im Jahr 2050 nur **noch 19 Mio. Tonnen CO₂e**, was bereits einem Rückgang von **rund 91 % gegenüber 1990 für den Gebäudesektor** entspricht. Im Trendszenario sind keine technologischen Lerneffekte berücksichtigt worden. Auch die spezifischen Fördersätze und das Förderbudget ist konstant gehalten worden. Die höhere Dynamik im Rückgang der THG-Emissionen nach 2030 ist insbesondere auf die erhöhten Energiepreise aufgrund der **steigenden CO₂-Preise** zurückzuführen. Ebenso spielt jedoch auch die Aktivitätssteigerung aufgrund des Alters des Gebäudebestandes und der installierten Wärmeversorgungstechnologien bedingt eine Rolle. Diese führt dazu, dass mehr Gebäude in den **natürlichen Austausch- und Instandsetzungszyklus** gelangen und damit die Sanierungs- und Heizungstauschrate steigt. Zusammen mit den höheren Energiepreisen für die Gebäudeeigentümer:innen steigt die Sanierungsrate bis auf 2,6 % im Jahr 2040 an. Inwieweit diese Dynamik durch fehlende Fachkräfte oder notwendige Angebote am Markt (serielle Sanierung, one-stop-shop) eingeschränkt werden könnte, wird im Rahmen der Szenarienmodellierung nicht untersucht.

Mit Bezug auf die Installation erneuerbarer Energien spielen die Wärmepumpen eine entscheidende Rolle. Während heute der Heizungsmarkt immer noch durch Gas- und Heizöl betriebene Wärmeversorgungssysteme mit über 90 % Marktanteil dominiert wird, sinkt dieser Anteil bis 2050 auf 14 %. Wärmepumpen haben ab 2045 einen Marktanteil von durchschnittlich 40 % an allen Neuproduktionen. Insgesamt werden im Simulationszeitraum rund 7 Mio. zusätzliche Wärmepumpen installiert. Darüber hinaus sind bis 2050 zusätzlich 6 Mio. Anschlüsse an Nah- und Fernwärmenetze erforderlich. Im Trendszenario wird somit die Wärmewende in der Versorgungstechnik erreicht, allerdings zu spät, um eine Relevanz für die Zielerreichung 2030 zu erreichen und auch nicht ausreichend, um die Ziele eines klimaneutralen Gebäudebestandes bis 2050 vollständig zu erfüllen.

Einordnung des Trendszenarios im Vergleich zu anderen aktuellen Referenzszenarien

Tabelle 9 ordnet das Trendszenario im Vergleich zu den in Kapitel 3 diskutierten Referenzszenarien ein. Beim Vergleich der relativen Endenergiebedarfsreduktion zeigt sich, dass das Trendszenario hinter dem Ambitionsniveau von Politikszenerarien IX und dem NECP Gutachten zurückbleibt. Allerdings muss dabei beachtet werden, dass die statistische Grundlage im Trendszenario aktueller ist und die anderen beiden Szenarien 2016 als Basisjahr verwendet haben. Mit Bezug auf den absoluten Endenergiebedarf für Raumwärme und Warmwasser im Gebäudesektor liegt das

Trendszenario mit 618 TWh im Jahr 2030 sogar unter den Werten der anderen beiden Szenarien¹⁷. Für den Vergleich bis 2050 zeigt sich jedoch die höhere Dynamik im Trendszenario bei den Sanierungen gegenüber dem NECP-KSPr Szenario. Hinsichtlich der THG-Emissionsminderung bis 2030 liegen Trendszenario und PSZ-IX fast gleich auf, während im NECP-KSPr Szenario rund 10 Million Tonnen CO₂e mehr eingespart werden. Einerseits wird im NECP Gutachten ein anderes Modell eingesetzt, dass auf einem Bilanzierungsansatz (Expertenschätzung für Treiber) und nicht auf einem Simulationsansatz basiert, andererseits ist insbesondere auch die Annahme eines signifikant höheren CO₂-Preises relevant. Im NECP Gutachten wird eine lineare Steigerung des CO₂-Preises auf nominal 180 EURO/t bis 2030 bzw. auf 326 EURO/t im Jahr 2050 angenommen, während die Annahmen im Trendszenario bei 150 EURO/t bis 2030 und 275 EURO/t konstant für 2040 bis 2050 liegen (vgl. Kapitel 4.2.1).

Tabelle 9: Ergebnisse des Trendszenarios im Vergleich zu anderen Referenzszenarien

Ergebnisse der Szenarien	KlimaNeut2050 Trendszenario	PSZ-IX- KSPr Szenario	NECP-KSPr Szenario
Rückgang Endenergiebedarf 2020 bis 2030	12 %	20 %	16%
Rückgang Endenergiebedarf 2020 bis 2050	43 %		33 %
THG Emissionen Gebäudesektor 2030 [Mio. Tonnen CO ₂ e]	88	87	78
THG Emissionen Gebäudesektor 2050 [Mio. Tonnen CO ₂ e]	19		12

Erkenntnisse zur Ziellücke 2030 und 2050

Aus dem Trendszenario und der resultierenden Ziellücke lassen sich bereits einige Erkenntnisse ableiten, die für die Schließung der Ziellücke und damit eine Ausrichtung zusätzlicher Instrumente relevant sind. Hierbei ist für die Erreichung des Sektorziels 2030 ein anderer Fokus notwendig als für die Zielerreichung eines klimaneutralen Gebäudebestandes 2050.

Mit Bezug auf die Erreichung der Ziele im Jahr 2030 ist als notwendiges Kriterium eine höhere Dynamik bei der Sanierungsrate und der Heizungsaustauschrate erforderlich. Daher sind Instrumente notwendig, die den Investitionsentscheidungsprozess früh adressieren und nicht erst, wenn eine Investition aufgrund von Mängeln am Gebäude oder der Versorgungstechnik notwendig er-

¹⁷ Der Endenergiebedarf für Raumwärme und Warmwasser im Gebäudesektor liegt im Jahr 2030 im PSIX-KSPr Szenario bei 639 TWh und im NECP-KSPr Szenario bei 626 TWh. Ein direkter Vergleich von absoluten Werten ist auch aufgrund von unterschiedlichen Temperaturbereinigungen nur bedingt möglich.

scheint. Vorgezogene Investitionen in Gebäudehülle und insbesondere Wärmeversorgungssysteme, die entsprechend den Instandsetzungszyklen im Gebäudebereich teilweise erst nach 2030 getätigt werden, müssten zur Erreichung der Ziele angereizt werden. Die Ergebnisse des Trendszenarios zeigen auch, dass trotz Förderung zum großen Teil Standardsanierungen durchgeführt werden. Zur Einordnung der Ergebnisse ist es relevant, dass das Modell Invert/ee-lab (vgl. Anhang C) eine Simulation realer Investitionsentscheidungen durchführt und dabei individuelle Entscheidungskriterien der Gebäudeeigentümer:innen auf Basis empirischer Erhebungen zum Entscheidungsverhalten berücksichtigt (siehe (vgl. Achtnicht & Madlener, 2014; Dütschke et al., 2020; Steinbach, 2015; Stieß et al., 2010)). Gerade im Wohngebäudebereich basiert die Investitionsentscheidung in der Regel nicht auf dynamischen Wirtschaftlichkeitsberechnungen entsprechend betriebswirtschaftlichen Literatur. So ist für viele Akteure die Höhe der notwendigen Investitionen ein wichtiges Entscheidungskriterium, was dazu führt, dass bei zu großen Differenzinvestitionen zwischen Standard- und ambitionierten Sanierungen, die Maßnahmen mit den geringeren Investitionen mit höherer Wahrscheinlichkeit gewählt wird, auch wenn die Förderung die Wirtschaftlichkeitslücke nach Kapitalwertberechnung über die rechnerische Abschreibungsdauer decken würde.

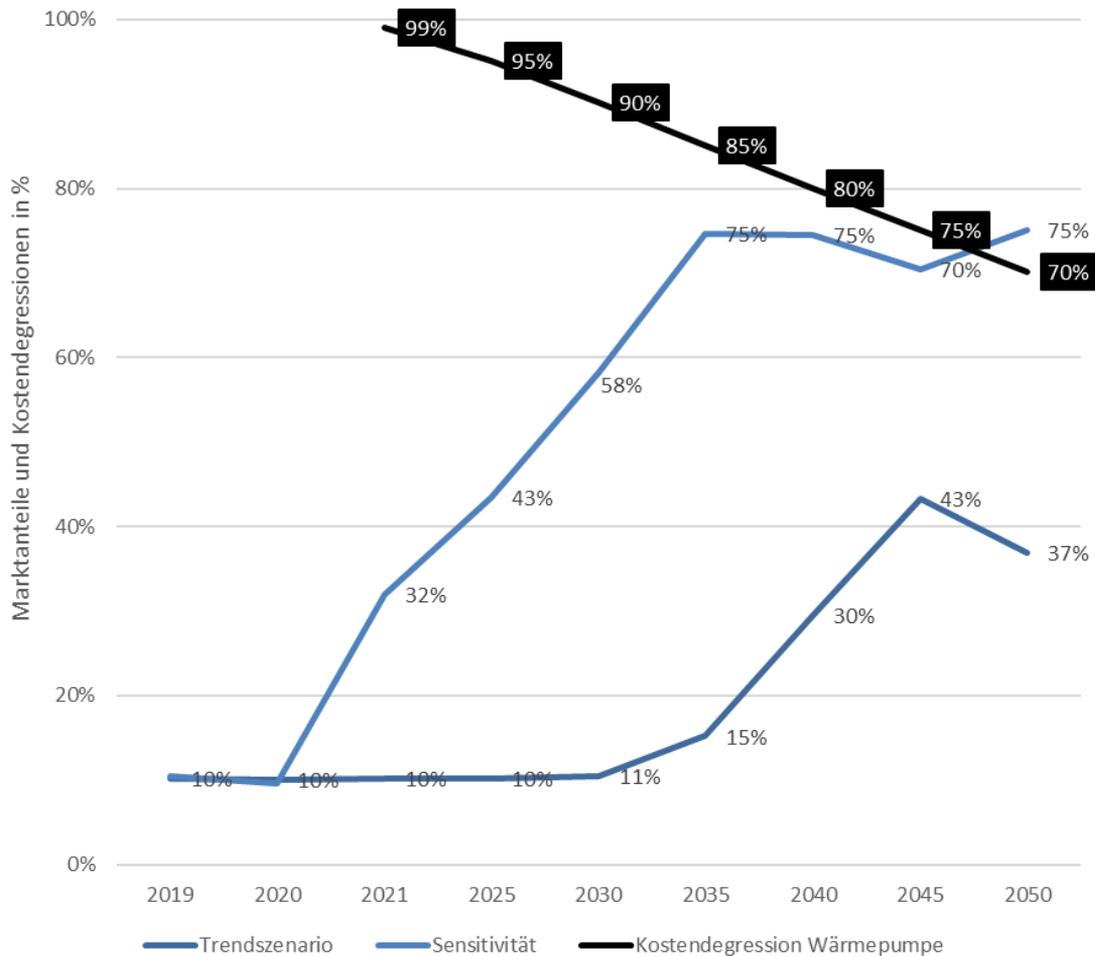
Jede Sanierung stellt eine Opportunität für ambitionierte Sanierungsmaßnahmen dar, werden diese nicht genutzt, werden diese Potentiale bis 2050 in den meisten Fällen durch einen zweiten Sanierungszyklus nicht mehr genutzt werden. Instrumente, mit denen technisch machbare und etablierte ambitionierte Sanierungspakete angereizt werden, könnten dieses Potential heben. Allerdings ist allein die Erhöhung der Sanierungstiefe für die Zielerreichung 2030 nicht ausreichend.

Zentrale Stellschraube für eine Zielerreichung 2030 ist die Umstellung der Wärmeversorgung auf erneuerbare Energien und/ oder Wärmenetze. Sofern bis 2030 nicht eine Defossilisierung der leitungsgebundenen Energieträger (Gas und Fernwärme) erreicht wird, ist eine Umstellung auf Wärmepumpen und Biomassekessel erforderlich. Aus den Ergebnissen des Trendszenarios zeigt sich, dass der bis 2030 anvisierte CO₂-Preis nicht ausreicht, um fossilen Brennstoffen und insbesondere Erdgas signifikant Marktanteile zu nehmen.

Bei der berechneten Sensitivität mit einer unterstellten Kostendegression bei Wärmepumpen findet bereits im Jahr 2035 eine extreme Verschiebung von Erdgas zu Wärmepumpen statt. Durch den Markthochlauf können die THG-Emissionen bis 2050 auf 8 Mio. Tonnen CO₂e gesenkt werden.

Abbildung 54 zeigt die Entwicklung der Marktanteile des Trendszenarios und der Sensitivität des Trendszenarios mit den darin angenommenen Kostendegressionen. Im Zuge der sinkenden Investitionskosten für Wärmepumpen in der Sensitivität steigen die Marktanteile für Wärmepumpen bereits ab 2020 im Vergleich zum Trendszenario signifikant an. Bis 2035 sinken die Investitionskosten um 15 %, während der Marktanteil für Wärmepumpen auf 75 % steigt.

Abbildung 54: Entwicklung der Marktanteile für Wärmepumpen im Trendszenario und der Sensitivität des Trendszenarios unter Berücksichtigung der Kostendegressionen



Durch den Markthochlauf von Wärmepumpen können die THG-Emissionen bis 2050 auf 8 Mio. Tonnen CO₂e gesenkt werden. Die Sensitivitätsanalyse bestätigt die Relevanz von Maßnahmen, die nicht nur bei Gebäudeeigentümer:innen ansetzen, sondern zu Kostensenkungen entlang der Wertschöpfungskette führen. Allerdings kommt auch hier die Verschiebung zur erneuerbaren Wärmeversorgung zu spät für die Erreichung des Sektorziels.

Ein kostenoptimaler Pfad aus Gesamtenergiesystemsicht, der nicht nur eine vollständige Dekarbonisierung des Gebäudebestandes bis 2050, sondern auch mittelfristig das Sektorziel 2030 sowie das gesamte THG Minderungsziel unter Berücksichtigung der anderen Energiesektoren erreicht, wird im Folgenden im Zielszenario analysiert.

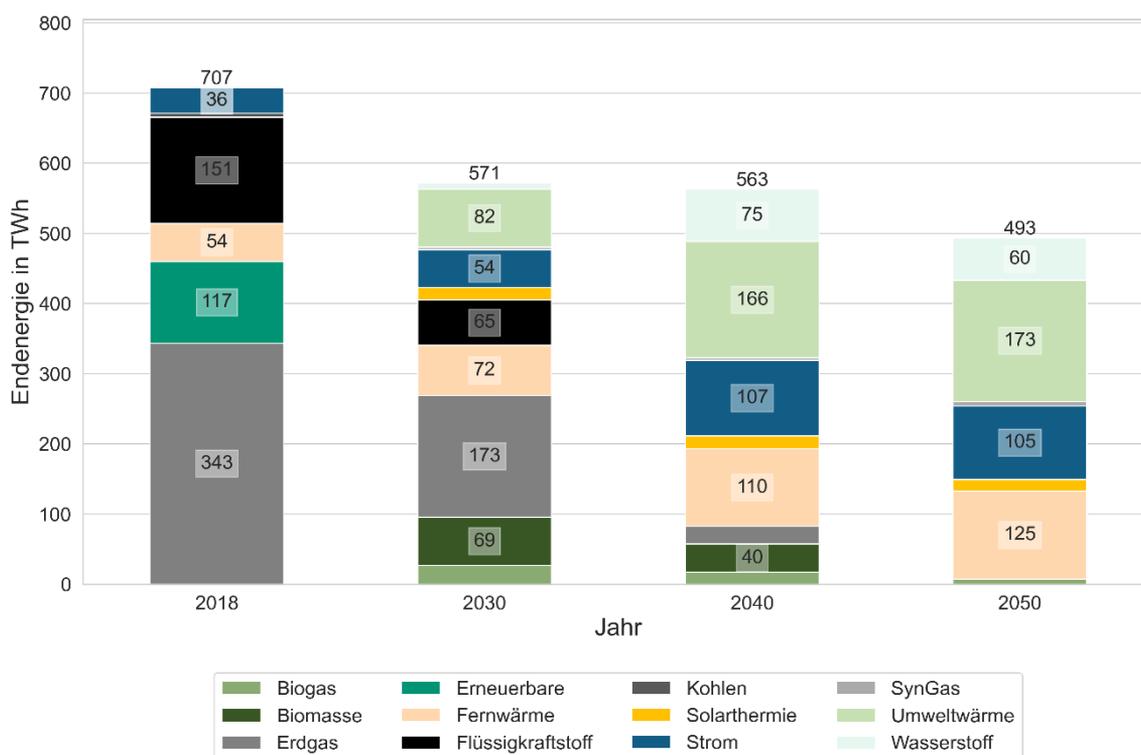
6 Ergebnisse Zielszenario

Im Folgenden Kapitel werden die Ergebnisse des Zielszenarios unter Berücksichtigung der in Kapitel 4.3 beschriebenen Rahmendaten dargestellt und analysiert.

6.1 Energiebedarf und THG-Emissionen im Gebäudesektor

In Abbildung 55 ist der Endenergiebedarf für Raumwärme und Trinkwarmwasser von Wohngebäuden und GHD nach KSG Sektorendefinition¹⁸ für die Jahre 2030, 2040 und 2050 dargestellt.

Abbildung 55: Endenergiebedarf des Zielszenarios für Raumwärme und Warmwasser in Wohngebäuden (Private Haushalte) und Nichtwohngebäuden (GHD)



Der Endenergiebedarf für Raumwärme und Warmwasser für Wohngebäude und GHD reduziert sich durch die energetische Gebäudesanierung sowie durch die Installation effizienterer Wärmeversorgungssysteme, wie Wärmepumpen sowie Nah- und Fernwärme anstelle von Gas- und Ölkesseln deutlich. Unter Berücksichtigung der „frei verfügbaren“ Energieträger Umweltwärme und Solarthermie werden im Zielszenario im Jahr 2030 nur noch rund 80 % der Energie, die im Jahr 2018 benötigt wird, verwendet, im Jahr 2050 sind es noch rund 70 % des heutigen Energiebedarfs. Insbesondere ist hier ein Rückgang der Verwendung fossiler Brennstoffe zu beobachten. Während im Jahr 2030 noch 173 TWh Erdgas und 65 TWh flüssige Energieträger eingesetzt werden, werden fossiles Gas und flüssige fossile Energieträger im Jahr 2050 nicht mehr verwendet. Der im Jahr

¹⁸ Ohne die Quellkategorie (CRF 1.A.5 Militär)

2050 minimal verbleibende Rest an gasförmigen Energieträgern ist synthetisch hergestelltes erneuerbares Gas und Biogas.

Anhand der Darstellung der Endenergie wird der mittel- bis langfristige Energieträgerwechsel deutlich: Um die energiebedingten THG-Emissionen im gesamten Energiesystem zu minimieren, ist im Wärmesektor ein Wechsel von einem von Gas und Flüssigkraftstoffen dominierten System zu CO₂-armer und bis zum Jahr 2050 CO₂-neutraler Nah- und Fernwärme, Strom und Wasserstoff notwendig. Während heute die Verwendung von Strom im Gebäudesektor für die Bereitstellung von Raumwärme und Warmwasser vernachlässigbar klein ist, bestimmt Strom im Zielszenario im Jahr 2050 rund 20% des Endenergiebedarfs. Zudem erhöht sich die Endenergiemenge in Wärmenetzen im Vergleich zum Jahr 2018 um den Faktor 2,3 bis zum Jahr 2050. Ab dem Jahr 2030 kommt dann zunehmend auch der bisher im Gesamtsystem fast nicht genutzte Energieträger Wasserstoff zum Einsatz, der im Jahr 2050 mit 230 TWh heimisch aus Wind und PV Strom erzeugt sowie mit 260 TWh aus dem Ausland importiert wird.

Biomasse spielt im Zielszenario im Gebäudesektor bis zum Jahr 2050 keine Rolle mehr. Etwa 75 % der angenommenen verfügbaren Biomasse wird zu Biodiesel umgewandelt und etwa 20 % zu Biogas (Vergleiche Anhang B, Abbildung 82). Der erzeugte Biodiesel wird anschließend vorrangig zur Defossilisierung von Schiffs-, (motorisierten) Bahn- und Luftverkehr eingesetzt, wo der Einsatz von Wasserstoff oder Strom nur begrenzt möglich ist. Das erzeugte Gas wird gemeinsam mit dem importierten synthetischen Gas in den verbleibenden Gaskessel, oder vor allem in Gasturbinen oder GuD-Kraftwerken zur Spitzenlastdeckung eingesetzt. Die Rolle der erneuerbaren Energieträger Solarthermie und Umweltwärme steigt bis zum Jahr 2050 deutlich an. Während solarthermische Wärme zu geringen Anteilen zur Deckung der Gebäudewärme beiträgt, werden im Jahr 2030 schon 72 TWh_{th} aus Wärmenetzen bereitgestellt werden. Diese Summe steigt bereits im Jahr 2040 auf 110 TWh_{th} und im Jahr 2050 auf 125 TWh_{th}.

THG-Emissionen im Gebäudesektor

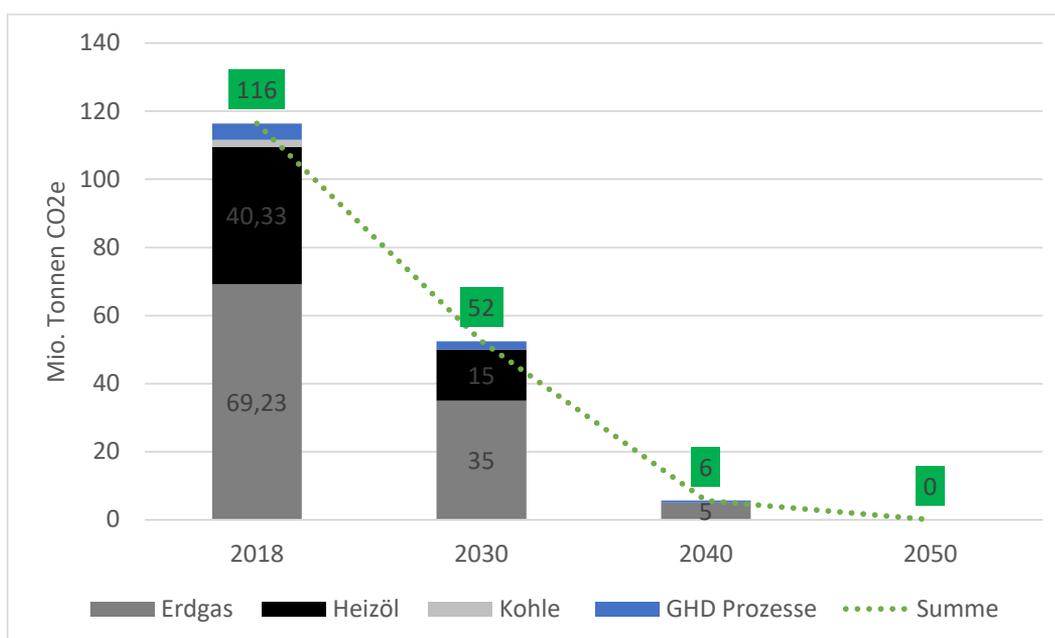
In Abbildung 56 ist der Rückgang der THG-Emissionen im Gebäudesektor von 2018 bis 2050 dargestellt. Die energiebedingten stationären THG-Emissionen des Gebäudesektors (Haushalte und GHD) sind derzeit vorrangig auf Gas und flüssige Kraftstoffe (leichtes Heizöl) zurückzuführen. Zudem kommen Emissionen durch die Prozesse im Teilsektor GHD hinzu, die einen vergleichsweise geringen Anteil ausmachen¹⁹. Wie in Abschnitt 4.3.1 beschrieben, können die Emissionen von den Zielsetzungen des KSG abweichen, da im Modell REMod eine gesamtsystemische Optimierung erfolgt und sektorenübergreifende Ziele und keine sektorenspezifischen Ziele vorgegeben werden.

Das Klimaschutzgesetz sieht eine verbindliche jährlich zulässige Emissionsmenge der Treibhausgasemissionen des Gebäudesektors von 70 Mt CO₂e im Jahr 2030 vor. Die jährlich zulässigen Emissionsmengen sind vom Jahr 2020 bis 2030 vorgegeben. Zusätzlich ist ein Banking Mechanismus bei Über- oder Unterschreitung gesetzlich verankert, sodass die jährlichen Budgets ab dem Jahr 2021 gemäß der Über- oder Unterschreitungsmengen angepasst werden. Bei Annahme, der im

¹⁹ Es wurde angenommen, dass sich der prozentuale energiebedingte Rückgang des Sektors Industrie auf die GHD-Prozessemissionen übertragen lässt.

Gesetz verankerten, jährlichen Emissionsmengen würde das Zielszenario im Jahr 2030 das KSG Budget mit 52 Mt CO₂e um rund 18 Mt CO₂e unterschreiten. Zum einen ist dieser Umstand darauf zurückzuführen, dass das sektorenübergreifende Ziel gemäß den Annahmen eine Reduktion um 65 % gegenüber 1990 festlegt, was ambitionierter als das Sektorenaggregat des Klimaschutzgesetzes ist, welches eine Reduktion von rund 55% gegenüber 1990 vorsieht. Zum anderen ist die deutliche Unterschreitung auf den sektorenübergreifenden Ansatz zurückzuführen. Was bedeutet, dass die Systemoptimierung über alle Sektoren²⁰ in einer anderen Verteilung der Treibhausgasminderung über die Sektoren im Vergleich zum KSG resultiert. Durch den raschen Anstieg von Wärmepumpen und Anschlüssen an das Wärmenetz sowie die teilweise Nutzung von synthetischem CH₄ in Gaskesseln werden bereits im Jahr 2040 im Gebäudesektor im Zielszenario lediglich 6 Mio. t CO₂e emittiert. Aufgrund der Zunahme von Wärmepumpen und Anschlüsse an Wärmenetze kommt es zu Verschiebungen der Emissionen in den Sektor Energiewirtschaft.

Abbildung 56: Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Gebäudesektor im Zielszenario



Anmerkung: Dargestellt sind die THG Emissionen des Gebäudesektors für das Jahr 2018 gemäß den Trendtabellen des Umweltbundesamtes (UBA 2021) zur Vorjahresschätzung 2020; die Jahre 2030, 2040 und 2050 sind Ergebnisse des Modells REMod.

6.2 Sanierungsmaßnahmen und Neubauten

Die Ergebnisse des Zielszenarios zeigen, dass im Gebäudesektor insbesondere bis zum Jahr 2030 ein deutlicher Anstieg der Sanierungsrate einen Beitrag zur Erreichung der 65%-Minderung bis zum Jahr 2030 leisten kann (siehe Abbildung 57). Der 10-Jahres Durchschnitt von 2020 bis 2030 liegt bei 1,6 % (im Jahr 2030 ist die Sanierungsrate 2 %). Dieser Anstieg der Sanierungsrate ist maßgeblich auf das Zwischenziel, 65 % der Emissionen im Jahr 2030 zu reduzieren, zurückzuführen. Dieses Bild ändert sich deutlich ab dem Jahr 2030, da hier die Sanierungsrate wieder abflacht

²⁰ Nicht betrachtet werden die Sektoren Landwirtschaft sowie Abfallwirtschaft und Sonstiges

(2030-2040 auf 1,46 %) und dann bis 2050 konstant bei rund 1% liegt. In diesen Jahren reicht für eine Minderung der Emissionen im Gebäudesektor eine geringere Sanierungsrate in Kombination mit dem Einsatz von Wärmepumpen und Anschlüsse an Wärmenetze aus. Die durchschnittliche Sanierungsrate über alle Jahre hinweg liegt bei 1,37 %.

Abbildung 57: Durchschnittliche Sanierungsrate nach Dekaden im Zielszenario

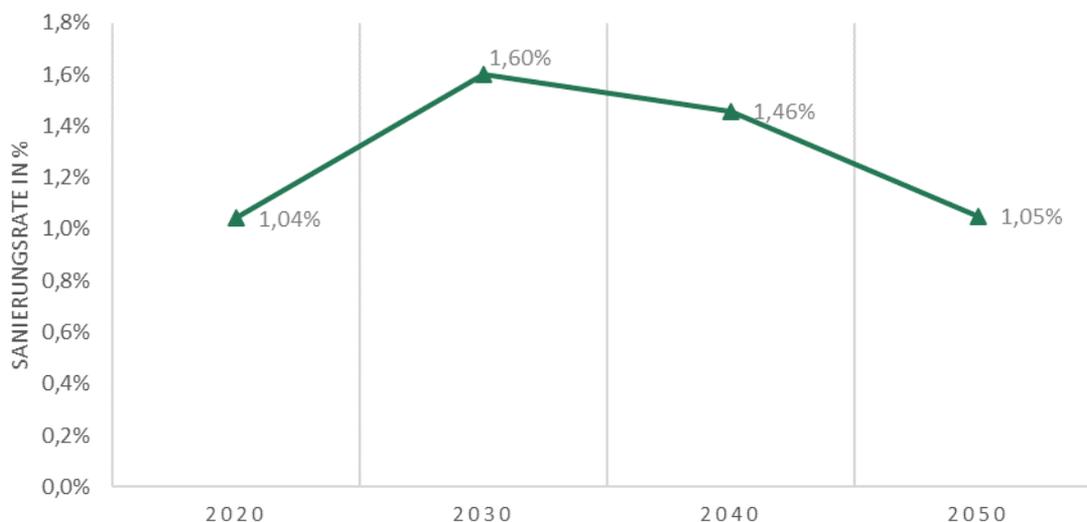
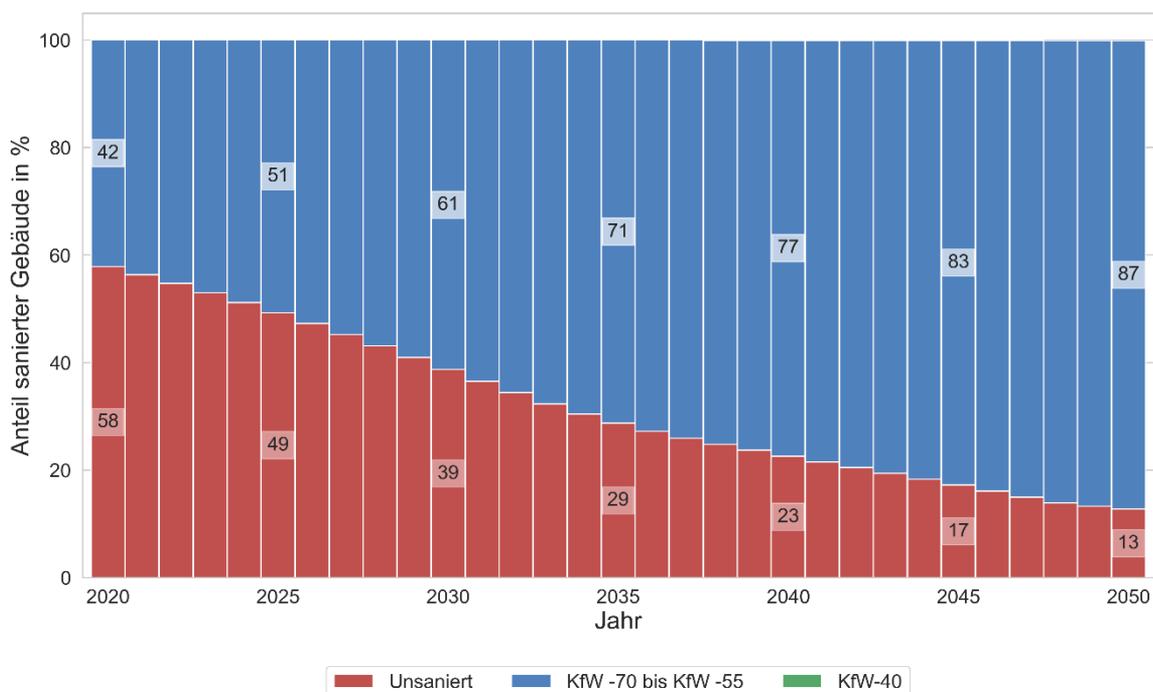


Abbildung 58 zeigt die Entwicklung der Sanierungstiefe im Zielszenario in den Jahren 2020 bis 2050. Bis 2030 sinkt der Anteil unsanierter Gebäude von heute rund 58 % des Gebäudebestands auf knapp 39 % im Jahr 2030 und bis 2050 auf rund 13 %. Die Sanierungstiefe entspricht dabei dem in REMod hinterlegten ersten Sanierungspaket mit durchschnittlichen 50 Prozent Reduktion des Heizwärmebedarfs. Die Option KfW 40 ist dabei mit einem Anteil im Jahr 2050 von unter 0,3 % des Gebäudebestands kein wesentlicher Teil der kostenoptimierten Lösung. Eine genaue Aufschlüsselung der durchgeführten Sanierungsmaßnahmen wird durch die Disaggregation der Ergebnisse unter Berücksichtigung der detaillierten Abbildung des Gebäudebestandes mit Invert/ee-Lab analysiert.

Die Ergebnisse bilden die aus Gesamtsystemsicht kostengünstigste Lösung ab, wobei ausschließlich die Investitions- und Betriebskosten der unterschiedlichen Technologien betrachtet werden. Förderungen hingegen werden im Modell nicht abgebildet, um aus der Makro-Perspektive den kostengünstigsten Pfad zur Erreichung von Klimaschutzziele zu ermitteln. Vor diesem Hintergrund ist die Sanierung von Gebäuden zur Reduzierung von Emissionen, verglichen mit dem Einsatz von Wärmepumpen sowie Nah- und Fernwärme in Kombination mit dem Ausbau von erneuerbaren Energien nicht die kostengünstigste Lösung. Insbesondere die Sanierung zu Passivhäusern stellt hier eine vergleichsweise teure Lösung dar, weshalb diese auch keinen relevanten Teil der kostengünstigsten Lösung darstellt. Zur Einordnung ist es jedoch entscheidend, dass die Ergebnisse der Systemoptimierung immer stark von den angenommenen Kosten abhängen und somit sehr sensitiv auf Änderungen dieser Annahmen reagieren können. Ebenso ist bei diesen Ergebnissen zu beachten, dass keine Fördermaßnahmen mit in die Berechnung einbezogen werden.

Vor dem Hintergrund der Prämisse Effizienz zu fördern und eine Reduzierung des Endenergieverbrauchs zu erreichen, könnte der Sanierung von Gebäuden somit eine größere Bedeutung zukommen als es die hier gezeigten Ergebnisse widerspiegeln.

Abbildung 58: Sanierungstiefe des Zielszenarios für den gesamten Transformationspfad anteilig für alle Gebäude

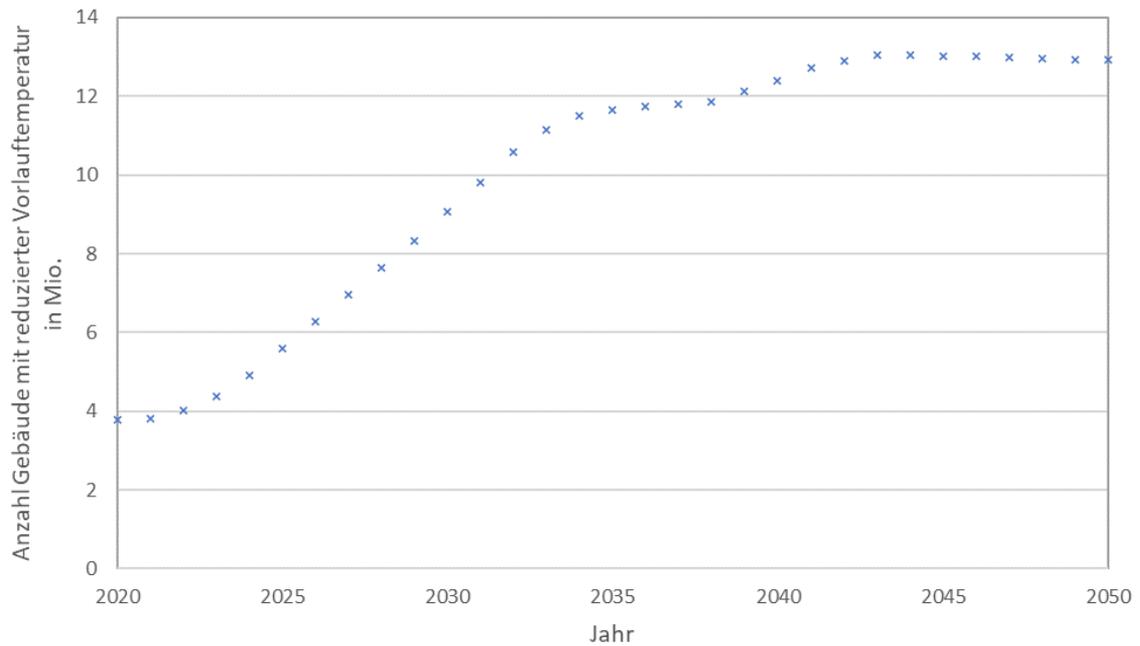


Neben der Sanierung der Gebäudehülle zur Reduzierung der Heizlast kann zusätzlich durch den Einsatz eines anderen Wärmeübertragers, beispielsweise die Umstellung einer Radiatorheizung auf Fußbodenheizung, die Vorlauftemperatur von Heizungstechnologien reduziert und somit die Effizienz dieser verbessert werden. Die Anzahl der Gebäude, bei denen diese Umstellung erfolgt, wird im Zielsystem durch die Optimierung bestimmt und ist abhängig von den hierfür angenommenen Kosten²¹.

Abbildung 59 zeigt die Anzahl der umgestellten Gebäude in Millionen. Ähnlich der Sanierungsrate zeigt sich auch hier insbesondere bis zum Jahr 2030 ein starker Anstieg der umgestellten Gebäude von heute etwa 4 Mio. auf über 10 Mio. Dieser Anstieg ist ebenfalls auf das Zwischenziel einer CO₂-Reduktion von -65 % zurückzuführen. In den Jahren bis 2030 bis 2050 flacht der Anstieg stark ab und es wird mit etwa 13 Mio. Gebäuden mit einer reduzierten Vorlauftemperatur ein Höchststand der Kostenoptimierung erreicht.

²¹ Anzumerken ist hierbei noch, dass der Einsatz der Heizungstechnologien in REMod nicht an die Vorlauftemperatur gebunden ist. Es können also alle Heizungstechnologien sowohl bei einer Vorlauftemperatur von 35 °C als auch bei 65 °C im Modell eingesetzt werden. Dies hat jedoch unter Umständen Auswirkungen auf die Effizienz der Technologien und eventuell auf die anfallenden Kosten haben. Diese Zusammenhänge sind im Modell berücksichtigt.

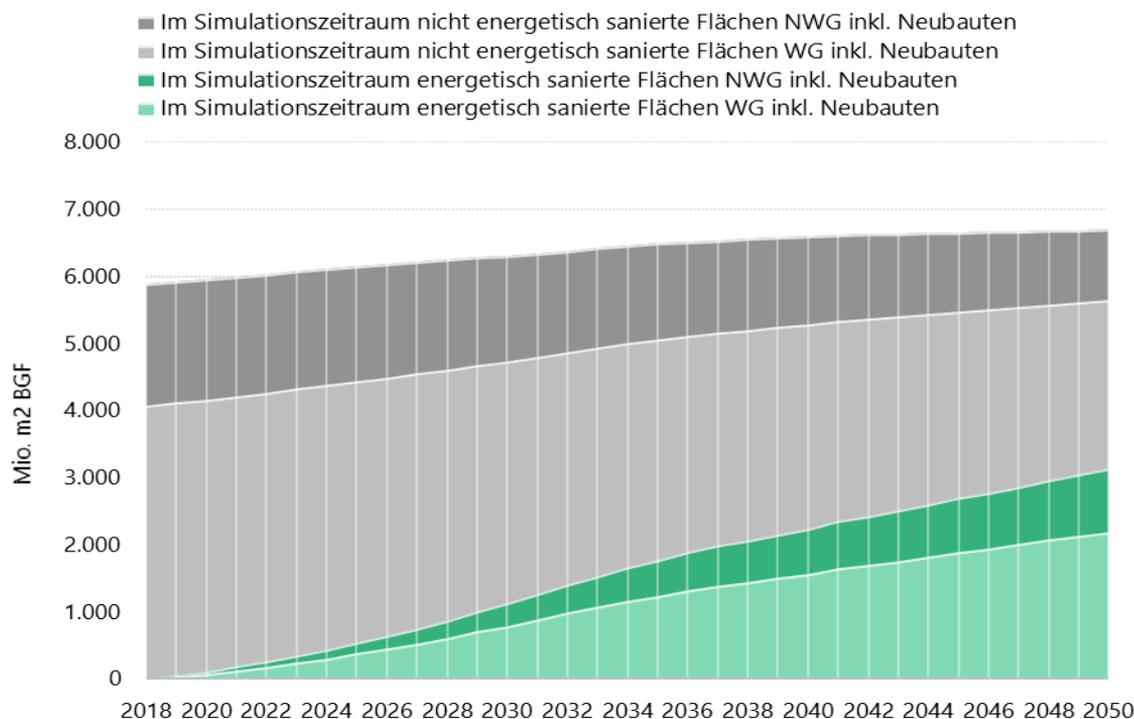
Abbildung 59: Anzahl Gebäude mit reduzierter Vorlauftemperatur von 65°C auf 35°C durch den Einsatz eines anderen Wärmeübertragers (Beispielsweise Umstellung von Radiatorheizung auf Fußbodenheizung)



Disaggregation der Ergebnisse mit dem Gebäudemodell Invert/ee-lab

Abbildung 60 zeigt die kumulierte Entwicklung der Gebäudeflächen (Bruttogeschossfläche, BGF) und den Anteil der sanierten Fläche über den simulierten Zeitraum.

Abbildung 60: Entwicklung der sanierten Gebäudeflächen im Zielszenario über den Zeitraum 2018 bis 2050



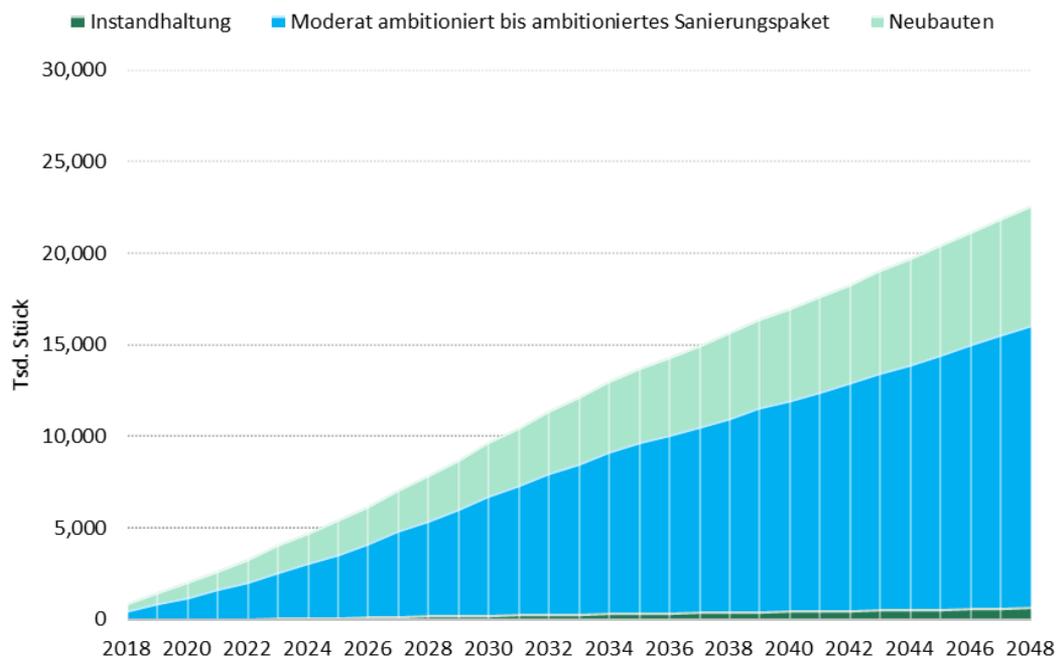
In grün ist die kumulierte Fläche sanierter Wohn- und Nichtwohngebäude dargestellt. Die sanierten Flächen nehmen ab Simulationsbeginn kontinuierlich zu, sind allerdings entsprechend der geringeren Sanierungsaktivität niedriger als im Trendszenario. Im Jahr 2050 sind sowohl 46 % der BGF von Wohngebäuden als auch der BGF von Nichtwohngebäuden saniert.²² Zu beachten ist dabei, dass im Modell der Gebäudebestand in Deutschland im Jahr 2018 abgebildet ist, in welchem bereits sanierte Gebäude enthalten sind. Die grau unterlegte Fläche enthält neben den nicht energetisch sanierten Gebäuden auch die Gebäude, bei denen nur eine Instandsetzung durchgeführt wurde. Zudem sind in der Darstellung auch die im Simulationszeitraum entstandenen Neubauten enthalten, die bis 2050 nicht saniert werden.

Abbildung 61 zeigt die Anzahl der sanierten Gebäude nach Sanierungstiefe sowie die Anzahl an Neubauten über den gesamten Simulationszeitraum. Wie in Abbildung 58 bereits ersichtlich, werden im Zielszenario nur Sanierungen mit einem Standard von etwa KfW 70 bis 55 (siehe Kapitel 4.3.2) durchgeführt, womit eine Einsparung von 50 % des bisherigen Heizwärmebedarfs erreicht wird. Dieser Standard entspricht einem moderat ambitionierten bis ambitionierten Sanierungspaket. Aufgrund der unterschiedlichen Modellsystematik besteht in der Disaggregation daneben auch die Option zur Instandsetzung des Gebäudes. Über den Simulationszeitraum werden insgesamt 6 Mio. Neubauten errichtet, sowie knapp 700.000 Instandsetzungen und rund 15 Mio. Sanie-

²² Darstellung ist ein Ergebnis der Disaggregation mit dem Modell Invert/ee-Lab ist. Anders als in Modell REMod, werden in der Auswertung aus Invert/ee-Lab die energetisch sanierten Gebäude im Simulationszeitraum dargestellt. In den grauen Flächen sind neben Neubauten auch die Gebäude enthalten, die nicht energetisch saniert werden und die vor 2018 bereits saniert wurden und bis 2050 nicht mehr saniert werden.

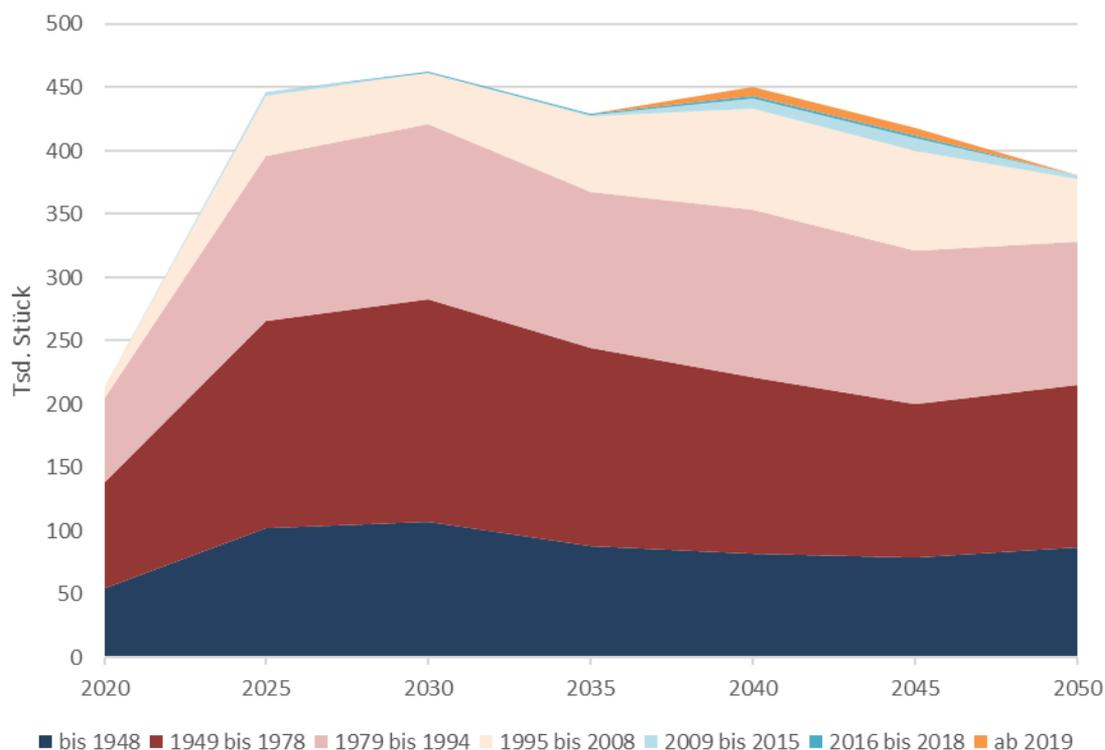
rungen nach dem Sanierungspaket moderat ambitioniert bis ambitioniert vorgenommen. Aufgrund der unterschiedlichen Modellsystematik und hinterlegten Annahmen zu Sanierungsstandards, sind die Darstellungen zur Sanierungstiefe auch nur bedingt zwischen den Modellen vergleichbar.

Abbildung 61: Kumulierte Anzahl durchgeführter Sanierungsmaßnahmen und errichteter Neubauten im Zielszenario



In Abbildung 62 sind die sanierten Gebäude nach Baualtersklassen über den Zeitraum 2020 bis 2050 dargestellt.

Abbildung 62: Anzahl der jährlichen Gebäudesanierungen nach Baualtersklassen über den Zeitraum 2020 bis 2050 im Zielszenario



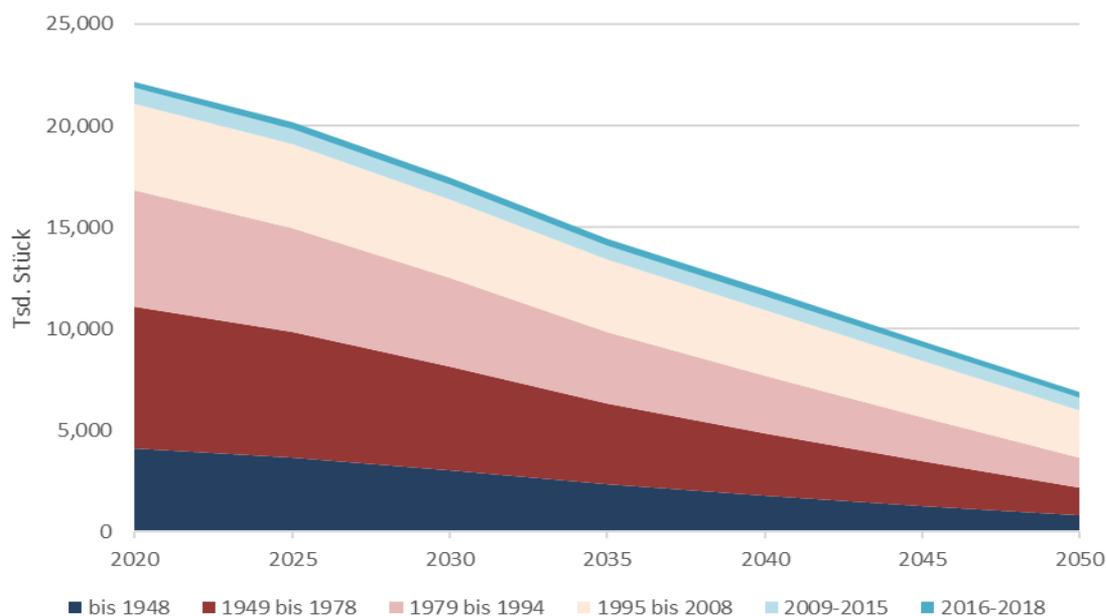
Der Verlauf der Sanierungen entspricht dabei der Sanierungsrate aus Abbildung 57. Im Zeitraum 2020 bis 2030 ist eine steigende Anzahl an Sanierungen der Gebäude der Baualtersklassen bis 1948 sowie bis 2008 zu beobachten. Darüber hinaus wird eine geringfügige Anzahl an Gebäuden aus der Klasse 2009 bis 2015 saniert. Von 2030 bis 2035 sinkt die Anzahl sanierter Gebäude und steigt bis zum Jahr 2040 wieder an. In diesem Zeitraum nimmt die Anzahl der älteren Gebäude, die in die Sanierung kommen ab und die Anzahl der sanierten Gebäude aus der Baualtersklasse 1995 bis 2008 steigt. Es ist allerdings auch festzustellen, dass die Gebäude aus den Jahren bis 1948 ab dem Jahr 2030 bis zum Ende des Simulationszeitraums nahezu konstant bleiben. Ab dem Jahr 2035 kommen neben Gebäuden der Altersklasse 2009 bis 2015 mit den Baualtersklassen 2016 bis 2018 und ab 2019 auch erste Neubauten in die Sanierung. Im Zeitraum 2040 bis 2050 ist die Anzahl sanierter Gebäude nochmals rückläufig. Bis 2045 sinkt die Anzahl von Sanierungen der Baualtersklassen 1949 bis 1994 nochmals und steigt anschließend bis 2050 wieder an.

Als Vergleich dazu zeigt Abbildung 63 die Anzahl unsanierter Gebäude nach Baualtersklassen über den Simulationszeitraum. Da in der Darstellung nur Gebäude berücksichtigt werden, die innerhalb des Simulationszeitraums keine Sanierungsmaßnahmen durchgeführt haben, ist die Anzahl unsanierter Gebäude am Ende der Simulation höher als in Abbildung 58²³. Im Jahr 2050 verbleiben Gebäude aus allen Baualtersklassen im unsanierten Zustand. Der größte Rückgang zwischen 2020 und 2050 ist mit 80 % bei den Baualtersklassen bis 1948 und 1949 bis 1978 zu sehen. Die Anzahl

²³ Darstellung ist ein Ergebnis der Disaggregation mit dem Modell Invert/ee-Lab ist. Anders als in Modell REMod, werden in der Auswertung aus Invert/ee-Lab die energetisch sanierten Gebäude im Simulationszeitraum dargestellt.

unsanierter Gebäude ist bei den zwischen 1979 und 1994 errichteten Gebäuden um 74 % und bei den zwischen 1995 und 2008 errichteten Gebäuden um 46 % gesunken. Der geringe Rückgang bei den Gebäuden, die ab dem Jahr 2009 errichtet wurden, ist dem jungen Baualter zuzuschreiben.

Abbildung 63: Anzahl der nicht im Simulationszeitraum sanierten Gebäude nach Baualtersklassen über den Zeitraum 2020 bis 2050 im Zielszenario



6.3 Zusammensetzung der Wärmeversorgungstechnologien im Gebäudesektor

Abbildung 64 zeigt die Entwicklung des Heizungstechnologiebestandes in den Jahren 2020 bis 2050. Die absolute Anzahl an Anschlüssen nimmt gemäß den in Kapitel 4.1.2 getroffenen Annahmen zur Entwicklung der spezifischen Wohnfläche und der damit steigenden Anzahl an Haushalten zu. Die Ergebnisse des Zielszenarios zeigen, dass Wärmepumpen mit 61 % und Wärmenetze mit 28 % im Jahr 2050 zu den dominierenden Technologien im Bestand der Wärmeversorgungssysteme werden. Auch bis zum Jahr 2030 erfolgt mit 5,6 Mio. bereits ein deutlicher Anstieg an Wärmepumpen sowie an Wärmenetzanschlüssen (2 Mio.). Bei den Wärmepumpen ist im Wesentlichen die Luftwärmepumpe die dominierende Technologie, welche unter den angenommenen Kosten- und Effizienzentwicklungen gegenüber Sole- und Hybridwärmepumpen günstiger ist. Dennoch werden die letztgenannten ab dem Jahr 2045 zu kleinen Anteilen installiert. Brennstoffzellen werden ab 2030 mit geringen Marktanteilen eingesetzt. Dies spiegelt die Entwicklung des Systems wider, da Wasserstofftechnologien erst eine wesentliche Rolle spielen, wenn die installierte Leistung von Erneuerbaren Energien so groß ist, dass es sinnvoll ist Stromüberschüsse in Elektrolyseuren in Wasserstoff umzuwandeln. Ebenfalls wird im Modell angenommen, dass der Import von Wasserstoff aus dem Ausland erst ab dem Jahr 2030 möglich ist. Konventionelle Technologien wie Gas-, Öl- und Biomasse-Kessel werden bis 2050 nahezu vollständig von klimaneutralen Technologien ersetzt. Lediglich ein kleiner Anteil an Gaskesseln, welche mit synthetischem erneuerbarem Gas betrieben werden, verbleibt im System.

Abbildung 64: Entwicklung der Wärmeversorgungssysteme für die Bereitstellung von Raumwärme und Warmwasser

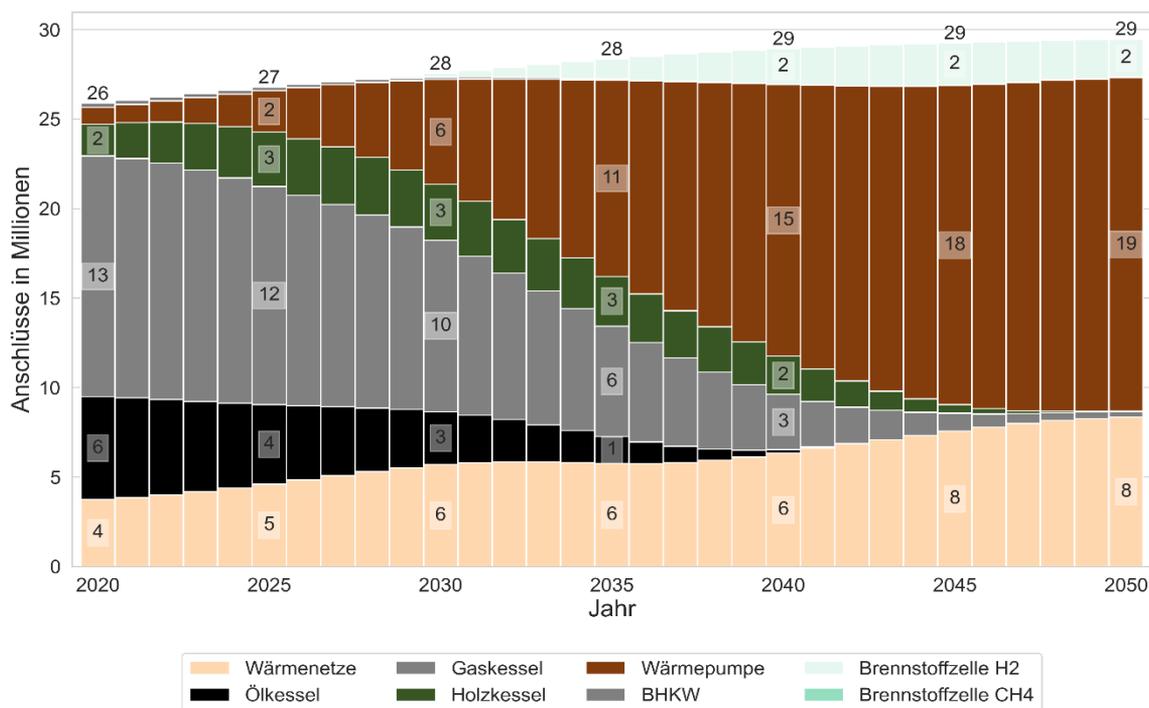


Tabelle 10 zeigt darüber hinaus die durchschnittlichen jährlichen Nettoinstallationen für die Auswahl an zukünftig relevanten Wärmeversorgungssystemen im Zielszenario. Der größte Zubau an Wärmepumpen erfolgt im Zeitraum 2030 bis 2040, während Biomassekessel nur bis 2025 installiert werden.

Tabelle 10: Durchschnittliche jährliche Anzahl ausgewählter Wärmeversorgungssysteme für den Transformationspfad des Gebäudesektors

Durchschnittlicher jährlicher Nettozuwachs in Tausend	2020-2030	2030-2040	2040-2050
Anschlüsse an das Wärmenetz	180	56	200
Wärmepumpe (Luft)	400	1.000	200
Biomassekessel	180		
Brennstoffzellen (H2)	10	170	8

Abbildung 65 zeigt den kumulierten Bruttozuwachs der Wärmeversorgungstechnologien im Zielszenario. Wie bereits in Abbildung 64 zu sehen, sind Wärmepumpen die dominierende Technologie. Aufgrund der Betrachtung des Brutto-Zuwachses werden über den Zeitraum allerdings mehr Wärmeversorgungssysteme neu installiert, als in Abbildung 64 zu sehen.

Abbildung 65: Entwicklung der kumulierten Neuinstallationen (Brutto) der Wärmeversorgungstechnologien im Zielszenario

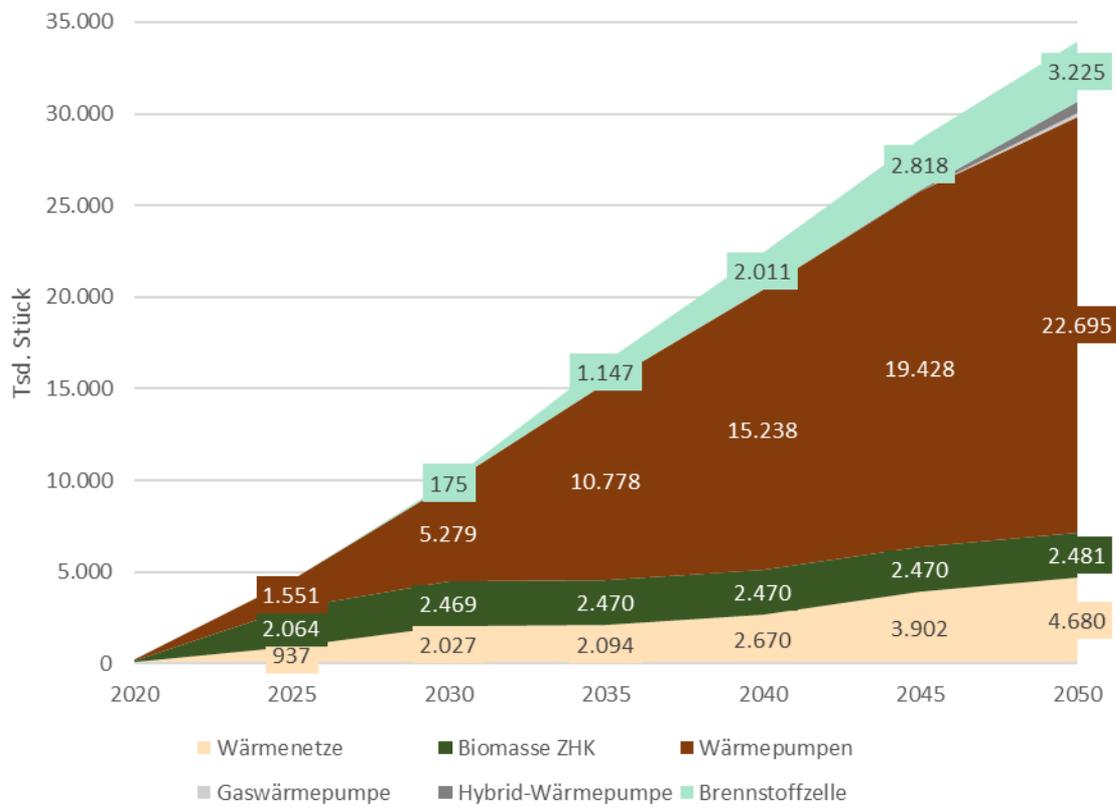
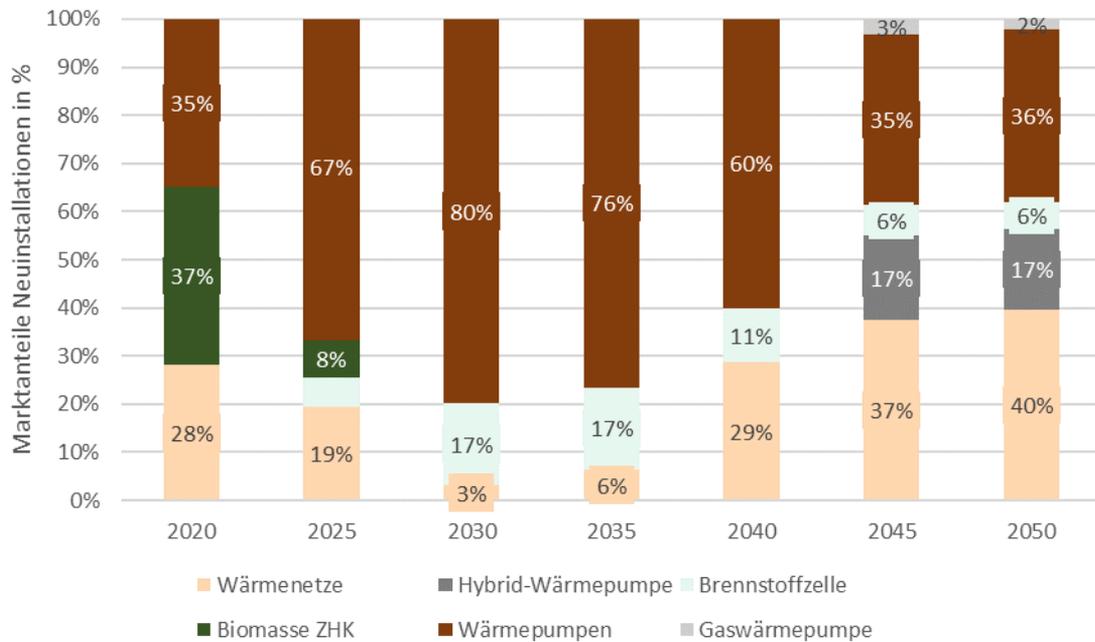


Abbildung 66 zeigt zudem die Marktanteile des jeweiligen Jahres der neuinstallierten Wärmeversorgungssystemen im Simulationszeitraum.

Abbildung 66: Neuinstallationen von Wärmeversorgungstechnologien im Zielszenario im Zeitraum 2020 bis 2050



Disaggregation der Ergebnisse mit dem Gebäudemodell Invert/ee-lab

Die folgenden Abbildungen sind Ergebnisse der Disaggregation des gesamtsystemischen Zielszenarios mit dem Modell Invert/ee-Lab.

Abbildung 67 zeigt die Marktanteile der Neuinstallationen von Wärmeversorgungssystemen nach Gebäudetypen. Wie bereits in Abbildung 64 ersichtlich, dominieren Wärmepumpen die neuinstallierten Wärmeversorgungssysteme in allen Gebäudetypen. Daneben ist allerdings auch ein steigender Zubau von Wärmenetzen ab dem Jahr 2040 in allen Gebäudetypen zu beobachten. In den Jahren 2025 bis 2035 findet ein geringerer Zubau von Wärmenetzen statt, dieser wird durch die Installation von Wärmepumpen und Brennstoffzellen reduziert. Darüber hinaus ist festzuhalten, dass ab 2025 kein Zubau mehr von Biomasse ZHK stattfindet.

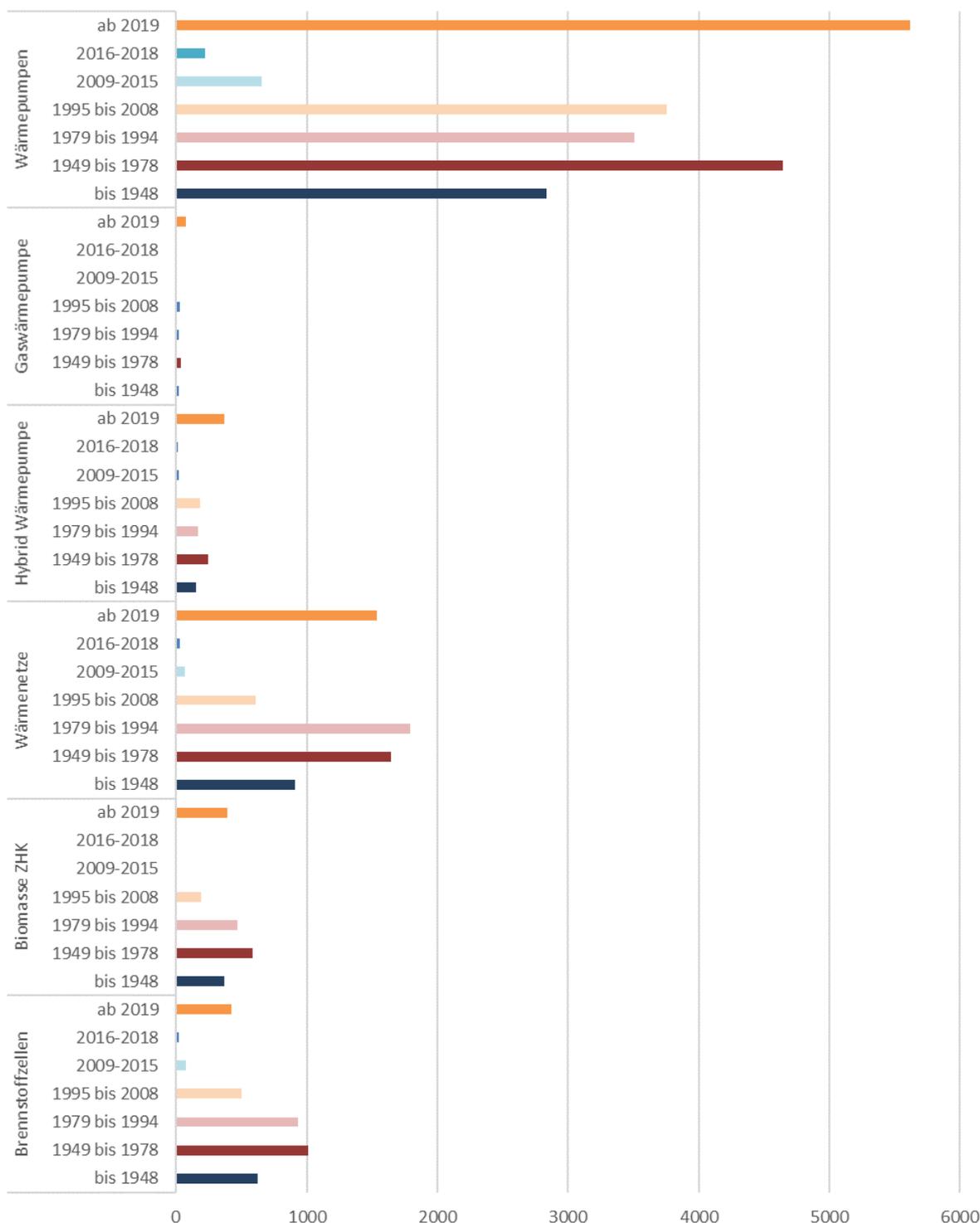
Abbildung 67: Neuinstallationen von Wärmeversorgungssystemen nach Gebäudetyp im Zeitraum 2020 bis 2050 im Zielszenario



In allen Gebäudetypen ist darüber hinaus ab 2045 ein Zubau der Hybrid-Wärmepumpe (Wärmepumpe in Kombination mit Gaskessel) zu beobachten. Insgesamt beträgt der Anteil der Hybrid-Wärmepumpen jedoch nur 1% des Bestands an Wärmeversorgungssystemen in 2050. Die Investitionskosten der Technologie liegen über denen der Luftwärmepumpen. Da allerdings annahmegemäß die Preise für synthetisches Gas bis zum Jahr 2050 deutlich abnehmen, ist anzunehmen, dass Flexibilisierungsaspekte neben den sinkenden Preisen für Methan trotz der höheren Investitionskosten ausschlaggebend für diese Technologiewahl sind. Da die Technologie erst zu einem sehr späten Zeitpunkt im Lösungsraum gezogen wird, ist die Lösung an dieser Stelle nicht als robustes Ergebnis zu interpretieren und hängt stark von den getroffenen Preisannahmen ab.

In Abbildung 68 ist die Anzahl der neuinstallierten Wärmeversorgungssysteme über den gesamten Simulationszeitraum nach Baualterklassen dargestellt.

Abbildung 68: Anzahl der vorrangig installierten Wärmeversorgungssysteme nach Baualter über den Zeitraum 2020 bis 2050 im Zielszenario

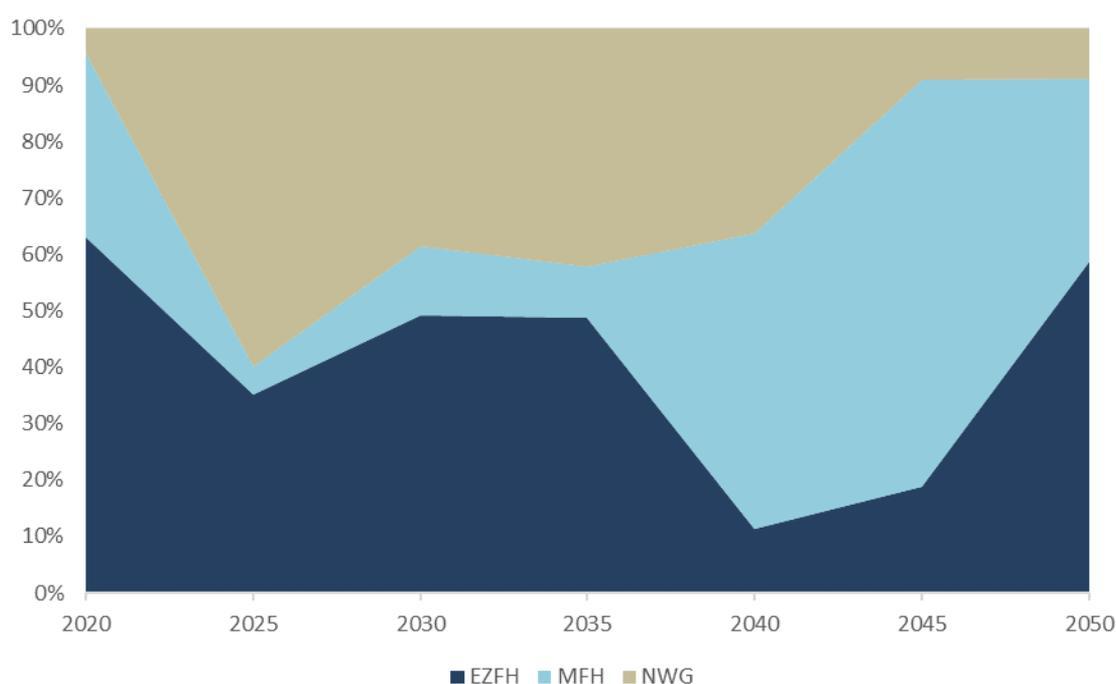


Analog zu den Darstellungen oben ist ersichtlich, dass Wärmepumpen die dominierenden Wärmeversorgungssysteme zur Reduktion der THG-Emissionen sind. Wärmepumpen und Wärmenetze werden flächendeckend in allen Baualterklassen installiert. Analog zum Trendszenario ist die ge-

ringste Anzahl Neuinstallation bei Gebäuden der Altersklassen 2009 bis 2018 zu finden, Heizungstausche konzentrieren sich im Zielszenario auf Wärmepumpen. Der größte absolute Zubau bei den Wärmepumpen erfolgt in Neubauten ab 2019, daneben sticht aber auch die Baualtersklasse 1949 bis 1978 hervor. Gaswärmepumpen und mit Strom oder Gas betriebene Hybrid-Wärmepumpen werden vorrangig in Neubauten installiert, wobei sich Letztere auch in den älteren Baualtersklassen wiederfinden. Demgegenüber werden Biomasseheizungen und Brennstoffzellen überwiegend in den Baualtersklassen bis 2008 installiert.

Abbildung 69 zeigt die Anzahl an Neuinstallationen von Wärmeversorgungssystemen nach Gebäudekategorie über den Simulationszeitraum. Bei den EFZH erfolgt der Zubau hauptsächlich in den Jahren bis 2040. Nach einem Rückgang der Neuinstallationen steigt der Zubau ab 2045 dann wieder an. Bei den MFH erfolgt der Zubau dagegen hauptsächlich ab 2035. Bei den NGW werden zu Beginn viele Wärmeversorgungssysteme installiert, der Zubau geht dann bis zum Jahr 2045 zurück.

Abbildung 69: Anzahl Neuinstallationen von Wärmeversorgungssystemen nach Gebäudekategorien im Zielszenario



Verwendung von Wasserstoff im Zielszenario:

Hinsichtlich der Verwendung von Wasserstoff, werden im Modell zwei Optionen betrachtet. Zum einen kann Wasserstoff direkt, zu einem Anteil von 10 % in das Gasnetz beigemischt werden. Zum anderen kann Wasserstoff durch den weiteren Umwandlungsschritt zu CH_4 als synthetisches Erdgas in das Netz eingespeist werden. Zudem kann in den Gebäuden die Option der Brennstoffzelle genutzt werden, H_2 -Kessel stehen jedoch nicht als Option im Modell zur Verfügung. Die Modellergebnisse von REMod für das hier vorgestellte Zielszenario zeigen, dass die Hauptanwendung von Wasserstoff, unter Betrachtung der Sektoren Energiewirtschaft, Verkehr, Industrie und Gebäude, vorrangig in den Sektoren Verkehr und Industrie und weniger im Gebäudesektor ist. Unter

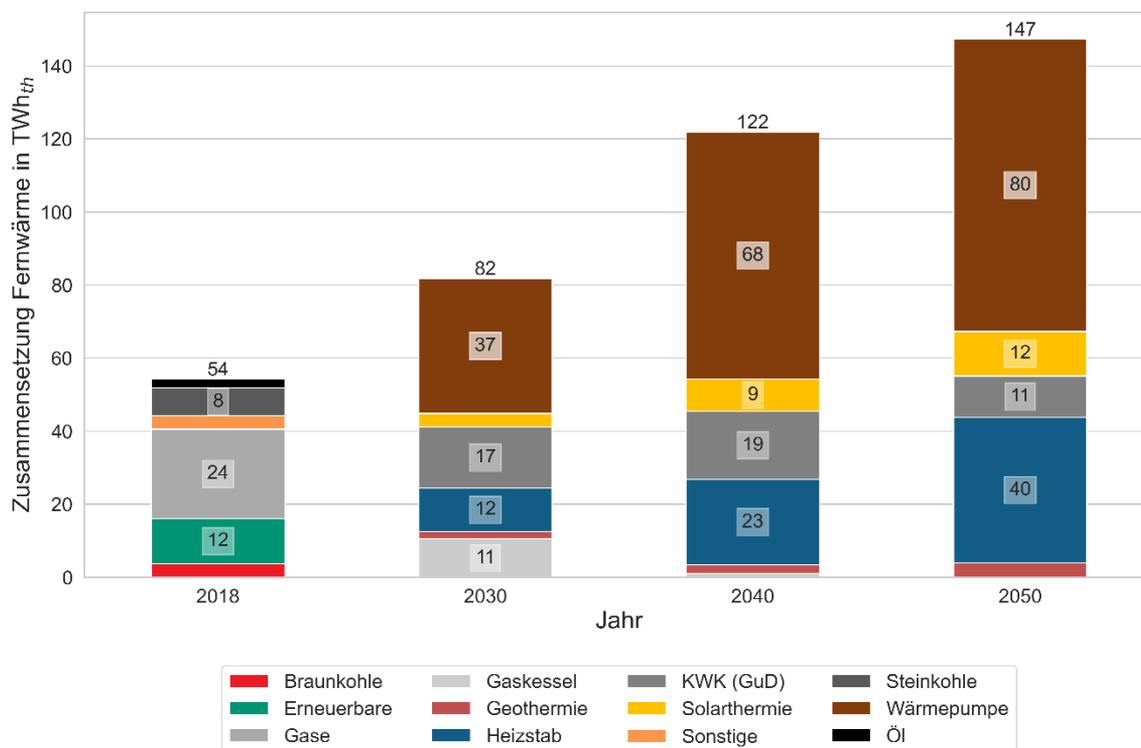
den angenommenen Rahmenbedingungen zeigt das hier vorgestellte Szenario nur in dem Umfang Marktanteile von Brennstoffzellen im Gebäudesektor, in dem dies für die Sicherstellung der gekoppelten Stromerzeugung notwendig ist. Ob dies in der Realität kostengünstig umsetzbar ist, ist von weiteren Voraussetzungen abhängig wie beispielsweise einer Wasserstoffinfrastruktur vor Ort oder der Möglichkeit von dezentralen Lösungen (Elektrolyseur in der Kombination mit einer Brennstoffzelle). Diese Lösungen sind in der Detailtiefe nicht im Modell abgebildet und sind aufgrund bisher geringer Marktdurchdringung mit größeren Unsicherheiten hinsichtlich der Kostenentwicklung behaftet. Daher kann eine Aussage über die Rolle von Wasserstoff im Gebäudesektor nur unter Zuhilfenahme von weiteren Sensitivitätsanalysen umfänglich beurteilt werden.

6.4 Entwicklung der Wärmebereitstellung in Wärmenetze

Um Klimaneutralität bis zum Jahr 2050 erreichen zu können, muss auch die Bereitstellung von Nah- und Fernwärme treibhausgasneutral werden. In Abbildung 70 ist die Entwicklung nach Energieträgern auf Ebene des Endenergiebezugs für Wohngebäude und Nichtwohngebäude im Zielszenario dargestellt²⁴. Heute wird Fernwärme vorrangig durch Wärmeauskopplung in Gaskraftwerken bereitgestellt. Im Zielszenario findet ein Zuwachs an Wärmenetzanschlüssen statt, sodass die nachgefragte Energiemenge von 54 TWh_{th} im Jahr 2018, auf 82 TWh_{th} im Jahr 2030 ansteigt. Dieser Anstieg setzt sich in den folgenden Jahren weiter fort und steigt bis zum Jahr 2050 auf 147 TWh_{th}, was einer Verdreifachung der Energiemenge entspricht. Im Jahr 2030 werden im Zielszenario bereits rund 45 % durch den direkten Einsatz von Strom in Großwärmepumpen bereitgestellt. Zudem werden Heizstäbe in Wärmespeichern für die Bereitstellung von Fernwärme verwendet. Ein geringerer Teil wird durch Solarthermieanlagen bereitgestellt. Die Verwendung von Wärmepumpen, Heizstäben in zentralen Wärmespeichern sowie Solarthermie nimmt bis 2050 nochmal signifikant zu, während die Verwendung der Wärmeauskopplung aus GuD-Anlagen weiter abnimmt. Im Jahr 2050 werden diese mit erneuerbar hergestelltem synthetischem Gas (durch Biogasaufbereitung, Import und nationale Erzeugung von synthetischem Erdgas (CH₄)) betrieben.

²⁴ Die Abweichungen zwischen Abbildung 55 (Endenergie) und Abbildung 70 (Sekundärenergie) ist durch die Speicherverluste der installierten Wärmespeicher begründet.

Abbildung 70: Entwicklung des Energieträgereinsatzes in Wärmenetzen



Anmerkung: 2018er Werte basierend auf AGEBA Anwendungsbilanzen (AGEBA 2020). Die Jahre 2030, 2040 und 2050 sind Ergebnisse des Modells REMod

6.5 Energiebedingte THG-Emissionen aller Sektoren im Vergleich

Inputgröße für REMod ist ein vorgegebenes CO₂-Budget für energiebedingte Emissionen über die Sektoren Energiewirtschaft, Industrie, Verkehr und Gebäude in Summe. Zu beachten ist an dieser Stelle, dass innerhalb des Modells der Landwirtschaftssektor nicht mitberücksichtigt wird. Die Erreichung der Sektorenziele wird durch die optimierte Technologiezusammensetzung der einzelnen Verbrauchssektoren bestimmt. Zur Einordnung der CO₂e-Emissionen des Gebäudesektors, sind in Abbildung 71 bis Abbildung 73 die CO₂e-Emissionen der Sektoren Energiewirtschaft, Verkehr und Industrie für die Jahre 2018, 2030, 2040 und 2050 dargestellt.

Der prozentuale Rückgang der modellendogen bestimmten brennstoffbedingten CO₂-Emissionen ist in Tabelle 11 dargestellt.

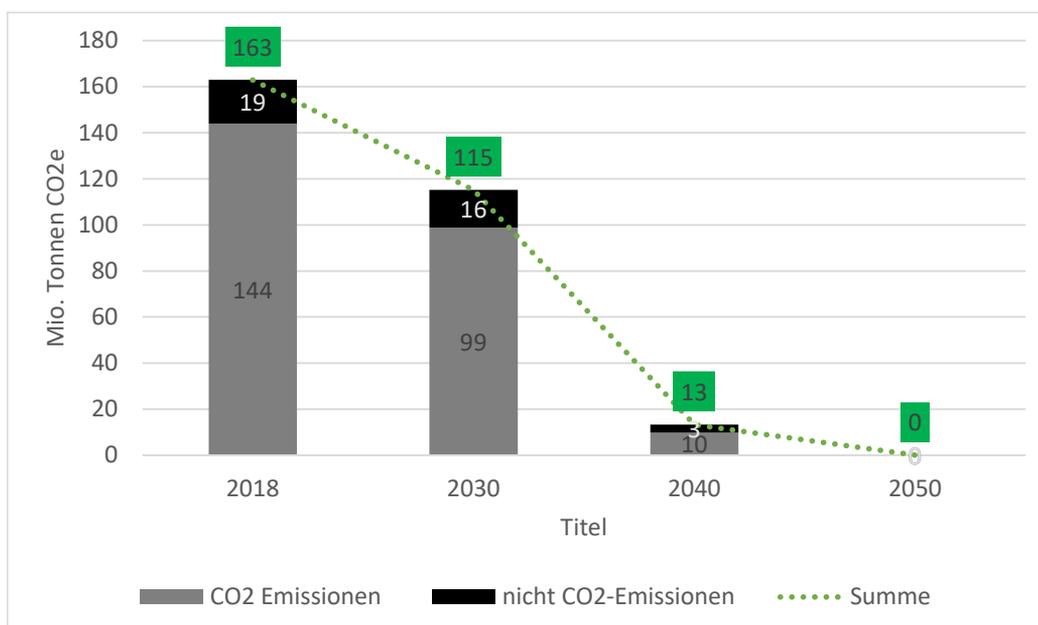
Tabelle 11: Prozentuale und absolute Reduktion der CO₂-Emissionen der Sektoren in den Jahren 2020, 2030, 2040 und 2050 im Vergleich zu 1990

Sektoren	CO ₂ -Emissionen 1990 [MT CO ₂]	Reduktion ggü. 1990 2020 ²⁵	Reduktion ggü. 1990 2030	Reduktion ggü. 1990 2040	Reduktion ggü. 1990 2050
Energiewirtschaft (CRF 1.A.1)	424	51% (208 MT CO ₂)	78% (93 MT CO ₂)	97% (13 MT CO _{2e})	100%
Gebäude (CRF 1.A.4.a, 1.A.4.b)	193	39% (118 MT CO ₂)	74% (50 MT CO _{2e})	97% (5 MT CO _{2e})	100%
Verkehr (CRF: 1.A.3.a, 1.A.3.b, 1.A.3.c, 1.A.3.d)	161	11% (144 MT CO ₂)	39% (99 MT CO _{2e})	94% (9 MT CO _{2e})	100%
Industrie (CRF 1.A.2)	185	36% (119 MT CO ₂)	66% (63 MT CO ₂)	91% (16 MT CO _{2e})	100%

Anmerkung: In Klammern sind die energiebedingten CO₂-Emissionen des jeweiligen Jahres dargestellt

Die Ergebnisse des Zielszenarios zeigen ähnliche prozentuale CO₂-Rückgänge in den Sektoren Energiewirtschaft, Gebäude und Industrie. Der CO₂-Rückgang im Sektor Verkehr hingegen ist im Zielszenario deutlich geringer, insbesondere für das mittelfristige Ziel einer 65-prozentigen Reduktion bis zum Jahr 2030. Hier zeigen die Modellergebnisse einen Rückgang der Emissionen um 39% im Verkehrssektor, während die anderen Sektoren bereits um die 75% der CO_{2e}-Emissionen reduzieren, um das 2030er Ziel zu erreichen.

²⁵ Bezogen auf die Vorjahresschätzung der Treibhausgasemissionen des Umweltbundesamtes vom 15.03.2021

Abbildung 71: Entwicklung der Treibhausgasemissionen des Verkehrssektors im Zielszenario

Anmerkung zur Abbildung: Dargestellt sind die CO₂ Emissionen der Quellgruppen (CRF: 1.A.3.a, 1.A.3.b, 1.A.3.c, 1.A.3.d) für 2018 gemäß der Trendtabellen des Umweltbundesamtes zur Vorjahresschätzung 2020 (UBA 2021) sowie die nicht-CO₂-Emissionen; die Jahre 2030, 2040 und 2050 sind Ergebnisse des Modells REMod für die CO₂-Emissionen. Für die nicht-CO₂-Emissionen wurde prozentual der gleiche Rückgang angenommen.

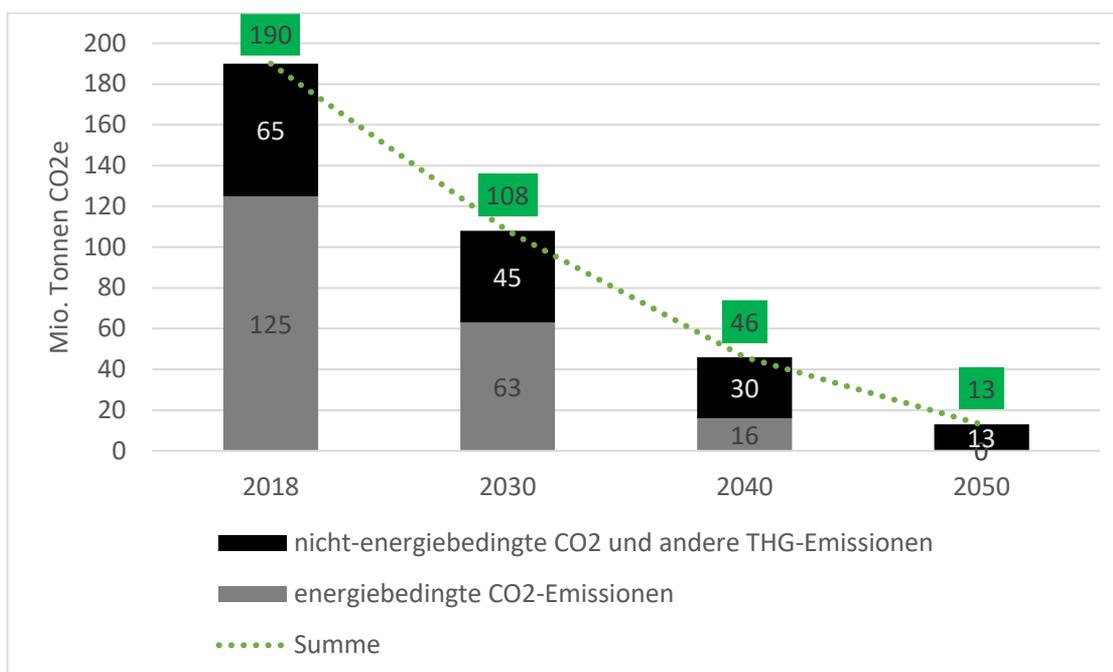
Der Verkehrssektor zeigt im Zielszenario im Vergleich zu den anderen Sektoren eine verzögerte Defossilisierung (Siehe Anhang). Im LKW-Bereich kommen zunehmend wasserstoffelektrische LKW zum Einsatz und bis zum Jahr 2050 ist der Sektor nahezu vollständig umgestellt (geringere Teile werden durch Oberleitungs-LKW elektrifiziert). PKW werden vorrangig durch batterieelektrische Fahrzeuge und zu geringen Teilen durch wasserstoffelektrische Fahrzeuge ersetzt. Durch die Umstellung der Antriebe können damit die Emissionen bis 2050 auf null gesenkt werden. Auch hier wird die Rolle von erneuerbar erzeugtem Strom ähnlich wie im Wärmesektor deutlich.

Ebenfalls bedeutsam für den langsamen Rückgang der Emissionen im Verkehr sind die Emissionen des motorisierten Bahn- und Schiffsverkehrs und der Luftfahrt²⁶, welche nach den Annahmen im Modell nicht durch den Einsatz alternativer Technologien, sondern nur durch CO₂-neutrale Brennstoffe dekarbonisiert werden können (siehe 6). Hier ist erst eine Reduzierung der Emissionen möglich, wenn zum einen die Biomasse für die Umwandlung in diese Brennstoffe verfügbar ist, diese also vom Gebäude in den Verkehrssektor verschoben wurde. Zum anderen müssen synthetisch hergestellte Brennstoffe durch Import oder in großem Umfang heimische Erzeugung verfügbar sein. Dies ist erst möglich, wenn es einen großen Anteil von Erneuerbaren Energien gibt, die den Strom für die Umwandlung bereitstellen können und auch ausländische Kapazitäten für den Import verfügbar sind. Dies ist nach den Annahmen im Modell erst ab dem Jahr 2030 möglich.

²⁶ Im Modell berücksichtigt sind alle von Deutschland ausgehenden Flüge; im Bericht der Emissionen sind jedoch laut KSG Definition nur die innerdeutschen Flüge berücksichtigt.

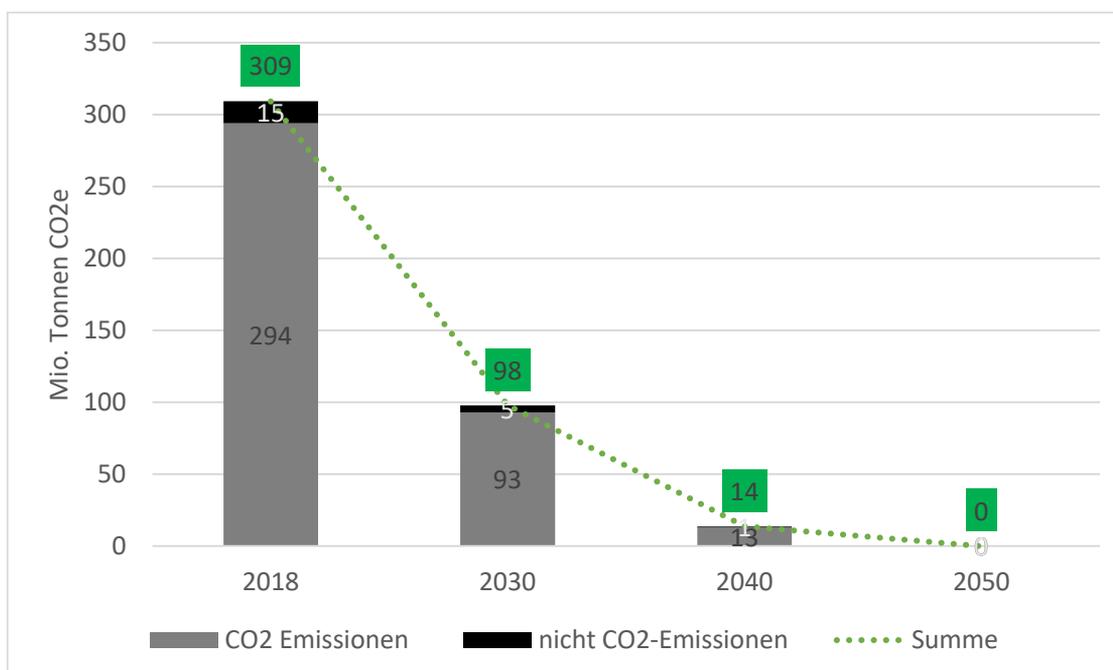
Die Verfügbarkeit von synthetischen Brennstoffen, insbesondere Wasserstoff, ist auch ein Grund für die verzögerte Defossilisierung im LKW-Bereich. Hier zeigen sich wasserstoffelektrische LKW als die aus Systemsicht kostengünstigste Option. Daher kann die Umstellung erst etwa ab dem Jahr 2030 erfolgen, wenn Wasserstoff in großem Umfang verfügbar ist.

Abbildung 72: Entwicklung der Treibhausgasemissionen der Industrie im Zielszenario



Anmerkung zur Abbildung: Dargestellt sind die CO₂-Emissionen der Quellgruppen (CRF 1.A.2), die den energiebedingten Emissionen für das Jahr 2018 gemäß der Trendtabellen des Umweltbundesamtes zur Vorjahresschätzung 2020 (UBA 2021) entsprechen. Zusätzlich sind die nicht energiebedingten THG Emissionen dargestellt. Zusätzlich wurden im Jahr 2018 47 Mt CO₂-Emissionen prozessbedingt emittiert und in Summe 65 tCO₂e. Die Jahre 2030, 2040 und 2050 sind Ergebnisse des Modells REMod für die energiebedingten CO₂-Emissionen. Die weiteren THG-Emissionen sind auf Basis des Projektionsberichts IX (Emele et al. 2019) für das Jahr 2030 berechnet. Der Wert für 2050 ist aus (Prognos, Öko-Institut, Wuppertal-Institut 2020) übernommen. Das Jahr 2040 wurde interpoliert.

Während in der Industrie im Jahr 2030 noch 63 Mt CO₂ für die Bereitstellung von Prozesswärme emittiert werden, reduziert sich diese Menge im Jahr 2040 auf 16 Mt CO₂ und ist im Jahr 2050 schließlich null. Die Emissionen stammen zu großen Teilen aus dem Einsatz von Steinkohle für die Stahlherstellung und von Gas für die Verbrennung in Gaskesseln. Die Stahlherstellung wird nach den Annahmen im Modell bis zum Jahr 2050 sukzessive auf den Einsatz von Wasserstoff oder Strom umgestellt, wodurch die Emissionen der Kohle ersetzt werden. Das eingesetzte Gas wird vor allem durch den Einsatz von Strom in Wärmepumpen oder Elektrodenkesseln zur Herstellung von Prozesswärme ersetzt. In der Industrie werden die energiebedingten Emissionen somit weitestgehend durch den Einsatz von Wärmepumpen, direkter Elektrifizierung und der Verwendung von Wasserstoff reduziert (Siehe hierzu Anhang B). Nicht-energiebedingte Emissionen werden aller Voraussicht nach in Anlehnung an Prognos, Öko-Institut, Wuppertal-Institut (2020) jedoch im Jahr 2050 mit 13 Mio. Tonnen CO₂e in die Bilanzierung der Emissionen eingehen.

Abbildung 73: Entwicklung der Treibhausgasemissionen der Energiewirtschaft im Zielszenario

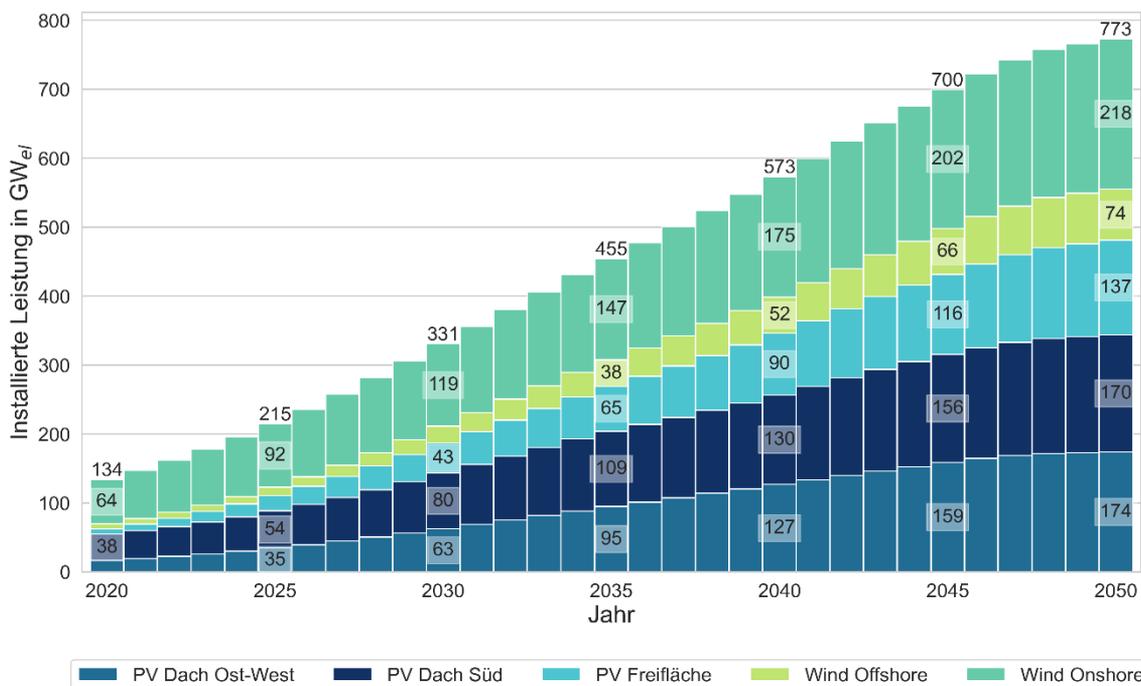
Anmerkung zur Abbildung: Dargestellt sind die CO₂ Emissionen der Quellgruppe (CRF: 1.A.1) für das Jahr 2018 gemäß der Trendtabellen des Umweltbundesamtes zur Vorjahresschätzung 2020 (UBA 2021) sowie die weiteren CO₂-Emissionen und THG Emissionen des Sektors Energiewirtschaft; die Jahre 2030, 2040 und 2050 sind Ergebnisse des Modells REMod. Der prozentuale Rückgang, der nicht energetischen THG-Emissionen, wurde von der Entwicklung der CO₂-Emissionen übernommen.

Eine „Verschiebung“ der CO₂e-Emissionen aus dem Gebäude, Verkehrs- und Industriesektor in die Energiewirtschaft bei gleichzeitiger Reduktion der Gesamtemissionen ist nur bei CO₂-neutraler Stromproduktion im Jahr 2050 möglich (Abbildung 73). Es zeigt sich ebenfalls, dass die Stromproduktion durch den Ausstieg aus der Kohleverstromung bereits im Jahr 2040 zu großen Teilen dekarbonisiert ist. Von den 93 Mt CO₂ des Jahres 2030 bleiben in 2040 lediglich Restemissionen von 13 Mt CO₂ durch den Einsatz von Gas in Gasturbinen oder GuD-Kraftwerken übrig. Dieser Anteil wird bis zum Jahr 2050 ebenfalls vollständig durch synthetische Energieträger ersetzt. Wie diese Stromproduktion aussehen kann, ist in Abschnitt 6.6 beschrieben.

6.6 Entwicklung des Energiesystems

Das Ziel der Klimaneutralität setzt eine hohe installierte Leistung von fluktuierenden Erneuerbaren Energietechnologien voraus. Vorherige Ergebnisse haben gezeigt, dass der Einsatz von Gas und Öl in den Verbrauchssektoren vermehrt durch den Einsatz von Strom ersetzt wird. Daher kommt der Energiewirtschaft eine bedeutende Rolle für die Defossilisierung der Verbrauchssektoren zu, welche bei einer Zuordnung der Emissionen nach dem Verbraucherprinzip nur indirekt Emissionen durch den Verbrauch von Strom verursachen. Die für das Zielszenario berechneten installierten Leistungen von Photovoltaik- und Windkraftanlagen sind in Abbildung 74 dargestellt.

Abbildung 74: Entwicklung der installierten Leistung von Windenergie- und Photovoltaikanlagen von 2020 bis zum Jahr 2050 in GW



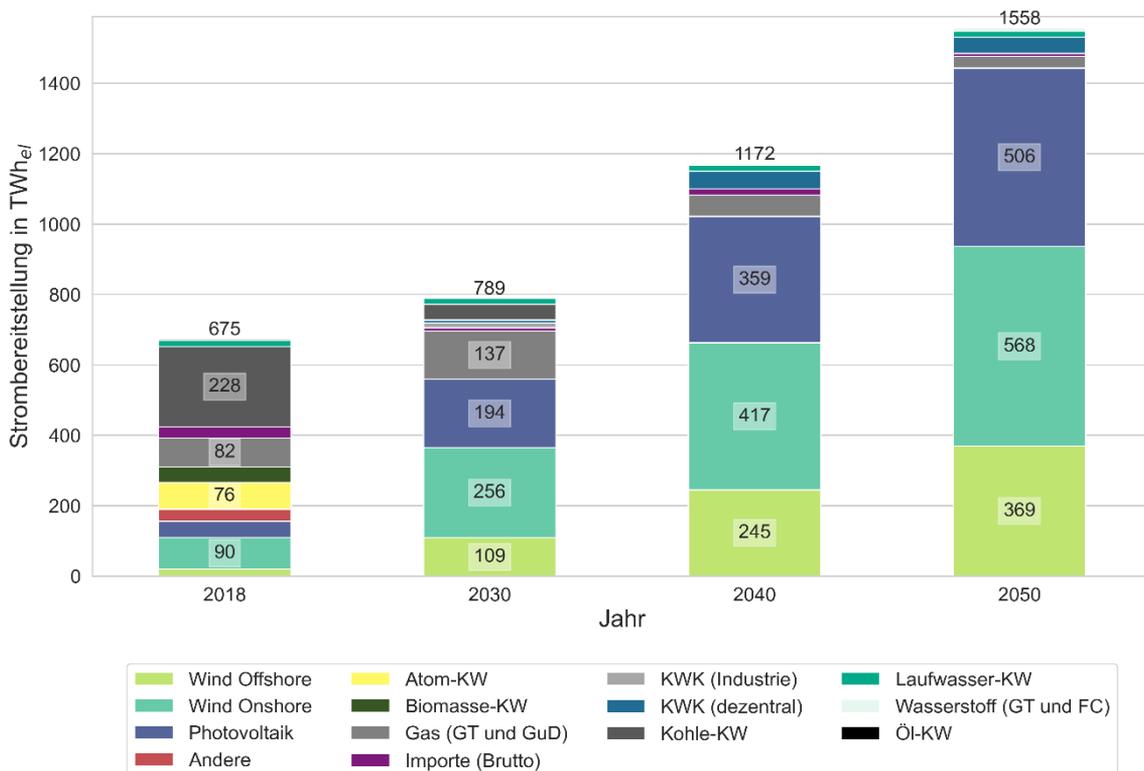
Neben der dargestellten Entwicklung der installierten Leistung in Abbildung 74 zeigt Tabelle 12 den durchschnittlichen, jährlichen Zubau von Photovoltaik, Wind On- und Offshore. Um im Zielsystem die gesamte nationale Stromproduktion klimaneutral zu decken, bedarf es im Jahr 2050 einer installierten Leistung von insgesamt 773 GW. Diese setzt sich zusammen aus 481 GW PV, 218 GW Wind Onshore sowie 74 GW Wind Offshore. Auf Grund der Zielverschärfung müssen bereits im Jahr 2030 insgesamt 330 GW_{el} an Erneuerbare Energien installiert sein um eine Reduzierung der Emission um -65 % zu erreichen. Im Vergleich zum Zubau im Jahr 2020 bedeutet dies, dass im Durchschnitt über die Jahre 2020-2050 jährlich die 2,9-fache Menge des Photovoltaikzubaues, das 5,1 fache des Wind onshore Zubaues sowie das 2,2 fache des Wind Offshore Zubaues des jeweiligen Zubaues im Jahr 2020 realisiert werden müsste.

Tabelle 12: Durchschnittlicher jährlicher Zubau von Photovoltaik, Wind Onshore und Wind Offshore nach Dekaden in GW_{el}

Durchschnittlicher jährlicher Zubau in GW _{el}	Zubau 2020	2020-2030	2030-2040	2040-2050	Gesamt (2020-2050)
Photovoltaik	4,89	12,6	16,0	14,1	14,2 (2,9 x Zubau 2020)
Wind Onshore	1,47	5,5	5,5	4,2	5,1 (3,5 x Zubau 2020)
Wind Offshore	0,24	1,7	2,8	2,2	2,2 (9 x Zubau 2020)

In Abbildung 75 sind die erzeugten Strommengen nach Energieträgern dargestellt. Bereits im Jahr 2030 werden 73 % des erzeugten Stroms aus erneuerbaren Energien gedeckt. Bis im Jahr 2050 steigt dieser Anteil auf 93 %. Die restliche Strommenge wird aus Kraftwerken bereitgestellt, die mit klimaneutralen synthetisch hergestellten Brennstoffen (heimisch erzeugt oder importiert) betrieben werden.

Abbildung 75: Stromerzeugung im Zielszenario aufgeteilt nach Energieträgern in TWh_{el}

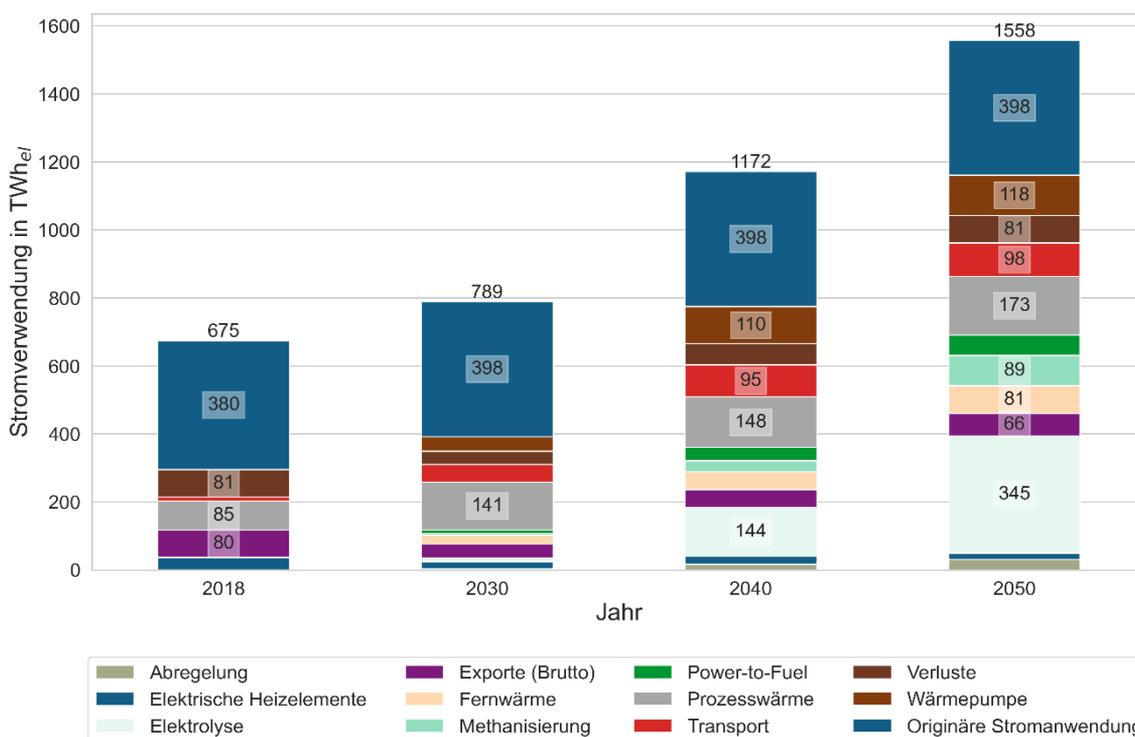


Die Transformation des Energiesystems in Richtung Klimaneutralität bedingt einen kontinuierlichen Anstieg der Stromerzeugung bis 2050. Im Jahr 2050 beträgt die Stromerzeugung im Zielszenario nahezu das Dreifache der heutigen Stromerzeugung. Durch die steigende Elektrifizierung der Verbrauchssektoren ist die Stromerzeugung im Jahr 2030 ca. bei 790 TWh_{el} und im Jahr 2050 bei etwa 1500 TWh_{el}.

Neben der zunehmenden Elektrifizierung spielen auch Effekte der Sektorenkopplung wie beispielsweise die Nutzung von Überschussstrom in Power-to-Fuel Anlagen oder die flexible Nutzung von Strom in Batteriespeichern, eine wesentliche Rolle für den Anstieg der Stromerzeugung sowie die Integration des größtenteils fluktuierenden erneuerbaren Stroms in das Energiesystems.

Bei Betrachten der Entwicklung der Stromverwendung bis 2050 wird der Effekt der Sektorenkopplung deutlich (Abbildung 76).

Abbildung 76: Stromverwendung der Jahre 2030, 2040 und 2050 für die einzelnen Sektoren sowie die Umwandlung in TWh_{el}



Es zeigt sich, ein Anstieg der direkten Elektrifizierung (Wärmepumpen, Heizstäbe, batterieelektrische Fahrzeuge) sowie der indirekten Verwendung von Strom (Elektrolyse, Methanisierung, Power-to-Fuel). Während im Jahr 2030 originäre Stromanwendungen (IT, Beleuchtung, Mechanische Energie, etc.) einen Großteil der Stromverwendung ausmachen und die Verwendung von Strom in den Sektoren nur leicht zunimmt, ändert sich dieses Bild in den Jahren 2040 und 2050 deutlich. Insbesondere zeigt sich eine Zunahme der Stromverwendung in Power-to-X Technologien wie Elektrolyse oder Methanisierung, wodurch Strom in den Verbrauchssektoren in Form von Wasserstoff oder Methan indirekt verwendet wird.

6.7 Zusammenfassung und Fazit

Das Zielszenario zeichnet unter den gegebenen Rahmenbedingungen einen kostenoptimalen Pfad zur Erreichung einer **vollständigen Defossilisierung des Gebäudebestandes bis 2050** sowie der Erreichung des **Sektorziels 2030** unter Berücksichtigung des sektorübergreifenden Minderungsziels von **65 % THG-Minderung gegenüber 1990**.

Durch die Optimierung des Gesamtsystems führt das sektorübergreifende Ziel dazu, dass im Gebäudesektor eine höhere Treibhausgasreduzierung resultiert, als es durch das Sektorziel vorgegeben ist. Die THG-Emissionen des Gebäudesektors betragen im **Jahr 2030 im Zielszenario nur noch 52 Mio. Tonnen CO₂e**, womit eine Übererfüllung des Sektorziels um 18 Mio. Tonnen erreicht wird.

Die Zielerreichung wird insbesondere durch eine konsequente Umstellung auf erneuerbare Wärmeversorgung und Wärmenetze beim Heizungsaustausch erreicht. So haben Wärmepumpen im Zielszenario bereits ab 2025 bei allen Gebäudetypen **Marktanteile von über 65 %, womit im Jahr 2030 rund 6 Mio. Wärmepumpen installiert** sind. Bis zum Jahr 2050 steigt die Zahl der **installierten Wärmepumpen auf 19 Millionen**. Im Zielbild 2050 erfolgt 56 % der Wärmebereitstellung im Gebäudesektor über Wärmepumpen (Strom und Umweltwärme) und **25 % über Wärmenetze**.

Ab dem Jahr 2030 kommt zunehmend auch der bisher im Gesamtsystem fast nicht genutzte Energieträger Wasserstoff zum Einsatz. Im Jahr 2050 **erfolgt rund 12 % der Wärmebereitstellung im Zielszenario über mit Wasserstoff betriebene Brennstoffzellen**. Methan (CH₄) Brennstoffzellen wurden aufgrund der hohen Kosten und vergleichsweise günstigeren Wärmeversorgungsalternativen nicht gezogen.

Mit Bezug auf die Sanierungsmaßnahmen sind im Zielszenario **am Anfang hohe Sanierungsraten erforderlich**, um das Sektorziel zu erreichen. Konsequenterweise steigen diese also bis 2030 an und fallen danach wieder, was teilweise eben durch die vorherige hohe Sanierungsaktivität bedingt ist. Eine ambitionierte Sanierungstiefe wird im Zielszenario hingegen nicht erreicht. Hierbei ist zu beachten, dass der Zielszenario-Modellierung ein **normativer kostenoptimierender Ansatz aus Gesamtsystemsicht** unterstellt ist. Ambitionierte Sanierungsmaßnahmen ohne Förderung und ohne Steuern und Abgaben auf die Energiepreise sind dabei im Vergleich zu alternativen Maßnahmen „teurer“. Die notwendige THG-Einsparung ist durch die ohnehin erforderliche Umstellung der Wärmeversorgung günstiger. Eine tiefere Sanierung ist so gesehen dann nicht mehr „notwendig“. Allerdings bestehen mit Bezug auf die Entwicklung von Energiepreisen hohe Unsicherheiten, so dass **tiefe Sanierungsmaßnahmen nicht nur als „No-regret“ Maßnahmen zu interpretieren sind**, sondern auch als **Absicherung gegenüber Energiepreissteigerungen** und damit gegenüber einem insgesamt teureren Gesamtsystem zur Erreichung des klimaneutralen Gebäudebestandes.

Im Folgenden werden die zentralen Ergebnisse des Zielszenarios noch einmal zusammengefasst:

- Auf Grund von Gebäudesanierung und effizienteren Technologien **sinkt der Endenergiebedarf des Gebäudesektors** gegenüber 2018 (707 TWh) bis **2030 um 20 % (570 TWh)** und bis **2050 um 30 % (500 TWh)**. Die heute dominierenden Energieträger Gas und Öl werden bis zum Jahr 2050 durch Strom, Wärmenetze, Umweltwärme und Wasserstoff ersetzt.

- Im Zielszenario steigt der Energiebedarf der **Nah- und Fernwärme** um den Faktor 2,3. Die Wärmeauskopplung von Großkraftwerken sowie die Nutzung von Gaskesseln werden vorrangig durch den **Einsatz von Großwärmepumpen** sowie die **Nutzung von Heizstäben in Wärmespeichern** ersetzt.
- Die energiebedingten sektorübergreifenden THG-Emissionen werden annahmegemäß bis 2030 um 65 % gegenüber 1990 gemindert. Der Gebäudesektor resultiert in 52 Mio. Tonnen CO₂, was einer **Reduktion um 74 % gegenüber 1990** entspricht. Das KSG Ziel wird um 18 Mio. Tonnen CO_{2e} unterschritten, wobei das KSG eine Minderung um 55 % gegenüber 1990 beinhaltet. Auf Grund des Quellprinzips und der direkten und indirekten **Elektifizierung** kommt es zu einer **Verschiebung der Emissionen des Gebäudesektors in den Sektor Energiewirtschaft**.
- In **dieser Dekade** ist ein kontinuierlicher **Anstieg der Sanierungsrate bis zu 2 % pro Jahr** im Jahr 2030 ein **wichtiger Treiber** für das Erreichen des 65 %-Minderungsziels. Bis zum Jahr 2050 flacht diese dann wieder deutlich auf 1 % ab. Die **Sanierungstiefe** entspricht Sanierungspaket mit durchschnittlich 50 % Heizwärmebedarfseinsparung.
- Die heute dominierenden Wärmeversorgungssysteme Gas- und Ölkessel werden vorrangig durch **Luft-Wärmepumpen und Wärmenetze** bis zum Jahr 2050 ersetzt. Von heute **bis 2030** bedeutet das jährliche Zubauraten von **400 Tausend Luft-Wärmepumpen, 180 Tausend Wärmenetzanschlüssen und 180 Tausend Biomassekesseln**. In den Jahren 2030 bis 2040 werden im Zielszenario durchschnittlich **1 Million neue Luftwärmepumpen**, und rund **170 Tausend Brennstoffzellen** sowie **56 Tausend Wärmenetzanschlüsse** installiert. Die Rolle von Wasserstoff im Gebäudesektor muss jedoch weiter analysiert werden.
- Die **Marktanteile** der installierten Wärmeversorgungssysteme sind **in allen Gebäudetypen vergleichbar**. Es ist jedoch ein höherer relativer Zubau von Wärmepumpen in Mehrfamilienhäusern sowie ein anteilig höherer Zubau von Brennstoffzellen in Nichtwohngebäuden festzustellen.
- Der **Zubau von Wärmepumpen und Wärmenetzen** als Treiber der Zielerreichung erfolgt **über alle Baualtersklassen**. Mit Biogas und synthetischem Methan betriebene **Gaswärmepumpen und Hybrid-Systeme**, die mit Strom oder Gas betrieben werden können, werden **vorrangig in Neubauten** installiert. **Biomasseheizungen und Brennstoffzellen** werden dagegen vorrangig in **(sanierten) Altbauten** installiert.
- **Erneuerbare Energietechnologien** sind das **Rückgrat** zur Erreichung eines klimaneutralen Energiesystems. Durch die zunehmende Sektorenkopplung ist eine isolierte Betrachtung der Sektoren daher nur bedingt sinnvoll und der frühe Ausbau dieser Technologien essenziell. Durchschnittlich muss so bei gleichbleibendem Verbrauch von 2020 bis 2050 jährlich eine Leistung von etwa 14,2 GW_{el} Photovoltaik, 2,2 GW_{el} Wind Offshore und 5,1 GW_{el} Wind Onshore zugebaut werden.

7 Vergleich Trend- und Zielszenario

In diesem abschließenden Kapitel werden die Ergebnisse des Trend- und Zielszenarios unter Berücksichtigung der angewendeten Untersuchungsansätze eingeordnet und verglichen. Darüber hinaus werden die Anforderungen und Hemmnisse zur Realisierung eines klimaneutralen Gebäudebestands beschrieben.

7.1 Einordnung der Ergebnisse unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Untersuchungsansätze

Für die Einordnung der Ergebnisse sind zunächst die unterschiedlichen Untersuchungsansätze von Trend- und Zielszenario zu beachten, welche mit Bezug auf die unterschiedlichen Fragestellungen gewählt wurden (Tabelle 13).

Das Trendszenario verfolgt einen **explorativen Ansatz**, um zu untersuchen wie sich der Gebäudebereich unter den derzeitigen Rahmenbedingungen entwickelt. Die Betrachtungsweise liegt dabei auf den **Entscheidungskalkülen der Gebäudeeigentümer:innen** für die Investitionen in Gebäudetechnik und Effizienzmaßnahmen, welche mit den jeweiligen technischen und ökonomischen Gegebenheiten sowie individuellen Einstellungen und Hemmnissen konfrontiert sind. Methodisch wird dazu mit dem Modell Invert/ee-Lab ein **Simulationsansatz** angewendet, der Investitionsentscheidungen unter realen Bedingungen modelliert. Aus den Ergebnissen lassen sich Rückschlüsse auf die Wirksamkeit der Politikinstrumente ziehen, wie die Veränderungen von Rahmenbedingungen wie beispielsweise Energiepreise und Technologiekosten die Entwicklung im Gebäudebereich beeinflussen. Mit dem explorativen Ansatz wird analysiert, welcher Pfad unter Berücksichtigung der Annahmen resultiert und inwieweit damit die Ziele im Gebäudebereich erreicht oder verfehlt werden. Eine Zielvorgabe spielt bei diesem Ansatz keine Rolle. Treiber für die Entwicklung sind die individuellen Investitionsentscheidungen auf Gebäudeebene, die durch Fördermaßnahmen, ordnungsrechtliche Vorgaben und die Entwicklung der Preise und Kosten sowie die Veränderung des Gebäudebestandes im Szenario beeinflusst werden. Rein ökonomisch betrachtet kann man bei diesem Ansatz von einer **einzelwirtschaftlichen Betrachtung** sprechen.

Für das Zielszenario wird hingegen ein **normativer Ansatz** verfolgt. Dieser untersucht, wie Zielvorgaben aus Sicht des Gesamtsystems kostenoptimal erreicht werden können. Die Betrachtungsweise liegt dabei nicht auf Ebene der Gebäudeeigentümer:innen, sondern im Sinne eines **zentralen Planers auf der gesamtwirtschaftlichen Ebene**. Methodisch wird dazu das Modell REMod verwendet, welches alle Verbrauchs- und Energiesektoren abbildet und eine **Optimierung des Gesamtsystems** verfolgt. Der Ansatz stellt somit nicht den Anspruch, die Realität zu simulieren, sondern einen Pfad zu erstellen, der unter Einhaltung der Klimaschutzziele in allen Sektoren sein systemisches Optimum für den Energiebereich aufzeigt. Somit hängen die Ergebnisse des Zielszenarios im Gebäudesektor auch maßgeblich von den Entwicklungen und der Wirtschaftlichkeit von Maßnahmen in anderen Sektoren ab. Die Ergebnisse zeigen damit auf, wie Ziele technologisch und gesamtwirtschaftlich optimiert erreicht werden können. Um einen solchen Pfad einzuschlagen, wäre jedoch eine entsprechende Anpassung des Rechts- und Förderrahmens notwendig, um die individuellen Investitionsentscheidungen im Gebäudebereich auf den systemoptimierten Pfad zu bringen.

Tabelle 13: Unterschiede im Untersuchungsansatz und der berücksichtigten Treiber in den Szenarien

Untersuchungsansatz und Treiber	Trendszenario	Zielszenario
Untersuchungsansatz	Explorativer Ansatz: Was wird erreicht unter den geg. Rahmenbedingungen?	Normativer Ansatz: Wie werden die Ziele erreicht?
Sektoren	Gebäudebereich	Gebäudebereich, Energiewirtschaft, Industrie, Verkehr
Methodik	Modellierung des Gebäudesektors mit agenten-basiertem Simulationsmodell	Modellierung des gesamten Energiesystems mit Optimierungsmodell
Technologiewahl	Einzelwirtschaftliche Investitionsentscheidungen auf Basis der individuellen Nutzwerte	Gesamtwirtschaftliche zentrale Investitionsentscheidung auf Basis einer kostenoptimalen Zielerreichung
Berücksichtigung des derzeitigen Rechts- und Förderrahmen	Ordnungsrechtliche Vorgaben Finanzielle Förderung Informatorische Instrumente	Verschärftes CO ₂ -Gesamt-minderungsziel von 65 % bis 2030 Klimaneutralität 2050
Energiepreise	Endverbraucherpreise im Gebäudebereich inkl. Steuern und Abgaben und CO ₂ -Preis (BEHG)	Erzeugungskosten / Import- und Großhandelspreise

Der Vergleich von Trendszenario (explorativ) und Zielszenario (normativ) zeigt somit nicht nur die Ziellücke auf, sondern auch welche technologischen Diffusionspfade im Gebäudebereich notwendig wären und in welchen Segmenten und zeitlichen Dimensionen diese unter den derzeitigen Rechts- und Förderbedingungen auseinanderlaufen.

7.2 Vergleich der Ergebnisse

Wie oben dargestellt, sind die zentralen Treiber im Trendszenario die derzeitigen Politikinstrumente und die Annahmen zur Energiepreisentwicklung inklusive der CO₂-Bespriessung, während im Zielszenario das Gesamt-minderungsziel erreicht werden muss.

Für den Zeitraum bis 2030 ist im Zielszenario eine höhere Sanierungsaktivität zu verzeichnen, mit höheren Anteilen bei ambitionierteren Sanierungsmaßnahmen. Der deutlichste Unterschied liegt jedoch im Systemwechsel bei den Neuinstallationen in der Wärmeversorgung. Während im Trendszenario im Zeitraum 2020 bis 2030 überwiegend fossil befeuerte Heizkessel installiert werden, wird im Zielszenario der Wechsel insbesondere zu Wärmepumpen und Wärmenetzen notwendig, um die Klimaschutzziele zu erreichen. Bis 2030 werden mit 5 Mio. Geräten mehr als fünfmal so viele Wärmepumpen im Zielszenario als im Trendszenario installiert. Die politischen Instrumente entfalten im Trendszenario damit nicht die notwendige Wirkung, um einen schnellen Wandel im Heizungsmarkt einzuleiten. So ist die angenommene Entwicklung des CO₂-Preises von

durchschnittlich 60 EURO/t im Zeitraum 2021 bis 2030 noch nicht ausreichend. Zudem sind die derzeitigen Fördermaßnahmen nicht konsequent auf die notwendige Umstellung auf erneuerbare Energien eingestellt. Durch die Förderung von Hybridheizungen stellen in dem Szenario Gaskessel in Kombination mit Solarthermie aufgrund der signifikant niedrigeren Investitionskosten weiterhin eine attraktive Option aus Sicht der Gebäudeeigentümer dar. Um im Zielszenario die hohe Durchdringung von Wärmepumpen zu erreichen, wird diese zudem durch niederschwellige Maßnahmen im Bereich der Temperaturabsenkung in den Gebäuden ermöglicht.

Im Zeitraum 2030 bis 2050 ändert sich das Bild mit Bezug auf die Sanierungsdynamik zwischen Trend- und Zielszenario. Insbesondere aufgrund des hohen CO₂-Preises von durchschnittlich 195 EURO/t steigt die Sanierungsrate im Trendszenario und liegt für den Zeitraum doppelt so hoch wie im Zielszenario. Auch die Sanierungstiefe ist im Trendszenario im Zeitraum nach 2030 ambitionierter. Im Zielszenario sind höhere Sanierungsraten und -tiefen nicht mehr notwendig, da aufgrund der Ziele und der damit einhergehenden hohen Dynamik beim Umstieg der Wärmeversorgung, die Dekarbonisierung des Gebäudesektors bereits ab 2040 erreicht wird.

Durch den gestiegenen Anteil sanierter Gebäude und gleichzeitig höherer fossiler Brennstoffpreise zeigt sich für den Zeitraum nach 2030 auch im Trendszenario der Wandel im Heizungsmarkt. Wärmepumpen werden nicht nur im Neubau eingesetzt, sondern weisen auch im Bestand nach 2040 höhere Marktanteile als Gaskessel auf. Der Wandel im Wärmemarkt kommt damit jedoch zu spät für die Zielerreichung 2030. Trotz der hohen Dynamik bei den Sanierungsmaßnahmen im Zeitraum nach 2030 wird der klimaneutrale Gebäudebestand 2050 im Trendszenario nicht erreicht. In der Sensitivitätsrechnung zum Trendszenario mit einer technologischen Entwicklung und daraus resultierenden Kostendegression ergibt sich hingegen bereits ab 2021 ein stärkerer Umstieg auf Wärmepumpen und andere erneuerbare Wärmeversorgungssysteme.

7.3 Anforderungen und Hemmnisse zur Realisierung des Zielpfades

Aus dem Vergleich von Trend- und Zielszenario zeigt sich, dass der Schlüssel zur Erreichung eines Klimaneutralen Gebäudebestandes und der Zielerreichung 2030 in einem **schnellen und fundamentalen Wandel bei der Neuinstallation von Wärmeversorgung** liegt. Dies muss zudem durch eine **Steigerung der Sanierungsmaßnahmen** begleitet werden, die insbesondere **Niedertemperaturverteilssysteme in Gebäuden ermöglicht**²⁷. Neben Wärmepumpen spielen Wärmenetze eine zentrale Rolle, die insbesondere in städtischen und dichtbesiedelten Gebieten die zentralen Dekarbonisierungsoptionen darstellen. Mit Bezug auf die Transformation der Wärmenetze ist dabei jedoch die Frage der Netztemperaturen relevant, die sich perspektivisch ebenfalls primär durch gebäudeseitige Maßnahmen und Optimierung der Verteilssysteme in den Gebäuden realisieren lässt.

Um diesen Zielpfad zu realisieren, sind Änderungen am Rechts- und Förderrahmen erforderlich, mit denen die unterschiedlichen Hemmnisse auf Ebene der einzelnen Akteure im Gebäudebereich

²⁷ Auch ein effizienter Einsatz von Gasbrennwertkesseln erfordert die Absenkung der Vorlauftemperaturen in Gebäuden, da sonst der Brennwerteffekt nicht oder nur teilweise genutzt werden kann. Oftmals wird dies nur in Zusammenhang mit Wärmepumpen diskutiert.

adressiert werden. Die Entwicklung spezifischer Maßnahmen ist nicht Bestandteil dieses Vorhabens, jedoch werden im Folgenden zentrale angebots- und nachfrageseitige Hemmnisse und Marktdynamiken diskutiert, die neben einer rein ökonomischen Betrachtung einer Realisierung des Zielpfades entgegenstehen und entsprechend mit Instrumenten adressiert werden müssten.

Angebotsseitige Hemmnisse für die Realisierung einer hohen Diffusionsgeschwindigkeit zielkonformer dezentraler Wärmeversorgungssysteme

Derzeit sind rund 80 % der neuinstallierten dezentralen Wärmeversorgungssysteme fossil betriebene Gas- und Heizölkessel (BDH - Bundesverband der Deutschen Heizungsindustrie, 2021). Der im Zielszenario identifizierte Pfad sieht einen sofortigen Wandel im Wärmemarkt vor, so dass nur noch Wärmesysteme auf Basis erneuerbarer Energien (Wärmepumpen, Biomasse und Solarthermie) im Bestand und Neubau installiert werden. Von Seiten der Hersteller ist der resultierende Hochlauf mit Bezug auf die produzierten Stückzahlen von Wärmepumpen bis 2030 grundsätzlich möglich. Entscheidend für die Zielerreichung sind jedoch nicht nur der Markthochlauf, sondern die Diffusionsgeschwindigkeit und damit die Geschwindigkeit des Markthochlaufs. Die Neuinstallation von Wärmeversorgungssystemen wird durch den Instandsetzungs- und Austauschzyklus bestimmt, somit müssten bereits heute ähnlich hohe jährliche Stückzahlen von Wärmepumpen zur Verfügung stehen wie im Jahr 2030.

Zentrale Akteure für eine Erhöhung der Diffusionsgeschwindigkeit stellen darüber hinaus die Heizungsinstallateur:innen dar. Empirische Untersuchungen zeigen, dass diese in aller Regel die erste Ansprechinstanz von Gebäudeeigentümer:innen sind und den höchsten Einfluss bei der finalen Wahl der Heiztechnik haben (Arning et al. 2019, Rechsteiner et al., 2019)). Als Hemmnisse für die Umsetzung der Wärmewende im Handwerk werden in Studien insbesondere folgende genannt:

- **Fachkräftemangel:** Insgesamt besteht im Bereich Sanierung eine hohe Nachfrage, so dass bereits bei derzeitiger Sanierungsrate teilweise nicht ausreichend Handwerker:innen zur Verfügung stehen. Zudem existiert ein Nachwuchsmangel an Fachkräften (Rechsteiner et al., 2019).
- **Bestehende Technologiepräferenzen:** Die Rolle von Handwerker:innen für die Verbreitung klimafreundlicher Technologien wird in der Literatur unterschiedlich bewertet. Studienergebnisse weisen aber eher darauf hin, dass die meisten Handwerksbetriebe tendenziell Altbewährtes empfehlen, Maßnahmen und Techniken, mit denen sie vertraut sind (Gölz 2018, BEE 2016). Heiztechnologien, die auf Erneuerbaren Energien basieren werden häufig nur dann thematisiert, wenn bekundetes Interesse von Seiten der Gebäudeeigentümer:innen besteht. Häufig fehlen Wissen und Umsetzungserfahrung (Rechsteiner et al., 2019).
- **Erforderliche Spezialisierung und Unternehmensgröße:** Heizungsunternehmen sind überwiegend kleine Betriebe. Um neue Technologien anzubieten, müssen Mitarbeiter:innen Qualifikationen durch entsprechende Weiterbildung erhalten und sich auf neue Technologien spezialisieren. Neben dem Zeit- und Kostenaufwand für die Weiterbildung, gehen insbesondere kleine Betriebe ein Risiko durch eine Spezialisierung auf neue Technologien wie Wärmepumpen ein, wenn dazu aus Kapazitätsgründen beispielsweise die Installation von Gaskesseln aufgegeben werden muss.

Zudem werden von Installateuren weitere Hemmnisse genannt, die dazu führen, dass häufig nicht die EE-basierten Technologien eingebaut werden:

Vermeintlich fehlende Zuverlässigkeit bzw. das Störungspotenzial derer, was wiederum die Reputation des Handwerksbetriebs beeinflusst (Wade et al 2016); das Vertriebssystem des Handwerks, wodurch Betriebe an einzelne Hersteller und deren Produktwahl gebunden sein können; gewerkeübergreifende Qualifikationen, da für den Einbau von EE-Technologien häufig mehr Fachwissen erforderlich ist; hohe Investitionskosten für EE-Wärmetechnologien (Rechsteiner et al., 2019).

Allerdings wurde in der Studie von Rechsteiner et al. (2019) auch festgestellt, dass der Stellenwert von EE-basierten Wärmetechnologien über die vergangenen Jahre bei Handwerksbetrieben gestiegen ist und rund die Hälfte der Befragten Weiterbildungsangebote in diesem Bereich wahrgenommen hat.

Nachfrageseitige Hemmnisse bei der Steigerung der Sanierungsraten und zielkonformer Wärmeversorgung

Eine Vielzahl an Faktoren beeinflusst, wie Sanierungsentscheidungen zustande kommen. Diese können sich wiederum je nach Gebäude- und Akteurstyp unterscheiden. Eine bedeutsame Rolle kommt zudem Intermediären, wie Energieberater:innen, und Anbietenden von energierelevanten Lösungen, wie Handwerksbetrieben, zu, die oftmals als erste Ansprechpartner für Privatpersonen fungieren und durch ihre Empfehlungen das Sanierungsausmaß beeinflussen (Engelmann et al., 2050, Arning et al. 2019).

Im Bereich der Wohngebäude stellen die Ein- oder Zweifamilienhäuser den Großteil, Mehrfamilienhäuser rund ein Fünftel der Gebäude. Bei beiden Gebäudetypen liegen Hemmnisse vor, die Sanierungs- und Modernisierungsaktivitäten erschweren. Die Gruppe der Ein- und Zweifamilienhäuser ist hinsichtlich ihrer individuellen Motive und Hemmnisse sehr heterogen. Sowohl ökonomische Faktoren - Investitionskosten bzw. Unsicherheiten bzgl. der Amortisation, fehlende Bereitschaft einer Kreditaufnahme – als auch nicht-ökonomische Faktoren wie beispielsweise subjektive Fehleinschätzung des energetischen Gebäudezustands, Befürchtungen bzgl. der Einschränkungen durch die Baumaßnahmen, mangelndes Interesse und unzureichende Inanspruchnahme von Beratungsangeboten beeinflussen die Bereitschaft, zu sanieren (Stieß & Dunkelberg, 2013; Weiß et al., 2018).

Bei Mehrfamilienhäusern unterliegt die Sanierungsentscheidung privaten Vermietern, Wohnungsgesellschaften oder Gemeinschaften von Wohnungseigentümer:innen. Für Wohnungsunternehmen und private Vermieter sind insbesondere die Refinanzierung der Sanierungsmaßnahmen über die Miete relevant (Renz & Hacke, 2016), die neben der geltenden Modernisierungumlage, maßgeblich vom jeweiligen regionalen Mietmarkt abhängt.

Weiterhin bestehen nach Ergebnissen von Schnaidt und Wagner (2020) bei vielen Wohnungsunternehmen kaum Erfahrung sowie Vorbehalte gegenüber dem Einsatz von Wärmepumpen. Im Bereich der Gemeinschaften von Wohnungseigentümer:innen sind insbesondere die hohen Kosten und fehlende finanzielle Rücklagen (Bundesinstitut für Bau- Stadt- und Raumforschung, 2014) sowie die unterschiedlichen Zielsetzungen und Uneinigkeit bei der Sanierungsentscheidung zu nennen.

Im Bereich der Nichtwohngebäude ist sowohl die Nutzungsart als auch die Eigentümerstruktur sehr heterogen. Dieses Segment ist mit Bezug auf das Entscheidungsverhalten und die individuellen Hemmnisse weitaus weniger erforscht als der Wohngebäudebereich. Im Projekt Diffusion EE²⁸ ist eine standardisierte Befragung von Gebäudeeigentümern und Verwaltern von Nichtwohngebäuden durchgeführt worden. Die Ergebnisse zeigen, dass insbesondere das ordnungsrechtliche Niveau die Sanierungsentscheidung vorgibt. Neben dem Wunsch nach Energieeinsparungen sind die überwiegenden Sanierungsanlässe nicht auf energetische Gründe oder bestehende Fördermaßnahmen zurückzuführen, sondern aufgrund von ästhetischen Gründen, Geschäftsveränderung oder dem Beheben von Schäden (Globisch & Dütschke, 2019).

²⁸ Modellierung individueller Entscheidungsprozesse und des Einflusses von Intermediären bei der Diffusion von Energieeffizienzmaßnahmen und Erneuerbaren Energien im Gebäudebereich wurde als interdisziplinäres Verbundprojekt im Rahmen des 6. Energieforschungsprogramms der Bundesregierung (BMWi) gefördert. https://www.isi.fraunhofer.de/de/competence-center/energietechnologien-energiesysteme/projekte/319147_diffusion-ee.html

Literaturverzeichnis

Achtnicht, Martin; Madlener, Reinhard, 2014: Factors influencing German house owners' preferences on energy retrofits. In: *Energy Policy*, 68, 254–263. Online verfügbar unter <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2014.01.006>

Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen (Hrsg.), 2020: Auswertungstabellen zur Energiebilanz Deutschland. Daten für die Jahre von 1990 bis 2019. Stand September 2020. Online verfügbar unter <https://www.ag-energiebilanzen.de/10-o-Auswertungstabellen.html>, zuletzt geprüft am 21.04.2021.

Agora Energiewende (Hrsg.), 2020: Klimaneutrales Deutschland. Online verfügbar unter <https://www.agora-energiewende.de/projekte/klimaneutrales-deutschland-2050/>, zuletzt geprüft am 07.04.2021

Arning, Katrin; Zaunbrecher, Barbara; Ziefle, Martina, 2019: Overlooked and underestimated. The influence of intermediaries' advice on energy-efficient retrofit decisions in private households (7-065-19). eceee 2019 Summer Study on energy efficiency: Is efficient sufficient? Panel 7: Make buildings policies great again (pp. 1177-1188). Zugehöriges Projekt: Diffusion EE (BMWi). ISBN 978-91-983878-5-8

BDH - Bundesverband der Deutschen Heizungsindustrie (Hrsg.), 2021: Marktentwicklung Wärmeerzeuger Deutschland 2011-2020.

BEE - Bundesverband Erneuerbare Energien e.V. (Hrsg.), 2016: Effizient Erneuerbar – Was jetzt zum Gelingen einer Erneuerbaren Wärmewende getan werden muss. BEE-Positionspapier. Berlin.

Bierwirth, Anja, 2015: Strategische Entwicklung eines zukunftsfähigen Wohnraumangebots – ein Suffizienz-Szenario. In: *uwf* 23 (1-2), S. 49–58. DOI: 10.1007/s00550-015-0355-6.

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU); Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) (Hrsg.), 2011: Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung.

Bründlinger, Thomas; König, Julian Elizalde; Frank, Oliver; Gründig, Dietmar; Jugel, Christoph; Kraft, Patrizia; Krieger, Oliver; Mischinger, Stefan; Prein, Philipp; Seidl, Hannes; Siegemund, Stefan; Stolte, Christian; Teichmann, Mario; Willke, Jakob; Wolke, Mareike, 2018: dena-Leitstudie Integrierte Energiewende. Impulse für die Gestaltung des Energiesystems bis 2050. Hg. v. dena. Berlin.

Bundesinstitut für Bau- Stadt- und Raumforschung (Hrsg.), 2014: Neues Wohnen – Gemeinschaftliche Wohnformen bei Genossenschaften. Hg. v. Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR). Bonn.

Bundesinstitut für Bau- Stadt- und Raumforschung (Hrsg.), 2017: Testreferenzjahre. Online verfügbar unter https://www.bbsr-energieeinsparung.de/EnEVPortal/DE/Regelungen/Testreferenzjahre/TRY_node.html, zuletzt geprüft am 15.02.2021

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (Hrsg.), 2015: Wohnungsmarktprognose 2030. Stand: April 2015. Unter Mitarbeit von Tobias Held und Matthias Waltersbacher. Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR-Analysen kompakt). Online verfügbar unter <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:101:1-201506036926>.

Bundesregierung, 2020: CO₂-Bepreisung. Online verfügbar unter <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/co2-bepreisung-1673008>, zuletzt geprüft am 07.04.2021

Bürger, Veit; Hesse, Tilman; Palzer, Andreas; Köhler, Benjamin; Herkel, Sebastian; Engelmann, Peter, 2017: Klimaneutraler Gebäudebestand 2050 - Energieeffizienzpotenziale und die Auswirkungen des Klimawandels auf den Gebäudebestand. Hg. v. Umweltbundesamt (ClimateChange, 26/2017). Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/klimaneutraler-gebaeudebestand-2050-0>, zuletzt geprüft am 19.11.2020.

Hank, Christoph 2020 (submitted): Techno-economic and environmental assessment of Power-to-Liquid processes.

Cischinsky, Holger; Diefenbach, Nikolaus, 2018: Datenerhebung Wohngebäudebestand 2016 - Datenerhebung zu den energetischen Merkmalen und Modernisierungsraten im deutschen und hessischen Wohngebäudebestand (1. Auflage). Institut Wohnen und Umwelt (IWU).

Cischinsky, Holger; Diefenbach, Nikolaus; Rodenfels, Markus, 2018: Datenerhebung Wohngebäudebestand 2016. Anleitung zur Durchführung von Auswertungen mit der Auswertungsdatenbank (Bd. 49, Nummer 0).

Dütschke, Elisabeth; Globisch, Joachim; Steinbach, Jan, 2020: Modellierung individueller Entscheidungsprozesse und des individuellen Einflusses von Intermediären bei der Diffusion von Energieeffizienzmaßnahmen und Erneuerbaren Energien im Gebäudebereich. Schlussbericht zum Projekt «Diffusion EE». <http://publica.fraunhofer.de/dokumente/N-630634.html>

Destatis, 2019: Wohnen in Deutschland. Zusatzprogramm des Mikrozensus 2018. Online verfügbar unter <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Wohnen/Publikationen/Downloads-Wohnen/wohnen-in-deutschland-5122125189005.html>.

DWD – Deutscher Wetterdienst (Hrsg.), 2017: Projektbericht Ortsgenaue Testreferenzjahre von Deutschland für mittlere und extreme Witterungsverhältnisse. Online verfügbar unter https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/forschung/programme/zb/Auftragsforschung/5EnergieKlimaBauen/2013/testreferenzjahre/try-projektbericht.pdf?__blob=publicationFile&v=1, zuletzt geprüft am 07.04.2021

EFI-NET GmbH & Co. KG (Hg.), 2020: Energiemarkt 12-Monatsrückblick vom 31. Dezember 2019. Online verfügbar unter <https://efi-net.de/energiemarkt-12-monatsrueckblick-vom-31-dezember-2019-2/>.

Emele, Lukas; Harthan, Ralph; Moosmann, Lorenz, 2019: Projektionsbericht 2019 für Deutschland. gemäß Verordnung (EU) Nr. 525/2013. Online verfügbar unter https://cdr.eionet.europa.eu/de/eu/mmr/arto4-13-14_lcds_pams_projections/projections/envxnw7wq/, zuletzt geprüft am 21.04.2021.

Engelmann, Peter; Köhler, Benjamin; Meyer, Robert; Dengler, Jörg; Herkel, Sebastian; Kießling, Lea; Quast, Anneke; Berneiser, Jessica; Bär, Christian; Sterchele, Philip; Heilig, Judith; Bürger, Veit; Braungardt, Sibylle; Hesse, Tilman; Sandrock, Matthias; Maaß, Christian; Strodel,

Nikolai, 2021: Systemische Herausforderung der Wärmewende Abschlussbericht. Hg. V. Umweltbundesamt (Climate Change 18/2021). Online verfügbar unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5750/publikationen/2021-04-26_cc_18-2021_waerme-wende.pdf

Europäische Kommission, 2020: A European Green Deal. Online verfügbar unter https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en, zuletzt geprüft am 07.04.2021

Europäische Kommission, 2020: Neues Klimaziel: EU-Kommission schlägt 55 % weniger Emissionen bis 2030 vor. Hg. v. Europäische Kommission. Online verfügbar unter https://ec.europa.eu/germany/news/20200917-neues-klimaziel_de, zuletzt geprüft am 17.11.2020.

Fichtner, Fraunhofer ISE, TFZ, Qconcept Energy, DBI-Gas- und Umwelttechnik GmbH, & IE Leipzig, 2019: Evaluation des Marktanzreizprogramms zur Förderung von Maßnahmen zur Nutzung erneuerbarer Energien im Wärmemarkt im Förderzeitraum 2015 bis 2018 (Nummer November).

Fraunhofer ISI, IfE TU München, GfK Retail and Technology GmbH, IREES GmbH, & BASE-ING. GmbH, 2013 Energieverbrauch des Sektors Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD) in Deutschland für die Jahre 2007 bis 2010. Online verfügbar unter: https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/ccx/2015/Schlussbericht-GHD_2006-2013_Februar2015.pdf

Gerbert, Philipp; Herhold, Patrick; Burchardt, Jens; Schönberger, Stefan; Rechenmacher, Florian; Kirchner, Almut; Kemmler, Andreas; Wünsch, Marco, 2018: Klimapfade für Deutschland. BDI - Bundesverband der Deutschen Industrie e. V., BCG - The Boston Consulting Group, Prognos, 286. <https://bdi.eu/publikation/news/klimapfade-fuer-deutschland/>

Globisch, Joachim; Dütschke, Elisabeth, 2019: Entscheidungsverhalten von Unternehmen bei energieeffizienten Sanierungen.

Gölz, S., 2018: Analysis of the heating and cooling consumers and recommendations in terms of new business models and regulatory framework. Validation workshop European Technology and Innovation Platform – Renewable Heating and Cooling. Brüssel.

Harthan, Ralph; Emele, Lukas; Hermann, Hauke; Matthes, Felix, 2017: Sektorale Abgrenzung der deutschen Treibhausgasemissionen mit einem Schwerpunkt auf die verbrennungsbedingten CO₂-Emissionen. Online verfügbar unter <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Sektorale-Abgrenzung-deutscher-Treibhausgas-Emissionen-2018.pdf>, zuletzt geprüft am 21.04.2021

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. Institut für Wohnen und Umwelt (IWU) im Auftrag des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR).

Kemmler, Andreas; Kirchner, Almut; Auf der Maur, Alex; Ess, Florian; Kreidelmeyer, Sven; Piégsa, Alexander; Spillmann, Thorsten; Wünsch, Marco; Ziegenhagen, Inka, 2020: Energie-wirtschaftliche Projektionen und Folgeabschätzungen 2030/2050.

Kreidelmeyer, Sven; Dambeck, Hans; Kirchner, Almut; Wünsch, Marco (2020): Kosten und Transformationspfade für strombasierte Energieträger. Endbericht zum Projekt „Transformationspfade und regulatorischer Rahmen für synthetische Brennstoffe“. Hg. v. Prognos AG. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi).

Löschel, Andreas; Erdmann, Georg; Staiß, Frithjof; Ziesing, Hans-Joachim, 2014: Stellungnahme zum zweiten Monitoring-Bericht der Bundesregierung für das Berichtsjahr 2012.

Maas, Anton; Schlitzberger, Stephan, 2017: EnEV 2017 – Vorbereitende Untersuchungen. Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR).

Öko-Institut et al., 2020: Rahmendatenbericht für Politikszenerarien IX (unveröffentlicht).

Rechsteiner, Eva; Pehnt, Martin; Ihm, Andreas; Hauser, Alisa et al., 2019: Das Handwerk als Gestalter der Wärmewende (c. HANGE).

Renz, Ina; Hacke, Ulrike, 2016: Einflussfaktoren auf die Sanierung im deutschen Wohngebäudebestand. Online verfügbar unter https://www.kfw.de/PDF/Download-Center/Konzernthemen/Research/PDF-Dokumente-alle-Evaluationen/Einflussfaktoren-auf-die-Sanierung-im-deutschen-Wohngeb%C3%A4udebestand_2016.pdf

Schnaidt, Silke; Wagner, Andreas, 2020: LowEx-Konzepte für die Wärmeversorgung von Mehrfamilien-Bestandsgebäuden. Akteure und Prozesse in der Gebäudesanierung & nichttechnische Rahmenbedingungen und Einflussfaktoren des Sanierungsprozesses.

Statistisches Bundesamt, 2019: Bautätigkeit und Wohnungen - Bestand an Wohnungen Fachserie 5 Reihe 3.

Spinoni, Jonathan; Vogt, Jürgen V.; Barbosa, Paulo; Dosio et al., 2018: Changes of heating and cooling degree-days in Europe from 1981 to 2100. INTERNATIONAL JOURNAL OF CLIMATOLOGY Int. J. Climatol, 38, 191–208. <https://doi.org/10.1002/joc.5362>

Steinbach, Jan, 2015: Modellbasierte Untersuchung von Politikinstrumenten zur Förderung erneuerbarer Energien und Energieeffizienz im Gebäudebereich (Fraunhofer ISI (Hrsg.)). Fraunhofer Verlag.

Sterchele, Philip; Brandes, Julian; Heilig, Judith; Wrede, Daniel; Kost, Christoph, 2020a: Wege zu einem klimaneutralen Energiesystem. Fraunhofer ISE. Freiburg.

Sterchele, Philip; Brandes, Julian; Heilig, Judith; Wrede, Daniel; Kost, Christoph; Schlegl, Thomas et al., 2020b: Anhang zur Studie »Wege zu einem klimaneutralen Energiesystem«. Hg. v. Fraunhofer ISE. Online verfügbar unter <https://www.ise.fraunhofer.de/de/veroeffentlichungen/studien/wege-zu-einem-klimaneutralen-energiesystem.html>, zuletzt geprüft am 19.11.2020.

Stieß, Immanuel; Dunkelberg, Elisa, 2013: Objectives, barriers and occasions for energy efficient refurbishment by private homeowners. Journal of Cleaner Production, 48, 250–259. Online verfügbar unter <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.09.041>

tagesschau.de, 2020: EU-Parlament beschließt schärfere Klimaziele. Hg. v. tagesschau.de. Online verfügbar unter <https://www.tagesschau.de/ausland/eu-parlament-fordert-strengerer-klimaziel-101.html>, zuletzt aktualisiert am 07.10.2020, zuletzt geprüft am 18.11.2020.

Thamling, Nils; Pehnt, Martin; Kirchner, Joachim, 2015: Hintergrundpapier zur Energieeffizienzstrategie Gebäude.

Umweltbundesamt (Hrsg.), 2019: Wohnen. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/daten/private-haushalte-konsum/wohnen>.

Umweltbundesamt (Hrsg.), 2020: Treibhausgasminderungswirkung des Klimaschutzprogramms 2030 (Kurzbericht). CLIMATE CHANGE 12/2020, 2030.

Umweltbundesamt (Hrsg.), 2021: Vorjahreschätzung der deutschen Treibhausgas-Emissionen für das Jahr 2020. 15.03.2021. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/2546/dokumente/2021_03_10_trendtabellen_thg_nach_sektoren_v1.o.xlsx, zuletzt geprüft am 21.04.2021.

Wade, Faye; Hitchings, Russell; Shipworth, Michelle, 2016: Understanding the missing middlemen of domestic heating: Installers as a community of professional practice in the United Kingdom. *Energy Research & Social Science* 19; 39-47.

Weiß, Julika; Bierwirth, Anja; Knoefel, Jan; März, Steven; Kaselofsky, Jan; Friege, Jonas, 2018: Entscheidungskontexte bei der energetischen Sanierung

Anhang

Anhang A. Identifizierung des Korrekturbedarfs des ESG Referenzszenarios

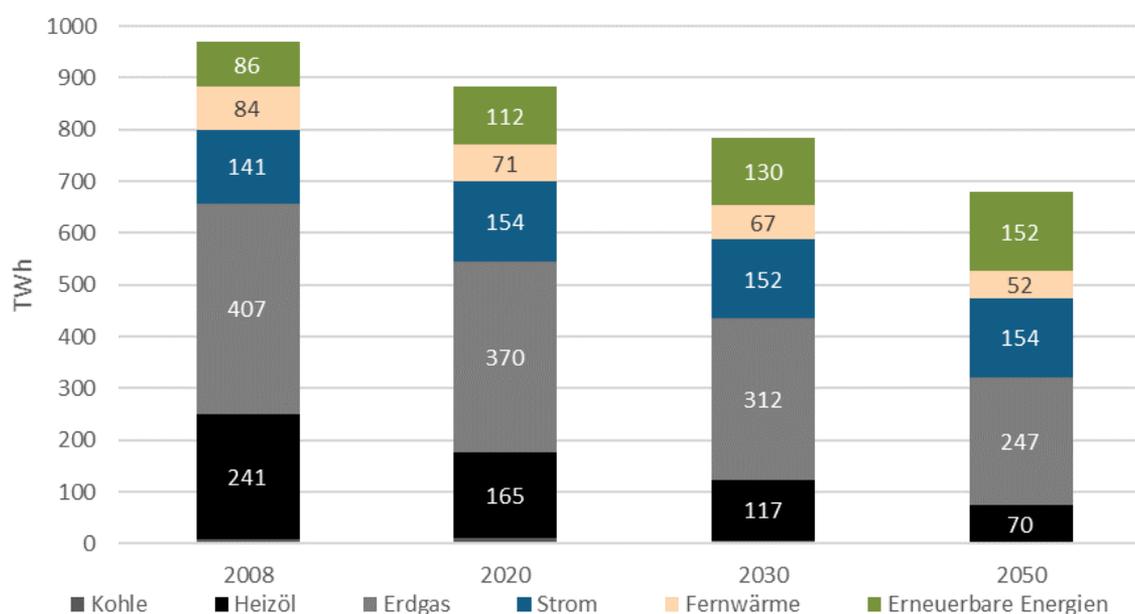
Die ESG setzt derzeit den Rahmen für die Ziele im Gebäudebereich. Die im Jahr 2015 veröffentlichte ESG beinhaltet neben den Zielszenarien auch ein Referenzszenario unter der Annahme der Fortführung der bestehenden Politikinstrumente. Bevor im Rahmen dieser Studie ein eigenes Trendszenario modelliert wird, wird der Anpassungsbedarfs des ESG Referenzszenarios qualitativ anhand der geänderten energie- und klimapolitischen Rahmendbedingungen sowie quantitativ im Vergleich zu aktuellen Referenzszenarien verglichen.

A.1 Entwicklung des Gebäudebereichs im ESG Referenzszenario

Abbildung 77 zeigt die Entwicklung des Endenergiebedarfs für den Gebäudebereich im Referenzszenario der ESG. Wichtige Indikatoren für die Einordnung des Szenarios aus heutiger Sicht sind die prognostizierte Entwicklung des Endenergiebedarfs in den vergangenen Jahren, die Entwicklung bis 2030 und 2050 sowie die Entwicklung der erneuerbaren Energien im Gebäudebereich:

- Im Zeitraum von 2008 bis 2020 sinkt der Endenergiebedarf um 9 %
- Im Zeitraum von 2008 bis 2030 sinkt der Endenergiebedarf um 19 % und bis 2050 um 30 %
- Der Anteil erneuerbarer Energien an der Wärmerversorgung steigt im Zeitraum 2008 bis 2050 um 77 %.

Abbildung 77: Entwicklung des Endenergiebedarfs im Gebäudebereich im Referenzszenario der Energieeffizienzstrategie Gebäude

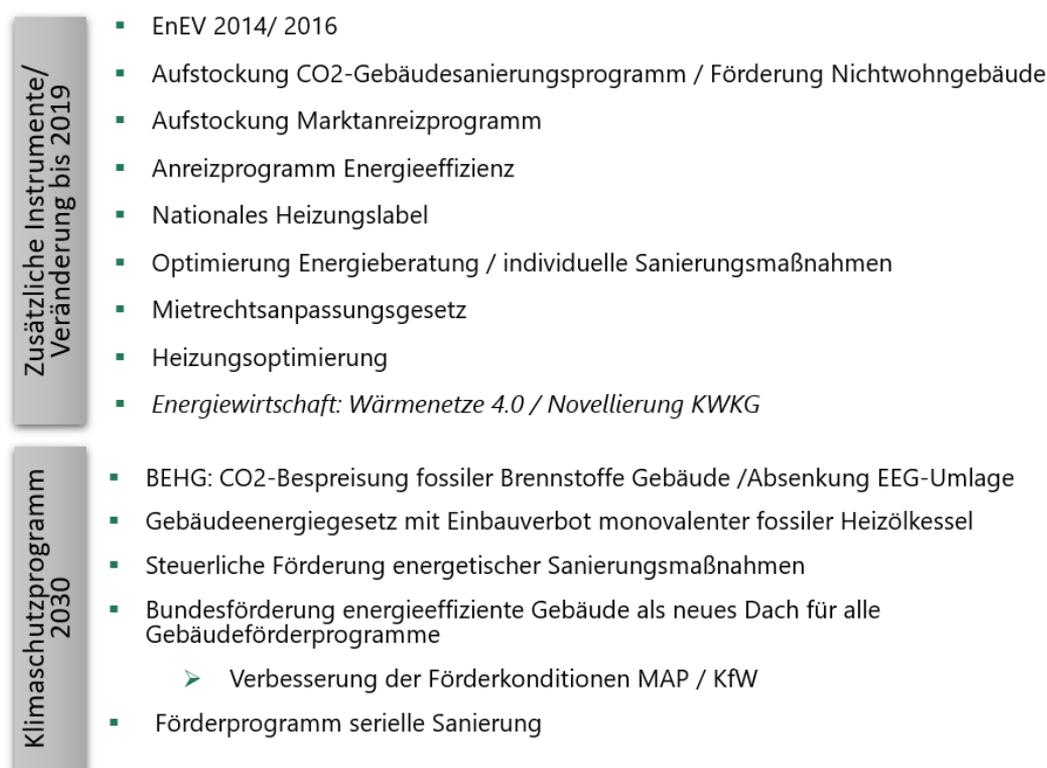


Quelle: Eigene Darstellung basierend auf (Thamling et al., 2015); Gebäudebereich umfasst den Endenergiebedarf für Raumwärme, Warmwasser, Klimakälte für Wohngebäude und Nichtwohngebäude sowie den Endenergiebedarf für Beleuchtung in GHD und Industrie (Nichtwohngebäude)

A.2 Energie- und klimapolitische Rahmenbedingungen

Zunächst wird untersucht, inwieweit sich für das Referenzszenario der ESG aus heutiger Sicht Änderungen ergeben. Neben Annahmen zu externen Rahmenbedingungen wie Bevölkerungs-, Gebäudebedarfs- und Energiepreisentwicklung sind insbesondere die Änderungen am Rechts- und Förderrahmen zu berücksichtigen. Das Referenzszenario der ESG berücksichtigt alle energie- und klimapolitischen Instrumente zum Stand Ende 2013, die über den Zeitraum bis 2050 fortgeschrieben werden. Zur Einordnung des ESG Referenzszenario sind die Maßnahmenänderungen und deren Wirkungen im Zeitraum 2013 und 2020 sowie die Beschlüsse des *Klimaschutzprogramms 2030 zur Umsetzung des Klimaschutzplans 2050* vom Oktober 2019. Abbildung 78 fasst die für den Gebäudebereich relevanten Instrumente zusammen, die im ESG Referenzszenario noch nicht berücksichtigt werden.

Abbildung 78: Zusätzliche und geänderte energie- und politische Maßnahmen im Vergleich zum ESG Referenzszenario



Quelle: Eigene Darstellung

Zusätzliche Instrumente zwischen 2014 und 2019

Für die Berechnung des Trendszenarios im Rahmen dieses Projektes werden alle zusätzlichen Instrumente oder Änderungen an bestehenden Maßnahmen sowie die Beschlüsse des Klimaschutzprogrammes 2030 berücksichtigt. Im Zeitraum zwischen 2014 und 2019 sind Instrumente im Zuge der Verabschiedung der Energieeffizienzstrategie Gebäude, dem Nationalen Aktionsplan Energieeffizienz (NAPE) und dem Aktionsprogramm Klimaschutz eingeführt worden. Dies betrifft insbesondere die Verbesserung der Ausstattung der finanziellen Förderinstrumente für

Energieeffizienzmaßnahmen, die über das CO₂ Gebäudesanierungsprogramm²⁹ finanziert werden sowie die Förderung von erneuerbaren Wärmeversorgungssystemen im Marktanreizprogramm. Zudem erfolgte die Novellierung der EnEV im Jahr 2014 mit der eine Verschärfung der Anforderungen im Neubau ab dem Jahr 2016 gelten. Neben den ordnungsrechtlichen und finanziellen Förderinstrumenten sind weitere flankierende informatorische Instrumente eingeführt oder verbessert worden, wie das Nationale Heizungslabel³⁰ oder die Optimierung der Energieberatung. Mit dem im Jahre 2018 verabschiedeten Mietrechtsanpassungsgesetz³¹ wird die Höhe der Modernisierungsumlage von energetischen Sanierungen im Mietwohnungsbestand von 11 % auf 8 % reduziert und eine Kappungsgrenze eingeführt. Aus ökonomischer Sicht stellt das Gesetz somit keine Verbesserung für Effizienzinvestitionen dar. Soziale Aspekte, die langfristig zu einer höheren Akzeptanz von energetischen Sanierungsmaßnahmen und damit höherer Dynamik führen können sind dabei auch zu beachten. Neben den Instrumenten, die direkt in den Gebäuden wirken – Heizungstausch und energetischen Sanierungsmaßnahmen – ist im Bereich der Energiewirtschaft die Bundesförderung für effiziente Wärmenetze (Wärmenetze 4.0) zu nennen, welches neben KWKG und Marktanreizprogramm, als Förderinstrument den Ausbau und die Transformation von Wärmenetzen fördert.

Beschlüsse des Klimaschutzprogramm 2030 für den Gebäudebereich

Für die Einordnung des Referenzszenarios und die Erstellung eines Trendszenarios mit der Fortschreibung bis zum Jahr 2050 sind die Beschlüsse des Klimaschutzprogramms 2030 vom Oktober 2019 noch relevanter, da damit die zentralen energie- und klimapolitischen Rahmenbedingen im Gebäudebereich noch einmal signifikant angepasst werden.

Mit der Bundesförderung energieeffiziente Gebäude (BEG) werden die finanziellen Förderinstrumente zusammengeführt und hinsichtlich der Höhe der spezifischen Förderung für Effizienzmaßnahmen und Wärmeversorgungssysteme sowie die zur Verfügung stehenden Budgets verbessert. Zusätzlich wird die steuerliche Förderung der Gebäudesanierung eingeführt. Mit dem Gebäudeenergiegesetz werden EnEV, EnEG und EEWärmeG zusammengeführt³². Die ordnungsrechtlichen Anforderungen an Neubauten und Sanierungen im Bestand werden im Vergleich zur EnEV 2016 jedoch nicht verschärft. Als zentrale Änderung beinhaltet das Gesetz ein Einbauverbot für monovalente Heizölkessel ab dem Jahr 2016 (§72 (4)). Daneben werden durch die Verabschiedung des Brennstoffemissionshandelsgesetz (BEHG)³³ fossile Brennstoffe im Gebäudebereich entsprechend ihrem CO₂-Gehalt ab dem Jahr 2021 verteuert. Mit dem Gesetz werden die Inverkehrbringer fossiler Brennstoffe im Gebäude und Verkehrsbereich dazu verpflichtet Emissionzertifikate zu erwerben. Im Zeitraum bis zum Jahr 2025 wird der CO₂-Preis für die Zertifikate

²⁹ Über das CO₂ Gebäudesanierungsprogramm werden bisher folgende Programme finanziert: Energieeffizient Sanieren - Programmnummern 151/152 und 430³⁰, KfW-Programm „Energieeffizient Bauen - Programmnummer 153“, KfW-Energieeffizienzprogramm „Energieeffizient Bauen und Sanieren - Programmnummern 276“ (Energiekosten im Gewerbegebäude senken), KfW-Programm „IKK Energieeffizient Bauen und Sanieren - Programmnummern 217/218, IKU - Energieeffizient Bauen und Sanieren - Programmnummern 220/219

³⁰ https://www.bafa.de/DE/Energie/Energieeffizienz/Heizungsetikett/heizungsetikett_node.html

³¹ Gesetz zur Ergänzung der Regelungen über die zulässige Miethöhe bei Mietbeginn und zur Anpassung der Regelungen über die Modernisierung der Mietsache (Mietrechtsanpassungsgesetz – MietAnpG). <https://www.bmjv.de/Shared-Docs/Gesetzgebungsverfahren/DE/MietAnpG.html>

³² Gebäudeenergiegesetz vom 8. August 2020 (BGBl. I S. 1728). <http://www.gesetze-im-internet.de/geg/GEG.pdf>

³³ Brennstoffemissionshandelsgesetz vom 12. Dezember 2019 (BGBl. I S. 2728), das durch Artikel 1 des Gesetzes vom 3. November 2020 (BGBl. I S. 2291) geändert worden ist. <http://www.gesetze-im-internet.de/behg/BEHG.pdf>

vorgegeben und steigt von 25 EURO/t CO₂e im Jahr 2021 auf 55 EURO/t CO₂e im Jahr 2025. Danach wird sich der Preis für die Zertifikate entsprechend Angebot und Nachfrage am Markt bilden, wobei für das Jahr 2026 ein Preiskorridor von 55 bis 65 EURO/t CO₂e vorgegeben ist.

A.3 Vergleich aktueller Referenzszenarien mit der ESG

Neben den Politikinstrumenten, deren Wirkung nicht im ESG Referenzszenario abgebildet ist, können andere Faktoren entgegenwirken. Insbesondere wenn die angenommenen Entwicklungen der fossilen Energieträgerpreise nicht in der Höhe realisiert wird, wie es den Annahmen des Szenarios unterstellt ist. Ein wichtiger Faktor ist zudem die Entwicklung der Bevölkerung und der damit verbundenen Entwicklung der Wohngebäude und Nichtwohngebäudeflächen.

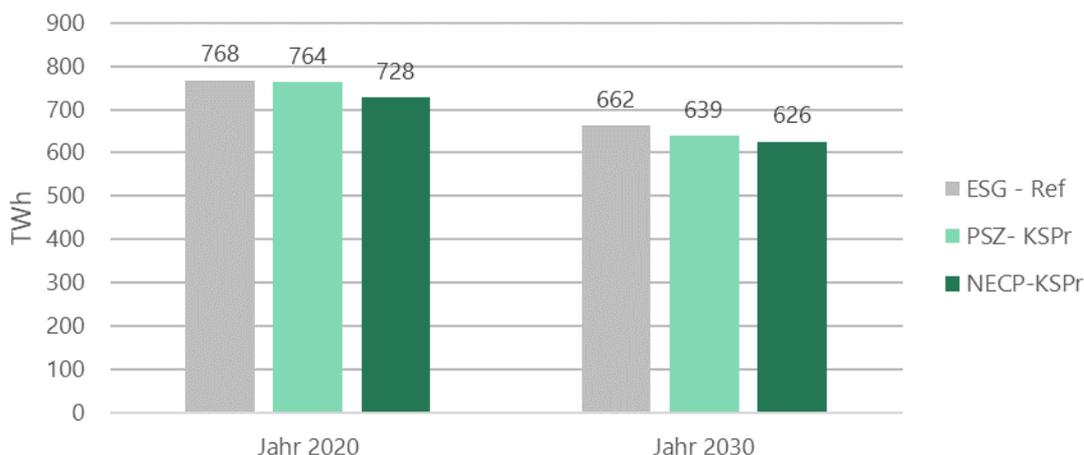
Um die Wirkung des ESG Referenzszenarios vor dem Hintergrund der geänderten energie- und klimapolitischen Rahmenbedingungen einzuordnen, wird es mit aktuellen Referenzentwicklungen verglichen, die bereits die Wirkungen der zusätzlichen Maßnahmen des Klimaschutzprogramms 2030 beinhalten. Hier sind derzeit zwei Szenarienstudien verfügbar:

- Im Rahmen des Projektes Politiksznarien IX ist im Auftrag des Umweltbundesamtes (UBA) die Wirkung des Klimaschutzprogramms 2030 für alle Sektoren in einer Szenarioanalyse bis zum Jahr 2035 untersucht worden (UBA (Hg.), 2020). Die Forschungsnehmer für die Studie „Treibhausgasminderungswirkung des Klimaschutzprogramms 2030“ sind Öko-Institut, Fraunhofer ISI und IREES. Die Ergebnisse für den Gebäudebereich sind dabei mit dem Modell Invert/ee-Lab durch IREES modelliert worden. Im Folgenden wird das Szenario als *PSZ-KSPr* referenziert.
- Im Rahmen der Studie „Energiewirtschaftliche Projektionen und Folgeabschätzungen 2030/2050“ sind im Auftrag des BMWi auch ein Szenario inklusive der Wirkungen des Klimaschutzprogramms 2030 berechnet worden. Die Ergebnisse der Studie sind in den Nationalen Energie- und Klimaschutzplan (NECP) eingeflossen. Forschungsnehmer für die Studie sind PROGNOSE und Fraunhofer ISI. Im Folgenden wird das Szenario als *NECP-KSPr* referenziert.

Da die Abgrenzung des Gebäudebereichs im Rahmen der Politiksznarien IX nach der Systematik des Klimaschutzplans 2050 erfolgt, werden die Ergebnisse für den Bilanzraum Raumwärme und Warmwasser für Wohngebäude und Nichtwohngebäude verglichen. Abbildung 79 zeigt, dass sich bereits für das Jahr 2020 Unterschiede zwischen den Szenarien zeigen. Auffällig ist, dass ESG-Referenz und *PSZ-KSPr* mit Bezug auf den Endenergiebedarf eine gleiche Größenordnung haben, während das *NECP-KSPr* Szenario rund 36 TWh bzw. 40 TWh niedriger liegt. Der Unterschied zwischen *PSZ-KSPr* und NECP ist jedoch nicht nur auf die unterschiedliche Entwicklung des Endenergiebedarfs, sondern auch auf die Unterschiede in der Temperaturbereinigung zurückzuführen³⁴. Insofern ist zur Beurteilung der Szenarien und Einordnung des ESG Referenzszenarios insbesondere der relative Rückgang beim Endenergiebedarf als geeigneter Indikator zu wählen.

³⁴ Das *PSZ-KSPr* Szenario ist auf das Basisjahr 2018 bezüglich des realen Verbrauchs kalibriert. Das *NECP-KSPr* Szenario hat das Jahr 2016 als Basisjahr. Die genaue Temperaturbereinigung ist nicht bekannt. Es wird vermutet, dass die Werte auf ein langjähriges Mittel der Wetterjahre korrigiert sind.

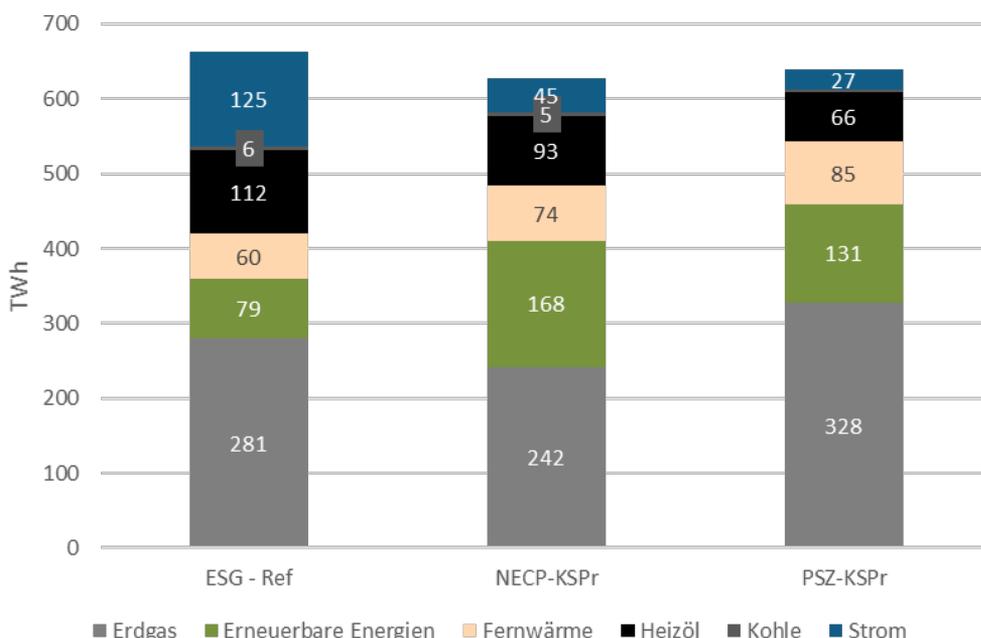
Abbildung 79: Endenergiebedarf für Raumwärme und Warmwasser für Wohngebäude und Nichtwohngebäude in Referenzszenarien



Quelle: Eigene Darstellung; (Kemmler et al., 2020; UBA (Hg.), 2020); Eigene Datenauswertung Politikszenerien; persönliche Informationen (PROGNOS) zu Detailauswertung NECP-KSPr Szenario

Der Rückgang beim Endenergiebedarf von 2020 bis 2030 liegt mit 16 % in dem Bereich der anderen beiden Szenarien - im PSZ-KSPr Szenario resultieren 20 % und im NECP-KSPr Szenario beträgt der Rückgang ebenfalls 16 %.

Abbildung 80: Vergleich des Energieträgereinsatzes im Jahr 2030 in den Referenzszenarien

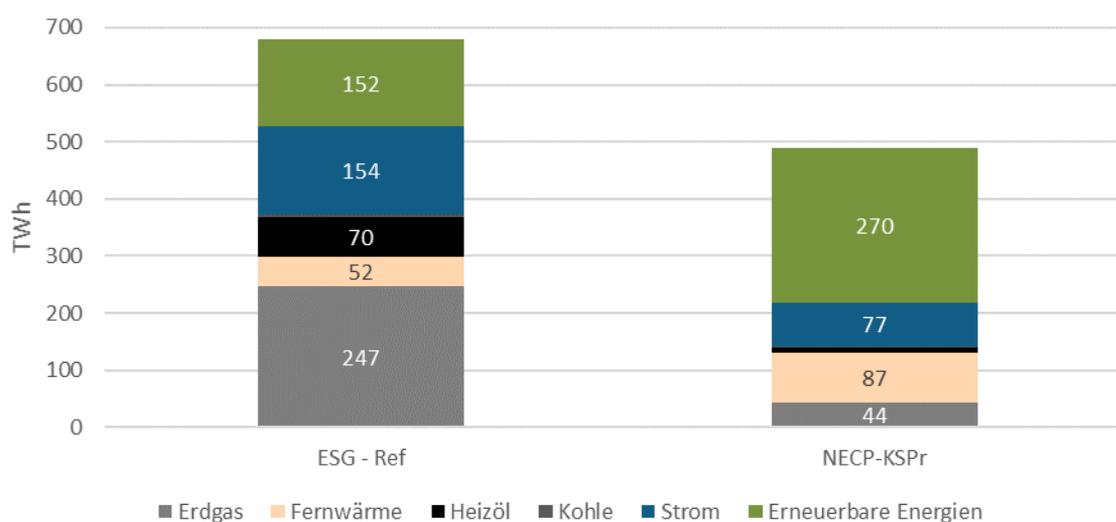


Quelle: Eigene Darstellung; (Kemmler et al., 2020; Thamling et al., 2015; UBA (Hg.), 2020); Eigene Datenauswertung Politikszenerien; persönliche Informationen (PROGNOS) zu Detailauswertung NECP-KSPr Szenario

Mit Bezug auf die verwendeten Energieträger für die Raumwärme- und Warmwasserbereitstellung zeigen sich deutliche Unterschiede (Abbildung 80). So beträgt der dezentrale EE-Wärme Anteil im ESG-Referenzszenario im Jahr 2030 12 % im Vergleich zu 20 % im PSZ-KSPR und 27 % im NECP-KSPR³⁵.

Für die Identifizierung des theoretischen Korrekturbedarfs bis zum Jahr 2050 kann nur das NECP-KSPR Szenario herangezogen werden, da der Betrachtungszeitraum in den Politikenszenarien nur bis zum Jahr 2035 geht. Für den Vergleich zwischen ESG-Referenz und NECP-KSPR wird im Jahr 2050 der Gebäudebereich entsprechend dem Bilanzraum der ESG für beide Szenarien dargestellt. Abbildung 81 verdeutlicht, dass im NECP-Szenario mit Berücksichtigung der neu eingeführten Politikinstrumente und unter Annahme einer dynamischen Entwicklung der CO₂-Preisung sowohl eine signifikantere Reduktion des Endenergiebedarfs als auch ein stärkerer Umstieg zu erneuerbarer Wärme resultiert.

Abbildung 81: Endenergiebedarf im Gebäudesektor in ESG-Referenz und NECP-KSPR Szenario im Jahr 2050



Quelle: Eigene Darstellung; (Kemmler et al., 2020; Thamling et al., 2015); persönliche Informationen (PROGNOS) zu Detailauswertung NECP-KSPR Szenario

³⁵ Im PSZ-KSPR Szenario sind biogene Nahwärmenetze der Fernwärme zugerechnet, die in der Statistik als dezentrale Biomasse im GHD Sektor bilanziert sind, was teilweise den Unterschied zum NECP-KSPR für Fernwärme und erneuerbare Energien erklärt. Das NECP-KSPR Szenario unterstellt zudem eine höhere CO₂-Preisentwicklung im BEHG

Anhang B. Weitere sektorspezifische Ergebnisse des Zielsystems

Abbildung 82: Technologien zur Umwandlung von Biomasse in Wasserstoff, Biodiesel oder CH₄ von 2020 bis 2050 in GW_{el}

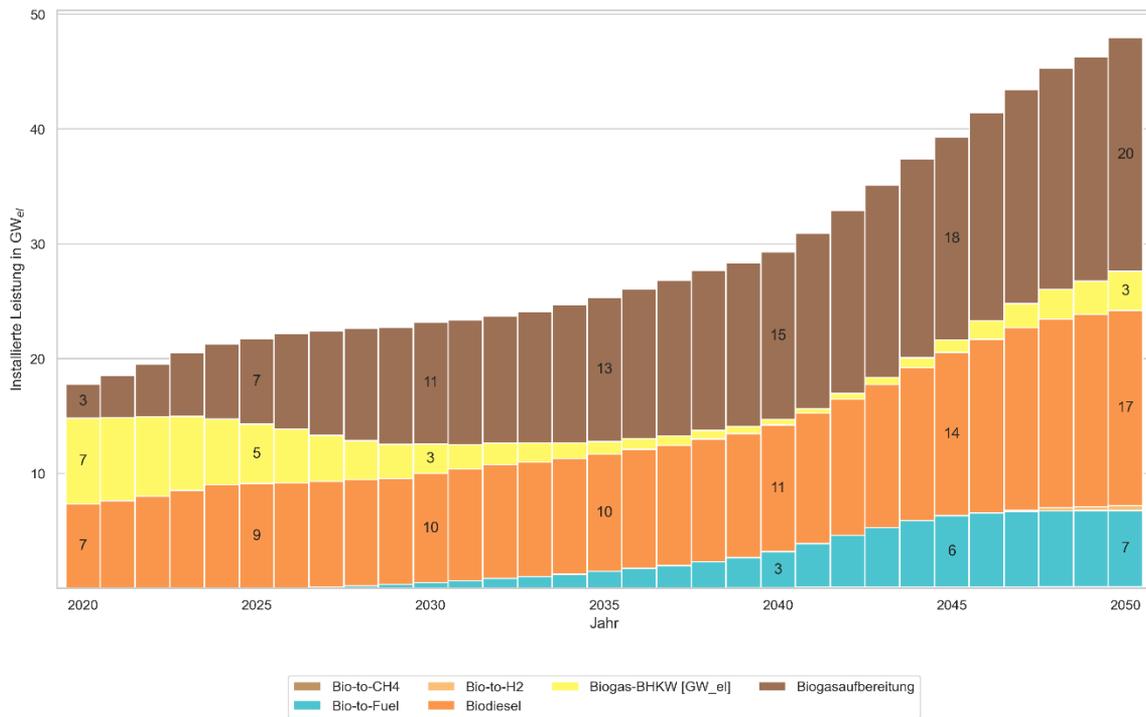


Abbildung 83: Entwicklung des LKW-Verkehrs im Zielszenario von 2020 bis 2050 in Mio. Fahrzeuge

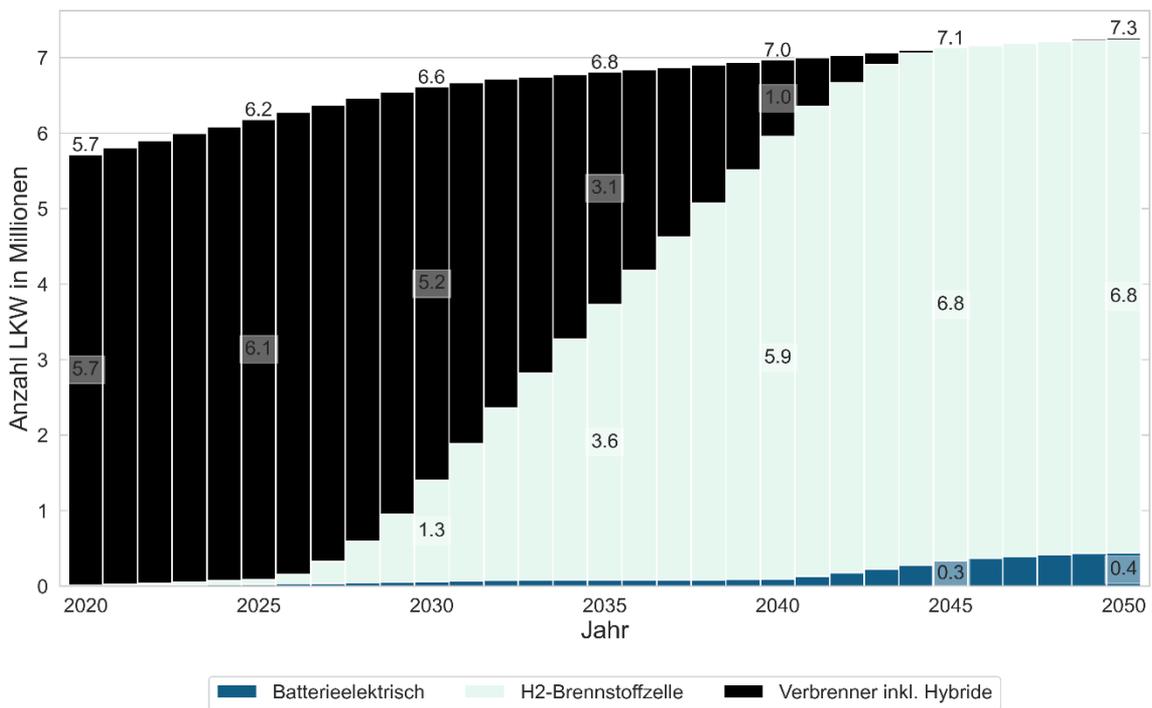


Abbildung 84: Entwicklung des PKW-Verkehrs im Zielszenario von 2020 bis 2050 in Mio. Fahrzeuge

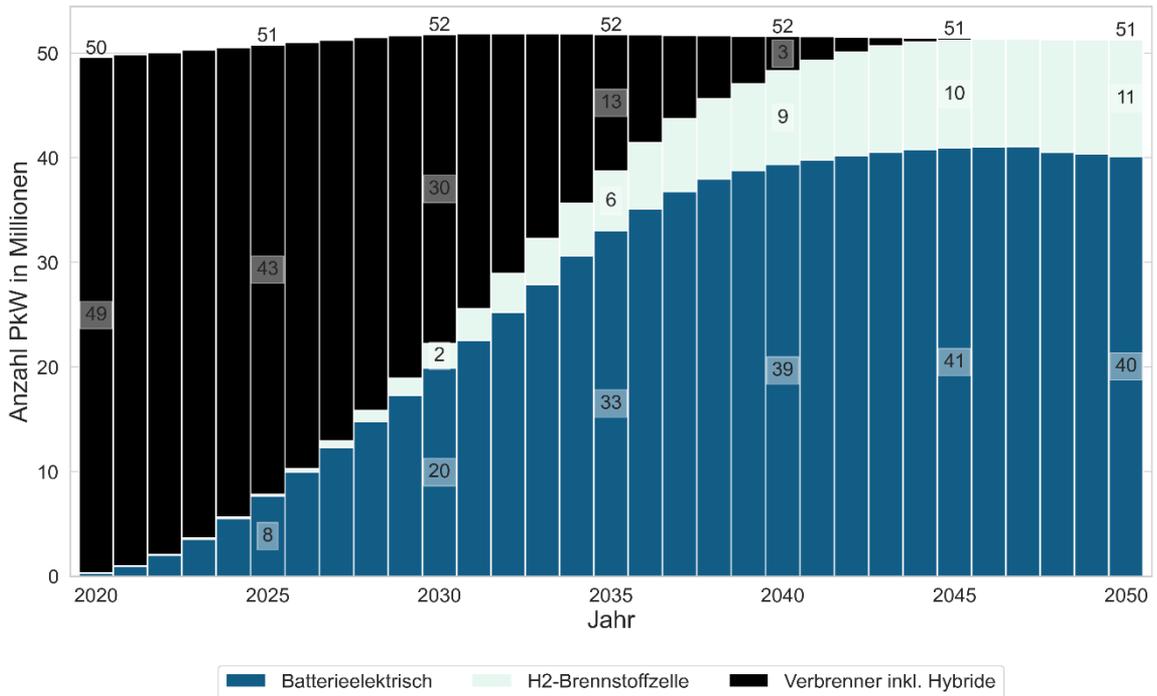
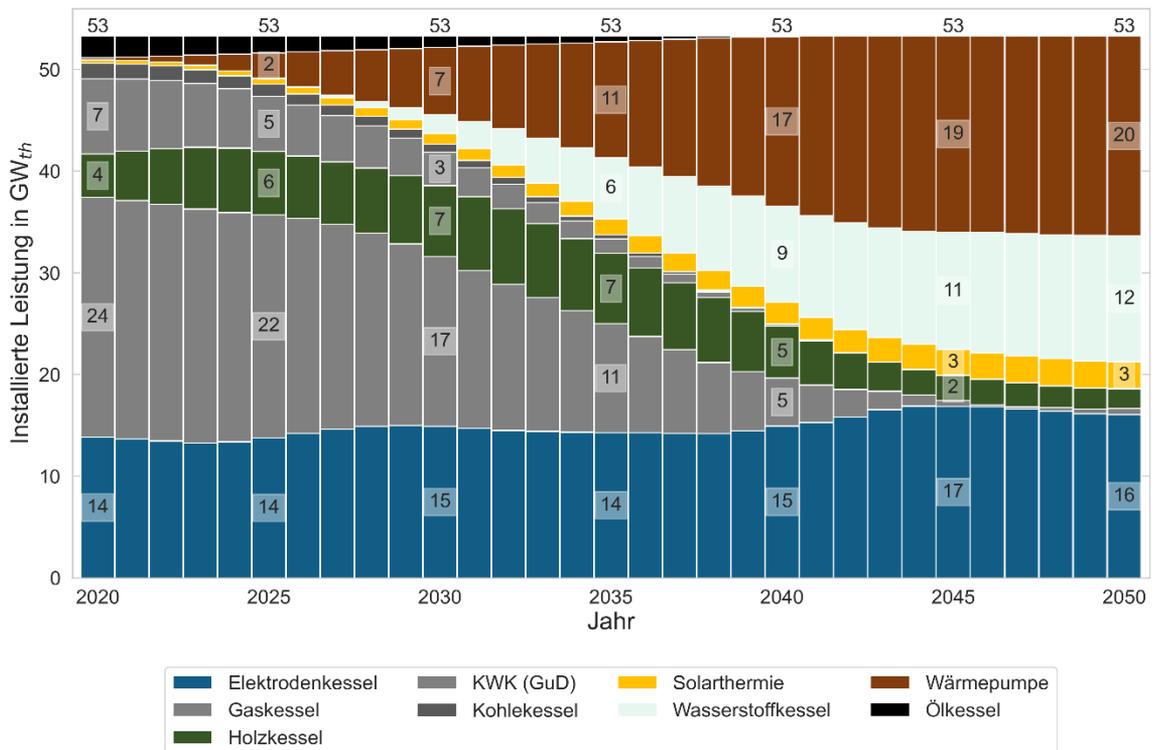


Abbildung 85: Entwicklung der Technologien zur industriellen Prozesswärmebereitstellung von 2020 bis 2050



Anhang C. Beschreibung des Energiesystemmodells Invert/ee-lab

Methodisch stellt Invert/EE-Lab ein dem Bottom-up-Ansatz folgendes, techno-ökonomisches 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 (Abbildung 86). Grundlage des Modells ist eine detaillierte Darstellung des Gebäudebestands nach Gebäudetypen, Baualtersklassen 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 (Steinbach, 2015).

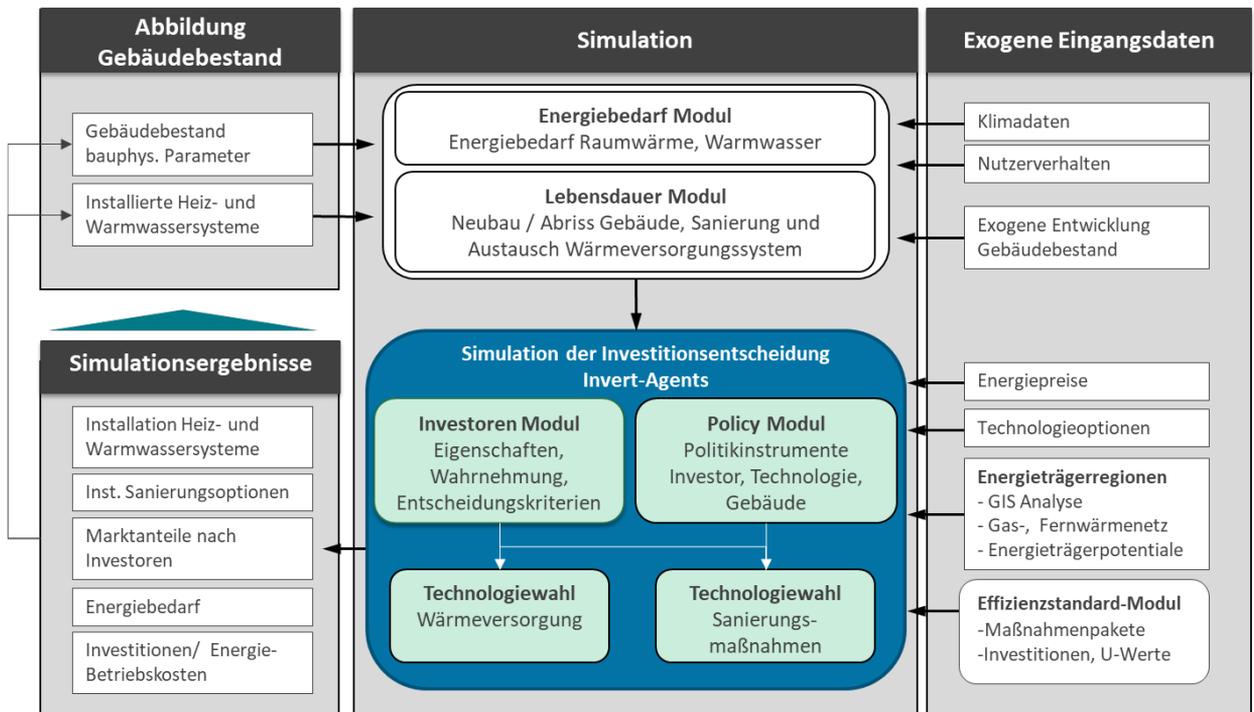
Mit INVERT/EE-Lab ist es möglich, die Auswirkung unterschiedlicher Politikinstrumente und Ausgestaltungsvarianten auf den Ausbau der Erneuerbaren Energien im Gebäudebereich in Szenarien zu analysieren. Im Rahmen des laufenden Forschungsprojektes *Diffusion EE* wird das Modell, um den Bereich der Intermediäre als zentrale Change Agents erweitert, um den Einfluss auf die Investitionsentscheidung im Gebäudebereich abzubilden.

Für eine realitätsnahe Simulation des Einsatzes erneuerbarer Energien im Gebäudebereich werden u.a. folgende relevante Zusammenhänge im Modell abgebildet:

- Berücksichtigung von investorenspezifischen Hemmnissen und Kalkülen bei der Investitionsentscheidung in Wärmeversorgungssysteme und Effizienzmaßnahmen.
- Das Temperaturniveau des Wärmeverteilungssystems wird in der Simulation berücksichtigt, hier besonders die Interaktion zwischen diesem und den Wirkungsgraden bzw. Arbeitszahlen der Bereitstellungstechnologien. Dies ist in besonderem Maße für eine realitätsnahe Simulation des Einsatzes von Wärmepumpen in älteren Gebäuden von Bedeutung.
- Die Modellierung der Energiebereitstellung aus solarthermischen Anlagen erfolgt auf monatlicher Basis unter Berücksichtigung der entsprechenden solaren Einstrahlung. Zudem wird entsprechend der Geometrie der Referenzgebäude, die den solarthermischen Anlagen zur Verfügung stehende Dachfläche im Modell berücksichtigt.
- Politikinstrumente zur Förderung von EE-Wärme und Effizienzmaßnahmen wie Investitionszuschüsse (Marktanreizprogramm), Nutzungspflichten (EEWärmeG) oder haushaltsunabhängige Umlagesysteme werden technologie- und gebäudespezifisch (Neubau, Bestand, öffentliche Gebäude) definiert.
- Darüber hinaus erfolgt eine Berücksichtigung der Limitierung erneuerbarer Energieträger über definierte Kostenpotenziale inklusive deren Entwicklung über den Simulationszeitraum.

Abbildung 86: Struktur des Simulationsmodells Invert/EE-Lab

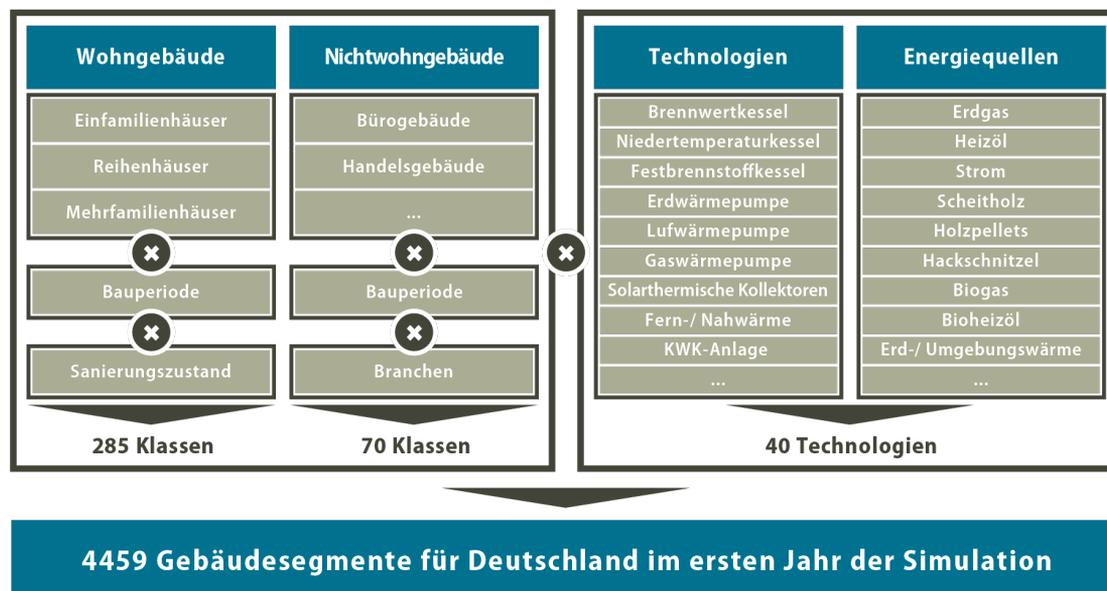
Gebäudetypologische Abbildung von Referenzgebäuden und Wärmeversorgungstechnologien



Quelle: (Steinbach, 2015)

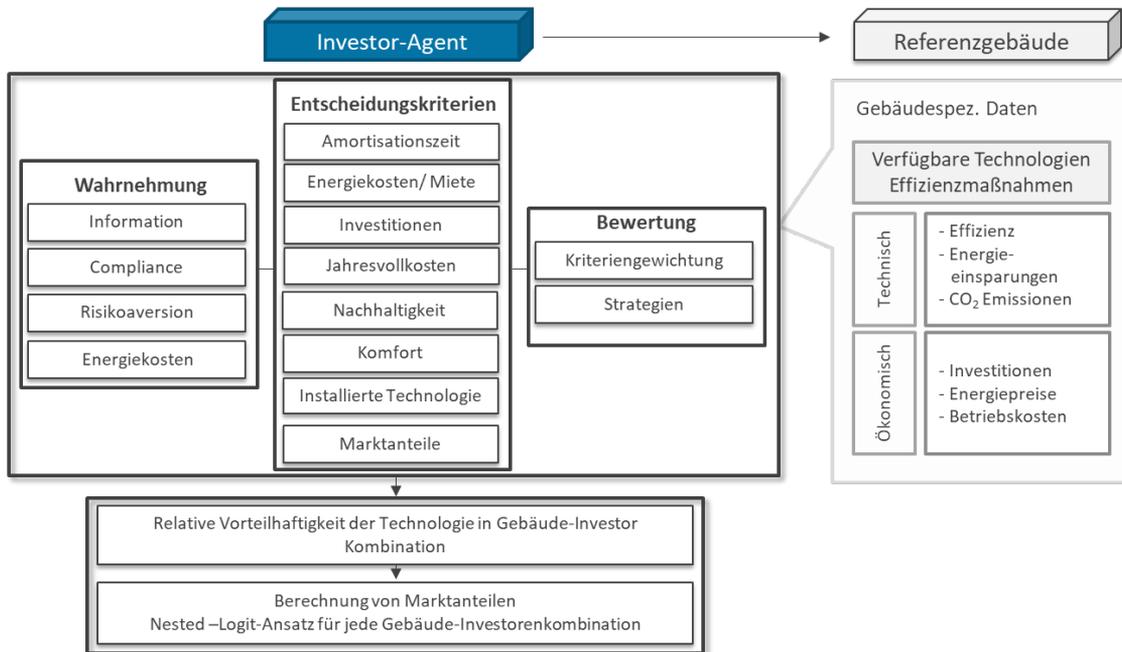
Derzeit werden 40 verschiedene Technologien zur Bereitstellung von Raumwärme und Warmwasser unterschieden, welche über detaillierte technische und ökonomische Daten abgebildet werden. Die Referenzgebäudetypologie mit den entsprechenden Zuordnungen von Gebäuden und Technologien wird auf Basis der Erhebungen „Datenbasis Wohngebäude“ (Diefenbach et al. 2010) und deren Aktualisierung aus dem Jahr 2018 (Cischinsky und Diefenbach 2018). Die Gebäudetypologie von Nichtwohngebäuden basiert ursprünglich auf der Studie „Energieverbrauch im Sektor Gewerbe, Handel, Dienstleistungen“ (Fraunhofer ISI et al., 2013). Der aus der Modellrechnung resultierende Energiebedarf ist auf die temperaturbereinigten Werte der Anwendungsbilanzen sowie der EE-Wärmebereitstellung nach AGEE-Stat kalibriert.

Abbildung 87: Struktur der hinterlegten Gebäudetypologie in Invert/ EE-Lab
Modellierung von Investoren im Gebäudebereich



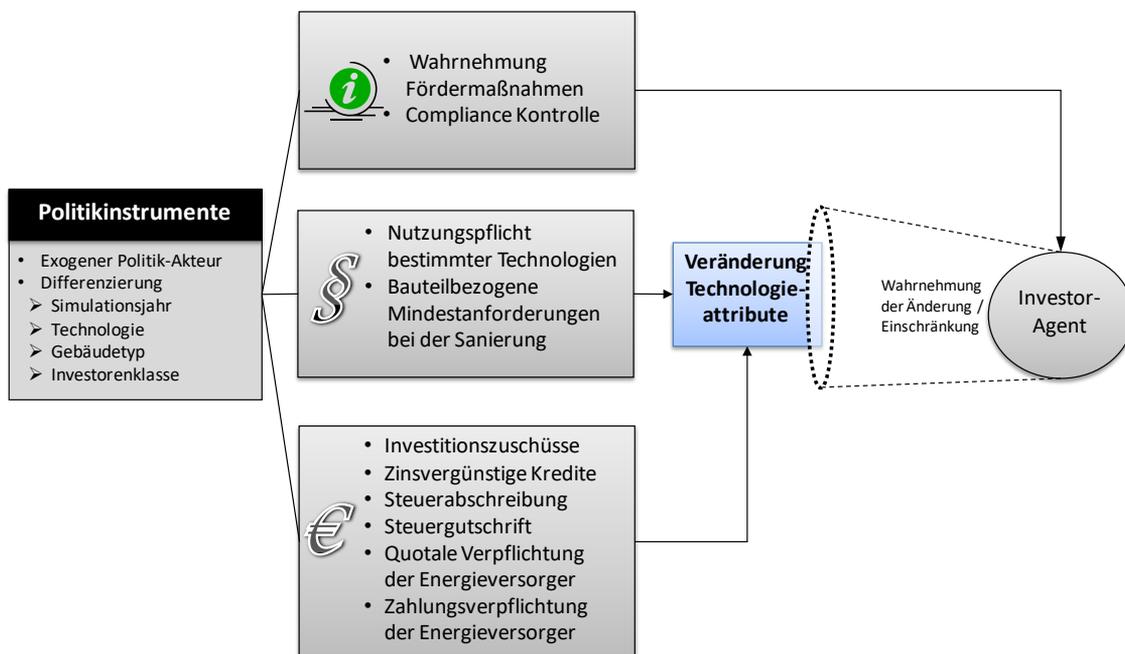
Im Modell können einzelne Investorentypen implementiert werden, welche den Referenzgebäudesegmenten anteilig als Besitzer zugeordnet werden. Diese Anteile sind zeitabhängig und können somit exogen über den Simulationszeitraum verändert werden. Das Modell erlaubt die Definition beliebig vieler Investorenagenten, welche jeweils Instanzen einer von fünf möglichen Agentenklassen darstellen – *Selbstnutzende Eigentümer:innen*, *Private Vermieter:innen*, *Gemeinschaften von Eigentümer:innen*, *Wohnungsbaugesellschaften*, *gewerbliche Gebäudebesitzer:innen*. 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 88: Modellierung der Gebäudeeigentümer:innen 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 akteurspezifische Untersuchung der Wirkungen der Instrumente ermöglichen sollen (Abbildung 89).

Abbildung 89: Schematische Darstellung der Modellierung von Politikinstrumenten 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. Informativische Maßnahmen wiederum wirken indirekt auf die Attribute der Wahlmöglichkeiten, indem die investorenspezifische Wahrnehmung verändert wird.

Anhang D. Beschreibung des Energiesystemmodells REMod

Die grundlegende Idee des Modells REMod-D basiert auf einer kostenbasierten Strukturoptimierung der Transformation des deutschen Energieversorgungssystems für alle Verbrauchssektoren – also die Sektoren Strom, Niedertemperaturwärme (Raumwärme und Warmwasser), Prozesswärme und Verkehr. Ziel dieser Rechnungen ist es, einen kostenoptimierten Transformationspfad vom heutigen System hin zu einem Energiesystem im Jahr 2050 zu bestimmen, wobei auf dem gesamten Weg eine für jedes Jahr vorgegebene Obergrenze erlaubter CO₂-Emissionen über alle Sektoren hinweg nicht überschritten wird.

Die Modellrechnungen beschreiben technisch mögliche Entwicklungspfade des Energiesystems mit allen dazugehörigen Systemkomponenten (wie Wandler, Speicher, Netze und Fahrzeugparks) und optimieren diese in Bezug auf die Minimierung der Gesamtkosten des deutschen Energiesystems auf Basis der getroffenen Annahmen und des Analyserahmens. Anspruch der Rechnungen ist es nicht zu beschreiben, wie die Zukunft aussehen wird, sondern die Frage zu beantworten, wie die Entwicklung von Gesamtsystemen aussehen kann, bei der möglichst geringe Gesamtkosten anfallen und zugleich die erwünschte Minderung der energiebedingten CO₂-Emissionen erreicht und die Energiebilanz zu jedem Zeitpunkt eingehalten wird.

Die notwendigen Eingangsdaten enthalten unter anderem Annahmen zu Kosten und Leistungsdaten einzelner Technologien. Zur Berechnung der stündlichen Energiebilanzen sind Wetterdaten und Last- und Erzeugerprofile für fünf historische Wetterjahre (2011-2015) hinterlegt. Das Modell berücksichtigt zwar geographisch aufgelöste Wetterinformationen, jedoch werden Energienachfrage, -erzeugung und -verteilung nicht räumlich aufgelöst. Kosten für benötigte Infrastruktur (zum Beispiel Netze) werden mittels eines Aufschlags für jede Anwendungstechnologie proportional zu deren Ausbau berücksichtigt. Dies kann im Hinblick auf notwendige Investitionsvolumen Verzerrungen erzeugen, da dadurch diese – im Vergleich zur Realität – zeitlich verzögert dargestellt werden.

Als Stromerzeuger stehen dem Modell verschiedene konventionelle Kraftwerke und Erneuerbare-Energien-Anlagen zur Verfügung. Biomasse kann in unterschiedlichen Nutzungspfaden entweder direkt oder nach Umwandlung in einen anderen Energieträger verwertet werden. So kann zum Beispiel Holz in Kesseln für die Industrie zur Bereitstellung von Prozesswärme verwendet werden oder zur Erzeugung von Niedertemperaturwärme im Gebäudesektor. Als Anlagen zur Umwandlung von Biomasse sind des Weiteren Biogasanlagen, Anlagen zur Einspeisung von

Biogas in das Erdgasnetz, Vergaser-Anlagen mit anschließender Konversion des Synthesegases in Wasserstoff, Methan oder flüssige Brennstoffe und Biodieselanlagen implementiert. Dem Modell stehen stationäre und mobile (Nutzung von Batterien batterieelektrischer Fahrzeuge) elektrische Energiespeicher und Pumpspeicherkraftwerke zur Verfügung. Zusätzlich werden Wasserstoffspeicher, Methanspeicher und thermische Warmwasserspeicher in verschiedenen Größenordnungen berücksichtigt. Die energetische Sanierung des Gebäudebestands wird ebenfalls modellendogen optimiert und ist durch zwei unterschiedliche Sanierungsstandards abgebildet.

Abbildung 90 zeigt den schematischen Aufbau des abgebildeten Energiesystems. Die Energienachfrageseite (rechts) wird dabei in vier Nutzungsbereiche unterteilt: Verkehr, Strom, Niedertemperatur- und Prozesswärme. In den Rechnungen wird das sogenannte „Ein-Knoten-Modell“ oder „Kupferplatten-Modell“ angenommen, in dem die Verteilung von Strom keinen Restriktionen unterliegt, das heißt, dass jede erzeugte und jede nachgefragte Einheit Strom im betrachteten Zeitschritt in ganz Deutschland verfügbar ist. Die notwendigen Kosten für Ausbau beziehungsweise Betrieb des Stromnetzes sind in der Kostenrechnung enthalten.

Abbildung 90: Schematische Darstellung des in REMod-D abgebildeten Energiesystems ohne die Darstellung der Subsysteme für Wärmeversorgung von Gebäuden und Verkehr



Quelle: Fraunhofer ISE

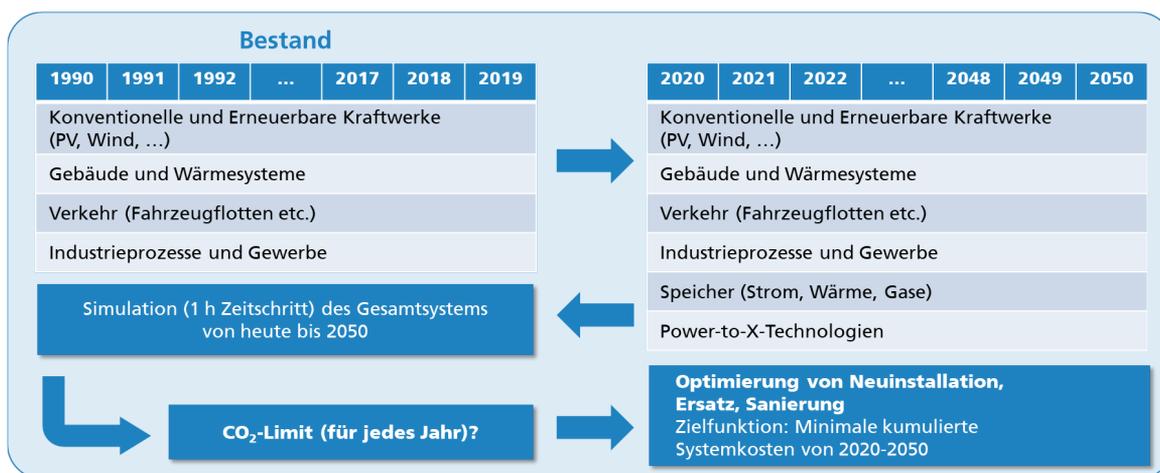
Zur Berücksichtigung des historischen Anlagenbestands werden ausgehend von 1990 bis zum Jahr 2019 alle Anlagen beziehungsweise Einheiten aller implementierten Wandlungs- und Nutzungs-Technologien in Anzahl, Baujahr beziehungsweise installierter Leistung erfasst. Basierend auf den Bestandsdaten der Technologien wird mit Hilfe des Optimierungsalgorithmus jährlich der zukünftige Anlagenpark bestimmt und das System im Anschluss Stunde für Stunde über den vollständigen Betrachtungszeitraum simuliert.

Das Vorgehen der Modellanwendung mit REMod sieht folgende Schritte vor:

1. Das gesamte deutsche Energiesystem wird unter Berücksichtigung einer Vielzahl von Energieträgern, Wandlern und Speichern sowie den Verbrauchssektoren Strom (originäre Stromanwendungen), Wärme, Verkehr und industrielle Prozesswärme Stunde für Stunde simuliert. Bedingt durch die Komplexität des Systems wird hierbei mit Vereinfachungen und hoher Aggregation von Einzelverbrauchern gearbeitet.
2. Die Modellierung (ein Simulationslauf) beginnt am 1. Januar 2014 und endet am 31. Dezember 2050. In jeder Stunde müssen alle Energieanforderungen aller Verbraucher gedeckt werden, das heißt, dass die Energiebilanz ausgeglichen und die Versorgungssicherheit gewährleistet ist. Ausgangspunkt ist der heutige Anlagenbestand. Dafür sind alle relevanten Daten von 1990 bis 2013 im Modell hinterlegt.
3. In jedem Jahr wird der Anlagenbestand basierend auf dem Vorjahr neu berechnet, wobei sich die Systemzusammensetzung ändern kann. Hier ist zwischen Ausbau und Ersatz zu unterscheiden. So können zum Beispiel Windenergieanlagen zugebaut werden, so dass am Ende des Jahres in Summe mehr Anlagen installiert sind als zu Beginn des Jahres. Gleiches gilt für viele weitere Komponenten des Systems (Wandler, Speicher). Zugleich müssen Altanlagen, die ihre Lebensdauer erreicht haben, ersetzt werden – oder sie fallen ersatzlos weg, wenn sich dies aus Systemsicht als günstiger erweist. Bei anderen Systemkomponenten wie Anlagen zur Wärmeversorgung oder Kraftfahrzeugen ist die Anzahl der Anlagen oder Einheiten dagegen von außen vorgegeben. Es werden zum Beispiel exakt so viele Heizungsanlagen benötigt, dass alle Gebäude ausreichend mit Wärme versorgt werden, es ist jedoch nicht möglich, darüber hinaus mehr Anlagen zu installieren. Innerhalb der Optimierung des Systems kann sich jedoch die Zusammensetzung der verwendeten Technologien ändern. Fallen zum Beispiel in einem Jahr 800.000 Heizungsanlagen altersbedingt weg, so können diese durch gleichartige oder aber auch andersartige Anlagen ersetzt werden. Diese Zusammensetzung und ihre zeitliche Entwicklung ist insofern ebenso Ergebnis der Optimierung wie etwa die Entscheidung über Zubau von Windenergieanlagen oder der Umfang energetischer Sanierungsmaßnahmen im Gebäudebestand. In welchem Umfang ein Zubau von Technologien (z.B. Windenergieanlagen) oder ein Ersatz von alten durch neue Technologien (z.B. Heizungstechnologien) stattfindet, kann im Rahmen der Szenariodefinition mit Ober- und Untergrenzen modellexogen festgelegt werden.
4. Nach jedem Simulationslauf von 2020 bis 2050 wird überprüft, ob die vorgegebene CO₂-Obergrenze in jedem Jahr eingehalten wurde, und es werden die Kosten des Systems (Investitionen, Wartung und Betrieb, Brennstoffkosten, etc.) berechnet.
5. Die Zielfunktion für die Optimierung der Entwicklung des Gesamtsystems berücksichtigt die kumulierten Gesamtkosten für die Energieversorgung von 2014 bis 2050. In diesen Kosten sind folgende Kostenpositionen enthalten: Investitionen für Ausbau, Umbau und Ersatz von Systemkomponenten; Finanzierungskosten zur Finanzierung der Investitionen; Betriebs- und Wartungskosten für alle Anlagen; und die Kosten für fossile und biogene Energierohstoffe.
6. Um kostengünstige Transformationspfade zu identifizieren, werden viele einzelne Simulationsläufe mit unterschiedlichen Systemzusammensetzungen beziehungsweise Entwicklungspfaden der Systemzusammensetzung durchgeführt. Unter Verwendung eines Optimierers werden sukzessiv diejenigen Pfade ermittelt, bei denen die Zielfunktion,

also die kumulativen Gesamtkosten, minimale Werte annehmen. Am Ende steht eine kostenminimale Variante, wobei auf Grund der Nichtlinearität der Problemstellung keine Garantie besteht, dass das globale Minimum in dem hochdimensionalen Parameterraum (mit bis zu 2.000 unabhängigen Variablen) gefunden wird. Die Erfahrung aus sehr vielen Rechenläufen und Programmanwendungen mit unterschiedlichen Randbedingungen zeigt vielmehr, dass der Lösungsraum viele unterschiedliche Lösungen – Entwicklungspfade der Transformation – aufweist, die zu relativ ähnlichen kumulativen Gesamtkosten führen.

Abbildung 91: Schematische Darstellung der Funktionsweise von REMod-D



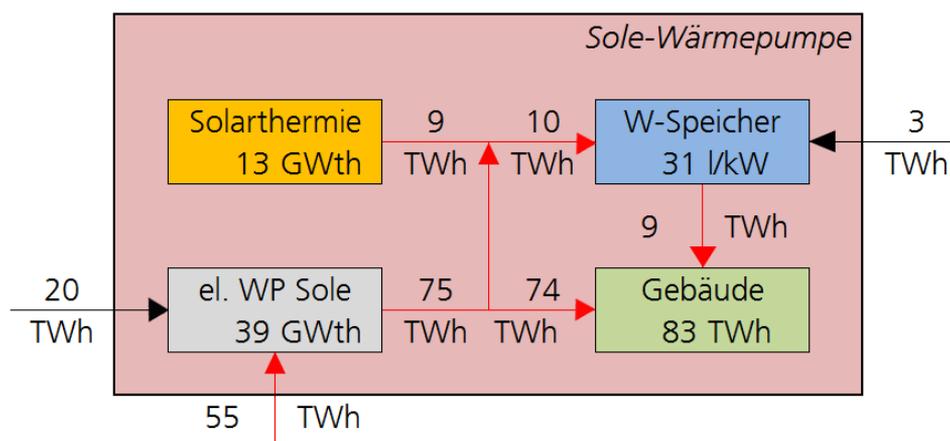
Quelle: Fraunhofer ISE

Die Energienachfrageseite wird in vier Nutzungsbereiche unterteilt: Verkehr, originäre Stromanwendungen, Gebäudewärme (sowohl Wohngebäude als auch Nichtwohngebäude und Industriebauwerke) und Prozesswärme. Hierbei wird der Verkehrssektor im Detail durch PKW und LKW mit jeweils sieben Fahrzeugkonzepten abgebildet, die Nachfrage des Straßenverkehrs (auf Basis des Fahrverhaltens von Pkw und Lkw) wird zeitlich aufgelöst und unter Berücksichtigung unterschiedlicher optionaler Antriebskonzepte abgebildet. Rein bilanziell, das heißt nicht zeitlich aufgelöst, werden die Energienachfrage der Luftfahrt, Schifffahrt und die des brennstoffbasierten Bahnverkehrs berücksichtigt. Im Verkehr muss nicht die Endenergie als Verbrauch abgedeckt werden, sondern die gefahrenen Kilometer. Die Wahl der Antriebsart ist ein Ergebnis der Optimierung. Im Gebäudesektor muss im Modell eine festgelegte Raumtemperatur als Bedingung erfüllt werden. Die dafür verwendeten Heizungstechnologien, der Zustand der Gebäudehülle, sowie der Endenergiebedarf sind wiederum Ergebnis der Modellierung. Die Basisstromlast (Bedarf für originäre Stromanwendungen) wird über Lastprofile basierend auf den Daten der europäischen Übertragungsnetzbetreiber abgebildet, die um die Stromlast für Heizungsanlagen reduziert wurde. Diese Last wird modellendogen berechnet und ist somit nicht Teil der Basislast. Die Energienachfrage der Industrie ist abgeleitet aus den statistischen Daten des Bundeswirtschaftsministeriums und bezieht sich auf die brennstoffbasierte Energiebereitstellung für Prozesswärme. Die Stromnachfrage der Industrie ist in der Basisstromlast erfasst.

Der Gebäudesektor ist mit 18 möglichen Heizwärmeversorgungstechniken implementiert. Jede dieser Heizungstechniken kann optional durch einen Wärmespeicher und optional durch eine Solarthermieanlage ergänzt werden. Abbildung 92 zeigt beispielhaft das System „elektrische Sole-

Wärmepumpe“, also das einer Sole-Wasser-Wärmepumpe mit Erdreich als Wärmequelle. Dargestellt sind die möglichen Energieflüsse zwischen den einzelnen Systemkomponenten. Thermische Speicher können sowohl über Solarthermie als auch mit Wärme aus Überschussstrom (direkt oder über die Wärmepumpe), beladen werden. Letzteres ermöglicht eine flexible Nutzung von Strom bei negativer Residuallast. Umgekehrt kann bei positiver Residuallast und gleichzeitigem Wärmebedarf die Wärmepumpe ausgeschaltet und der Speicher entladen werden.

Abbildung 92: Schematischer Aufbau der Heizungssysteme am Beispiel einer erdreichgekoppelten, elektrischen Wärmepumpe

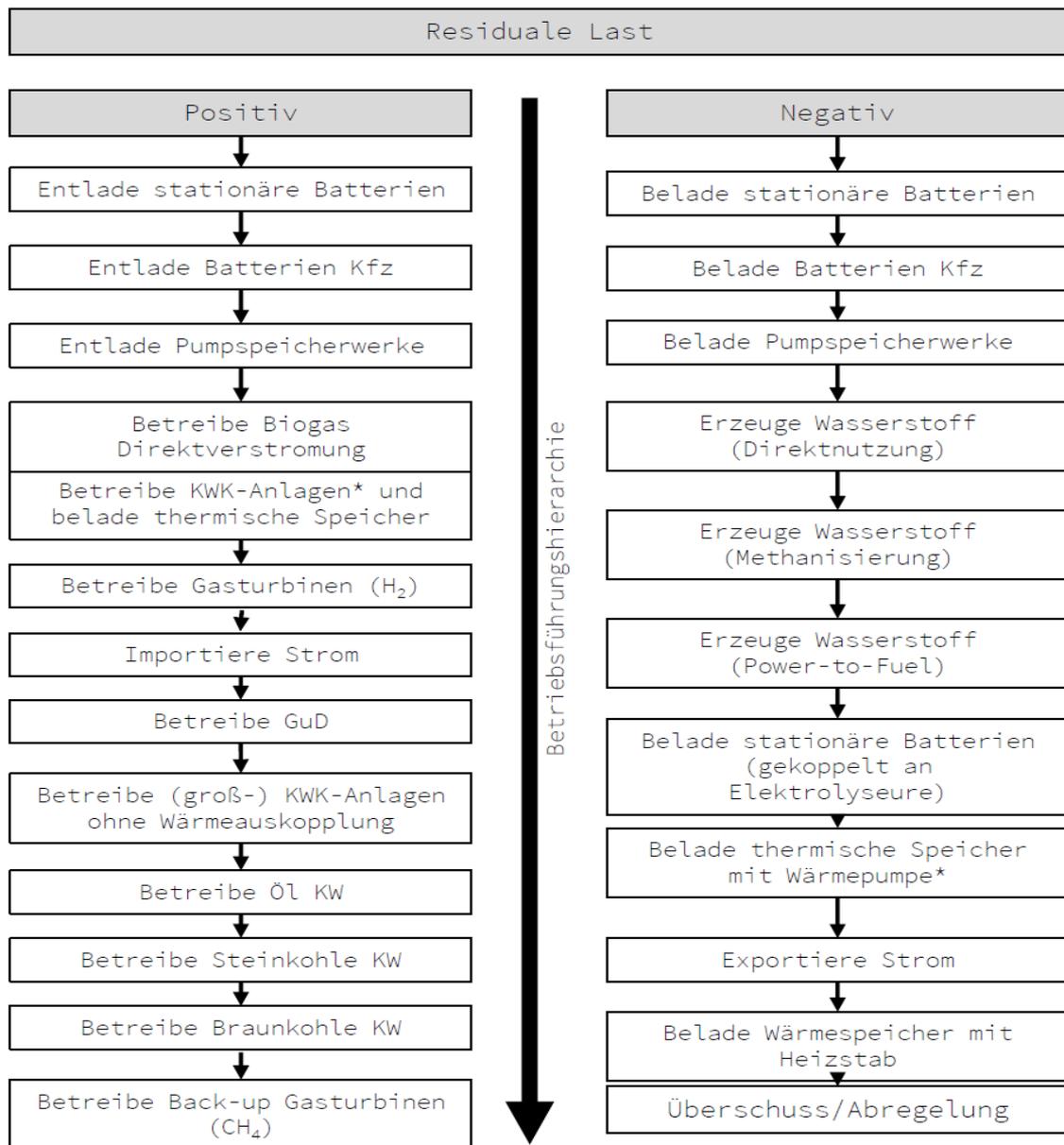


Quelle: Fraunhofer ISE

Anmerkung: (rote Linien = Wärme, schwarze Linie = Strom)

Das Modell REMod-D basiert auf einfachen physikalischen Modellen aller enthaltenen Komponenten. Zentraler Bestandteil ist dabei der Austausch von Energie über das Stromsystem. Eine nach der Einspeisung von erneuerbarem Strom noch zu deckende Last (Residuallast) wird durch die Erzeugung von Strom aus unterschiedlichen Anlagen ausgeglichen. Überschüssiger Strom hingegen kann gespeichert und/oder in unterschiedliche Energieformen (chemisch und thermisch) gewandelt und somit für alle Sektoren zugänglich gemacht werden. Der Betrieb der stromerzeugenden und stromverwendenden Anlagen bei positiver beziehungsweise negativer Residuallast folgt einer festgelegten Betriebsführungsstrategie. Die Reihenfolge der Nutzung der Komponenten in dieser Betriebsführung folgt dem Pfad der höchsten Energieeffizienz bei gleichzeitig niedrigsten CO₂-Emissionen. Abbildung 93 zeigt die verschiedenen Stufen zur Erzeugung beziehungsweise Verwertung von Strom bei positiver beziehungsweise negativer Residuallast im System. Zur Deckung positiver Residuallasten werden nach der Verwendung von elektrischen Speichern und Biogas-BHKW zunächst KWK-Anlagen betrieben und die entstehende Wärme dazu genutzt, thermische Speicher zu beladen beziehungsweise Wärmelasten zu decken, sofern diese zeitgleich vorliegen. Anschließend können Wasserstoffbetriebene Gasturbinen die Last ausgleichen oder Strom wird importiert. Weiterer Bedarf wird durch den Betrieb von GuD-Kraftwerken und KWK-Anlagen im „nur-Strom-Modus“ gedeckt. Sofern diese noch installiert sind, kommen als letzte Option konventionelle Öl- Stein oder Braunkohlekraftwerke zum Einsatz. Als letzte Flexibilitätsoption sorgen CH₄-basierte Gasturbinen dafür, dass die Stromlast in jeder Stunde bedient wird. Die Einsatzreihenfolge führt jedoch nicht dazu, dass nur Technologien genutzt werden, die sich oben in der Reihenfolge befinden. Vielmehr wird jeweils eine Technologiekonfiguration gewählt, die ganzheitlich zu einem Kostenminimum (also inklusive von Bau und Betrieb der Anlagen) führt.

Abbildung 93: Betriebsführungsreihenfolge bei positiver (links) und negativer (rechts) Residuallast



Quelle: Fraunhofer ISE

Maßgeblich für die verschiedenen Residuallastzustände während der Simulation ist der Einfluss des Wetters. Um diesen adäquat abzubilden, werden im Rahmen der Rechnungen fünf reale Datensätze der Jahre 2011 bis 2015 verwendet. Die im Modell verwendeten Wetterdaten zur Berechnung der Einspeise- und Lastprofile basieren auf öffentlich zugänglichen Daten des Deutschen Wetterdienstes. Verarbeitet werden im Modell Wetterdaten aus zwei verschiedenen Referenzstandorten in Deutschland, Braunschweig für Norddeutschland und Würzburg für Süddeutschland. Von beiden Standorten werden stündliche Außentemperaturwerte und Strahlungsdaten verwendet. Zur Berücksichtigung stochastischer Effekte werden für die Berechnung des Wetters im Betrachtungszeitraum von 2020 bis 2050 die verfügbaren Wetterjahre der Jahre 2011-2015 zu Beginn der Rechnungen entweder zufällig oder nach vorgegeben Reihenfolge auf den Zeitraum von 2020 bis 2050 verteilt. Jede iterative Berechnung (Simulationslauf) eines Transformationspfads innerhalb einer Optimierung verwendet dann diese Sequenz in immer

gleicher Form. Damit wurde für den gesamten Zeitraum 2020 bis 2050 ein konsistenter Datensatz erstellt, der als Basis für die Errechnung der Stromerzeugung aus Solarenergie und Wind dient, mit dem die Heizlast des Gebäudesektors berechnet wird und der als Basis für die Wärmeerzeugung aus solarthermischen Anlagen verwendet wird. Der reale Verlauf der Stromverbrauchsdaten dieser Jahre wird ebenso in der gleichen Sequenz verwendet, um eine adäquate Korrelation zwischen dem Verlauf der Basisstromlast und dem Verlauf der Energiebereitstellung aus erneuerbaren Quellen, der durch den Verlauf der meteorologischen Größen bestimmt ist, sicherzustellen.

Modellreferenzen:

- Sterchele, P., Brandes, J., Heilig, J., Wrede, D., Kost, C., Schlegl, T., Bett, A., Henning, H.-M. (2020): "Wege zu einem klimaneutralen Energiesystem – Die deutsche Energiewende im Kontext gesellschaftlicher Verhaltensweisen", <https://www.ise.fraunhofer.de/de/veroeffentlichungen/studien/wege-zu-einem-klimaneutralen-energiesystem.html>
- Analyse: Sektorkopplung - Untersuchungen und Überlegungen zur Entwicklung eines integrierten Energiesystems
- Handlungsempfehlung: Sektorkopplung - Untersuchungen und Überlegungen zur Entwicklung eines integrierten Energiesystems
- Optimierungsmodell REMod-D - Materialien des Akademienprojekts „Energiesysteme der Zukunft“
- Palzer, Andreas (2016): Sektorübergreifende Modellierung und Optimierung eines zukünftigen deutschen Energiesystems unter Berücksichtigung von Energieeffizienzmaßnahmen im Gebäudesektor. Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe.
- Henning, H.-M.; Palzer, Andreas (2015): Was kostet die Energiewende? Wege zur Transformation des deutschen Energiesystems bis 2050. Hg. v. Fraunhofer ISE. Freiburg.
- Henning, Hans-Martin; Palzer, Andreas (2014): A comprehensive model for the German electricity and heat sector in a future energy system with a dominant contribution from renewable energy technologies – Part I: Methodology. In: Renewable and Sustainable Energy Reviews 30, S. 1003–1018. DOI: 10.1016/j.rser.2013.09.012 .
- Palzer, Andreas; Henning, H.-M. (2014a): A future German energy system with a dominating contribution from renewable energies: a holistic model based on hourly simulation. In: Energy Technology 2, S. 13–28.
- Palzer, Andreas; Henning, Hans-Martin (2014b): A comprehensive model for the German electricity and heat sector in a future energy system with a dominant contribution from renewable energy technologies – Part II: Results. In: Renewable and Sustainable Energy Reviews 30, S. 1019–1034. DOI: 10.1016/j.rser.2013.11.032 .
- Henning, Hans-Martin; Palzer, Andreas (2013): ENERGIESYSTEM DEUTSCHLAND 2050. Sektor- und Energieträgerübergreifende, modellbasierte, ganzheitliche Untersuchung zur langfristigen Reduktion energiebedingter CO₂-Emissionen durch Energieeffizienz und den Einsatz Erneuerbarer Energien. Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE. Freiburg.
- Henning, Hans-Martin; Palzer, Andreas (2012): 100 % ERNEUERBARE ENERGIEN FÜR STROM UND WÄRME IN DEUTSCHLAND. Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE. Freiburg.

REMod: Technische-ökonomische Annahmen des Umwandlungssektors**Tabelle 14: In REMod hinterlegte Heizungstechnologien - Wärmenetze**

Komponente	Größe	Einheit	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Wärmenetze: Geothermie-Direktwärme (Tiefe>1000m, keine Stromerzeugung)	Investition	€/kWth	3775	3584	3392	3221	3049	2895	2740
Wärmenetze: Geothermie-Direktwärme (Tiefe>1000m, keine Stromerzeugung)	Lebensdauer	a	30	30	35	35	40	40	50
Wärmenetze: Geothermie-Direktwärme (Tiefe>1000m, keine Stromerzeugung)	M/O-Kosten	% Invest	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
Wärmenetze: GuD mit Wärmeauskopplung > 10 MW	Investition	€/kWel	791	768	753	743	738	737	736
Wärmenetze: GuD mit Wärmeauskopplung > 10 MW	Lebensdauer	a	30	30	30	30	30	30	30
Wärmenetze: GuD mit Wärmeauskopplung > 10 MW	M/O-Kosten	% Invest	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
Wärmenetze: GuD mit Wärmeauskopplung > 10 MW	Wirkungsgrad el.	%	56.0	58.0	59.0	60.0	61.0	62.0	63.0
Wärmenetze: GuD mit Wärmeauskopplung > 10 MW	Wirkungsgrad th.	%	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0
Wärmenetze: (Groß-) Wärmepumpen (Wasser-Wasser)	Investition	€/kWth	400	375	350	325	300	275	250
Wärmenetze: (Groß-) Wärmepumpen (Wasser-Wasser)	Lebensdauer	a	25	25	25	25	25	25	25

Komponente	Größe	Einheit	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Wärmenetze: (Groß-) Wärmepumpen (Wasser-Wasser)	M/O-Kosten	% Invest	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3
Wärmenetze: Solarthermie (Freiflächenanlagen)	Investition	€/m ²	290	260	230	215	200	195	190
Wärmenetze: Solarthermie (Freiflächenanlagen)	Lebensdauer	a	30	30	30	30	30	30	30
Wärmenetze: Solarthermie (Freiflächenanlagen)	M/O-Kosten	% Invest	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2
Wärmenetze: Wärmespeicher (Wasser ca. 50 m ³)	Investition	€/m ³	139	129	119	110	100	90	80
Wärmenetze: Wärmespeicher (Wasser ca. 50 m ³)	Lebensdauer	a	40	40	40	40	40	40	40
Wärmenetze: Wärmespeicher (Wasser ca. 50 m ³)	M/O-Kosten	% Invest	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0

Quelle: (Sterchele et al. 2020b).

Tabelle 15: In REMod hinterlegte Stromerzeuger

Komponente	Größe	Einheit	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Wind Offshore	Investition	€/kW _{el}	3512	3210	2937	2697	2493	2337	2251
Wind Offshore	Lebensdauer	a	20	20	20	20	20	20	20
Wind Offshore	Potenzial	GW	0.66	0.66	2.77	2.77	2.77	2.77	2.77

Komponente	Größe	Einheit	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Wind Offshore	M/O-Kosten	% Invest	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
Wind Onshore	Investition	€/kW _{el}	1493	1411	1366	1345	1337	1335	1335
Wind Onshore	Lebensdauer	a	24	24	25	25	25	26	26
Wind Onshore	Potenzial	GW	5.52	5.52	5.52	5.52	5.52	5.52	5.52
Wind Onshore	M/O-Kosten	% Invest	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
Photovoltaik Dach Süd	Investition	€/kW _{el}	976	828	718	643	597	576	571
Photovoltaik Dach Süd	Lebensdauer	a	26	26	27	27	28	28	29
Photovoltaik Dach Süd	Potenzial	GW	1.90	4.00	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50
Photovoltaik Dach Süd	M/O-Kosten	% Invest	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
Photovoltaik Dach Ost-West	Investition	€/kW _{el}	976	828	718	643	597	576	571
Photovoltaik Dach Ost-West	Lebensdauer	a	26	26	27	27	28	28	29
Photovoltaik Dach Ost-West	Potenzial	GW	2.30	4.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50
Photovoltaik Dach Ost-West	M/O-Kosten	% Invest	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
Photovoltaik Freifläche Süd	Investition	€/kW _{el}	648	600	550	505	463	425	390
Photovoltaik Freifläche Süd	Lebensdauer	a	26	26	27	27	28	28	29
Photovoltaik Freifläche Süd	Potenzial	GW	1.00	3.40	4.35	4.35	5.35	5.35	5.35
Photovoltaik Freifläche Süd	M/O-Kosten	% Invest	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0

Komponente	Größe	Einheit	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
GuD-Kraftwerke	Investition	€/kW _{el}	700	700	700	700	700	700	700
GuD-Kraftwerke	Lebensdauer	a	40	40	40	40	40	40	40
GuD-Kraftwerke	M/O-Kosten	% Invest	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
GuD-Kraftwerke	Wirkungsgrad	%	56.0	57.0	59.0	60.0	61.0	62.0	63.0
Gasturbine	Investition	€/kW _{el}	385	385	385	385	385	385	385
Gasturbine	Lebensdauer	a	40	40	40	40	40	40	40
Gasturbine	M/O-Kosten	% Invest	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
Gasturbine	Wirkungsgrad	%	35.0	35.0	35.0	35.0	35.0	35.0	35.0
Braunkohle-kraftwerk	Investition	€/kW _{el}	1700	1700	1700	1700	1700	1700	1700
Braunkohle-kraftwerk	Lebensdauer	a	45	45	45	45	45	45	45
Braunkohle-kraftwerk	M/O-Kosten	% Invest	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6
Braunkohle-kraftwerk	Wirkungsgrad	%	37.0	38.0	39.0	40.0	41.0	42.0	42.0
Steinkohlekraftwerk	Investition	€/kW _{el}	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500
Steinkohlekraftwerk	Lebensdauer	a	45	45	45	45	45	45	45
Steinkohlekraftwerk	M/O-Kosten	% Invest	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6
Steinkohlekraftwerk	Wirkungsgrad	%	41.0	42.0	42.0	42.0	42.0	42.0	42.0

Komponente	Größe	Einheit	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
H ₂ -Rückver-stromung (Gasturbine)	Investition	€/kW _{el}	500	451	419	399	389	386	385
H ₂ -Rückver-stromung (Gasturbine)	Lebensdauer	a	40	40	40	40	40	40	40
H ₂ -Rückver-stromung (Gasturbine)	M/O-Kosten	% Invest	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
H ₂ -Rückver-stromung (Gasturbine)	Wirkungsgrad	%	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0

Quelle: (Sterchele et al. 2020b).

Tabelle 16: Energiewandler- und Speicher

Komponente	Größe	Einheit	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Wärmenetze	Investition	€/kW _{th}	400	400	400	400	400	400	400
Wärmenetze	Lebensdauer	a	40	40	40	40	40	40	40
Wärmenetze	M/O-Kosten	% Invest	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Gasnetz	Investition	€/kW _{Gas}	28	28	28	28	28	28	28
Gasnetz	Lebensdauer	a	30	30	30	30	30	30	30
Gasnetz	M/O-Kosten	% Invest	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
Anbindung - Offshore Seekabel	Investition	€/kW _{Wind_off}	430	430	430	430	430	430	430

Komponente	Größe	Einheit	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Anbindung - Offshore Seekabel	Lebensdauer	a	40	40	40	40	40	40	40
Anbindung - Offshore Seekabel	M/O-Kosten	% Invest	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
HGÜ (Nord-Süd-Anbindung)	Investition	€/kWWind _off	200	200	200	200	200	200	200
HGÜ (Nord-Süd-Anbindung)	Lebensdauer	a	40	40	40	40	40	40	40
HGÜ (Nord-Süd-Anbindung)	M/O-Kosten	% Invest	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
Mittelspannung (Onshore Aus- bau)	Investition	€/kWWind _on	180	180	180	180	180	180	180
Mittelspannung (Onshore Aus- bau)	Lebensdauer	a	40	40	40	40	40	40	40
Mittelspannung (Onshore Aus- bau)	M/O-Kosten	% Invest	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
Verteilnetz (PV-Ausbau)	Investition	€/kWPV	140	140	140	140	140	140	140
Verteilnetz (PV-Ausbau)	Lebensdauer	a	40	40	40	40	40	40	40
Verteilnetz (PV-Ausbau)	M/O-Kosten	% Invest	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
Elektrolyse (MIX PEM/AEL/HTEL)	Investition	€/kWel	738	676	613	584	554	525	495
Elektrolyse (MIX PEM/AEL/HTEL)	Lebensdauer	a	26	26	25	26	28	29	30

Komponente	Größe	Einheit	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Elektrolyse (MIX PEM/AEL/HTEL)	M/O-Kosten	% Invest	3.5	3.4	3.3	3.5	3.6	3.8	3.9
Elektrolyse (MIX PEM/AEL/HTEL)	Wirkungsgrad	%	64.5	64.8	65.1	66.4	67.6	68.9	70.2
Stationäre Batterien	Investition	€/kWhel	400	275	150	138	125	113	100
Stationäre Batterien	Lebensdauer	a	10	10	15	15	15	15	15
Stationäre Batterien	M/O-Kosten	% Invest	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Stationäre Batterien	Wirkungsgrad	%	85.8	86.5	87.2	87.8	88.5	89.2	90.0
Wasserstoffspeicher & -verdichter	Investition	€/kWh ₂	163	163	163	163	163	163	163
Wasserstoffspeicher & -verdichter	Lebensdauer	a	30	30	30	30	30	30	30
Wasserstoffspeicher & -verdichter	M/O-Kosten	% Invest	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
Wasserstoffspeicher & -verdichter	Wirkungsgrad	%	95.0	95.0	95.0	95.0	95.0	95.0	95.0
Methanisierung (inkl. Elektrolyse und CO ₂ -Abtrennung aus der Luft)	Investition	€/kWel	1914	1494	1074	1040	1006	1000	995
Methanisierung (inkl. Elektrolyse und CO ₂ -Abtrennung aus der Luft)	Lebensdauer	a	21	23	24	26	27	29	30

Komponente	Größe	Einheit	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Methanisierung (inkl. Elektrolyse und CO ₂ -Abtrennung aus der Luft)	M/O-Kosten	% Invest	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0
Methanisierung (inkl. Elektrolyse und CO ₂ -Abtrennung aus der Luft)	Wirkungsgrad Elyse	%	57.1	59.3	61.5	61.5	61.5	61.5	61.5
Methanisierung (inkl. Elektrolyse und CO ₂ -Abtrennung aus der Luft)	Wirkungsgrad Sabatier	%	74.3	74.3	74.3	74.3	74.3	74.3	74.3
Erdgas-Dampf-Reformierung	Investition	€/kWGas	995	995	995	995	995	995	995
Erdgas-Dampf-Reformierung	Lebensdauer	a	15	15	15	15	15	15	15
Erdgas-Dampf-Reformierung	M/O-Kosten	% Invest	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
Erdgas-Dampf-Reformierung	Wirkungsgrad	%	69.4	69.4	69.4	69.4	69.4	69.4	69.4
Power-to-Methanol-to-Gasoline (inkl. CO ₂ -Abtrennung aus der Luft)	Investition	€/kWel	1814	1394	974	940	906	900	895
Power-to-Methanol-to-Gasoline (inkl. CO ₂ -Abtrennung aus der Luft)	Lebensdauer	a	21	23	24	26	27	29	30
Power-to-Methanol-to-Gasoline (inkl. CO ₂ -Abtrennung aus der Luft)	M/O-Kosten	% Invest	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0

Komponente	Größe	Einheit	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Power-to-Methanol-to-Gasoline (inkl. CO ₂ -Abtrennung aus der Luft)	Wirkungsgrad	%	43.3	44.9	46.6	46.6	46.6	46.6	46.6

Quelle: (Sterchele et al. 2020b).

Tabelle 17: Biomassewandler

Komponente	Größe	Einheit	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Holz- und holzartige Biomasse zu CH ₄ (Vergasung mit anschl. Synthetisierung)	Investition	€/kWth	2561	2198	1955	1808	1732	1704	1700
Holz- und holzartige Biomasse zu CH ₄ (Vergasung mit anschl. Synthetisierung)	Lebensdauer	a	20	20	20	20	20	20	20
Holz- und holzartige Biomasse zu CH ₄ (Vergasung mit anschl. Synthetisierung)	M/O-Kosten	% Invest	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
Holz- und holzartige Biomasse zu CH ₄ (Vergasung mit anschl. Synthetisierung)	Wirkungsgrad	%	55.0	55.0	55.0	55.0	55.0	55.0	55.0
Holz- und holzartige Biomasse zu H ₂ (Vergasung mit anschl. Synthetisierung)	Investition	€/kWth	1874	1609	1431	1323	1267	1247	1244

Komponente	Größe	Einheit	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Holz- und holzartige Biomasse zu H ₂ (Vergasung mit anschl. Synthetisierung)	Lebensdauer	a	20	20	20	20	20	20	20
Holz- und holzartige Biomasse zu H ₂ (Vergasung mit anschl. Synthetisierung)	M/O-Kosten	% Invest	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
Holz- und holzartige Biomasse zu H ₂ (Vergasung mit anschl. Synthetisierung)	Wirkungsgrad	%	61.0	61.0	61.0	61.0	61.0	61.0	61.0
Holz- und holzartige Biomasse zu flüssigen Kraftstoffen (Vergasung mit anschl. Synthetisierung)	Investition	€/kWth	2835	2434	2164	2001	1917	1886	1882
Holz- und holzartige Biomasse zu flüssigen Kraftstoffen (Vergasung mit anschl. Synthetisierung)	Lebensdauer	a	20	20	20	20	20	20	20
Holz- und holzartige Biomasse zu flüssigen Kraftstoffen (Vergasung mit anschl. Synthetisierung)	M/O-Kosten	% Invest	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
Holz- und holzartige Biomasse zu flüssigen Kraftstoffen (Vergasung mit anschl. Synthetisierung)	Wirkungsgrad	%	46.0	46.0	46.0	46.0	46.0	46.0	46.0

Komponente	Größe	Einheit	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Biodieselanlage (Raps zu Biodiesel)	Investition	€/kWth	150	150	150	150	150	150	150
Biodieselanlage (Raps zu Biodiesel)	Lebensdauer	a	20	20	20	20	20	20	20
Biodieselanlage (Raps zu Biodiesel)	M/O-Kosten	% Invest	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
Biodieselanlage (Raps zu Biodiesel)	Wirkungsgrad (Feld zu Fuel)	%	60.0	60.0	60.0	60.0	60.0	60.0	60.0
Biogasanlage (Rohstoff Biogas - ohne BHKW)*	Investition	€/kWBiogas	965	852	776	731	707	698	697
Biogasanlage (Rohstoff Biogas - ohne BHKW)*	Lebensdauer	a	20	20	20	20	20	20	20
Biogasanlage (Rohstoff Biogas - ohne BHKW)*	M/O-Kosten	% Invest	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
Biogas Aufbereitung (CO ₂ -Abscheidung -> Bio-Erdgas)	Investition	€/kWhGas	538.5	412.7	328.4	277.3	251.1	241.4	240.0
Biogas Aufbereitung (CO ₂ -Abscheidung -> Bio-Erdgas)	Lebensdauer	a	25	25	25	25	25	25	25
Biogas Aufbereitung (CO ₂ -Abscheidung -> Bio-Erdgas)	M/O-Kosten	% Invest	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
Biogas Aufbereitung (CO ₂ -Abscheidung -> Bio-Erdgas)	Wirkungsgrad	%	88.0	88.0	88.0	88.0	88.0	88.0	88.0

Komponente	Größe	Einheit	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
BHKW < 0.5 MW (Biogas-Direktverstromung)	Investition	€/kWel	556	541	528	517	509	503	500
BHKW < 0.5 MW (Biogas-Direktverstromung)	Lebensdauer	a	20	20	20	20	20	20	20
BHKW < 0.5 MW (Biogas-Direktverstromung)	M/O-Kosten	% Invest	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
BHKW < 0.5 MW (Biogas-Direktverstromung)	Wirkungsgrad	%	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0

* Die verfügbaren Energiemengen werden i. d. R. bereits als "Biogas" ausgewiesen, deshalb kein Wirkungsgrad.

Quelle: (Sterchele et al. 2020b).

Tabelle 18: Industrie (Prozesswärmeerzeugung) Niedertemperatur (NT)

Komponente	Größe	Einheit	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Biomassekessel Industrie NT	Investition	€/kWth	251	243	236	228	221	214	206
Biomassekessel Industrie NT	Lebensdauer	a	20	20	20	20	20	20	20
Biomassekessel Industrie NT	M/O-Kosten	% Invest	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
Biomassekessel Industrie NT	Wirkungsgrad	%	85.0	85.0	85.0	85.0	85.0	85.0	85.0

Komponente	Größe	Einheit	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Solarthermische Wärme für Industrie prozesse NT	Kosten	€/MWhth	89	82	75	69	63	58	54
(Groß-) Wärmepumpen (Sole-Wasser) NT	Investition	€/kWth	400	375	350	325	300	275	250
(Groß-) Wärmepumpen (Sole-Wasser) NT	Lebensdauer	a	20	20	20	20	20	20	20
(Groß-) Wärmepumpen (Sole-Wasser) NT	M/O-Kosten	% Invest	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5
Ölkessel Industrie NT	Investition	€/kWth	136	136	136	136	136	136	136
Ölkessel Industrie NT	Lebensdauer	a	20	20	20	20	20	20	20
Ölkessel Industrie NT	M/O-Kosten	% Invest	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
Ölkessel Industrie NT	Wirkungsgrad	%	88.0	88.0	88.0	88.0	88.0	88.0	88.0
Gaskessel Industrie NT	Investition	€/kWth	97	97	97	97	97	97	97
Gaskessel Industrie NT	Lebensdauer	a	20	20	20	20	20	20	20
Gaskessel Industrie NT	M/O-Kosten	% Invest	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
Gaskessel Industrie NT	Wirkungsgrad	%	92.0	92.0	92.0	92.0	92.0	92.0	92.0

Komponente	Größe	Einheit	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Elektrodenkessel NT	Investition	€/kWel	136	136	136	136	136	136	136
Elektrodenkessel NT	Lebensdauer	a	20	20	20	20	20	20	20
Elektrodenkessel NT	M/O-Kosten	% Invest	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
Elektrodenkessel NT	Wirkungsgrad	%	98.0	98.0	98.0	98.0	98.0	98.0	98.0
BHKW > 1 MWel NT	Investition	€/kWel	650	650	650	650	650	650	650
BHKW > 1 MWel NT	Lebensdauer	a	20	20	20	20	20	20	20
BHKW > 1 MWel NT	M/O-Kosten	% Invest	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
BHKW > 1 MWel NT	Wirkungsgrad el.	%	45.0	45.0	45.0	45.0	45.0	45.0	45.0
BHKW > 1 MWel NT	Wirkungsgrad th.	%	45	45	45	45	45	45	45
H2-Kessel NT	Investition	€/kWth	136	136	136	136	136	136	136
H2-Kessel NT	Lebensdauer	a	20	20	20	20	20	20	20
H2-Kessel NT	M/O-Kosten	% Invest	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0

Komponente	Größe	Einheit	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
H ₂ -Kessel NT	Wirkungsgrad	%	92.0	92.0	92.0	92.0	92.0	92.0	92.0
Kohlekessel Industrie NT	Investition	€/kWth	251	243	236	228	221	214	206
Kohlekessel Industrie NT	Lebensdauer	a	20	20	20	20	20	20	20
Kohlekessel Industrie NT	M/O-Kosten	% Invest	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
Kohlekessel Industrie NT	Wirkungsgrad	%	85.0	85.0	85.0	85.0	85.0	85.0	85.0

Quelle: (Sterchele et al. 2020b).

Tabelle 19: Industrie (Prozesswärmeerzeugung) Hochtemperatur (HT)

Komponente	Größe	Einheit	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Biomassekessel Industrie HT	Investition	€/kWth	251	243	236	228	221	214	206
Biomassekessel Industrie HT	Lebensdauer	a	20	20	20	20	20	20	20
Biomassekessel Industrie HT	M/O-Kosten	% Invest	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
Biomassekessel Industrie HT	Wirkungsgrad	%	85.0	85.0	85.0	85.0	85.0	85.0	85.0
Solarthermische Wärme für Industrieprozesse HT	Kosten	€/kWth	0.21	0.16	0.13	0.11	0.10	0.10	0.10

Komponente	Größe	Einheit	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
(Groß-) Wärmepumpen (Sole-Wasser) HT	Investition	€/kWth	692	657	638	629	625	625	625
(Groß-) Wärmepumpen (Sole-Wasser) HT	Lebensdauer	a	20	20	20	20	20	20	20
(Groß-) Wärmepumpen (Sole-Wasser) HT	M/O-Kosten	% Invest	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5
Ölkessel Industrie HT	Investition	€/kWth	136	136	136	136	136	136	136
Ölkessel Industrie HT	Lebensdauer	a	20	20	20	20	20	20	20
Ölkessel Industrie HT	M/O-Kosten	% Invest	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
Ölkessel Industrie HT	Wirkungsgrad	%	88.0	88.0	88.0	88.0	88.0	88.0	88.0
Gaskessel Industrie HT	Investition	€/kWth	97	97	97	97	97	97	97
Gaskessel Industrie HT	Lebensdauer	a	20	20	20	20	20	20	20
Gaskessel Industrie HT	M/O-Kosten	% Invest	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
Gaskessel Industrie HT	Wirkungsgrad	%	92.0	92.0	92.0	92.0	92.0	92.0	92.0
Elektrodenkessel HT	Investition	€/kWel	136	136	136	136	136	136	136
Elektrodenkessel HT	Lebensdauer	a	20	20	20	20	20	20	20
Elektrodenkessel HT	M/O-Kosten	% Invest	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
Elektrodenkessel HT	Wirkungsgrad	%	98.0	98.0	98.0	98.0	98.0	98.0	98.0

Komponente	Größe	Einheit	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
GuD-KWK > 1 MWel HT	Investition	€/kWel	650	650	650	650	650	650	650
GuD-KWK > 1 MWel HT	Lebensdauer	a	20	20	20	20	20	20	20
GuD-KWK > 1 MWel HT	M/O-Kosten	% Invest	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
GuD-KWK > 1 MWel HT	Wirkungsgrad el.	%	45.0	45.0	45.0	45.0	45.0	45.0	45.0
GuD-KWK > 1 MWel HT	Wirkungsgrad th.	%	45.0	45.0	45.0	45.0	45.0	45.0	45.0
H2-Kessel HT	Investition	€/kWth	136	136	136	136	136	136	136
H2-Kessel HT	Lebensdauer	a	20	20	20	20	20	20	20
H2-Kessel HT	M/O-Kosten	% Invest	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
H2-Kessel HT	Wirkungsgrad	%	92.0	92.0	92.0	92.0	92.0	92.0	92.0
Kohlekessel Industrie HT	Investition	€/kWth	251	243	236	228	221	214	206
Kohlekessel Industrie HT	Lebensdauer	a	20	20	20	20	20	20	20
Kohlekessel Industrie HT	M/O-Kosten	% Invest	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
Kohlekessel Industrie HT	Wirkungsgrad	%	85.0	85.0	85.0	85.0	85.0	85.0	85.0

Quelle: : (Sterchele et al. 2020b).