

CO₂-Global-Budget

Rainer Vallentin

Aktualisierung der Klimaschutzstandards für den deutschen Wohnbau

für Gebäude



Impressum

CO₂-Global-Budget für Gebäude

Aktualisierung der Klimaschutzstandards für den deutschen Wohnbau

Langfassung

Autor:

Rainer Vallentin, München

Umschlagsgestaltung:

Michael Lang, Graphiker, Erding (D)

Grafiken und Fotos: Rainer Vallentin, München

(andere Fotografen sind direkt bei den Abbildungen genannt)

Herausgabe im Eigenverlag als Online-Veröffentlichung

Das Urheberrecht liegt beim Autor.

München, 08. Mai 2024

Warum eine Aktualisierung?

Nach 10 Jahren ist es notwendig, die Klimaschutz-Szenarien zum Wohngebäudepark Deutschlands zu überarbeiten und auf den neuesten Stand zu bringen. Dies betrifft zuallererst „technische“ Anpassungen:

- Berücksichtigung der Bevölkerungs-, Haushalts- und Wohnflächenentwicklung im Zeitraum 2005 - 2018 und deren Fortschreibungen in Bevölkerungs- und Wohnungsprognosen, weil diese wesentliche Mengenkomponenten in den Szenarien darstellen.
- Modellierung der Entwicklung der Heizstruktur im Zeitraum 2005 - 2018, weil sich daraus wichtige Hinweise für Strategien zur notwendigen Dekarbonisierung der Heizsysteme bis 2050 ableiten lassen. Für die künftige Entwicklung werden zusätzlich Szenarien anderer Autoren herangezogen und auf Plausibilität hinsichtlich ihrer Anwendung auf den Wohngebäudepark geprüft.
- Einarbeiten der Veränderungen der Stromerzeugungsstruktur Deutschlands seit 2005 und der Beschlüsse zum Kohleausstieg. Hierzu werden Szenarien anderer Autoren ausgewertet, die unterschiedliche Annahmen zur Substitution der heute brennstoffgestützten Systeme durch Strom treffen. Dies betrifft insbesondere die künftige Wärmeerzeugung (Wärmepumpen) und Mobilität (Elektromobilität, erneuerbare Kraftstoffe) sowie Industrieprozesse.
- Abgleich mit Verbrauchsdaten zum Endenergiebedarf des Wohngebäudeparks für Wärme und Strom mit Hilfe der Daten aus verschiedenen Veröffentlichungen.
- Abschätzung zum Stand der energetischen Sanierungen im Wohngebäudebestand aufgrund von Studien zur Sanierungsrate bzw. zur Sanierungstiefe.
- Anpassung der Klimaziele der Aktualisierung an den völkerrechtlich verbindlichen Beschlüssen der Pariser Klimakonferenz 2015 mit Hilfe der CO₂-Global-Budgets (IPCC 2021).

CO₂-Global-Budget für Gebäude

Im Vorfeld der Ausarbeitung der Klimaschutzszenarien war zunächst zu definieren, wie ein umsetzbarer Weg aussieht, der die Pariser Klimaziele einhält. Dabei steht die Frage im Vordergrund, welche maximale Menge an Treibhausgasemissionen weltweit noch künftig in die Atmosphäre gelangen darf. Als CO₂-Global-Budgets werden diese Mengenangaben auf bestimmte Klimalimits, z.B. 1,5-, 1,7- oder 2,0-Grad-Ziel bezogen und verschiedenen Eintrittswahrscheinlichkeiten, z.B. 33%, 50%, 67% bzw. 83%, zugeordnet (siehe Tabelle 1.1).

Die Menge an Treibhausgasen, die weltweit noch emittiert werden darf ist endlich und knapp bemessen. So knapp, dass nur noch ein extrem kleiner Zeitraum verbleibt, um die derzeit hohen Emissionen auf Null zu führen.

Über eine nationale und sektorale Zuordnung kann das CO₂-Budget schließlich für die Wohnnutzungen in Deutschland angegeben werden. In dieser Studie wird das CO₂-Budget für das Wohnen zum ersten Mal systematisch in Klimaschutzszenarien angewendet und bildet dabei den zentralen Indikator. Von großem Vorteil ist hierbei, dass die klimarelevante Qualität verschiedener Klimaschutzstrategien mit einer einfachen Kenngröße abgebildet werden kann.

Paris-kompatibles Bauen

Ein Paris-kompatibles Bauen orientiert sich an den CO₂-Budgets für Gebäude, die das 1,7 Grad-Limit mit einer Eintrittswahrscheinlichkeit von 67 % einhalten können. Mit Hilfe von Langfristszenarien (2020 - 2070) lassen sich die konkreten Anforderungen an die energetische Qualität von Neubauten sowie für Modernisierungen im Bestand entwickeln und schließlich in Form von Klimaschutzstandards definieren.

Inhalt

Warum eine Aktualisierung?	S. 3	5.4	Wärmeversorgung	S. 68
Ein persönliches Wort zuvor	S. 6	5.5	Stromversorgung	S. 68
Kernthesen (Zusammenfassung für Entscheidungsträger)	S. 8	5.6	Vergleich der Ausgangswerte 2010 zwischen statistischen Daten und den Modellrechnungen in den Szenarien	S. 69
1 Zusammenfassung	S.10	5.7	Festlegungen in den Szenarien	S. 69
1.1 Paris-kompatibler Gebäudepark / Herleitung des CO ₂ -Global-Budgets für Wohngebäude	S. 10	6 Szenarien und Modellbildung	S.70	
1.2 Klimaschutzkorridor und -zielfeld	S. 12	6.1	Beschreibung der Szenarien	S. 72
1.3 Entwicklung CO ₂ -Emissionen seit 1990	S. 12	6.2	Bilanzierung in den Szenarien	S. 73
1.4 Szenariengestützte Untersuchung	S. 13	6.3	Kohortenmodell	S. 75
1.5 Wichtige Eck- und Rahmendaten	S. 16	6.4	Szenarioabhängige Annahmen zu den energetischen Qualitäten der Baukomponenten in den Szenarien	S. 81
1.6 Zentrale Ergebnisse	S. 18	6.5	Szenarioabhängige Annahmen zu den energetischen Qualitäten der Versorgungssysteme in den Szenarien	S. 86
1.7 Erste Zwischenbilanz	S. 26	7 Entwicklung des Heizwärme- und des sonstigen Nutzenergiebedarfs 1990 - 2070	S.98	
1.8 CO ₂ -Senken und sonstige Ausgleichsmaßnahmen	S. 27	7.1	Entwicklung des Heizwärmebedarfs in den Standardszenarien	S. 98
1.9 Modellierung weiterer Szenarienfamilien	S. 27	7.2	Warmwasserbedarf	S. 107
1.10 Erweitertes Fazit	S. 28	7.3	Hilfsstrombedarf	S. 108
1.11 Handlungsempfehlungen	S. 32	7.4	Haushaltsstrombedarf	S. 108
1.12 Strategische Fragen und Analysen	S. 36	7.5	Variation des Heizwärmebedarfs unter verschiedenen Randbedingungen	S. 109
Die folgenden Teile sind ausschließlich Bestandteil der Langfassung:		7.6	Entwicklung des weiteren Nutzenergiebedarfs (Warmwasser, Stromanwendungen) in den Suffizienzszenarien	S. 112
2 Neubestimmung der Klimaziele auf der Basis von CO₂-Globalbudgets	S. 46	7.7	Nutzenergiebedarf in den Szenarienfamilien	S. 113
2.1 Bestimmung von Klimaschutzwegen anhand der CO ₂ -Globalbudgets (IPCC 2021)	S. 50	8 Entwicklung Endenergiebedarf 1990 - 2070	S.116	
2.2 Interpretation der Ergebnisse	S. 52	9 Entwicklung Primärenergiebedarf 1990 - 2070	S.120	
2.3 Entwicklung von Klimaschutzwegen für die Wohnnutzungen	S. 53	10 Entwicklung THG-Emissionen 1990 - 2070	S.126	
3 Aktualisierung der Basis- und Eckdaten	S. 54			
4 Kurzanalyse der Entwicklungen 2005 - 2020	S. 60			
5 Ausgangszustand der Wohngebäude	S. 62			
5.1 Strategische Gruppen im Hinblick auf die Bewertung der Eingriffsempfindlichkeit und sonstigen Hemmnissen	S. 62			
5.2 Einteilung des Bestands in Baualtersklassen	S. 63			
5.3 Bestimmung des energetischen Ausgangszustands	S. 63			

11 Neue Szenarienfamilien und deren Analyse **S.130**

- 11.1 Kurzvorstellung der neuen Szenarienfamilien S. 131
- 11.2 Darstellung der Ergebnisse der neuen Szenarienfamilien S. 134
- 11.3 Entwicklung der Pro-Kopf-GWP-Emissionen in Verbindung mit Klimaschutz-Korridor und -Zieldorf S. 148
- 11.4 Entwicklung der kumulierten Pro-Kopf-GWP-Emissionen im Vergleich zu den Gebäude-Emissions-Budgets S. 151
- 11.5 CO₂-Senken und ihr möglicher Beitrag zum Klimaschutz im deutschen Wohnbau S. 145
- 11.6 Versuchsweise Zusammenführung der Klimaschutzbeiträge bei Betriebsenergie, Materialbereitstellung und durch effektive CO₂-Senken S. 161
- 11.7 Klimaschutzstandards für den künftigen deutschen Wohnbau auf Basis der CO₂-Global-Budgets für Gebäude S. 162

12 Kritische Prüfung der Annahmen und Randbedingungen **S.166**

- 12.1 Einfluss der Annahmen zu den Basis- und Eckdaten (Bevölkerung, Wohnflächenentwicklung) S. 167
- 12.2 Einfluss des Klimawandels S. 171
- 12.3 Kritische Prüfung der Annahmen zur freien Lüftung sowie zur Lüftung mit / ohne Wärmerückgewinnung S. 173
- 12.4 Unterschiedliche Bewertungen der biogenen Emissionen von Biomasseheizungen S. 177
- 12.5 Switch-Szenarien S. 179
- 12.6 Teil-Switch-Szenarien S. 182
- 12.7 Ziele der Bundesregierung 2021 S. 184
- 12.8 Ziele der Bundesregierung 2021 - Teilumsetzung nur bei der Stromerzeugung S. 186

Anmerkungen **S.190****Literatur **S.194****

Ein persönliches Wort zuvor

Im Jahr 1206 wandert Franziskus von Assisi zur halb zerfallen Kirche St. Damiano um zu beten. Da spricht das Kreuz zu ihm: „Franziskus geh' und baue mein Haus wieder auf, das, wie du siehst, ganz und gar in Verfall gerät.“

Franziskus versteht diese Aufforderung zunächst im wörtlichen Sinne, verkauft zunächst gegen den Willen seines Vaters Stoffballen und baut die Kirchenruine wieder auf. Erst viel später begreift er, dass ihm die Erneuerung der christlichen Gemeinschaft und der Institution Kirche als Lebensaufgabe zugesetzt ist.

Ich finde, dass wir vor einer ähnlichen Aufgabe stehen. Wir sind zunächst einmal ganz persönlich aufgefordert, die Themen Umwelt und Klima als große Herausforderung unserer Zeit anzunehmen und dafür auch etwas einzusetzen. Dies nicht zu tun hieße „in einer anderen Zeit zu leben“ und sich mit einer „Lebenslüge“ abzufinden.

Diese Aufgabe können wir aber nicht alleine lösen, sondern wir brauchen eine Vision für das Kommende, die wir gemeinsam entwickeln und durchsetzen. Die Vorstellung einer „Umbau-Kultur“, die eben alle Bereiche unseres Berufs und unseres Lebens erfasst, beschreibt das ganz zutreffend. Moralisch heißt das, dass wir von nun an selber an die Grenze dessen gehen, was wir als Forderung an uns selber und andere als gerade noch erträglich einstufen würden.

Auf der anderen Seite kann man sich kaum etwas existenzielles, spannenderes und sinnvolleres vorstellen, als daran mitzuwirken, unsere Umwelt so um- und neu- zu gestalten, dass unser Handeln nicht mehr als Krieg gegen die Natur und damit gegen uns selber verstanden werden muss.

Das Bild Vogelpredigt vermittelt darüber hinaus die Hinwendung zur nicht-menschlichen Umwelt als Thema, das bei allen gesellschaftlichen und sozialen Fragen mitzudenken ist. Für Franziskus ist die Erneuerung des Christentums nur unter Einbeziehung der Natur denkbar, der sich die menschlichen Ansprüche unterzuordnen haben: Nicht nur die Mitmenschen sondern alle Tiere und Pflanzen sowie die unbelebte Natur sind unsere „Schwestern und Brüder“.

Wir stehen heute einer Aufgabe gegenüber, die all unsere Kräfte und Aufmerksamkeit benötigt: Parallel zu dem seit dem Beginn der Industrialisierung bis heute immer weitreichenderen Umbau von einer biogen zu einer fossil gestützten Wirtschaft, wurden auch die natürlichen Ökosysteme immer mehr zurückgedrängt und zerstört. Sie sind gerade in den letzten Jahrzehnten dermaßen unter Druck geraten, dass ein Fortbestand der Artenvielfalt nicht mehr gewährleistet zu sein scheint.

Besonders schwierig ist die Erkenntnis, dass die Ziele des Klima- und des Naturschutzes nicht immer deckungsgleich sind. Offenkundig ist dies beim Thema der energetischen und stofflichen Nutzung von Holz und sonstiger nachwachsenden Rohstoffen der Fall. Hier wurde jüngst der Vorschlag ins Feld geführt, durch das Bauen mit Holz einen substantiellen Beitrag durch Klimaentlastung durch die Bildung von negativen Emissionen - den sog. CO₂-Senken - leisten zu können (vgl. Schellnhuber 2022). Als Antwort darauf entstand daher eine weitere Studie mit dem Titel: „Wie kann der Holzbau zum Klimaschutz beitragen?“ (Vallentin 2024). Dort wird die These vertreten, dass dies nur dann gelingen wird, wenn der Holzbau vom Wald her gedacht wird und wir den Ökosystemen einen Eigenwert zugesetzen. Und damit schließt sich der Kreis zurück zum Franziskus von Assisi und dem Bild der Vogelpredigt.



Giotto di Bondone: Hl. Franziskus und die Vogelpredigt

Kernthesen

Die Kernaussagen der Szenarienstudie zum Klimaschutz im deutschen Wohngebäudepark sind:

1 CO₂-Global-Budget für Gebäude (Wohnnutzungen)

Ein Bauen, das in Übereinstimmung mit den Pariser Klimazielen steht, basiert auf den CO₂-Global-Budgets, wie sie das IPCC jüngst veröffentlicht hat (IPCC 2021). Die Menge an Treibhausgasen, die noch global emittiert werden darf ist endlich. Es steht nur noch ein extrem kleiner Zeitraum zu Verfügung, um die derzeit hohen Emissionen auf Null zu führen. Anhand des Anteils Deutschlands an der Weltbevölkerung von 1,1 % und dem Anteil des Wohnens an den nationalen Treibhausgasemissionen von 25 % lässt sich für das 1,7-Grad-Ziel ein Pro-Kopf-Budget in Höhe von 23 Tonnen bestimmen. Dies bildet die Grundlage für Bewertung der Szenarien.

2 Entwicklung der Treibhausgasemissionen seit 2005

Innerhalb der letzten 15 Jahre konnten die Pro-Kopf-Emissionen durch die Wohnnutzungen kaum abgesenkt werden. Dadurch hat sich die Ausgangslage für einen effektiven Klimaschutz markant verschlechtert. Gründe hierfür sind fehlende Effizienzerfolge bei den Gebäuden (Hülle, Lüftung, Stromausstattungen) und die Dominanz fossiler Heizsysteme. Nur bei der Stromerzeugung ist ein klimagerechter Pfad eingeleitet.

3 Szenariengestützte Untersuchung

Als Methode kommen in dieser Studie szenariobasierte Modellrechnungen zum Einsatz. Zugrunde gelegt ist ein differenziertes Abbild des Wohngebäudeparks mit 52 Gebäudetypen und aller energierelevanter Nutzungsarten des Wohnens (Raumwärme, Lüften, Warmwasser, sämtliche Stromanwendungen) sowie der zugeordneten Heizsysteme und der deutschen Stromerzeugung. Auf dieser Basis kann eine verursachergerechte Bilanzierung der Wohnnutzungen erfolgen. In

den Szenarien werden grundlegende Handlungsoptionen gegenübergestellt. Dies betrifft einerseits das Zusammenspiel von energetischen Qualitäten der Gebäudehüllen, Lüftung und Versorgungssysteme. Andererseits können hierbei auch verschiedene Umsetzungsstrategien und der Einfluss des Nutzerverhaltens und des Klimawandels mit untersucht werden. Wegen der großen Trägheit des Gebäudeparks in Bezug auf Veränderungsprozesse sind lange Zeiträume zu betrachten.

4 Differenzierte Modellierung des Wohngebäudeparks

Für die Auswertung der Szenarien ist entscheidend, dass der komplexe Wohngebäudebestand im Hinblick auf Gebäudetypen (z.B. Ein- und Mehrfamilienhäuser), Baualter, Konstruktionsarten und Eingriffsempfindlichkeit (Baudenkmale, bedingt und voll sanierbarer Bestand) differenziert modelliert ist. Nur so lassen sich die unterschiedlichen Herangehensweisen im Neubau und Bestand sowie die speziellen Umsetzungshemmnisse bei der energetischen Modernisierung angemessen abbilden.

5 Zentrale Ergebnisse

Die Referenzszenarien repräsentieren „Weiter-so“-Entwicklungen. Sie stehen in keinem Fall in Übereinstimmung mit den Pariser Klimazielen. Selbst mit dem Einsatz umfangreicher CO₂-Senken kann der notwendige Ausgleich nicht mehr hergestellt werden. Die Klimaschutzszenarien beinhalten die Umsetzung einer hohen Qualität hinsichtlich Energieeffizienz und erneuerbarer Energien. Wegen des Stillstands der letzten 15 Jahre wird hier jedoch nur ein grenzwertiger Klimaschutz erreicht. Unter günstigen Umsetzungsbedingungen und dem Einsatz von CO₂-Senken ist eine Zielerreichung noch möglich. Bei den Klimaschutz-Plus-Szenarien kommen ab 2030 zusätzlich technologische Fortschritte mit ins Spiel, die heute bereits in Form von Prototypen oder Konzeptstudien existieren. Nur hier ist die Einhaltung des 2-Grad-Budgets nachweisbar. Für einen voll-

wertigen Klimaschutz, der das 1,7-Grad-Budget nicht überschreitet ist zusätzlich der Einsatz von CO₂-Senken in Höhe von ca. 0,7 - 1,0 Gt notwendig (Szenario Klimaneutral 2050).

6 Drei Hauptstrategien

Hohe Energieeffizienz, der Wechsel von fossilen zu erneuerbaren Versorgungssystemen und die Schaffung von CO₂-Senken im Gebäude oder an anderen Orten stellen die drei unverzichtbaren Hauptstrategien für den Paris-kompatiblen Umbau des Wohngebäudeparks dar.

7 Gelegenheiten für hohe Qualität nutzen

Immer dann, wenn ein Neubau ansteht oder im Bestand eine Bau- oder Technikkomponenten instand zu setzen oder zu erneuern ist, ergibt sich die Gelegenheit eine hohe anstelle einer mittleren Qualität zu realisieren. Die hohe Qualität entspricht der Güte des Passivhauskonzeptes (Wärmeschutz, Wärmerückgewinnung bei Lüftung, Stromeffizienz, erneuerbares Heizsystem). Bei anstehenden Reparaturen bzw. dem Austausch ergibt sich die Gelegenheit von einem fossilen auf ein erneuerbares Heizsystem zu wechseln. Der Neubau und energetische Modernisierungen sollten darüber hinaus unter Einsatz von Holzbauweisen und nachwachsenden bzw. Recycling-Baustoffen erfolgen. Damit können zugleich CO₂-Senken geschaffen und sicher eingelagert werden.

8 UND-Strategien

Für den Klimaschutz kommt es darauf an, die Strategien sinnvoll zu verknüpfen und diese nicht gegeneinander auszuspielen. Insbesondere Effizienz und Erneuerbare lassen sich in der notwendigen Geschwindigkeit nur miteinander realisieren.

Deutlich erkennbar wird dies an der „Effizienzlücke“, die bei dem willkürlichen Weglassen der Effizienzstrategie entstehen würde, wie dies z.B. im Konzeptansatz „Einfach Bauen“ (Nagler et al. 2020) vorgeschlagen wird. Sie umfasst emissionsseitig 1860 Mio t CO₂-Äquivalente und ist damit fast so groß wie das 1,7-Grad-Budget. Zudem wäre das Energiesystem um einen Faktor 3,4 größer als im Szenario Klimaneutral 2050.

9 Gebäudehüllen aus nachwachsenden Rohstoffen

Die im Rahmen dieser Untersuchung parallel entstandene Studie „Wie kann der Holzbau zum Klimaschutz beitragen?“ (Valentin 2023) rückt den Einsatz von Dämmstoffen aus schnellwachsenden biogenen Materialien (z.B. Stroh, Hanf, Gräser) in das Zentrum einer künftigen CO₂-Senkenstrategie. Diese können in allen Bauweisen (Holz-, Holzhybrid- und Massivbau) sowie im Neubau als auch bei energetischen Modernisierungen zum Einsatz kommen. Neben der Speicherung von Kohlenstoff helfen sie die energie- und materialbedingten Emissionen der Gebäude im gesamten Lebenszyklus zu reduzieren.

10 Klimagerechtes Konsum- und Nutzerverhalten

in den Suffizienzstrategien werden Maßnahmen zusammengefasst, bei denen Freiwilligkeit und individuelle Beweggründe eine Rolle spielen. Konkret wurde hierzu untersucht, welche Beiträge durch ein klimagerechtes Nutzerverhalten (Absenkung der Raumtemperatur und des Warmwasserverbrauchs) und durch andere Konsummuster (Akzeptieren kleinerer Wohnungsgrößen, reduzierte Ausstattungen) erschlossen werden können. Ihr Einfluss ist vor allem in der Anfangsphase bedeutend.

11 Systemdienlichkeit des Gebäudeparks

Für den Klimaschutz ist es notwendig, den Gebäudepark als integralen Bestandteil des erneuerbaren Energiesystems zu verstehen. Die Gebäude selbst und deren Versorgungssysteme können darin Aufgaben des Lastmanagements und der Rückverstromung saisonal gespeicherter Energie übernehmen.

12 Energieautonomie

Mit den drei Hauptstrategien Erneuerbare, Effizienz und CO₂-Senken gelingt es, sich aus der Abhängigkeit von fossilen Energieträgern zu befreien. Entscheidend ist die Effizienzstrategie, weil sie ermöglicht, das künftige erneuerbare Energiesystem gegenüber dem heutigen um einen Faktor vier zu verkleinern. Dies hat den Effekt, dass der Ausbau der erneuerbaren Energien schneller erfolgt und dabei zudem die Belange des Umwelt- und Kulturschutzes berücksichtigt werden können.

1 Zusammenfassung

Diese Studie verfolgt das Ziel aufzuzeigen, wie die konkrete Umsetzung des Pariser Klimaschutzabkommens für den deutschen Wohngebäudepark ausgestaltet werden kann.

Der Betrachtungsrahmen entspricht dem Sektor der privaten Haushalte. Er wird jedoch verursachergerecht um die anteilige Strom- und FernwärmeverSORGUNG erweitert, damit z.B. der anstehende Wandel weg von den fossilen Heizsystemen hin zu Wärmepumpenheizungen und erneuerbarer Nah-/Fernwärme zutreffend abgebildet werden kann. Anders als in den gesetzlichen Energiebilanzierungsverfahren werden sämtliche Stromanwendungen in den Wohngebäuden mitbilanziert. Einerseits sind diese Bestandteil des Sektors der privaten Haushalte und andererseits stellen diese neben der Raumwärme das zweitwichtigste Handlungsfeld dar. Der Energieaufwand und die Treibhausgasemissionen der Baumaterialien und Bauprozesse werden hingegen nicht mit bilanziert (1).

Auf der Bilanzierungsebene End- und Primärenergie sowie den daraus resultierenden Treibhausgasemissionen beanspruchen die Wohnnutzungen in den letzten Dekaden etwa 25 % der gesamten Energiebedarfs bzw. des Global Warming Potentials (siehe Tab. 1.2). Sie stellen somit einen Schlüsselsektor für die nationale Klimaschutzstrategie Deutschlands dar.

Tabelle 1.1
CO₂-Global-Budgets ab 2020 für verschiedene Klimaschutzziele und Eintrittswahrscheinlichkeiten gemäß IPCC. Zuordnung der Pro-Kopf-CO₂-Budgets für Deutschland durch Zuweisung des 1,1%-Anteils an der Weltbevölkerung. Für die Wohnnutzungen kann davon ein Viertel in Anspruch genommen werden. Zur besseren Orientierung ist der Pfad C, der einen Paris-kompatiblen Klimaschutz repräsentiert, grau hinterlegt. Quellen: (IPCC 2021, SfP, S. SPM-38) und eigene Berechnungen.

Pfad	Klimaschutzziel (Wahrscheinlichkeit)	CO ₂ -Globalbudget ab 2020 (IPCC 2021)	Pro-Kopf-CO ₂ -Budget Deutschland ab 2020	Pro-Kopf-CO ₂ -Budget Deutschland - Wohnen
A	2 Grad (50 %)	1350 Gt	180 t/P	45,1 t/P
B	2 Grad (67%)	1150 Gt	154 t/P	38,5 t/P
C	1,7 Grad (67%)	700 Gt	93 t/P	23,3 t/P
D	1,5 Grad (67%)	400 Gt	53 t/P	13,3 t/P

1.1 Paris-kompatibler Gebäudepark / Herleitung des CO₂-Globalbudgets für Wohngebäude

Unter „Paris-Kompatibilität“ wird ein Klimaschutz verstanden, der in Übereinstimmung mit dem Pariser Klimaabkommen steht. Damit wird bewusst eine Abgrenzung von ungenau definierten Klimaschutzkonzepten wie „Klimaneutraler Gebäudebestand“ oder „Klimagerechtes Bauen“ gesucht, die im Hinblick auf die Umsetzung und den Zeitpfad weitgehend unbestimmt bleiben. Die Operationalisierung des Pariser Klimaschutzzieles erfolgt über das CO₂-Global-Budget und seine nationale sowie sektorale Zuordnung auf den deutschen Wohngebäudepark.

Das CO₂-Global-Budget beschreibt, welche Kohlendioxidemissionen in Zukunft noch weltweit ausgestossen werden dürfen um mit einer bestimmten Eintrittswahrscheinlichkeit ein vorgegebenes Klimaziel (z.B. Überschreitung der globalen Mitteltemperatur gegenüber vorindustriellem Stand um 2,0 bzw. 1,5 Grad) einzuhalten (vgl. IPCC 2021, SfP, S. SPM-38). Die Zuordnung des CO₂-Global-Budgets auf Länder und Sektoren erfordert die Einbeziehung von Gerechtigkeitsgrundsätzen, kann also nicht auf objektiv-wissenschaftlicher Basis erfolgen. Hier hat sich als Bezugsgröße für die Verteilung auf Ländergruppen oder einzelne Nationen der Anteil an der Weltbevölkerung allgemein durchgesetzt (2). Für Deutschland beträgt dieser 1,1 %. Unter Berücksichtigung des Anteils des Wohngebäudeparks von 25 % an den klimarelevanten deutschen Gesamtmissionen ergeben sich folgende wohngebäudebezogene CO₂-Budgets (siehe Tabelle 1.1):

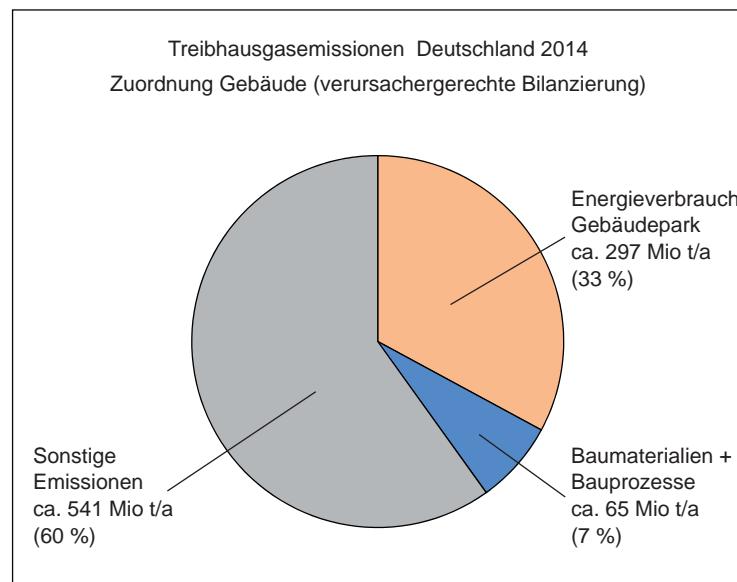
- 2-Grad (Eintrittswahrscheinlichkeit 50%): 45,1 t/P
- 2-Grad (Eintrittswahrscheinlichkeit 67%): 38,5 t/P
- 1,75-Grad (Eintrittswahrscheinlichkeit 67%): 23,3 t/P
- 1,5-Grad (Eintrittswahrscheinlichkeit 67%): 13,3 t/P

Die Spannbreite der Werte ist erheblich. Zugleich wird deutlich, dass das Zeitfenster für einen Klimaschutz in Richtung des 1,5-Grad-Ziels inzwischen sehr klein geworden ist. Eine „Weiter so“-Strategie ist in keinem Fall mehr möglich. Jede weitere Verzögerung hat nun zur Folge, dass ein Klimaziel nach dem anderen außer Reichweite für eine noch wirtschaftlich vertretbare Umsetzung wird. Am anschaulichsten werden diese Zusammenhänge, indem man die Reichweite in Jahren angibt, bis das jeweilige Budget aufgebraucht ist, wenn man die heutigen Pro-Kopf-Emissionen (ca. 2,5 t/Pa) beibehalten würde:

- 2-Grad (Wahrscheinlichkeit 50%): 18 Jahre (2038)
- 2-Grad (Wahrscheinlichkeit 67%): 15 Jahre (2035)
- 1,7-Grad (Wahrscheinlichkeit 67%): 9 Jahre (2029)
- 1,5-Grad (Wahrscheinlichkeit 67%): 5 Jahre (2025)

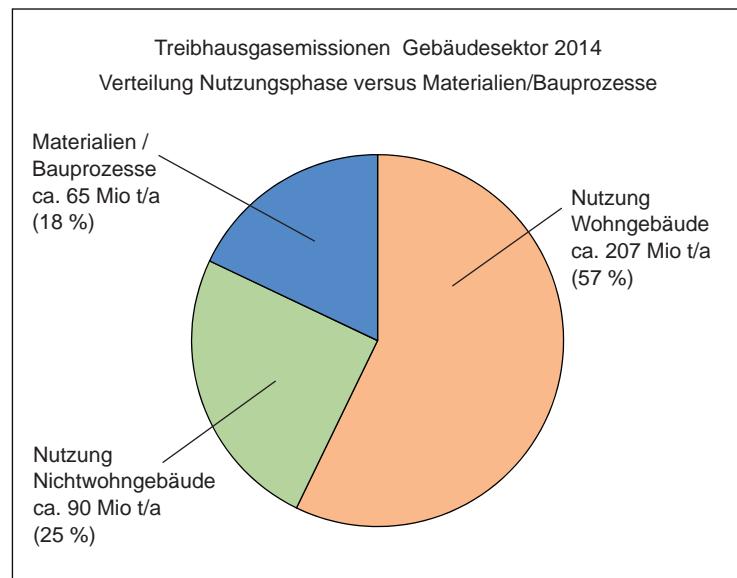
Derzeit beansprucht der Gebäudesektor 40 % der Treibhausgasemissionen Deutschlands. Davon entfallen mehr als 80 % auf die Nutzungsphase (Heizen, Lüften, Warmwasser- und sämtliche Stromanwendungen in den Gebäuden) und etwa 20 % auf die Herstellung von Baumaterialien und Bauprozesse (vgl. BBSR 2020, S. 17 und Darstellung in Abb. 1.1 und 1.2).

Damit sind die elementaren Gewichtungen der Klimaschutzstrategien bereits vorgegeben: An erster Stelle steht die Reduktion der Treibhausgasemissionen in der Nutzungsphase, die fast vollständig mit den Energieanwendungen in den Gebäuden in Verbindung steht. Die Hauptstrategien hierbei sind Energieeffizienz und der Ausstieg aus den fossilen Wärme- und Stromerzeugungen. Gleichwohl ist zeitgleich eine Dekarbonisierung der Baustoffe und der Bauprozesse erforderlich. Ihre anteilige Bedeutung wird im Zuge der kommenden Emissionsminderungen in der Nutzungsphase tendenziell zunehmen und der Aufbau einer CO₂-armen Kreislaufwirtschaft viel Zeit in Anspruch nehmen. Ferner ist zu erwarten, dass zur Steigerung der Energieeffizienz und für den Ausbau der erneuerbaren Energien ein vorübergehender Anstieg der materialbedingten Emissionen erfolgt (vgl. BBSR 2020, S.27).



- Gebäude - Energie (Nutzung)
- Baumaterialien / Bauprozesse
- Sonstige Emissionen

Abbildung 1.1
Treibhausgasemissionen 2014 in Deutschland und Zuordnung Gebäudesektor getrennt nach Nutzung (Wärme / Strom) und Emissionen für die Herstellung von Baumaterialien und Bauprozesse. Quelle: (BBSR 2020, S.17)

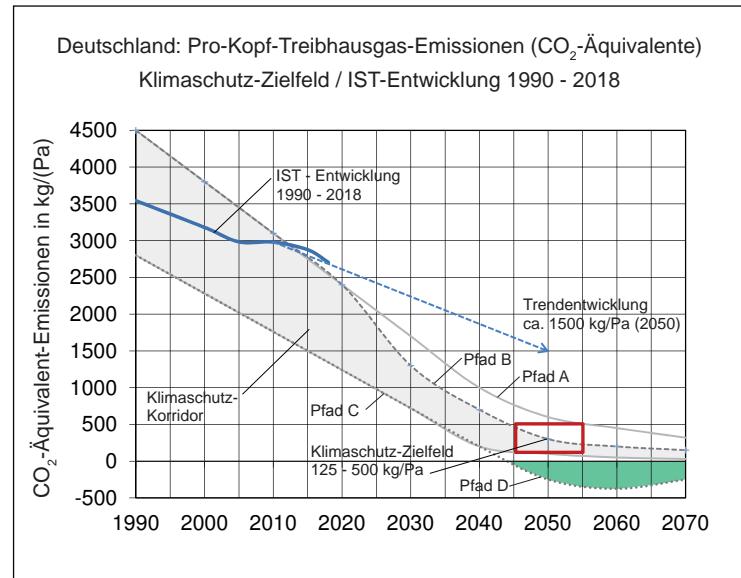


- Nutzung Wohnen
- Nutzung Nichtwohnen
- Materialien / Bauprozesse

Abbildung 1.2
Treibhausgasemissionen 2014 in Deutschland im Gebäudesektor bei verursachergerechten Zuordnung. Quelle: (BBSR 2020, S.17)

- IST - Entwicklung 1990 - 2018
- Klimaschutz-Korridor
- Klimaschutz-Zielfeld
- CO₂-Senken (1,5 Grad-Ziel)

Abbildung 1.3
Pro-Kopf-Treibhausgasemissionen der privaten Haushalte im Zeitraum 1990 - 2018. Zur besseren Einordnung sind eine Tendentwicklung bis 2050 und der Klimaschutz-Korridor und das Klimaschutz-Zielfeld mit dargestellt. Die CO₂-Senken für den Pfad D sind grün hinterlegt. Quelle: (UBA 2018) und eigene Berechnungen.



1.2 Klimaschutzkorridor und -zielfeld

Zur Beurteilung der bisherigen Entwicklung und zur anschaulichen Analyse der Zuverlässigkeit von Klimaschutz-Minderungspfaden wurde in enger Anlehnung an (Kern 2016) ein Klimaschutzkorridor in Verbindung mit einem Zielfeld entwickelt (siehe Abb. 1.3). Grundlage bilden die vier Klimaschutzpfade A - D, in denen die jeweiligen Pro-Kopf-Budgets aus Tabelle 1.1 eingehalten sind. Sie haben somit einen direkten Bezug zum CO₂-Global-Budget. Der grau hinterlegte Klimaschutz-Korridor ist als der Bereich zwischen den Pfaden B und C definiert, der für einen Paris-kompatiblen Klimaschutz steht. Das Zielfeld umfasst zusätzlich auch grenzwertige Entwicklungen, bei denen das 2-Grad-Ziel nur mit einer Eintrittswahrscheinlichkeit von 50% erreicht würde. Für das 1,5-Grad-Ziel sind in jedem Fall zusätzlich CO₂-Senken notwendig, über die negative Emissionen (z.B. durch Entfernen von CO₂-Emissionen aus der Atmosphäre und langfristige Einlagerung) möglich sind. Diese sind zur besseren Orientierung in Abb. 1.3 grün markiert.

Tab. 1.2
Vergleich der CO₂-Emissionen der privaten Haushalte mit den gesamten CO₂-Emissionen in Deutschland 2005, 2010 und 2015. Angaben als Absolutwerte in Mio t/a und als prozentualer Anteil. Quelle: (UBA 2018).

CO ₂ -Emissionen (Mio t)			
Jahr	2005	2010	2015
Wohnen	220	221	213
Gesamt	867	832	796
Anteil (%)	25,1	26,4	26,8

1.3 Entwicklung der CO₂-Emissionen seit 1990

Wie Abb. 1.3. zeigt sind die CO₂-Emissionen des deutschen Wohngebäudeparks im Zeitraum 1990 - 2005 von ca. 3500 kg/Pa auf ca. 3000 kg/Pa gesunken. Hierbei spielten u.a. die sog. „Wall-Profit“-Effekte eine Rolle, d.h. die Erneuerung der emissionsintensiven Strom- und WärmeverSORGUNG in den neuen Bundesländern nach der Wiedervereinigung. Nach 2005 sind die Pro-Kopf-Emissionen durch die Wohnnutzungen hingegen kaum noch gesunken. Bildlich gesprochen haben sie in einer Seitwärtsbewegung den Klimaschutzkorridor verlassen. Die Ursachen hierfür sind (3):

- Der Neubau und die energetischen Modernisierungen mit „mittlerer Qualität“ (z.B. Anforderungen EnEV bzw. GEG, Sanierung bestenfalls mit Niedrigenergiekomponenten) bewirkten nur geringe Effizienzfortschritte beim Endenergieverbrauch pro Person.
- Die Sanierungsrate von 1 % ist zu niedrig, um im Bestand eine durchgreifende Bedarfsreduzierung zu erreichen.
- Wegen dem stetig hinzu kommenden Neubau verharren Endenergieverbrauch und Treibhausgasemissionen auf hohem Niveau.
- Der Anteil fossiler Energieträger beträgt bei der WärmeverSORGUNG immer noch mehr als 85 %. Selbst im Neubau werden weiterhin fossile Heizsysteme eingebaut.
- Die Kohleverstromung und zu geringe Erfolge bei der Stromeffizienz sind die größten Hemmnisse für einen wirk samen Klimaschutz im Strombereich.
- Die umfangreichen und gleichzeitig kostenintensiven Förderprogramme (z.B. KfW, Bafa) konnten in der Vergangenheit diese Trends nicht umkehren. Dominierend war hier die Förderung des KfW-Effizienzhauses 55 (4).

Die letzten 15 Jahre waren somit verlorene Jahre für den Klimaschutz. Als Folge hat sich der Gebäudepark von einem relativ einfach umsetzbaren zu einem besonders kritischen Sektor gewandelt.

1.4 Szenariengestützte Untersuchung

Als Methode kommen in dieser Studie szenariobasierte Modellrechnungen zum Einsatz (vgl. Vallentin 2011, Teil IV). Die Untersuchung erfolgt über ein Kohortenmodell, in dem der Wohngebäudepark über 52 Gebäudetypen abgebildet wird. Dabei kommt die IWU-Wohngebäudetypologie (IWU 2003 und deren Aktualisierungen) zum Einsatz, die in leicht abgewandelter Form und ergänzt mit Neubautypen ein hoch differenziertes Abbild der Vielfalt des Wohngebäudeparks ermöglicht. Insbesondere wurden dabei die Aspekte Gebäude- und Nutzungs-

formen, Bau- und Konstruktionsweisen, Baualtersklassen und Eingriffsempfindlichkeit berücksichtigt. Unterschiedliche Handlungsoptionen werden in Form von Szenarien gegenübergestellt, in denen die energetische Qualität des Gebäude (Hülle + Lüftungssystem) und die Wärme- sowie Stromversorgung nach übergeordneten Gesichtspunkten variiert werden.

Szenarien erzählen eine Geschichte, indem sie denkbare künftige Entwicklungen beschreiben. Dies erfolgt zumeist in idealtypischer Form, um die Szenarien klar gegeneinander abzutrennen. Besonderer Wert wird darauf gelegt, dass die in den

Szenario	Heizwärme / Heizung	Warmwasser	Lüftung	Haushaltsgeräte
Status quo	Spezifischer Nutzenergiebedarf, Heiz- und Stromstruktur sowie energetische Qualität auf dem Stand von 1990, Mengenkomponenten (z.B. Wohnflächen, Haushalte) jedoch wie in allen anderen Szenarien			
Referenz	Energetische Verbesserungen orientieren sich an bisheriger Entwicklung (leichte Verschärfung EnEV bzw. GEG alle 3-4 Jahre für Neubau und Sanierung), Ausstieg Ölheizungen bis 2070; Stromerzeugung gemäß "Energie-Referenz-Prognose" (ewi/gws/prognos 2014) Kohleverstromung endet 2038.			
	Moderate Effizienzverbesserungen	Fensterlüftung bis 2030 dominant; danach Abluftanlagen als Standard	Moderate Effizienzverbesserungen	
Klimaschutz	Energetische Qualitäten ab 2020: Orientierung am Kostenoptimum in Neubau (vgl. KliNaWo-Studie) und bei Sanierung (EnerPhit-Standard); Ausstieg Ölheizungen bis 2060; Ausstieg Gasheizungen 2070; Stromerzeugung folgt "Szenario 2011 A" (Nitsch et al. 2012), Kohleverstromung endet 2035.			
	Ab 2020: Energetisch gleichwertig mit Passivhaus-Neubau bzw. EnerPhit-Sanierungen	Wassersparende Armaturen, WW- Anschlüsse für Waschmaschinen und Geschirrspüler	Ab 2020: verstärkter Ausbau Lüftungsanlagen mit WRG, ab 2030 wird dies Standard	Ausstattung mit effizienten Haushaltsgeräten, Leuchtmitteln und sonstigen Stromgeräten
Klimaschutz Plus	Wie Klimaschutzszenario, Berücksichtigung von absehbaren technologischen Verbesserungen bei allen Bau- und Technikkomponenten; entspricht vermutlich dem Kostenoptimum ab 2030/2040; Ausstieg Ölheizungen 2050; Ausstieg Gasheizungen 2060; Stromerzeugung gemäß "Szenario 2013" (Nitsch 2013), Kohleverstromung endet 2030.			
	Hocheffiziente Heizsysteme mit stark reduzierten Verteil- und Speicherverlusten	wie Klimaschutzszenario plus Dusch-WW-WRG sowie hocheffizienter Wärme- speicherung und -verteilung	ab 2025: Lüftungen mit WRG und hocheffizienten Ventilatoren plus CO2-gesteuerter Luftmengenregelung	Hocheffiziente Ausstattung bei allen Elektrogeräten plus integriertes Lastmanagement

Tabelle 1.3:
Kurzcharakterisierung der vier
Hauptszenarien gemäß den
Hauptanwendungsfeldern Heizung,
Warmwasser, Lüftung und Haushaltsgesamtgeräte.

Der Ausstieg aus den Ölheizungen bedeutet konkret, dass ca. 25 - 30 Jahre zuvor keine neuen Ölheizungen mehr im Neubau und bei Instandsetzungen bzw. Erneuerungen im Bestand eingebaut werden dürfen; im Effizienz-Szenario gilt dies demnach ab spätestens 2035 und im Effizienz-Plus-Szenario spätestens ab 2025. Die Dynamik der Heiz- und Stromerzeugungsstruktur wird in Abschnitt 6 detailliert behandelt.

Szenarien dargestellten Handlungspfade in sich konsistent und plausibel modelliert sind, um innere Widersprüche und Kombinationen von Entwicklungen, die sich ausschließen (z.B. hohe Anteile Biomasseheizungen in einem gleichzeitig wenig effizienten Gebäudepark jenseits der Verfügbarkeitsgrenze der Biomasse) zu vermeiden. Anhand der späteren Auswertung der Szenarien soll schließlich geklärt werden, mit welchen Maßnahmenkombinationen die Transformation des Wohngebäudeparks gemäß den Pariser Klimazielen erfolgen kann.

Es werden insgesamt vier Szenarien unterschieden, die folgendermaßen charakterisiert werden können (siehe Tab. 1.3):

Status-quo-Szenario

Im Status-quo-Szenario werden die energetischen Qualitäten (Neubau und Sanierung) auf dem Stand des Jahres 1990 „eingefroren“ und unverändert in der Zukunft fortgeführt. Die Mengenkomponenten (z.B. Bevölkerung, Wohnflächen, Art und Umfang von Elektroausstattungen) werden jedoch, wie in den anderen Szenarien auch, weiterentwickelt. Das Status-quo-Szenario dient aus methodischer Sicht als Referenz und Eichmaßstab für die erzielten Effizienzsteigerungen und die Dekarbonisierungserfolge in den anderen Szenarien.

Referenz-Szenario

Hier wird eine „Weiter-so-wie-bisher“-Entwicklung abgebildet. Es werden nur zurückhaltende Reaktionen von Politik, Gesellschaft und Wirtschaft auf künftige Problemstellungen unterstellt. Beispielsweise wird der Wärmeschutz der Gebäude auch künftig nur zurückhaltend verbessert, wie dies in den Wärmeschutzverordnungen, und später in den unterschiedlichen Fassungen der EnEV und des GEG geschah. Eine Wärmerückgewinnung der Lüftung kommt im gesamten Betrachtungszeitraum nicht zum Einsatz. Die Stromeffizienz wird nicht über die bisher zu beobachtenden Verbesserungen hinaus gesteigert. Der Wandel der Heizstruktur und Stromerzeugung erfolgt entsprechend den Entwicklungen der vergangenen 15 Jahre.

Klimaschutz-Szenario

In diesem Zielszenario erfolgt der Neubau und die energetischen Sanierungen in der Güte des Passivhauskonzepts und orientieren sich damit an dem Kostenoptimum der Lebenszykluskosten, wie es z.B. in entsprechenden Studien zum Wohnbau in Vorarlberg und Luxemburg detailliert ermittelt wurde (vgl. EIV 2018 und MdE 2014) (5). Dies beinhaltet einen sehr guten Wärmeschutz der Gebäudehülle inklusive Fenster und eine hochwertige Wärmerückgewinnung der Lüftung sowie eine stromeffiziente Ausstattung der Wohngebäude mit Haushaltsgeräten und für Kommunikationselektronik, Beleuchtung, Aufzüge, Hilfsaggregate. Aufgrund des zunehmend geringeren Energiebedarfs der Gebäude können sich erneuerbare Heizsysteme spürbar schneller durchsetzen als im Referenzszenario. Auch der Wandel hin zu einer erneuerbaren Stromerzeugung erfolgt hier schneller als im Referenzszenario. Weil künftig neue Stromanwendungen hinzukommen (z.B. für Mobilität, Wärmeerzeugung, Prozesswärme) ist eine hohe Stromeffizienz Voraussetzung für eine derartige Entwicklung.

Klimaschutz-Plus-Szenario

Neben den Maßnahmen des Klimaschutzszenarios werden hier Technologieentwicklungen miteinbezogen, die derzeit nur in Form von Prototypen bzw. Sonderlösungen oder theoretischer Studien vorliegen (z.B. besonders energieeffiziente Fenster und Verglasungen auch für Anwendungen im Denkmalschutz, Duschwasser-Wärmerückgewinnung, Wärmepumpen mit emissionsarmen Kältemitteln usw.). Die Beobachtungen der vergangenen Jahre haben gezeigt, dass diese Entwicklungen viel schneller und durchgreifender erfolgen, als zunächst vermutet. Daher bestehen gute Gründe für die Annahme, dass die hier beschriebenen Qualitäten und Neukomponenten tatsächlich in einigen Jahren allgemein zur Verfügung stehen, wirtschaftlich eingesetzt werden und bereits 2030 dem Kostenoptimum entsprechen können. Zusätzlich wird in diesem Szenario ein schnellerer Ausstieg aus den fossilen Heizsystemen und aus der Kohleverstromung angenommen. Der

Umfang der Stromerzeugung verdoppelt sich hier gegenüber dem Klimaschutzszenario, u.a. weil hier der Einstieg in die erneuerbare Erzeugung von Wasserstoff bzw. Methan als saisonaler Speicher sowie für industrielle Zwecke sowie Flug- bzw. Schwerlastverkehr modelliert wird.

Kopplungsprinzip als Umsetzungsstrategie

Das sog. Kopplungsprinzip drückt aus, dass sich Gelegenheiten für energetische Effizienzverbesserungen und den Wechsel von fossilen zu erneuerbaren Energiesystemen immer dann ergeben, wenn eine Bau- bzw. ein Technikkomponente ohnehin instand zu setzen oder zu erneuern ist. Sobald z.B. eine Außenwand neu zu streichen oder der Putz auszubessern ist, kann in diesem Zuge eine Außendämmung aufgebracht werden. Es sind aber auch andere Gelegenheiten denkbar, z.B. Erweiterungen, Umbauten oder Nutzungsänderungen. **Betont werden soll an dieser Stelle, dass das Motiv der Energieeinsparung oder des Klimaschutzes für sich genommen - mit wenigen noch zu benennenden Ausnahmen - nicht der Auslöser für Effizienzverbesserungen oder den Umstieg auf erneuerbare Energiesysteme sein kann oder soll.**

Dafür sprechen vor allem ökonomische Gründe. In den meisten Fällen ist nur dann eine Wirtschaftlichkeit der energetischen Maßnahmen gegeben. Es fallen keine zusätzlichen Rüstkosten (z.B. Baustelleneinrichtung, Gerüst) an und der Restwert der Konstruktionen wird nicht vorzeitig zerstört. Es ist aufschlussreich, dass Hausbesitzer von sich aus dieser ökonomischen Vernunft folgen (vgl. Frondel et al. 2006, S. 89). Anderslautende Vorschläge kommen eher von außen, z.B. die Erhöhung der Sanierungsrate deutlich über 2 % hinaus oder die sog. „Abrissprämie“ für energetisch besonders schlechte Gebäude.

Mittlere Nutzungsdauern

Gemäß dem o.g. Kopplungsprinzip werden im Kohortenmodell immer dann energetische Verbesserungen durchgeführt, wenn die Nutzungsdauer eines Bauteils oder eines haustechni-

schen Systems abläuft. Diese entsprechen den technischen Standzeiten und nicht den häufig verwendeten wirtschaftlichen Abschreibungszeiträumen, die i.d.R. deutlich kürzer sind. Aus der mittleren Nutzungsdauer ergibt sich eine mittlere Standzeit von Baukomponenten von 50 - 60 Jahren und von 15 - 30 Jahren bei Technikaggregaten. Letztere sind somit deutlich kürzer, was einen Vorteil für die anstehenden Erneuerungsprozesse der Heizsysteme in Richtung Erneuerbare bedeutet.

Einteilung der Wohngebäude in strategische Gruppen

Die Wohngebäude werden im Kohortenmodell drei strategischen Gruppen zugeordnet, für die szenarienabhängig differenzierte Umsetzungsbedingungen modelliert wurden:

- 1 Neubau ab 1990
- 2 Voll sanierbarer Bestand
- 3 Bedingt sanierbarer Bestand / Baudenkmale

Die energetischen Umsetzungsniveaus an die strategischen Gruppen erfolgen in abgestufter Form. Volumfängliche energetische Anforderungen werden nur im Neubau gestellt. Im Bestand wird hingegen berücksichtigt, dass hier baukulturelle, baupraktische und wirtschaftliche Restriktionen existieren.

Der eingriffsempfindliche Gebäudebestand und die Sonderstellung der Baudenkmale

An Baudenkmale und sonstige eingriffsempfindliche Gebäude werden vorab keine festgelegten energetischen Anforderungen gestellt und es besteht auch keine Pflicht einen Ausgleich für die im Vergleich zum voll sanierbaren Bestand geringere Energieeffizienz zu leisten. Bauliche Maßnahmen können dort ohnehin nur einzelfallbezogen und in Abstimmung mit den Denkmalschutzbehörden erfolgen. Um hierbei auf der sicheren Seite zu agieren wurde der Anteil der eingriffsempfindlichen Gebäuden im Ausgangszustand mit ca. 10 % bewusst sehr umfangreich gewählt und umfasst somit auch diejenigen Bestandsbauten, die aus technischen oder wirtschaftlichen Gründen problematisch in der Umsetzung sind (6).



Denkmalgeschützter Bestand



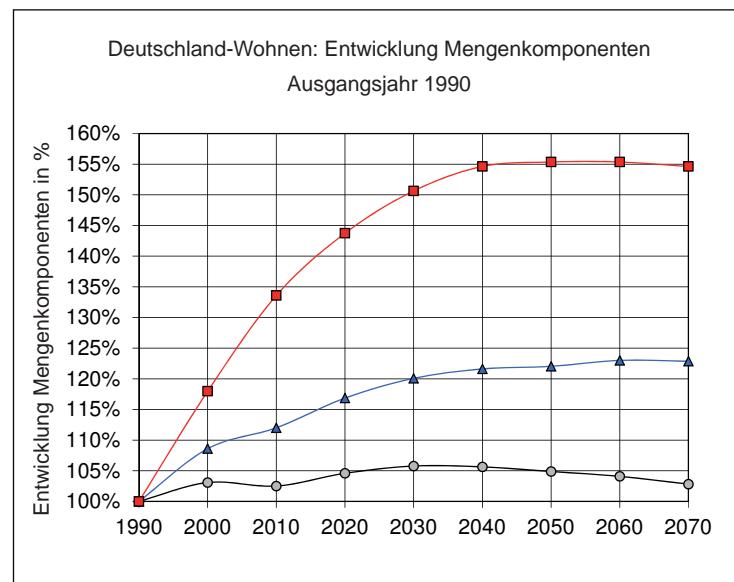
Bedingt sanierbarer Bestand



Voll sanierbarer Bestand

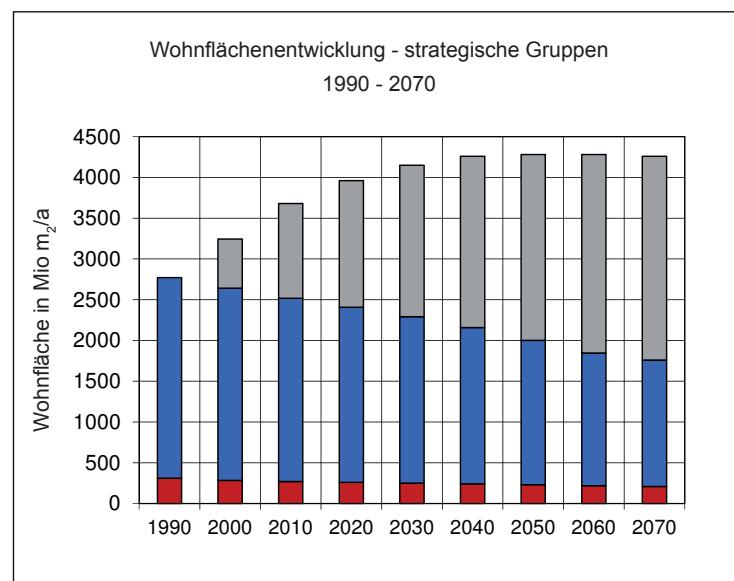
- Wohnfläche
- ▲ Anzahl Haushalte
- Bevölkerung

Abbildung 1.4
Entwicklung von Bevölkerung, Haushalten und der Wohnfläche im Zeitraum 1990 - 2020 gemäß statistischen Daten und Weiterentwicklung in den Szenarien. Die Entwicklungen sind prozentual gegenüber dem Ausgangsjahr 1990 (= 100 %) aufgetragen. Quellen: (DESTASIS 2019, gbe-bund 2020, gbe-bund 2021, BBSR 2015) und eigene Berechnungen; siehe hierzu auch Abschnitt 3.



- Neubau seit 1990
- Voll sanierbarer Bestand
- Bedingt sanierbarer Bestand

Abbildung 1.5
Entwicklung von der Wohnflächen, differenziert nach strategischen Gruppen. (Quelle: IWU 2015 und IWU 2018) und eigene Berechnungen; siehe hierzu auch Abschnitt 3.



1.5 Wichtige Eck- und Rahmendaten

Mengenkomponenten

Als „Antriebe“ für Veränderungen in den Szenarien sind insbesondere Bevölkerung, die Zahl der Haushalte und die Wohnflächen wirksam. Besonders auffällig ist der stark überproportionale Zuwachs an Wohnflächen um 45 % im Zeitraum 1990 - 2020, während die Zahl der Haushalte im gleichen Zeitraum um 17 % und die Bevölkerung nur um 5 % angestiegen sind. Das Wohnflächenwachstum ist nur zu einem geringeren Teil mit der Vergrößerung der Bevölkerung und der Tendenz hin zu kleineren Haushaltsgrößen erklärbar. Vielmehr spielen der Remanenzeffekt und der steigende Wohnkonsum als Folge der Wohlstandsentwicklung seit 1960 eine entscheidende Rolle. Aus Klimaschutzsicht wird zudem die stetige Zunahme der Siedlungs- und Verkehrsflächen kritisch bewertet, die sich als Landnutzungsänderung in einer Verringerung der CO₂-Senken (LULUCF-Sektor) auswirkt.

Bei Betrachtung der Wohnflächenentwicklung, differenziert nach den strategischen Gruppen, fällt auf, dass im Ausgangszustand 1990 der voll sanierbare Bestand mit 90 % des Umfangs dominierend ist. Der bedingt sanierbare Bestand macht in etwa 10 % aus, wovon Baudenkmale einen Anteil von 2 % beanspruchen. Im Betrachtungszeitraum sind die Abgänge aus dem Bestand mit einer Quote von ca. 0,4-0,5 %/a an dem Absinken der Bestandswohnflächen sichtbar. Im bedingt sanierbaren Bestand sind die Abgangsraten deutlich niedriger. Der Neubau gleicht zunächst diesen Abgang aus. Zeitgleich werden neue Wohnflächen geschaffen, die den Wohngebäudepark bis 2050 immer umfangreicher machen. Aufgrund dieser Gesamtentwicklung macht der Neubau ab 1990 im Jahr 2040 bereits mehr als die Hälfte des Wohngebäudestocks aus.

In der Projektion nach 2020 setzt sich der Anstieg der Wohnflächen noch bis etwa 2050 fort. Erst danach findet eine Stabilisierung auf hohem Niveau statt.

Ausgangszustand Gebäude

Neben dem Umfang des Wohngebäudebestands ist auch der energetische Ausgangszustand eine wichtige Randbedingung. Hierbei spielen auch Teilsanierungen in den letzten Jahren und Jahrzehnten eine Rolle, die jedoch nur schwierig zu erfassen sind. Die Festlegungen in der Modellierung des Wohngebäudeparks in den Szenarien basiert auf einer Untersuchung des Instituts Wohnen und Umwelt (IWU 2018).

Für das Jahr 2010 werden in den Szenarien für den Ausgangszustand des Wohngebäudeparks folgende nutzflächenbezogene Kennwerte ausgewiesen:

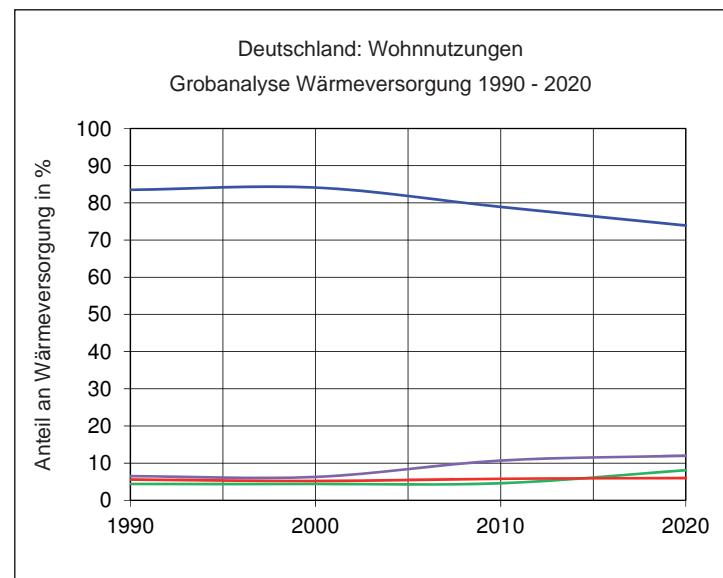
- Spezifischer Jahresheizwärmeverbrauch: 127,5 kWh/m²a
- Spezifischer Warmwasserbedarf: 14,4 kWh/m²a
- Spezifischer Strombedarf: 31,0 kWh/m²a
- Spezifischer Endenergiebedarf: 203,6 kWh/m²a.

Heizstruktur

Bei der Entwicklung der Wärmeversorgung (Abb. 1.6) zeigt sich im Zeitraum von 1990 - 2020 eine starke Dominanz der fossilen Heizsysteme. Weil auch die Fernwärme- und Stromerzeugung überwiegend mit fossilen Energieträgern erfolgte, lag der Anteil der erneuerbaren Wärmeversorgung im Jahr 1990 bei 93 % und konnte bis Jahr 2010 nur auf 88,5 % abgesenkt werden und lag im Jahr 2020 immer noch bei 86,0 %.

Stromerzeugung

Deutlich dynamischer hat sich die Bruttostromerzeugung Deutschlands in Richtung Erneuerbare entwickelt (Abb. 1.7). Deren Anteil beträgt im Jahr 2020 bereits über 40 %. Für die Wohnnutzungen spielt dies auch deshalb eine wichtige Rolle, weil der Primärenergieeinsatz und die Treibhausgasemissionen der Strom- gegenüber den Wärmenutzungen je Endenergieeinheit viel höher ausfällt. Gleichzeitig findet der Ausstieg aus der Kernenergienutzung statt. Weil diese Stromerzeugung zunächst zu ersetzen ist, zögert dies den Aufbau einer vollständig erneuerbaren Stromversorgung hinaus.

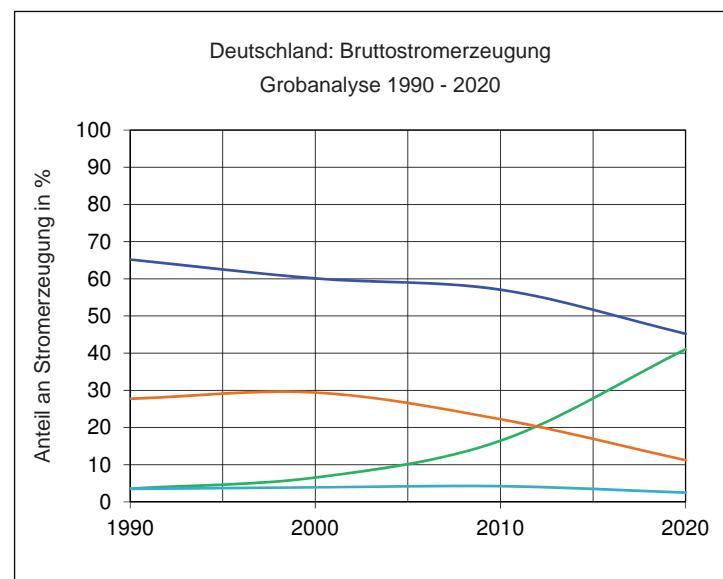


Deutschland: Wohnnutzungen
Grobanalyse Wärmeversorgung 1990 - 2020

Anteil an Wärmeversorgung in %

Fossile Brennstoffe
Erneuerbare Wärme
Fernwärme
Strom (direkt+Wärmepumpen)

Abbildung 1.6
Grundzüge der Heizstruktur der
deutschen Wohngebäude im Zeit-
raum 1990 - 2020. Quellen: (IWU
2018 und (BDEW 2019); siehe
hierzu auch Abschnitt 3.



Deutschland: Bruttostromerzeugung
Grobanalyse 1990 - 2020

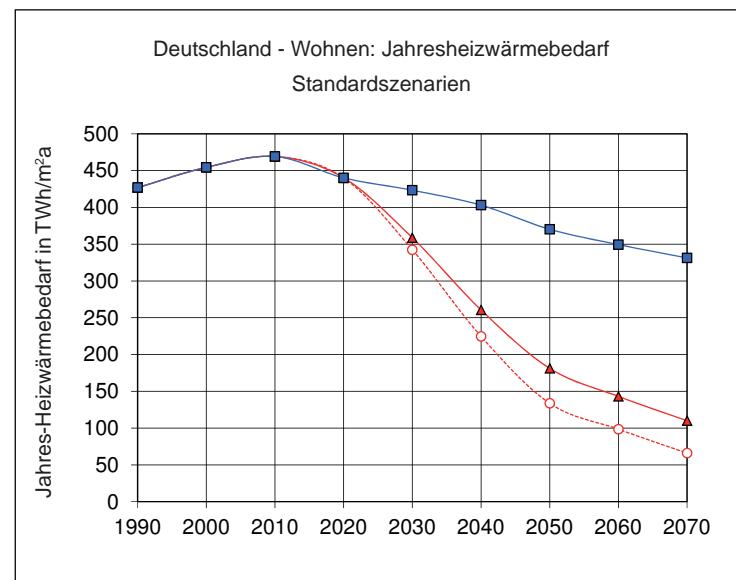
Anteil an Stromerzeugung in %

Fossile Stromerzeugung
Erneuerbare Stromerzeugung
Kernkraftwerke
Sonstige

Abbildung 1.7
Grundzüge der Stromerzeugungs-
struktur Deutschlands im Zeitraum
1990 - 2020. Quelle: (AG Energie-
bilanzen 2019); siehe hierzu auch
Abschnitt 3.

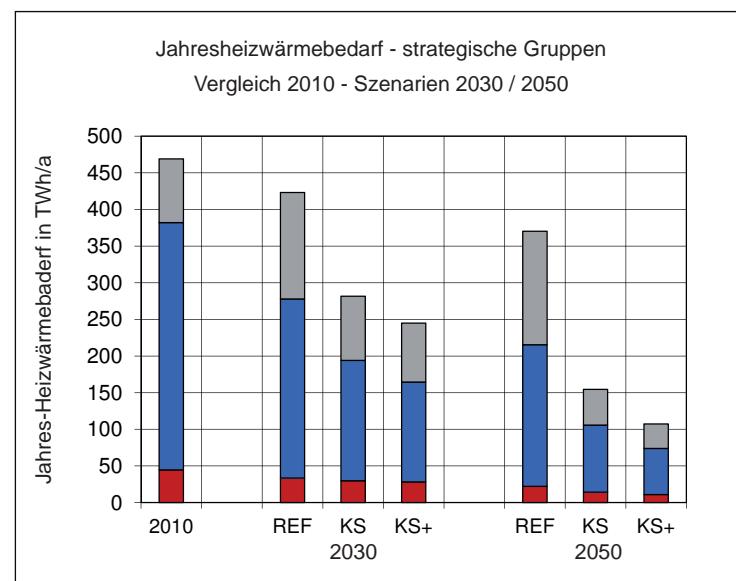
- Referenz-Szenario
- ▲ Klimaschutz-Szenario
- Klimaschutz-Plus-Szenario

Abbildung 1.8
Entwicklung des Jahresheizwärmebedarfs der deutschen Wohngebäude im Zeitraum 1990 - 2070 in TWh/a im Referenz-, Klimaschutz- und Klimaschutz-Plus-Szenario.



- Neubau seit 1990
- Voll sanierbarer Bestand
- Bedingt sanierbarer Bestand

Abbildung 1.9
Entwicklung des Jahresheizwärmebedarfs der deutschen Wohngebäude in den Jahren 2010, 2030 und 2050 in TWh/a, differenziert nach strategischen Gruppen. Für 2030 und 2050 sind die Werte im Referenz- (REF), Klimaschutz- (KS) und Klimaschutz-Plus-Szenario (KS+) nebeneinander aufgetragen.



1.6 Zentrale Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Szenarien in Kurzform zusammengestellt, die als Grundlage für die späteren Handlungsempfehlungen dienen. Als Neuerung gegenüber der Dissertation wird hierbei ein Bezug zum CO₂-Globalbudget und damit zu den Pariser Klimazielen hergestellt.

Entwicklung Heizwärmebedarf

Im Wohngebäudepark dominiert derzeit mit einem Anteil von ca. 73 % die Raumwärme den Nutzenergiebedarf. Danach folgen mit 15 % die Stromanwendungen und die Warmwasserbereitung mit 12 %. Für Klimaschutzwägen ist somit die Reduktion des Heizwärmebedarfs aller Wohngebäude das zentrale Handlungsfeld. Die wesentlichen Maßnahmen bestehen in der Verbesserung des Wärmeschutzes der Gebäude und im Einsatz der Wärmerückgewinnung bei der Lüftung.

Im Referenzszenario kann der Heizwärmebedarf nach seinem Höchstwert von ca. 470 TWh im Jahr 2010 in den folgenden Jahrzehnten nur wenig gesenkt werden. Im Jahr 2050 beträgt die Reduktion mit einem Heizwärmebedarf von ca. 370 TWh/a gerade einmal 22 % (Abb. 1.8). Ursache hierfür ist der Einsatz sog. „mittlerer Qualitäten“ (siehe Tab. 1.9) beim Wärmeschutz und das weitgehende Fehlen der Wärmerückgewinnung bei den Lüftungskonzepten. In den Klimaschutzszenarien gelingt hingegen bis 2050 eine starke Reduktion um 62 bzw. 71 % der Bedarfswerte für Raumheizung auf Werte von 180 TWh/a im Klimaschutz- und auf 135 TWh/a im Klimaschutz-Plus-Szenario. Bei der differenzierten Betrachtung nach strategischen Gruppen (Abb. 1.9) ist erkennbar, dass der bedingt sanierbare Bestand wegen seinem geringen Umfang kein substanzielles Problem darstellt. In den beiden Klimaschutzszenarien werden vor allem im Neubau seit 1990 und im voll sanierbaren Bestand durchgreifende Minderungserfolge erreicht. Im Referenzszenario ist dies nicht der Fall. Das führt dort sogar zu einem Anstieg des Heizwärmebedarfs im Neubau nach 2010.

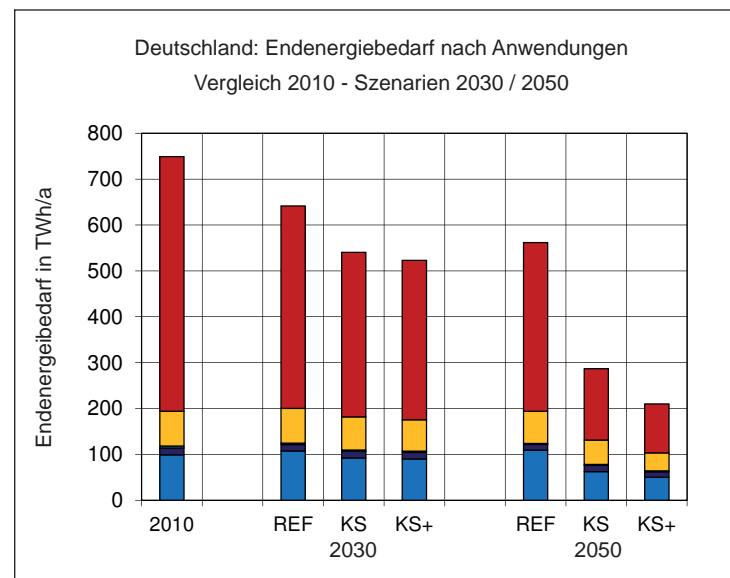
Entwicklung des sonstigen Nutzenergiebedarfs

Die Stromanwendungen in den Haushalten sind ein besonders effektives und wirtschaftliches Handlungsfeld zur Senkung des Nutzenergiebedarfs der privaten Haushalte. Im Referenzszenario verändert sich der Strombedarf der Haushalte kaum, weil durch zusätzliche Anwendungen und Ausstattungen die Effizienzerfolge bei den Geräten bestenfalls kompensiert werden. In den Klimaschutzszenarien hingegen kann durch die konsequente Ausstattung der Haushalte mit stromeffizienten Geräten in etwa eine Halbierung des Strombedarfs erreicht werden.

Bei den Warmwasseranwendungen sind die Möglichkeiten für eine Verbesserung der Effizienz aufgrund von Hygieneanforderungen und Komfortgewohnheiten deutlich geringer als bei Raumwärme und Stromanwendungen. Im Klimaschutz-Plus-Szenario wird jedoch bis 2050, z.B. durch den Einsatz wassersparende Armaturen und Duschwasser-Wärmerückgewinnung, immerhin eine Reduktion um 30 % erreicht.

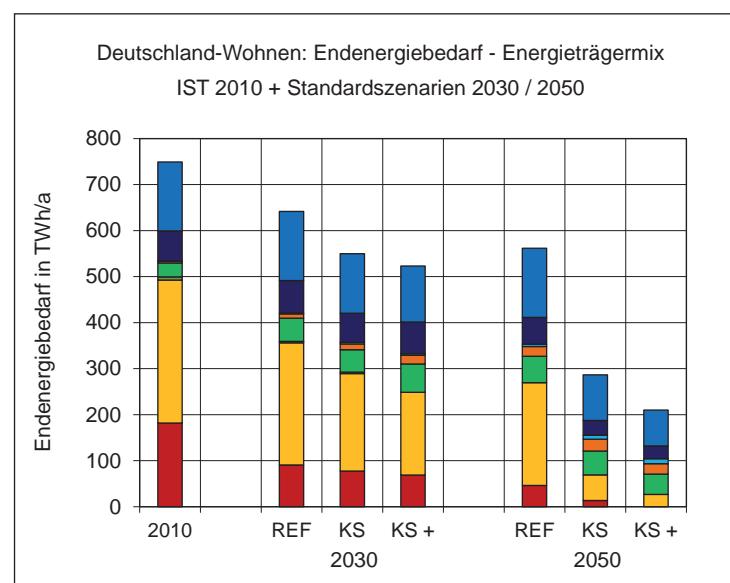
Entwicklung Endenergiebedarf

Bei der Endenergie (Abb. 1.10 und 1.11) sind zusätzlich die Wärmeverluste bei Erzeugung, Verteilung und Speicherung mitbilanziert. Die Grundtendenzen sind ähnlich wie beim Nutzenergiebedarf. Dominierend ist die Raumwärme. Nur in den Klimaschutzszenarien kann der Endenergiebedarf in allen Anwendungsfeldern substanzell verringert werden. Gegenüber der Referenzentwicklung können hier die Wärmeverluste bei Erzeugung, Verteilung und Speicherung durch sorgfältige Planung, Vereinfachung der Heizsysteme und besseren Wärmeschutz stark reduziert werden. Parallel dazu gelingt in den Klimaschutzszenarien ein schnellerer Ausstieg aus den fossilen Energiesystemen. Dazu tragen entscheidend die geringeren Energiebedarfswerte (z.B. wegen der einfacheren Quellenergierschließung für Wärmepumpen) bei. Während im Referenzszenario im Jahr 2050 immer noch fossile Heizsysteme dominieren, wird im Klimaschutz-Plus-Szenario nur noch ein kleiner Anteil der Wohngebäude mit Erdgas beheizt.



█ Raumwärme
█ Warmwasser
█ Gas für Kochen
█ Hilfsstrom
█ Haushaltsstrom

Abbildung 1.10
Entwicklung des Nutzenergiebedarfs der deutschen Wohngebäude in den Jahren 2010, 2030 und 2050 in TWh/a, getrennt für die Anwendungsfelder Raumwärme, Warmwasser, Gas für Kochen, Hilfs- und Haushaltsstrom. Für 2030 und 2050 sind die Werte im Referenz- (REF), Klimaschutz- (KS) und Klimaschutz-Plus-Szenario (KS+) nebeneinander aufgetragen.

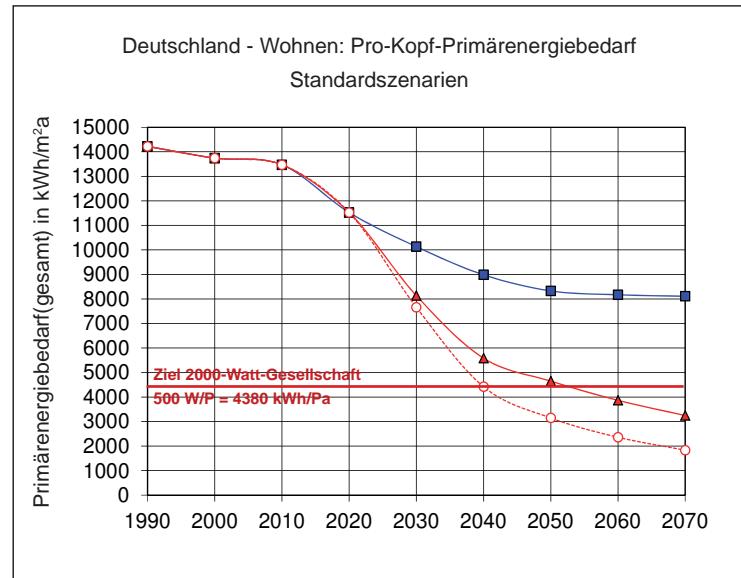


█ Strom
█ Fernwärme
█ Geothermie
█ Solarwärme
█ Biomasse
█ Braun- und Steinkohle
█ Erdgas
█ Heizöl

Abbildung 1.11
Entwicklung des Endenergiebedarfs der deutschen Wohngebäude in den Jahren 2010, 2030 und 2050 in TWh/a, getrennt nach Energieträgern. Für 2030 und 2050 sind die Werte im Referenz- (REF), Klimaschutz- (KS) und Klimaschutz-Plus-Szenario (KS+) nebeneinander aufgetragen.

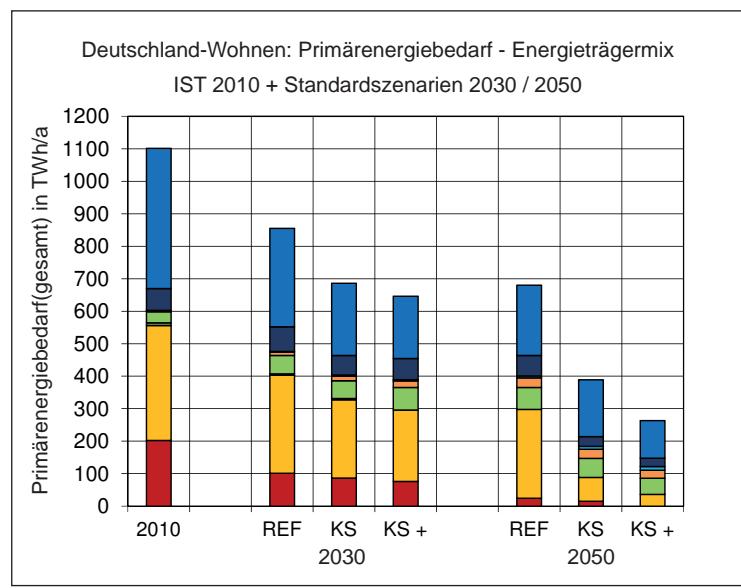
- Referenz-Szenario
- ▲ Klimaschutz-Szenario
- Klimaschutz-Plus-Szenario

Abbildung 1.12
Entwicklung des gesamten Pro-Kopf-Primärenergiebedarfs der deutschen Wohngebäude im Zeitraum 1990 - 2070 in kWh/Pa im Referenz-, Klimaschutz- und Klimaschutz-Plus-Szenario. Zur besseren Orientierung ist der Kennwert der 2000-Watt-Gesellschaft (500 W = 4380 kWh/Pa) mit aufgetragen.



- Strom
- Fernwärme
- Geothermie
- Solarwärme
- Biomasse
- Braun- und Steinkohle
- Erdgas
- Heizöl

Abbildung 1.13
Entwicklung des gesamten Primärenergiebedarfs der deutschen Wohngebäude in den Jahren 2010, 2030 und 2050 in TWh/a, getrennt nach Energieträgern. Für 2030 und 2050 sind die Werte im Referenz-(REF), Klimaschutz- (KS) und Klimaschutz-Plus-Szenario (KS+) nebeneinander aufgetragen.



Entwicklung Primärenergiebedarf

Im Primärenergiebedarf werden zusätzlich zur Endenergie alle vor- und nachgelagerten Prozesse der Energiebereitstellung (z.B. Exploration, Förderung, Transport + übergeordnete Verteilung, Erstellung Kraftwerke und Heizzentralen und deren späterer Rückbau) im Sinne des kumulierten Energieaufwands (KEA) mitbilanziert. Es wird die gesamte Primärenergie ausgewiesen, d.h. fossile, nukleare und erneuerbare Primärenergie werden zusammengefasst. Damit ergibt sich ein guter Beurteilungsmaßstab, wie groß das Energiesystem für die Energiebereitstellung der Wohnnutzungen in den jeweiligen Szenarien sein muss. Im Gegensatz zur Endenergie ist der gesamte Aufwand für die Stromerzeugung mit enthalten.

In Abb. 1.12 sind die Pro-Kopf-Werte des Primärenergieaufwandes der drei Szenarien gegenübergestellt. Im Referenzszenario kann der Primärenergiebedarf der Wohnnutzungen im Zeitraum 2010 - 2050 von 13.500 auf 8.300 kWh/Pa und damit nur um 38 % verringert werden. Mit einem Wert von 4700 kWh/Pa im Jahr 2050 wird im Klimaschutzszenario nahezu der Kennwert der 2000-Watt-Gesellschaft von 4380 kWh/Pa und eine Reduktion von 65 % erreicht. Im Klimaschutz-Plus-Szenario liegt der Primärenergie-Kennwert bei 3100 kWh/Pa dann deutlich unter dem der 2000-Watt-Gesellschaft. Die Reduktion gegenüber dem Ausgangswert im Jahr 2010 beträgt 77 %. Es ist gut zu erkennen, dass das Energiesystem bei der Referenzentwicklung um einen Faktor 1,8 bzw. 2,6 größer ausfallen müsste als im Klimaschutz- bzw. Klimaschutz-Plus-Szenario.

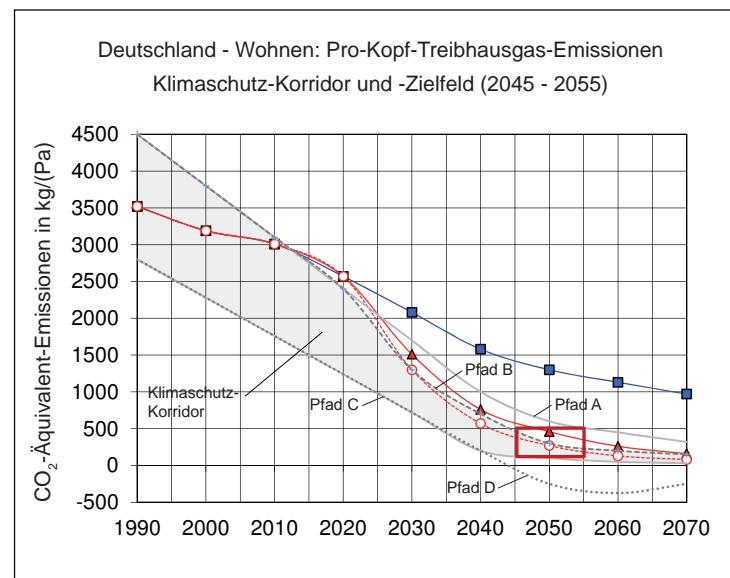
Bei der Entwicklung des Energieträgermixes (Abb. 1.13) zeigen sich die gleichen Tendenzen wie bei der Endenergie, wobei die Stromerzeugung hier ein deutlich höheres Gewicht hat. Die Transformation hin zu einem erneuerbaren und gleichzeitig effizienten Energiesystem gelingt nur in den Klimaschutzszenarien, während im Referenzszenario im Jahr 2050 hohe Bedarfswerte mit einer dann immer noch dominant fossilen Energieerzeugung verbunden bleiben.

Entwicklung der Treibhausgasemissionen

In dieser Studie kommen als Kriterium zum ersten Mal CO₂-Budgets für Gebäude zum Einsatz. Sie beschreiben die Menge der kumulierten Treibhausgasemissionen, die anteilig für die Wohnnutzungen in Deutschland noch zulässig sind. Gemäß der Pariser Klimavereinbarung stellt das 2-Grad-Ziel die Mindestanforderung dar (Pfad B). Nach Möglichkeit soll möglichst eine Unterschreitung in Richtung 1,5-Grad-Ziel (Pfad D) angestrebt werden, um die Risiken des Klimawandels zu begrenzen. Das 1,7-Grad-Ziel (Pfad C) kann somit als Paris-kompatibel eingestuft werden. Als Klimaschutz-Korridor ist das Feld zwischen Pfad B und C definiert. Das Zielfeld wurde so bestimmt, dass Entwicklungen, die oberhalb davon verlaufen auf keinen Fall mehr als Klimaschutzpfade eingestuft werden können.

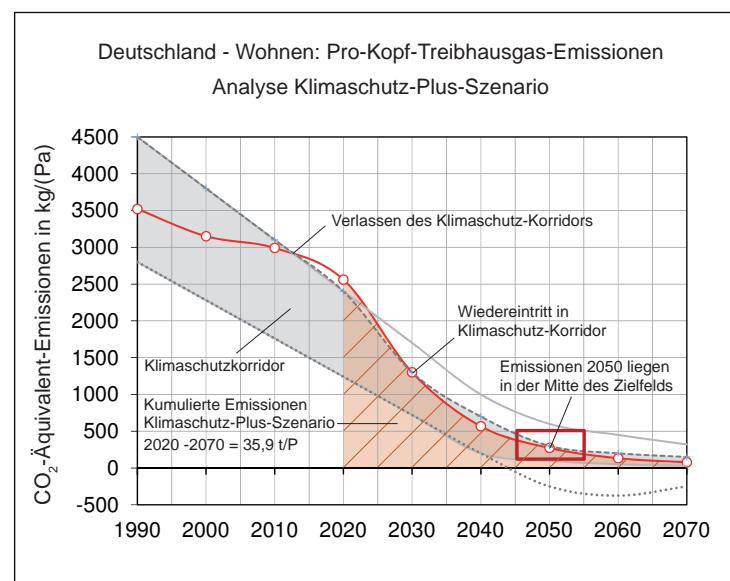
In Abbildung 1.14 ist zunächst die Entwicklung der Pro-Kopf-CO₂-Äquivalent-Emissionen seit 1990 bis 2020 dargestellt. Ausgehend von 3,5 t/Pa sinken die Werte bis 2020 auf 2,5 t/Pa. Die Modellierung in den Szenarien kann somit auch die Ist-Entwicklung, wie sie in Abb. 1.3 analysiert wurde, hinreichend gut nachgebildet. Festzustellen ist ferner, dass die Emissionen nach 2010 den Korridor seitlich verlassen haben.

In der Referenzentwicklung entfernen sich die Werte für das Global Warming Potential immer weiter vom Klimaschutz-Korridor und befinden sich im Jahr 2050 mit ca. 1,3 t/Pa um einen Faktor 4,3 über dem Zielwert von 0,30 t/Pa (Mitte des Zielfelds). Dieser Wert liegt derart hoch, dass damit der Zielwert von einer Tonne pro Person und Jahr für Deutschland insgesamt überschritten wird. Die Emissionen des Klimaschutzszenarios verlaufen stetig leicht oberhalb des Klimaschutzkorridors und landen schließlich im oberen Bereich des Zielfeldes. Dies entspricht bestenfalls noch einem grenzwertigen Klimaschutz (2-Grad-Ziel mit 50 % Eintrittswahrscheinlichkeit). Im Klimaschutz-Plus-Szenario gelingt es 2030 wieder in den Klimaschutz-Korridor zurückzukehren. Im Jahr 2050 liegt der Pro-Kopf-Kennwert schließlich in der Mitte des Zielfelds.



- Referenz-Szenario
- ▲ Klimaschutz-Szenario
- Klimaschutz-Plus-Szenario
- Klimaschutz-Korridor
- Klimaschutz-Zielfeld

Abbildung 1.14:
Entwicklung der Pro-Kopf-Treibhausgasemissionen für die Hauptzonen. Angabe in CO₂-Äquivalente je Person und Jahr in kg/Pa im Zeitraum 1990 - 2070. Zur besseren Orientierung sind die vier Pfade A-D gemäß Tab. 1.1. und der daraus abgeleitete Klimaschutz-Korridor (grau) und das Klimaschutz-Zielfeld (rotes Rechteck) mit dargestellt.



- Klimaschutz-Plus-Szenario
- Klimaschutz-Korridor
- Klimaschutz-Zielfeld

Abbildung 1.15:
Exemplarische Analyse des Klimaschutz-Plus-Szenarios im Hinblick auf die Entwicklung der Pro-Kopf-Treibhausgasemissionen. Zur besseren Nachvollziehbarkeit sind die strategisch hervorgehobenen Punkte im Emissionsverlauf markiert und bezeichnet sowie die Herleitung der kumulierten Emissionen 2020 - 2070 als hellrot schraffierte Fläche dargestellt.



Abbildung 1.16
Entwicklung des Global-Warming-Potentials der deutschen Wohngebäude in den Jahren 2010, 2030 und 2050 in Mio t/a, getrennt für die Anwendungsfelder Raumwärme, Warmwasser, Gas für Kochen, Hilfs- und Haushaltsstrom. Für 2030 und 2050 sind die Werte im Referenz- (REF), Klimaschutz- (KS) und Klimaschutz-Plus-Szenario (KS+) nebeneinander aufgetragen.

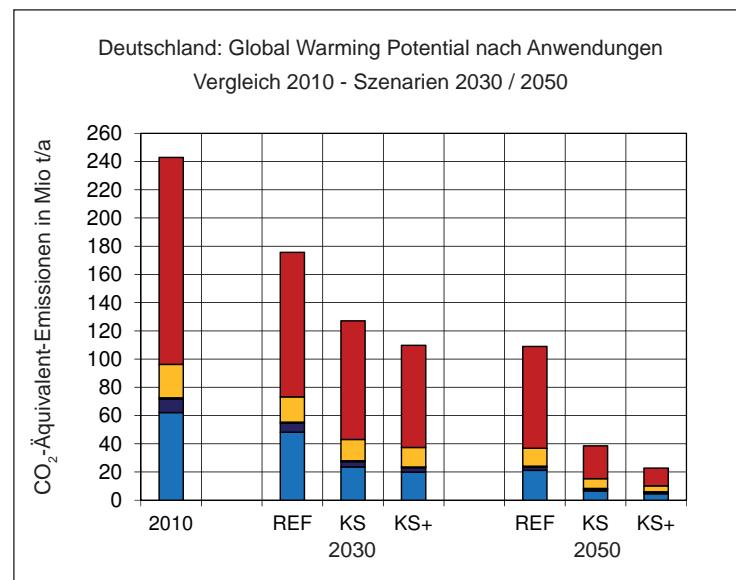
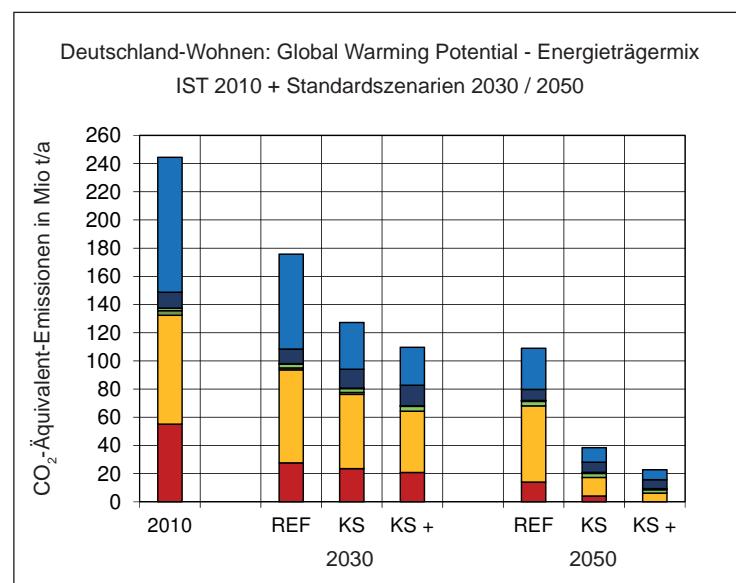


Abbildung 1.17
Entwicklung des Global-Warming-Potentials der deutschen Wohngebäude in den Jahren 2010, 2030 und 2050 in Mio t/a, getrennt nach Energieträgern. Für 2030 und 2050 sind die Werte im Referenz- (REF), Klimaschutz- (KS) und Klimaschutz-Plus-Szenario (KS+) nebeneinander aufgetragen.



Eine Paris-kompatible Entwicklung erfordert bis 2050 ein Reduktion um einen Faktor 10 gegenüber dem Wert im Jahr 2010. Dies gelingt - das zeigt die erste Analyse - nur noch unter den Bedingungen des Klimaschutz-Plus-Szenarios.

Die Darstellung des Global Warming Potentials der Wohnnutzungen nach Anwendungen (Abb. 1.16) zeigt in allen Szenarien eine Dominanz der Raumwärme. An zweiter Stelle stehen die Stromanwendungen. Der geringste Anteil kann der Bereitstellung von Warmwasser zugeordnet werden. Die Betrachtung der Anteile ist jedoch wenig aussagekräftig, denn es ergeben sich zwischen den Szenarien substantielle Unterschiede bei den Absolutwerten. Ganz offensichtlich ist es möglich in allen Anwendungsbereichen Effizienzverbesserungen zu erreichen und diese mit einem Ausstieg aus den fossilen Heiz- und Stromversorgungen zu kombinieren.

In Abbildung 1.17 ist der Beitrag der verschiedenen Energieträger zu den Treibhausgasemissionen erkennbar:

- Im Jahr 2010 wird durch den Einsatz von Erdgas und Heizöl in Heizsystemen etwas mehr als 50 % der GWP-Emissionen verursacht. Die andere Hälfte geht auf das Konto der Strom- und Fernwärmeerzeugung, die Bestandteil der gewählten verursachergerechten Bilanzierung sind.
- Im Referenzszenario können die klimawirksamen Emissionen wegen zu geringer Effizienzfortschritte und einem zu langsamem Ausbau der erneuerbaren Strom- und Wärmeversorgung nicht in ausreichendem Maße abgesenkt werden. Erdgas dominiert im Jahr 2050 die Emissionsbilanz.
- In den beiden Klimaschutzszenarien kann bis 2050 gegenüber der Referenzentwicklung eine deutliche Reduktion der klimawirksamen Emissionen erreicht werden.
- Im Klimaschutz-Plus-Szenario ergibt sich durch die zusätzliche Verbesserung der Bau- und Technikkomponenten bis 2050 eine nochmalige Halbierung der Emissionen gegenüber dem Klimaschutzszenario. Nur mit diesem Pfad wird eine Paris-kompatible Entwicklung nachgewiesen.

Kumulierte Treibhausgasemissionen und deren Bezug zu den Global-Warming-Budgets für Gebäude

In einer äquivalenten Darstellungsform werden nun die kumulierten CO₂-Äquivalent-Emissionen seit 2020 der drei Standardszenarien gegenübergestellt. Dabei werden die jährlichen Werte nacheinander aufaddiert. Aufgrund der langen Verweildauer der Treibhausgase in der Atmosphäre wird damit der Wirkmechanismus, der den Klimawandel antreibt, anschaulicher abgebildet, als in der vorherigen Darstellung mit Minde rungspfaden. Die kumulierten CO₂-Äquivalent-Emissionen seit 2020 haben einen unmittelbaren Bezug zu den Pariser Klimazielen. Am Ende ist es ein einziger Wert, mit dem die Paris-Kompatibilität eines Emissionspfades belegt wird (siehe farbige Balken am rechten Rand von Abb. 1.19).

Die Global-Warming-Budgets für Gebäude, sind als farbige horizontale Linien markiert und verstehen sich als Grenzwerte, denen die Klimaschutzziele gemäß den Pfaden A-D in Tabelle 1.1 zugeordnet sind. Sie stellen klar definierte Schwellen dar, deren Überschreitung zudem auch zeitlich eingeordnet werden kann (siehe Abb 1.18 und 1.19):

- Das 1-5-Grad-Budget für Wohnnutzungen in Deutschland ist in allen drei Szenarien bereits bereit in den Jahren 2025 - 2027 ausgeschöpft.
- 2029 - 2033 wird das 1,7-Grad-Budget überschritten.
- Das 2-Grad-Budget ist im Referenzszenario im Jahr 2038 erschöpft. Auch danach steigen die kumulierten Emissionen immer weiter an. Eine Stabilisierung kann erst in der Projektion bis 2100 mit einem Wert von 93 t/P stattfinden.
- Im Klimaschutzszenario wird das 2-Grad-Budget im Jahr 2052 überschritten. Am Ende landen die kumulierten GWP-Emissionen mit 45 t/P wenigstens knapp unterhalb des bereits grenzwertigen 2-Grad-Budgets mit nur 50% Eintrittswahrscheinlichkeit.
- Nur das Klimaschutz-Plus-Szenario bleibt mit 36 t/P zuverlässig unter der Schwelle des 2-Grad-Budgets mit 67 % Eintrittswahrscheinlichkeit.

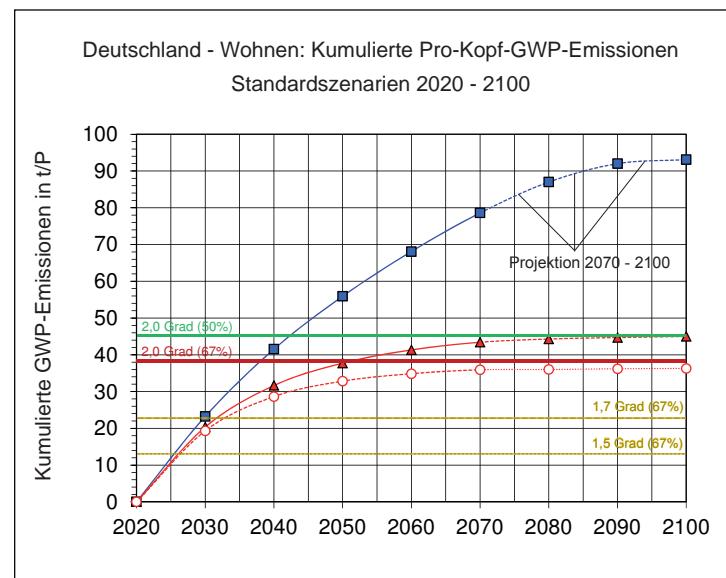


Abbildung 1.18
Entwicklung der kumulierten Pro-Kopf-Treibhausgasemissionen der deutschen Wohngebäude im Zeitraum 1990 - 2070 in t/P im Referenz-, Klimaschutz- und Klimaschutz-Plus-Szenario. Zur Beurteilung der Paris-Kompatibilität sind die Budgets für die abgestuften Klimazielle gemäß den Pfaden A-D aus Tab. 1.1. als farbig markierte horizontale Linien mit aufgetragen. Die Emissionen nach 2070 sind als Projektion so abgeschätzt, dass spätestens im Jahr 2100 Klimaneutralität erreicht ist.

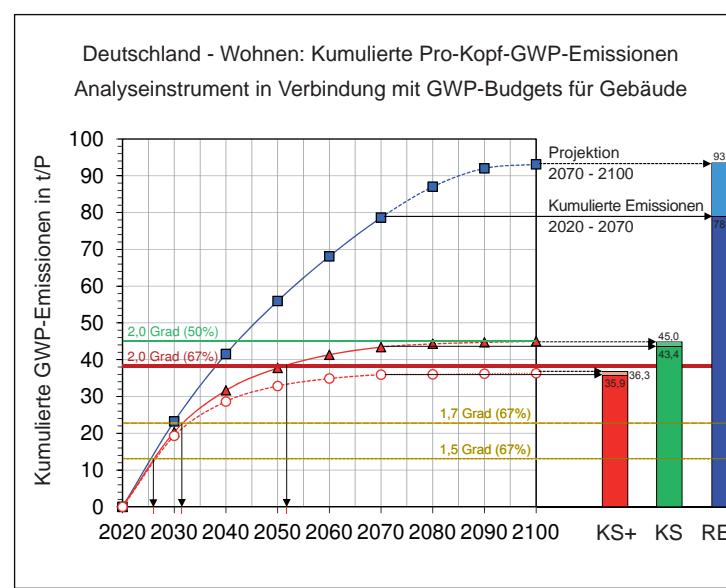


Abbildung 1.19
Analyse der kumulierten Pro-Kopf-Treibhausgasemissionen der deutschen Wohngebäude im Zeitraum 1990 - 2070 in t/P. Zur Erläuterung sind die Zeitpunkte der Budgetgrenzen im Klimaschutzszenario als Pfeile nach unten auf die x-Achse angegeben. Auf der rechten Seite finden sich die Gesamtwerte der kumulierten Treibhausgasemissionen als farbige Balken für das Referenz- (blau), das Klimaschutz- (grün) und das Klimaschutz-Plus-Szenario (rot). Die berechneten Emissionen 2020-2070 sind dunkel und die Projektion 2070 - 2100 hell dargestellt.

Tabelle 1.4:
Primäre „Ampel“-Bewertung der Szenarien im Hinblick auf die 2-Grad-Erfüllung mit dem Kriterium der kumulierten Pro-Kopf-GWP-Emissionen seit 2020 in t/P.

Kumulierte Pro-Kopf-GWP-Emissionen in t/P		
"Ampel"-Bewertung	Kriterium	
Rot	größer gleich 45,1	
Gelb	zwischen 38,5 und 45,1	
Grün	kleiner gleich 38,5	

Tabelle 1.5:
Sekundäre „Ampel“-Bewertung der Szenarien im Hinblick auf die Einhaltung der Klimaziele mit Hilfe von zusätzlichen CO₂-Senken. Die Höhe der Senken ist als Minuswert in t/P ausgewiesen.

Erforderliche CO ₂ -Senken in t/P		
"Ampel"-Bewertung	Kriterium	
Rot	größer gleich -25,0	
Gelb	zwischen -7,5 und -25,0	
Grün	kleiner gleich -7,5	

Tabelle 1.6:
Hauptdaten der Standardszenarien zum Global-Warming-Potential. Unten erfolgt eine einfache Bewertung der Szenarien über die wohngebäudebezogenen GWP-Budgets und die erforderlichen CO₂-Senken zum Erreichen des 2-Grad-, des 1,7-Grad- und des 1,5-Grad-Ziels mit Hilfe des zuvor erläuterten „Ampelsystems“.

Standardszenarien		REF	KS	KS +
Global Warming Potential (Mio t/a)	2010	244,4	244,4	244,4
	2030	175,8	127,1	109,7
	2050	108,8	38,6	22,9
	2070	79,4	12,9	6,4
GWP pro Kopf (kg/Pa)	2010	3002	3002	3002
	2030	2084	1507	1300
	2050	1301	462	273
	2070	969	157	78
Kumulierte GWP pro Kopf seit 2020 (t/P)	bis 2070	78,6	43,4	35,9
	gesamt	93,1	45,0	36,3
Erforderliche GWP-Senke (t/P) für Einhaltung Klimaziel mit 67% Eintrittswahrscheinlichkeit	2 Grad	-55,3	-7,2	0,0
	1,7 Grad	-69,8	-21,7	-13,0
	1,5 Grad	-79,8	-31,7	-23,0

Emissions-Budgets als Analyseinstrument

Der Klimaschutz-Korridor plus Zielfeld (KKZ) und die gebäudebezogenen Emissions-Budgets (gEB) stellen äquivalente und sich ergänzende Analyseinstrumente dar.

Der Verlauf der Minderungspfade im Vergleich zu den Pfaden A-D sowie dem Klimaschutz-Korridor und -Zielfeld ermöglicht einen anschaulichen Überblick mit welchen Strategien die Pariser Klimaziele erreicht werden können. Entscheidend ist hierfür, dass die Treibhausgasemissionen im Zeitverlauf der nächsten Jahrzehnte schnell und durchgreifend zurückgehen. Als Zielwert für das Jahr 2050 kann ein Pro-Kopf-Wert von kleiner gleich 300 kg/Pa Verwendung finden. Dieser liegt in der Mitte des Zielfelds.

Für den Klimaschutz ist jedoch nicht das Erreichen bestimmter Zielwerte ausschlaggebend, sondern die Summe der in Zukunft noch ausgestoßenen Treibhausgasemissionen. Dieser Zusammenhang wird durch die CO₂-Global-Budgets abgebildet. Mit Hilfe der daraus abgeleiteten gebäudebezogenen Emissionsbudgets ergeben sich Schwellenwerte mit Bezug zu bestimmten abgestuften Klimazielvorgaben (z.B. 2,0 Grad mit Eintrittswahrscheinlichkeit von 67 %). Um die auf die Wohnnutzung in Deutschland bezogenen Ziele einzuhalten, dürfen diese Grenzwerte nicht überschritten werden (siehe Tab. 1.1, letzte Spalte). Über das Aufaddieren der Treibhausgasemissionen kann am Ende beurteilt werden, ob ein Szenario und die dort modellierten Handlungsoptionen kompatibel mit den Pariser Klimazielvorgaben sind oder nicht. Dies erfolgt über einen einzigen aussagekräftigen Kennwert. Wichtig ist, dass hierfür lange Zeiträume gewählt werden. In allen Szenarien ist dies die Periode 2020 - 2070 und zusätzlich eine Projektion bis 2100. Dahinter verbirgt sich die Annahme, dass spätestens im Jahr 2100 Klimaneutralität für den Gebäudesektor erreicht wird. Über eine Ampelbewertung (siehe Tab. 1.4 und 1.5) ergibt sich schließlich eine übersichtliche Schnellbewertung für den Vergleich der Szenarien untereinander.

Ampelsystem zur Schnellbewertung von Szenarien

Zur besseren Orientierung wird ein zweistufiges Bewertungssystem zur Schnellbewertung der Szenarien eingeführt (siehe Tabellen 1.4 und 1.5).

Im ersten Schritt wird aufbauend auf den gebäudebezogenen Emissionsbudgets (gEB) aus Tabelle 1.1 eine Ampelbewertung zur Schlüsselgröße der kumulierten Pro-Kopf-Emissionen des deutschen Wohngebäudeparks eingeführt:

- Rot sind gEB-Werte größer gleich 45,1 t/P markiert. Hier wird das Klimaziel von 2 Grad nur noch mit einer Eintrittswahrscheinlichkeit von weniger als 50 % erreicht. Szenarien, die in diese Kategorie eingeordnet werden, haben definitiv keinen Bezug mehr zu den Pariser Klimazielen.
- Gelb sind gEB-Werte zwischen 38,5 und 45,1 t/P markiert. Szenarien, die in diesem Bereich zu liegen kommen, erreichen bestenfalls einen grenzwertigen Klimaschutz. Hier sind Zusatzmaßnahmen notwendig, um einen Paris-kompatiblen Wohnungspark zu erreichen.
- Grün sind gEB-Werte kleiner gleich 38,5 t/P markiert. Szenarien, die in diesem Bereich zu liegen kommen, stehen zunächst nicht in direktem Widerspruch zu den Pariser Klimazielen. Denn einschränkend ist zu sagen, dass hier nur eine Übereinstimmung mit dem 2-Grad-Ziel mit einer Eintrittswahrscheinlichkeit von 67 % gegeben ist. Für einen Paris-kompatiblen Wohngebäudepark wäre eigentlich das 1,7-Grad-Ziel zutreffender.

Aufgrund der genannten Einschränkungen wurde das Ampelsystem um die Option der potenziellen künftigen CO₂-Senken erweitert. Damit wird ein neues Element in Szenarien für den Gebäudesektor eingeführt, für die es bislang kein Vorbild gibt. Die Kriterien basieren auf dem Potenzial für natürliche Senken in Höhe von etwa einer Tonne pro Person und Jahr in Verbindung mit Zeiträumen (eine bzw. drei Generationen, d.h. 30 bzw. 100 Jahre). Dies wird im Folgenden in Abschnitt 1.8 noch näher zu begründen sein.

Beurteilt wird die Höhe der zusätzlich notwendigen CO₂-Senken, um eine Kompatibilität der Szenarien mit den Pariser Klimazielen herstellen zu können. Auch hier wurden aus Gründen einer schnellen Einordnung drei Kategorien gebildet:

- Rot sind notwendige CO₂-Senken größer gleich -25,0 t/P markiert. Das Ausmaß der notwendigen Senken wäre hier derart groß, dass in großem Umfang risikoreiche und kostenintensive technische Senken hinzutreten müssten. Dieses Risiko ist auch deshalb als unverhältnismäßig einzuschätzen, weil die Vermeidung von Treibhausgasemissionen technisch viel einfacher und deutlich kostengünstiger umsetzbar ist.
- Gelb sind notwendige CO₂-Senken zwischen -7,5 und -25 t/P markiert. Der Umfang wird als gerade noch vertretbar eingeschätzt, wobei Werte bis 15 t/P wohl als weniger kritisch angesehen werden können.
- Grün sind notwendige CO₂-Senken kleiner gleich 7,5 t/P markiert. Diese werden als gut umsetzbar eingeschätzt.

Die Anwendung des Ampelsystems für die drei Standardszenarien wird in Tabelle 1.6 demonstriert:

- Den Ausgangspunkt bilden die Treibhausgasemissionen (GWP) der Jahre 2010, 2030, 2050 und 2070, wie sie in den Modellberechnungen der Szenarien ermittelt wurden.
- Im zweiten Schritt werden auf dieser Basis die Pro-Kopf-Emissionen berechnet.
- Aufaddiert ergeben sich daraus die kumulierten Treibhausgasemissionen im Zeitraum 2020 - 2070.
- Unter der Annahme einer Klimaneutralität des Gebäudesektors bis spätestens 2100, kann eine Projektion die bis dahin noch ausgestoßenen Treibhausgasemissionen abschätzen und damit die gesamten künftigen kumulierten Emissionen abgeschätzt werden.

Das Referenzszenario wird in allen Kategorien rot bewertet. Es ist damit durchgehend nicht Paris-kompatibel, selbst wenn man zusätzlich die Potenziale von CO₂-Senken mit einbezieht.

Das Klimaschutzszenario erhält mit 45,0 t/P gerade noch eine gelbe Einstufung bei den gesamten kumulierten Pro-Kopf-GWP-Emissionen. Das 2-Grad-Ziel wäre mit einem Einsatz von CO₂-Senken in Höhe von -7,2 t/P noch erreichbar (Einstufung grün), während das 1,7-Grad Ziel bereits -21 t/P benötigen würde (Einstufung gelb). Das 1,5-Grad-Ziel würde CO₂-Senken von -31,7 t/P erfordern (Einstufung rot), weil dies über dem kritischen Schwellenwert von -25 t/P liegt. Die Beurteilung ergibt eine Einstufung als bedingt Paris-kompatibel.

Das Klimaschutz-Plus-Szenario kann auch ohne CO₂-Senken das gEB für das 2-Grad-Ziel von 38,5 t/P unterschreiten (Einstufung grün). Für das 1,7-Grad-Ziel werden CO₂-Senken von - 13 t/P und für das 1,5-Grad-Ziel von - 23 t/P benötigt (Einstufung gelb). Nur dieses Szenario kann demnach als uneingeschränkt Paris-kompatibel eingestuft werden.

1.7 Erste Zwischenbilanz

Die vorausgegangene Analyse der drei Standardszenarien hat aufgezeigt, dass die beiden Hauptstrategien der Dissertation Energieeffizienz und Ausbau einer erneuerbaren Wärme- und Stromversorgung unverzichtbar sind um eine Einhaltung des wohngebäudebezogenen 2-Grad-Budgets mit hinreichender Sicherheit sicherzustellen. Die notwendigen Strategien werden im Klimaschutz-Plus-Szenario abgebildet. Zu den Kernstrategien zählen (siehe auch Tabelle 1.7):

- Hohe energetische Qualitäten mit der Güte des Passivhausstandards für die Gebäudehüllen im Nebau und bei energetischen Sanierungen im Gebäudebestand.
- Konsequenter Einsatz der Wärmerückgewinnung bei Lüftung und Warmwasser (z.B. Duschwasser-Wärmerückgewinnung).
- Hohe Stromeffizienz in allen Anwendungsfeldern (Haushaltsgeräte, Beleuchtung, Kommunikation, Hilfs- und Gemeinschaftsstrom).

- Berücksichtigung des technologischen Fortschritts in Form von heutigen Prototypen und künftigen Weiter- bzw. Neu-entwicklungen ab 2030.
- Erneuerbare Wärmeversorgung für Neubauten und Ausstieg aus den fossilen Heizsystemen im Bestand.
- Zügiger Aufbau einer erneuerbare Stromversorgung auf nationalen und europäischer Ebene. Der Gebäudesektor muss hierzu einen angemessenen Beitrag leisten (z.B. Nutzung der Dachflächen für Photovoltaik).
- Erhöhung der energetischen Sanierungsrate bis 2030 von heute 1% auf 2 %.
- Beginn der genannten Klimaschutzstrategien ab sofort. Der Übergang von verbindlichen politischen Beschlüssen und deren praktischen Umsetzung darf nicht länger als 2 - 5 Jahre dauern.

Für die Beurteilung der notwendigen Klimaschutzstrategien sind die baukulturellen Eingriffsempfindlichkeiten wie Denkmalschutz und die sonstigen objektiven Hemmnisse, wie z.B. konstruktive Grenzen und Platzprobleme sowie besondere Härten im Einzelfall zu berücksichtigen. Sie haben zur Folge, dass die Anforderungen im Neubau und in voll sanierbaren Bestand entsprechend höher ausfallen müssen.

Die Zwischenbilanz hat ein ernüchterndes Ergebnis: Im Gegensatz zur Dissertation 2011 existieren nun keine Spielräume mehr für abweichende Umsetzungen und mangelnde Beteiligung bei der Umsetzung der Klimaschutzstrategien (vgl. Valentin 2011, S. IV-125 ff.). Dafür sind im Wesentlichen zwei Ursachen verantwortlich:

- 1 Die Klimaschutzziele haben sich wesentlich verschärft. Am deutlichsten wird dies am Zielwert der Pro-Kopf-GWP-Emissionen im Jahr 2050 für Wohnnutzungen. Während dieser Wert in der Dissertation noch bei ca. 600 kg/Pa lag, hat sich dieser Grenzwert gemäß den Anforderungen zur Einhaltung des 2-Grad-Ziels mit 300 kg/Pa innerhalb von 10 Jahren halbiert (7).

- 2 Durch den Stillstand seit 2005 hat sich die Ausgangslage für einen wirksamen Klimaschutz deutlich verschlechtert. Im Jahr 2020 sind die Treibhausgasemissionen zwar coronabedingt gesunken, um im Jahr 2021 wieder zu steigen.

Bis zu dieser Stelle wurde als Klimaschutzziel wahlgemerkt nur das 2-Grad-Ziel als Maßstab herangezogen. In der Pariser Klimavereinbarung wird jedoch ein strengeres Ziel möglichst in Richtung 1,5-Grad gefordert. Dafür stünde nur noch ein deutlich geringeres wohngebäudebezogenen Emissionsbudget von 13,3 t/P zur Verfügung. Die Zwischenbilanz zeigt auf, dass dieses Ziel wegen der nun stark verzögerten Umsetzung mit den beiden klassischen Strategien Energieeffizienz und Umbau der fossilen Energiesysteme zu einer erneuerbaren Vollversorgung wohl nicht mehr erreicht werden kann.

1.8 CO₂-Senken und sonstige Ausgleichsmaßnahmen

Im IPCC-Sachstandsreport SR6 (IPCC 2018) wurde herausgearbeitet, dass das 1,5-Grad Ziel nur noch unter Einbeziehung von CO₂-Senken eine Umsetzungsperspektive hat. In dieser Veröffentlichung wurden zum ersten Mal CO₂-Global-Budgets mit Bezug zu den Pariser Klimazielen veröffentlicht (8).

Als CO₂-Senken werden Maßnahmen zusammengefasst, bei denen Kohlendioxid aus der Atmosphäre oder aus Energie- bzw. Industrieprozessen entnommen und dauerhaft in sicheren Lagern gespeichert wird. Dabei ist besondere Sorge dafür zu tragen, dass eine versehentliche Freisetzung zuverlässig verhindert wird. Bei den CO₂-Senken wird zwischen natürlichen und technischen Senken unterschieden:

- Natürliche Senken basieren auf der Kohlenstoffeinspeicherung in den biologischen Systemen und verstärken diese mit bewussten Eingriffen (z.B. Neuauforstung, Wiedervernässung von ehemaligen Mooren, Einbringung von Bio-kohle in Böden, Holzbau anstelle thermischer oder stoffli-

- chen Nutzung von Holz in kurzlebigen Produkten).
- Technische Senken sind ingenieurgestützte Maßnahmen, bei denen Kohlendioxid und andere Treibhausgase aus Energie- oder Industrieprozessen abgeschieden, verflüssigt transportiert und in sicheren geologischen Lagern verpresst wird (CCS). Auch sonstige Strategien, die unter z.B. unter den Oberbegriffen „Geoengineering“ oder „Direct Air Capture“ subsummiert werden, zählen hierzu (9).

Natürliche Senken generieren i.d.R. einen Zusatznutzen (z.B. Steigerung des Humusgehaltes und der Feuchtresilienz der Böden, stoffliche Nutzung, Verbesserung von Regional- und Kleinklima). Technischen Senken sind als sog. „end of the pipe“-Technologien ohne Zusatznutzen, kostenintensiv und zu meist mit hohen Risiken verbunden. Für den Einsatz von CO₂-Senken im Wohngebäudepark sind daher in den Szenarien nur natürlichen Senken vorgesehen. Eine grobe Schätzung ergibt ein Potential von einer Tonne Kohlendioxid pro Person und Jahr, wovon für die Wohnnutzungen ein Viertel in Anspruch genommen werden kann.

Technische Senken im Gebäudesektor kommen hingegen bei großtechnischen Industrieprozessen für Baumaterialien in Betracht, z.B. bei der Zement- und Stahlherstellung (10).

1.9 Modellierung weiterer Szenarienfamilien und deren Auswertung

Als Konsequenz aus der nun deutlich schwierigeren Ausgangslage im Vergleich zur Dissertation 2011 wurden neue Szenarienfamilien auf Basis der bisher vorgestellten Standardszenarien modelliert. Einerseits war eine Fortsetzung der problematischen Umsetzungsbedingungen, wie sie die bisherige Entwicklung geprägt haben, zu untersuchen. Andererseits sollen neue Handlungsoptionen ausgelotet werden, die eine schnellere und tiefere Umsetzung ermöglichen würden.

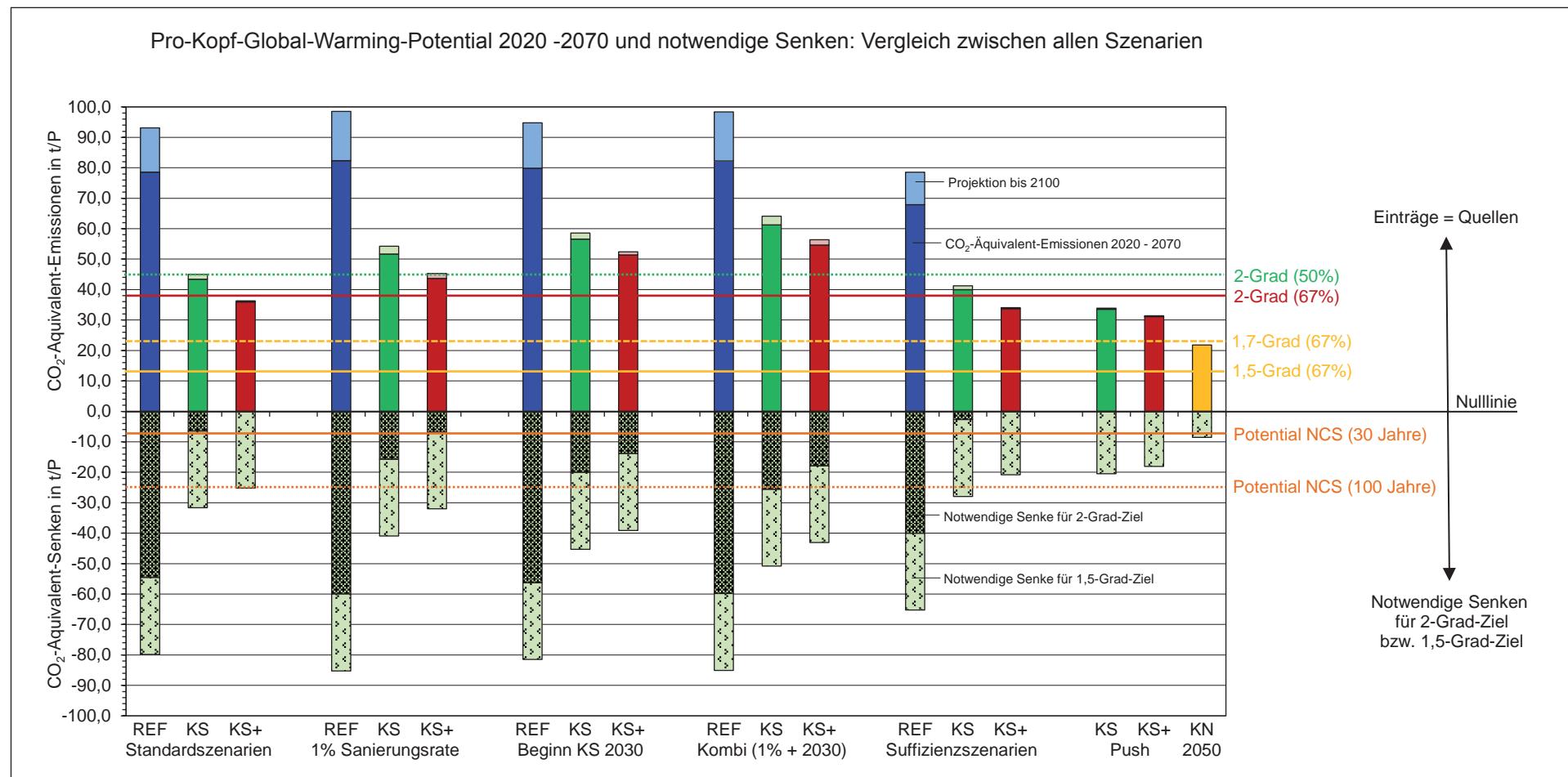
Szenarienfamilie / Kurzbeschreibung	Szenario	Kumulierte Pro-Kopf-GWP-Emissionen (t/P)				Notwendiger Ausgleich mit CO ₂ -Senken (t/P)	
		bis 2030	bis 2050	bis 2070	gesamt	2-Grad	1,7 Grad
Standard Konsequente Anwendung des Kopplungsprinzips (Sanierungsrate 2 %) Klimaschutzstrategien beginnen 2020 / ab 2030 vollumfängliche Umsetzung Unterscheidung der Anforderungen im Bestand (voll-/ bedingt sanierbar) In allen Szenarien werden die Qualitäten im Betrachtungszeitraum stetig verbessert Suffizienzstrategien kommen nicht zum Einsatz	Referenz	23,3	55,9	78,6	93,1	-54,6	-69,8
	Klimaschutz	20,3	37,7	43,4	45,0	-6,5	-21,7
	Klimaschutz-Plus	19,3	32,8	35,9	36,3	0,0	-13,0
1 % Sanierungsrate wie Standard, jedoch durchgängig nur 1 % Sanierungsrate bei energetischen Modernisierungen	Referenz	23,4	57,5	82,4	96,4	-60,0	-73,1
	Klimaschutz	21,0	43,0	51,7	54,6	-15,7	-31,3
	Klimaschutz-Plus	20,0	38,1	43,7	45,3	-6,8	-22,0
Beginn Klimaschutz 2030 wie Standard, jedoch Beginn gebäudebezogener Klimaschutzmaßnahmen erst ab 2030	Referenz	23,5	56,9	79,9	95,0	-56,3	-71,7
	Klimaschutz	23,4	49,4	56,6	58,6	-20,1	-35,3
	Klimaschutz-Plus	23,4	46,7	51,4	52,4	-13,9	-29,1
Kombination (1% Sanierungsrate / Beginn Klimaschutz 2030) wie Standard, jedoch Sanierungsrate 1 % und Beginn Klimaschutzmaßnahmen erst ab 2030	Referenz	23,5	57,6	82,2	98,4	-59,9	-75,1
	Klimaschutz	23,4	51,4	61,3	64,1	-25,6	-40,8
	Klimaschutz-Plus	23,4	47,9	54,6	56,4	-17,9	-33,1
Suffizienz wie Standard, jedoch konsequente Verfolgung von Suffizienzansätzen hinsichtlich Wohnfläche / Person, Raumtemperatur, WW-Anwendungen und Stromanwendungen	Referenz	22,2	50,4	67,9	78,6	-40,1	-55,3
	Klimaschutz	19,6	35,3	40,0	41,2	-2,7	-20,9
	Klimaschutz-Plus	18,7	31,2	33,8	34,1	0,0	-10,8
Push / Klimaneutral 2050 wie Standard, jedoch konsequenter Einsatz der marktbesten Komponenten Beim Szenario KN 2050 werden ab 2030/40 zusätzlich CO ₂ -Senken eingesetzt	Push	18,4	30,9	33,5	33,9	0,0	-10,6
	Push-Plus	17,9	28,9	31,1	31,4	0,0	-8,1
	KN 2050	17,8	25,3	23,3	19,5	0,0	0,0

Tabelle 1.7: Kurzbeschreibung der Szenarienfamilien mit Angabe der kumulierten Pro-Kopf-GWP-Emissionen seit 2020 und der notwendigen CO₂-Senken zum Erreichen des 2,0- und 1,7-Grad-Ziels

In Tabelle 1.7 findet sich eine Kurzbeschreibung der Szenarienfamilien nebst Zusammenstellung der Ergebnisse in Form der zuvor erläuterten zweistufigen Ampelbewertung. Als Kriterien kommen primär die kumulierten Treibhausgasemissionen seit 2020 und sekundär die Höhe des notwendigen Ausgleichs mit CO₂-Senken differenziert für das 2,0- und das 1,5-Grad-Ziel zum Einsatz. Von den insgesamt 18 modellierten Szenarien können zunächst nur fünf das Gebäudebezogene Emissions-

budget für das 2-Grad-Ziel einhalten. Darunter befinden sich ausschließlich Klimaschutz-Plus- und die noch weitergehenden Push-Szenarien. Bezieht man zusätzlich die Potenziale von CO₂-Senken zur Einhaltung des 2-Grad-Ziels mit ein, erweitert sich der Kreis um einige Klimaschutzszenarien. Unter ungünstigen Randbedingungen (Kombination 1 % Sanierungsrate + Beginn Klimaschutz 2030) ist jedoch bei ihnen selbst der Ausgleich mit CO₂-Senken als grenzwertig einzustufen.

Abbildung 1.20:
Gegenüberstellung der kumulierten Pro-Kopf-GWP-Emissionen seit 2020 für alle 18 Szenarien aus den sechs Szenarienfamilien. Die Referenzszenarien sind blau, die Klimaschutzszenarien grün und die Klimaschutz-Plus-Szenarien rot markiert. Zusätzlich sind die notwendigen CO₂-Senken zum Erreichen des 2,0 und 1,5-Grad-Ziels angegeben.



1.10 Erweitertes Fazit

Die Analyse aller 18 Szenarien ermöglicht nun ein abschließendes Fazit.

Referenzszenarien

Alle Referenzszenarien (in Abbildung 1.20 blau markiert) verfehlten das wohngebäudebezogene 2-Grad-Budget unabhängig von den sonstigen Randbedingungen erheblich. Selbst mit einem umfangreichen Einsatz von CO₂-Senken ließe sich dies nicht ausgleichen. Folglich sind in der Ampelbewertung die Referenzszenarien in sämtlichen Kategorien rot markiert.

- Eine Strategie des „Weiter so“ - auch nur in Teilbereichen - ist aus Klimaschutzsicht hoch problematisch. Dies führt zu derart hohen Energiebedarfen und Treibhausgasemissionen, dass mit ihnen das 1,7-Grad-Budget von 93 t/P für Deutschland insgesamt überschritten würde. Damit würde alleine dieser Sektor das nationale Klimaziel gefährden.
- Die Einbeziehung umfangreicher Suffizienzstrategien führt zwar zu einer spürbaren Reduktion der kumulierten GWP-Emissionen um 15,6 % gegenüber den Standardannahmen auf 78,6 t/P. Damit wird das 2-Grad-Budget immer noch um einen Faktor zwei überschritten. Selbst auf dieser Basis kann daher kein belastbarer Klimaschutzpfad begründet werden.
- Die Referenzszenarien können somit unabhängig von den Randbedingungen in keinem Fall als Paris-kompatibel eingestuft werden.

Klimaschutzszenarien

Die Klimaschutzszenarien (in Abbildung 1.20 grün markiert) verfehlten das 2-Grad-Budget mehr oder weniger stark. Jedoch lassen sich in einigen Fällen mit Hilfe von CO₂-Senken der notwendige Ausgleich zur Zielerfüllung herstellen. In der Ampelbewertung zeigt sich dies in einem gemischten Bild der Beurteilung je nach Szenario und Kategorie. Hier wird deutlich, welch große Bedeutung die Umsetzungsbedingungen für eine erfolgreiche Klimaschutzentwicklung spielen.

- Bei ungünstigen Randbedingungen (z.B. 1% Sanierungsrate, Beginn gebäudebezogener Klimaschutzmaßnahmen erst 2030 sowie der Kombination von beidem) kann nicht einmal das grenzwertige 2-Grad-Budget mit 50 % Eintrittswahrscheinlichkeit unterschritten werden. Mit dem Einsatz umfangreicher CO₂-Senken wäre das 2-Grad-Budget gerade noch einhaltbar.
- Unter günstigen Randbedingungen, wie in den Standard- und Suffizienzszenarien modelliert, kann wenigstens das 2-Grad-Budget mit einer Eintrittswahrscheinlichkeit von 50 % eingehalten werden. Sowohl das 2,0- als auch das 1,7-Grad-Budget ist durch den Einsatz von CO₂-Senken noch erreichbar.
- In der Gesamtbeurteilung können die Klimaschutzszenarien als nur bedingt Paris-kompatibel eingestuft werden.

Klimaschutz-Plus-Szenarien

Bei den Klimaschutz-Plus-Szenarien (in Abbildung 1.20 rot markiert) kann durch den Einsatz von technologischen Verbesserungen bei allen Bau- und Technikkomponenten ab 2030 nochmals eine spürbare Reduktion der kumulierten GWP-Emissionen von 6,2 - 9,3 t/P erreicht werden. Immer noch zeigt sich ein gemischtes Bild in der Ampelbewertung jedoch auf vorteilhafterem Niveau:

- Ungünstige Randbedingungen wirken sich auch hier kritisch aus. Jedoch ist ein Ausgleich mit CO₂-Senken zur Einhaltung des 2-Grad-Budgets durchgängig möglich.
- Dabei wirkt sich ein verspäteter Beginn ab 2030 deutlich ungünstiger aus, als eine Fortsetzung der derzeitigen Sanierungsrate von nur 1%.
- Unter den günstigen Randbedingungen der Standard- und Suffizienzszenarien wird das 2-Grad-Budget auch ohne CO₂-Senken eingehalten. Das 1,7-Grad-Budget kann unter Einsatz von CO₂-Senken noch erreicht werden.
- In der Gesamtbeurteilung können die Klimaschutz-Plus-Szenarien als Paris-kompatibel eingestuft werden. Unter ungünstigen Randbedingungen gilt dies nur eingeschränkt.

Push-Szenarien

Erst in den Push-Szenarien ist eine vollumfängliche Einhaltung der Pariser Klimaziele gegeben. Sie stellen eine Weiterentwicklung der Klimaschutz-Plus-Szenarien dar. Dies wird durch den konsequenten und unverzüglichen Einsatz der heute marktbesten Komponenten und einen besonders schnellen Umbau der Energiesysteme zu einer vollständig erneuerbaren Versorgung erreicht. Eine derartige Transformation ist ohne Vorbild und stellt somit einen sehr optimistischen Zukunftsentwurf dar:

- Das 2-Grad-Budget kann problemlos unterschritten werden, so dass mit einem begrenzten Einsatz von CO₂-Senken auch das 1,7 Grad-Budget eingehalten werden kann.
- Im Push-Plus-Szenario kommen zusätzlich Suffizienzmaßnahmen zum Einsatz. Die kumulierten GWP-Emissionen sinken dadurch nochmals um 7 %.
- Mit dem Szenario „Klimaneutralität 2050“ kann das 1,7-Grad-Budget eingehalten werden. Dafür ist es notwendig, bereits ab 2030 zusätzlich CO₂-Senken einzusetzen. Diese summieren sich bis 2070 auf minus 8 - 10 t/P.

Einfluss von Umsetzungsbedingungen

Die methodische Funktion der neu gebildeten Szenarienfamilien besteht vor allem darin, den Einfluss verschiedener Umsetzungsbedingungen auf die kumulierten GWP-Emissionen prüfen und quantifizieren zu können (siehe Tabelle 1.8).

Drei Szenarienfamilien beschäftigen sich mit ungünstigen Randbedingungen, die Tendenzen, wie sie in der Vergangenheit zu beobachten waren, fortsetzen:

- Eine Sanierungsrate von 1% anstelle 2%
- Beginn gebäudebezogener Klimaschutzes erst 2030
- Kombination der beiden o.g. Bedingungen

Im Referenzszenario wirken sich diese ungünstigen Randbedingungen nur in geringem Maße aus (gEB plus 4% - 6 %). Weitaus kritischer zu bewerten sind diese schwierigen Umset-

	REF	KS	KS +
1 % Sanierungsrate	104%	121%	125%
Beginn Klimaschutz 2030	102%	130%	144%
Kombination 1% SR + Beginn KS 2030	106%	142%	155%
Suffizienz	84%	92%	94%
Push	k.A.	k.A.	93%
Push-Plus	k.A.	k.A.	87%
Klimaneutral 2050	k.A.	k.A.	54%

Tabelle 1.8:
Unterschiede zwischen den kumulierten GWP-Emissionen in den Standardszenarien im Vergleich zu denen in den neuen Szenarienfamilien in Prozent. Damit kann der Einfluss der Umsetzungsbedingungen quantifiziert werden.

Legende:
REF: Referenzszenario
KS: Klimaschutzszenario
KS +: Klimaschutz-Plus-Szenario
k.A.: keine Angabe möglich

zungsbedingungen in den Klimaschutzszenarien, indem die kumulierten GWP-Emissionen dort um 21 - 55 % ansteigen.

In den Suffizienzszenarien werden klimarelevante Verhaltensänderungen (Absenkung der Raumtemperatur um 2 Kelvin, Reduzierung Warmwasserverbrauch und Einsatz von Stromgeräten in den Haushalten) sowie ein geringerer Anstieg der Wohnflächen als in den Standardszenarien modelliert. Die Auswirkungen im Referenzszenario sind mit minus 16 % weit aus größer als in den Klimaschutzszenarien mit minus 6 - 8 %. Der Grund hierfür liegt darin, dass in energieeffizienten Gebäuden die zugleich erneuerbar versorgt werden, eine hohe thermische Behaglichkeit, Komfortansprüche und konsumbedingte Ansprüche nicht grundsätzlich im Widerspruch zu den Klimaschutzstrategien stehen. Das kann auch als ausgeprägte Resilienz der Kernstrategien Effizienz und Erneuerbare interpretiert werden. Gleichwohl wird sichtbar, dass die Suffizienzstrategien besonders in der Anfangsphase einen substanziellen Beitrag zum Klimaschutz für Wohngebäude leisten können.

Auch wenn die Minderungsbeiträge der Push-Szenarien gegenüber den Standardszenarien mit minus 7 - 13 % nicht besonders groß erscheinen mögen, leisten sie den entscheidenden Zusatzbeitrag um die Anforderungen eines Paris-kompatiblen Umbaus des Wohngebäudeparks vollumfänglich zu er-

füllen. Dies zeigt auf, dass die Kernstrategien Effizienz und Erneuerbare bei unverzüglichem Beginn und konsequenter Umsetzung in Verbindung mit dem künftigen technologischen Fortschritt ein besonders zuverlässiges und robustes Konzept darstellen. Von strategischer Bedeutung hierbei ist, dass keine CO₂-Senken erforderlich, um das 2-Grad-Budget zuverlässig einzuhalten.

Das Szenario „Klimaneutral 2050“ unterscheidet sich von den Push-Szenarien dadurch, dass die CO₂-Senken bereits ab 2030 zum Einsatz kommen, mit dem Ziel das 1,7-Grad-Budget zu unterschreiten. Damit werden schließlich die Pariser Klimaziele im Wohngebäudepark vollumfänglich eingelöst.

1.11 Handlungsempfehlungen

Durch die hoch differenzierte Modellierung der Szenarien und die dadurch mögliche feinkörnige Auswertung können nun einerseits Handlungsempfehlungen formuliert und darauf aufbauend Klimaschutzstandards für Wohngebäude in Deutschland definiert werden.

1 Paris-kompatibler Umbau des Wohngebäudeparks

Der klimagerechte Umbau des Wohngebäudeparks betrifft am Ende jedes Gebäude und alle Handlungsfelder. Ziel ist, im Sinne einer allgemeinen Zukunftsfähigkeit, die energetischen Eigenschaften der Gebäude durchgreifend zu verbessern und im selben Zuge eine erneuerbare Energieversorgung für alle Wohnbauten aufzubauen.

Der alles entscheidende Aspekt ist, dass bei diesem Umbau statt der bisher üblichen mittleren künftig eine **hohe energetische Qualität** zum Einsatz kommt (siehe Tabelle 1.9).

Idealtypische Konzepte für hohe Qualitäten stellen mit erneuerbaren Energien versorgte Passivhäuser im Neubau und Ener-

Phit-Sanierungen im Bestand dar. Beide Konzepte haben sich bereits seit Längerem in der Praxis bewährt und funktionieren zuverlässig. Dies gilt gerade im Hinblick auf die reproduzierbar besonders niedrigen Energieverbräuche bei gleichzeitig moderaten zusätzlichen Investitionskosten. Sie entsprechen bereits heute bei den Lebenszykluskosten dem Kostenoptimum (vgl. EIV 2018, MdE 2014, EIV 2022).

Auch andere Konzepte die hohe Energieeffizienz mit einer erneuerbaren Wärme- und Stromversorgung kombinieren, z.B. KfW-40-EE-, Null- und Plusenergiehäuser sowie mit gewissen Einschränkungen auch Aktiv- und Sonnenhäuser, sind Repräsentanten für hohe Qualität.

Neubau

Die bisherigen gesetzlichen Neubaustandards mit mittlerer Qualität sind durch Standards mit hoher Qualität (Güte KfW-Effizienzhaus-40-EE bzw. Passivhaus) zu ersetzen. Im Luxemburg ist dies bereits im Jahr 2018 erfolgt (vgl. RGD 2016). Darüber hinaus dürfen Neubauten künftig nur noch mit erneuerbaren Heizsystemen versorgt werden. Das Gebäude-Energien-Gesetz (GEG) sollte in diesem Sinne unverzüglich und ohne weiteren Übergangsschritt überarbeitet werden.

Voll sanierbarer Bestand

Auch im vollsanierbaren Bestand ist die Realisierung hoher energetischer Qualitäten der alles entscheidende Konzeptansatz. Zusätzlich ist eine Erhöhung der Sanierungsrate von bislang etwa 1 % auf 2 % bis 2030 wichtig. Im Gegensatz zum Neubau erfolgt die Umsetzung hier im Zuge der sich bietenden Gelegenheiten, die sich durch ohnehin anstehende Instandsetzungen und Erneuerungen ergeben. Neben der schrittweisen Sanierung existiert auch die Möglichkeit umfassender Modernisierungen, die idealerweise mit Nachverdichtungen gekoppelt sind. Aufgrund der vorgegebenen Konstruktionen lassen sich nicht alle Anschlusspunkte optimal im Hinblick auf Luftdichtigkeit und Wärmebrückenvermeidung lösen. Häufige Hemmnisse sind

Mittlere Qualität	Hohe Qualität
Wärmeschutz (U-Werte Gebäudehülle)	Wärmeschutz (U-Werte Gebäudehülle)
Dach: 0,18 - 0,35 W/m ² K	Dach: 0,08 - 0,12 W/m ² K
Außenwand: 0,25 - 0,40 W/m ² K	Außenwand: 0,10 - 0,15 W/m ² K
Kellerdecke/Bodenplatten: 0,30 - 0,50 W/m ² K	Kellerdecke/Bodenplatten: 0,15 - 0,20 W/m ² K
Fenster/Verglasungssysteme: 1,50 - 1,00 W/m ² K (eingebauter Zustand)	Fenster/Verglasungssysteme: 0,60 - 0,85 W/m ² K (eingebauter Zustand)
Lüftung	Lüftung
Fensterlüftung + evt. Abluftanlagen	Lüftung mit Wärmerückgewinnung + Fensterlüftung
Wärmeversorgung	Wärmeversorgung
Fossile und teiffossile Systeme (z.B. Gasheizungen + Solarthermie/PV)	Erneuerbare Systeme (z.B. Wärmepumpen/Fernwärme/Biomasse*)
Stromeffizienz	Stromeffizienz
Ausstattung mit marktüblichen Geräten und Komponenten	Ausstattung mit hocheffizienten Geräten und Komponenten
Stromerzeugung	Stromerzeugung
Netzstrom	Netzstrom + Eigenerzeugung (Gebäude / Region / global)

Tabelle 1.9:
Gegenüberstellung der Eigenschaften und Anforderungen zwischen mittlerer und hoher Qualität. Für die Klimaschutzstrategien im Gebäude-sektor ist entscheidend, anstelle der bislang üblichen mittleren Qualität künftig eine hohe Qualität bei allen Neubauten und energetischen Modernisierungen im Bestand einzusetzen.

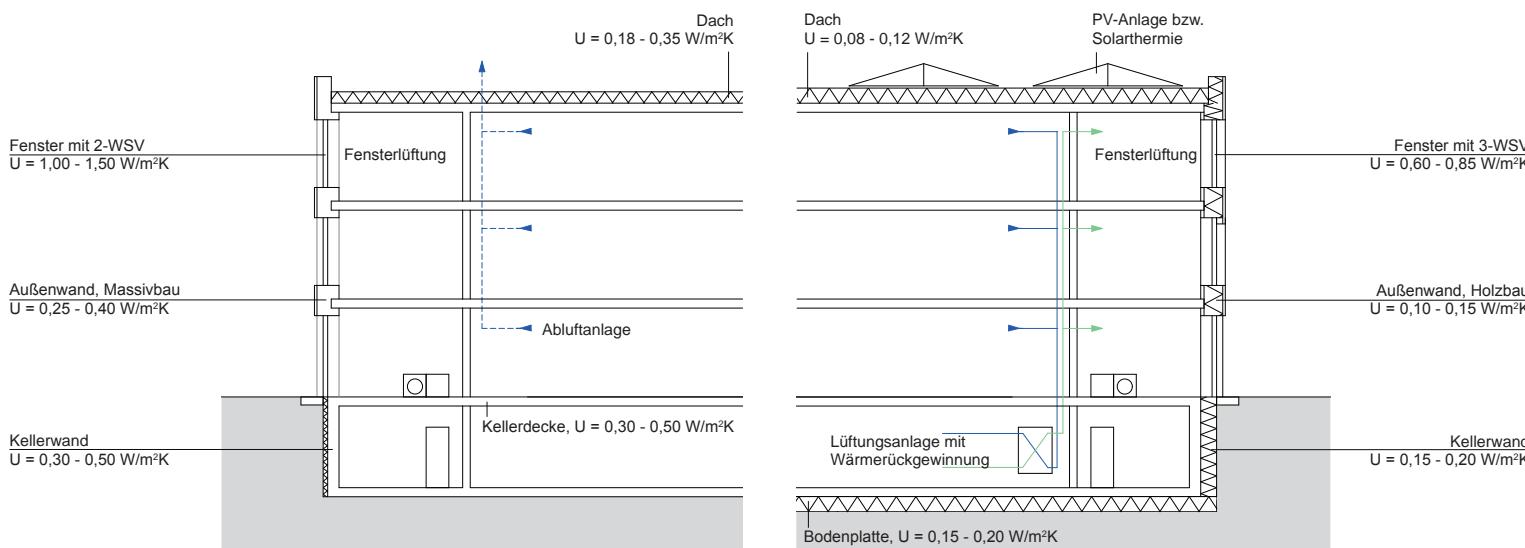


Abbildung 1.21:
Gegenüberstellung der Eigenschaften und Anforderungen zwischen mittlerer und hoher Qualität an einem schematischen Gebäudeschnitt.

ferner Platzprobleme (z.B. Kellerdämmung) sowie statische, wirtschaftliche und baupraktische Probleme.

Bedingt sanierbarer Bestand

Nochmals anders gelagert sind die Bedingungen im bedingt sanierbaren Bestand. Hier spielt zusätzlich der Aspekt der Eingriffsempfindlichkeit eine Rolle, z.B. baukulturell schützenwerte Fassaden und Innenraumausstattungen. Dadurch lassen sich die energetischen Maßnahmen bisweilen gar nicht oder nur in abgewandelter Form umsetzen. Ein typischen Beispiel ist die Ausführung einer Innen- anstelle einer Außendämmung.

Sonderstellung der Baudenkmale

An Baudenkmale können keine vorgegebenen energetischen Anforderungen gestellt werden. Der Erhalt der Bausubstanz hat Vorrang. Bauliche Maßnahmen können nur in Abstimmung mit den Denkmalschutzbehörden ausgeführt werden. Das erfordert immer einzelfallbezogene Konzepte.

2 Trägheit des Wohngebäudeparks

Der Wohngebäudepark ist ein besonders trüges System, in dem Veränderungsprozesse sehr langsam ablaufen. Wegen der langen Nutzungsdauern der Bau- und Technikkomponenten können sich hier neue Energiestandards und erneuerbare Energiesysteme nur langsam im Gesamtbestand durchsetzen. Das hat vielfältige Konsequenzen für eine erfolgreiche Umsetzung der Klimaschutzstrategien:

- Eine Erhöhung der Sanierungsrate von 1% auf 2 % bis 2030 ist sinnvoll und notwendig, auch um den Werterhalt der Gebäude zu sichern (Auflösung Sanierungsstau).
- Eine Erhöhung deutlich über 2 % hinaus ist jedoch kontraproduktiv (Zerstörung von funktionsfähigen Konstruktionen und Technikaggregaten mit ihren Restwerten)
- Wegen der ausbleibenden Erfolge beim Klimaschutz bei den Wohnnutzungen während der letzten 15 Jahre ist nun ein sofortiger Beginn der gebäudebezogenen Klimaschutzstrategien mit hoher Qualität erforderlich. Jede weitere

Verzögerung über das Jahr 2025 hinaus beinhaltet ein sehr hohes Risiko, das 2-Grad-Budget für Wohngebäude nicht mehr einhalten zu können.

- Durch technische Verbesserungen können die Neubauqualitäten und die Sanierungstiefe bei energetischen Modernisierungen auch in Zukunft weiter gesteigert werden.
- Suffizienzstrategien bilden gerade für die Anfangsphase kurzfristig erschließbare Potenziale, den Energiebedarf und die Treibhausgasemissionen abzusenken.

3 Einbeziehung künftigen technologischen Fortschritts

Um das 2-Grad-Budget mit hinreichender Sicherheit zu erreichen, sind ab 2030 zusätzlich auch künftige technologische Fortschritte in die Klimaschutzstrategien miteinzubeziehen. Das betrifft sämtliche Bau- und Technikkomponenten, z.B. Fenster und Verglasungen, Hüllkonstruktionen und deren serielle Fertigung, Lüftungsanlagen und -konzepte sowie die erneuerbaren Heizsysteme (z.B. Wärmepumpen, Fernwärme) und sämtliche stromgestützten Anwendungen und Versorgungslösungen. Dieses Forschungsfeld sollte intensiv gefördert werden, um den politisch beschlossenen Klimaschutz und seine Verknüpfung mit dem Ziel der Energieautonomie gerade noch in den vorgegebenen engen Zeitrahmen realisieren zu können.

Die dadurch ausgelösen Weiterentwicklungen von Bau- und Techniksystemen sowie der zugeordneten Planungskonzepte bilden den Bezugsmaßstab, um die Anforderungen an Wohngebäude und deren Versorgungssysteme auch in den nächsten Jahrzehnten weiter forschreiben zu können, um damit die Markteinführung und breite Anwendung zu ermöglichen.

4 Klimagerechtes Nutzerverhalten und Änderungen der Konsummuster

Unter dem Überbegriff Suffizienzstrategien werden Maßnahmen zusammengefasst, bei denen individuelle Motivation und Freiwilligkeit den Ausgangspunkt für Emissionsminderungen bilden. Hierzu zählen ein klimaschonendes Nutzerverhalten

(z.B. Absenkung der mittleren Raumtemperatur in der eigenen Wohnung) und Änderungen von Konsummustern (Akzeptieren kleinerer Wohnungsgrößen, reduzierte Ausstattungen). Als systematische Strategie sind diese Verhaltensänderungen auf Anreize und Preissignale angewiesen (z.B. hoher CO₂-Preis mit vollständiger Pro-Kopf-Rückvergütung). Die Szenarien zeigen, dass vor allem in der Anfangsphase bis 2040 dadurch ein zügig umsetzbarer Beitrag zur Emissionsminderung erzielt werden kann.

5 CO₂-Senken und sonstige Klimaausgleiche

Ein wichtiges Ergebnis der Aktualisierung der Szenarien ist, dass als neue Klimaschutzmaßnahme bereits mittelfristig die Bildung von Kohlenstoffsenken notwendig ist, um ein Paris-kompatibles Wohnen zu erreichen. Dies ist vor allem dann erforderlich, wenn anstelle des wohngebäudebezogenen 2-Grad- das 1,7-Grad-Budget eingehalten werden soll. Im Klimaschutz-Plus-Szenario wären hierfür zusätzlich CO₂-Senken im Umfang von 0,7-1,0 Gt bzw. 10-13 t/P nachzuweisen.

Für Wohnbauten ist der Einsatz von Holzbauweisen in Verbindung mit nachwachsenden Baustoffen wirklich naheliegend (vgl. Schellnhuber et al. 2020). Auch andere Verfahren wie z.B. die Erzeugung von Biokohle in Holz-Heizkraftwerken und ihre Einbringung in Böden oder die Wiedervernässung von Mooren sind als CO₂-Senken wirksam. Sie sind als negative Emissionen dann anrechenbar, wenn sie in Verbindung mit baulichen Maßnahmen oder der Gebäudenutzung selbst direkt umgesetzt oder an anderer Stelle mitfinanziert werden.

Für den Nachweis sind weitere Randbedingungen einzuhalten (z.B. Anrechenbarkeit der CO₂-Senken unter Berücksichtigung der Holzentnahme aus dem Wald, nachhaltige Waldbewirtschaftung, Nutzung als langlebiger Baustoff anstelle thermischer Nutzung, langfristige Sicherung bzw. Verhinderung einer unfreiwilliger Freisetzung des im Boden, Produkten oder geologischen Lagern eingespeicherten CO₂).

6 Dekarbonisierung der Materialbereitstellung und Bauprozesse

Die Betrachtung der Energieaufwendungen und Treibhausgasemissionen durch Baumaterialien und Bauprozesse war nicht Bestandteil der Szenarienstudien. Diese ist jedoch derzeit Ausgangspunkt für intensive Diskussionen um die Themen graue Energie, Ökobilanzierung von Gebäuden und Kreislaufwirtschaft. Belastbare Aussagen könnten nur auf der Basis von Szenarien zur künftigen Entwicklung der Herstellung, Verarbeitung, Instandsetzung, Erneuerung und des Rückbaus von Baukonstruktionen und Haustechnik erfolgen. Bislang fehlen jedoch Studien, die die künftige Dynamik der Herstellungs- und Bauprozesse unter Berücksichtigung der Transformation hin zu einer klimaneutralen Wirtschaft abbilden. Die bislang vorliegenden Untersuchungen enthalten daher oftmals Fehlschlüsse und sind zur Begründung belastbarer Klimaschutzstrategien in diesem wichtigen Handlungsfeld nicht geeignet. Neue seriöse Forschungsarbeiten sind notwendig, um die bislang ungeklärten Bilanzierungs- und Umsetzungsfragen zu klären (11).

An dieser Stelle können daher vorerst nur allgemein gehaltene Einschätzungen gegeben werden:

- Der Umbau zu einem Paris-kompatiblen Wohngebäudepark ist zumindest vorübergehend mit einem Anstieg des Herstellungsenergieaufwandes und der materialbedingten Treibhausgasemissionen verbunden. Hintergrund sind die zusätzlichen Materialaufwendungen für eine hohe Energieeffizienz, erneuerbare Heiz- und Stromsysteme sowie die Erhöhung der Sanierungsrate von 1% auf 2 %.
- Der Materialeinsatz für die Ausführung in hoher anstelle mittlerer Qualität wird durch die anschließenden Energie- und Emissionsminderungen bei weitem übertroffen (vgl. BBSR 2020, S. 27). Entscheidend hierfür sind die langen Nutzungsdauern der Bau- und Technikkomponenten.
- Der Umbau der Wirtschaft in Richtung Klimaneutralität wird auch die Herstellung von Baumaterialien, Haustechnik und alle Bauprozesse umfassen. An erster Stelle

ist hierbei der Ausbau der erneuerbaren Energien und Effizienzsteigerungen bei allen Produktions- und Verarbeitungsprozessen wirksam. Zur Reduzierung von prozessbedingten Emissionen z.B. bei der Zement- und Stahlproduktion werden künftig technische Senken (CCS) und/oder erneuerbarer Wasserstoff Anwendung finden.

- Der Aufbau einer Kreislaufwirtschaft im Baubereich ist ein langwieriger Vorgang, der alle Herstellungs- und Bauprozesse betreffen wird. Grundlage hierfür ist ein neues Planungsverständnis im Sinne eines „Zirkulären Bauens“.
- Der Gebäudeparks dient bei dieser Interpretation als Materiallager und beinhaltet künftig auch die Bildung von CO₂-Senken in langlebigen Baukonstruktionen.
- Mit einem Anteil von mehr als 4/5-tel dominiert der Energieeinsatz in der Nutzungsphase die Treibhausemissionen im Gebäudesektor. Die Baumaterialien beanspruchen davon hingegen weniger als 20% (siehe Abb. 1.1 und 1.2).
- Konzepte zur Dekarbonisierung der Materialbereitstellung und Bauprozesse müssen daher zwingend mit der Ausführung der Hüllkonstruktionen, Lüftungskonzepte und Energieversorgung mit hohen Qualitäten kombiniert werden.
- Idealerweise erfolgt dies mit Material- und emissionsarmen Bau- und Technikprodukten und wird mit der Bildung von CO₂-Senken gekoppelt, z.B. Holzbau mit Dämmung aus schnell nachwachsenden Rohstoffen (z.B. Stroh, Hanf).

Fazit

Die Hauptstrategien klimagerechten Wohnens können auf Basis der Szenarienauswertung und der daraus abgeleiteten Handlungsempfehlungen in fünf Punkten zusammengefasst werden:

- 1 Konsequente Steigerung der Energieeffizienz
- 2 Einsatz erneuerbarer Energien und Rohstoffe
- 3 Dekarbonisierung der Baumaterialien und Bauprozesse
- 4 Einsatz von Kohlenstoffsenken
- 5 Klimagerechte Konsum- und Verhaltensweisen

1.12 Strategische Fragen und Analysen

Der Wohngebäudepark wird in dieser Studie als integraler Bestandteil des Energiesystems interpretiert. Zusätzlich existieren vielfache Beziehungen und Abhängigkeiten zu anderen Sektoren. Die sich daraus ergebenden strategischen Fragen sollen nun in diesem abschließenden Abschnitt der Zusammenfassung behandelt und erste Antworten gegeben werden.

„UND“ anstelle „ODER“-Strategien

Zentrales Ergebnis der Untersuchung ist, dass es vor allem darauf ankommt, die einzelnen Klimaschutzstrategien sinnvoll und effektiv miteinander zu kombinieren. Ein gegeneinander Ausspielen der zuvor genannten Klimaschutzstrategien, insbesondere der beiden Hauptstrategien Effizienz und Erneuerbare hat zur Konsequenz, dass die nationalen Klimaziele Deutschlands alleine im Sektor der Wohnnutzungen in Frage gestellt werden können.

Das Dilemma der mittleren Qualität

Werden, wie dies in der Referenzentwicklung der Fall ist, bei Neubauten und den energetischen Modernisierung im Bestand nur mittlere Qualitäten eingesetzt, so produziert dies das „Dilemma der mittleren Qualität“:

- Mit den mittleren Qualitäten, wie sie im derzeit noch gültigen GEG festgelegt sind und das Baugeschehen bestimmen, können die deutschen Klimaschutzziele nicht erreicht werden.
- Wegen der langen Nutzungsdauern von 30 - 80 Jahren bei den Bau- und Technikkomponenten handelt es sich in erster Linie um verpasste Gelegenheiten, die so schnell nicht wiederkehren.
- In zweiter Linie stellt sich ein sog. „Lock-in-Effekt“ ein. Auch nach 20, 40 oder 60 Jahren ist keine Wirtschaftlichkeit für energetische Verbesserungen von mittlerer auf hohe Qualität zu erwarten.
- Gründe hierfür sind der abnehmende Grenznutzen bei

- Effizienzmaßnahmen (z.B. im Hinblick auf Dämmstärken und Wärmeverluste) und dass die Energiepreise auf Dauer nicht beliebig ansteigen werden (z.B. Deckelung auf dem Preisniveau erneuerbarer Versorgungslösungen).
- Nicht zuletzt bleiben die mittleren Qualitäten oftmals hinter dem wirtschaftlichen Optimum zurück, d.h., bei einer Ausführung mit hoher Qualität wären weitere Gewinne bei den Lebenszykluskosten im Vergleich zur üblichen Ausführung möglich gewesen.
 - Keinesfalls zielführend ist hingegen das zeitliche Vorziehen von Maßnahmen, der vorzeitige Abriss von Bestandsgebäuden und Ersatz mit einem Neubau („Abrissprämie“) oder eine Erhöhung der Sanierungsrate deutlich über 2 % hinaus. Diese Vorschläge stehen im Widerspruch zum Kopplungsprinzip, verursachen hohe Rüstkosten und zerstören funktionierende Konstruktionen und Technik und damit die darin noch vorhandenen Restwerte.
 - Gerade auch im Neubau ist eine hohe Qualität entscheidend für den Klimaschutz. Im entscheidenden Zeitraum bis 2050 gibt es dort keine Gelegenheiten mehr zur Verbesserung der Energieeffizienz und im Hinblick auf einen Wechsel hin zu einer erneuerbaren Wärmeversorgung.

Wenn schon - denn schon

Es kommt daher entscheidend darauf, die sich bietenden Gelegenheiten für die Realisierung hoher Qualität zu nutzen. Auslöser dafür sind in den meisten Fällen nicht der Klimaschutz, sondern ganz andere Motive und Notwendigkeiten. Dies soll ein einigen Beispielen erläutert werden:

- Wenn der Außenputz ohnehin erneuert werden muss, kann in diesem Zuge zugleich ein Außenwärmeschutz aufgebracht werden.
- Am Ende der technischen Nutzungsdauer eines Flachdaches kann der alte Aufbau belassen und mit einer neuen Abdichtung plus Zusatzdämmung (sog. „Duodach“) versehen werden. Anders als in vielen Ökobilanzieren zugrunde gelegt, bleibt der alte Konstruktionsaufbau erhalten, d.h. es

findet kein Rückbau mit anschließender „thermischer Verwertung“ der Dämmung statt.

- Der Austausch von Fenstern ist aus Gründen des Feuchteschutzes ein bauphysikalisch sinnvoller Auslöser für den Einbau einer Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung.
- Sobald bei einer Gasheizung ein Kesselaustausch ansteht, bietet sich die Gelegenheit für den Wechsel zu einem erneuerbaren Heizsystem, z.B. einer Wärmepumpe.
- Eine sowieso anstehende Erneuerung der Dachdeckung wird mit einer Aufdachdämmung und der Installation einer PV-Anlage verbunden.

Überbrückung der Winterlücke

In Ländern mit ausgeprägten Jahreszeiten existiert in einem erneuerbaren Stromsystem das Problem der sog. „Winterlücke“. Während im Sommer tendenziell Überschüsse produziert werden, treten im Winterhalbjahr regelmäßig Energielücken auf,

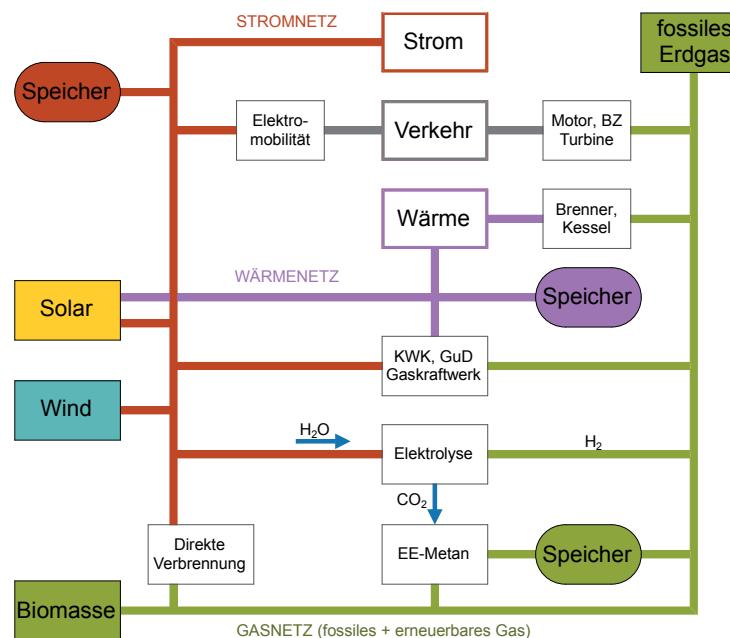
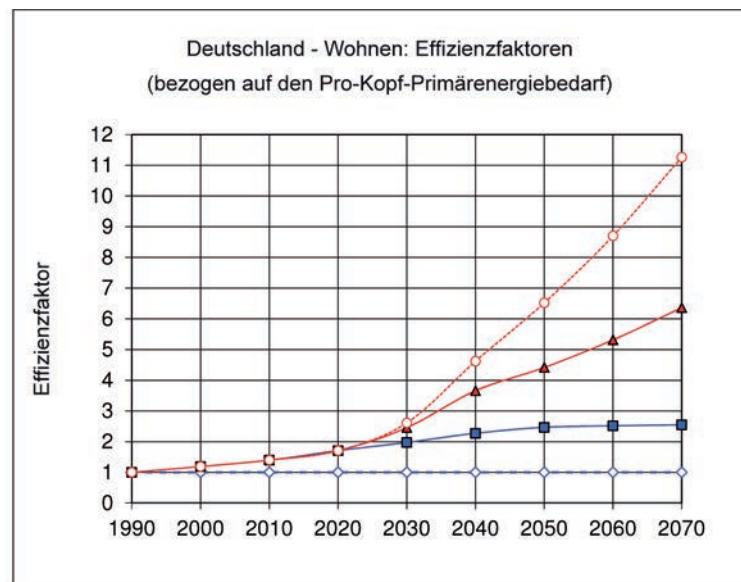


Abbildung 1.22:
Schema des künftigen Energiesystems mit integrierter „Power-to-Gas“-Strategie. Übergangsweise ist der Einsatz von fossilem Erdgas notwendig, das nach und nach durch erneuerbaren Wasserstoff bzw. Methan ersetzt wird. Quelle: abgeändert nach (Sterner et al. 2011, S. 19).

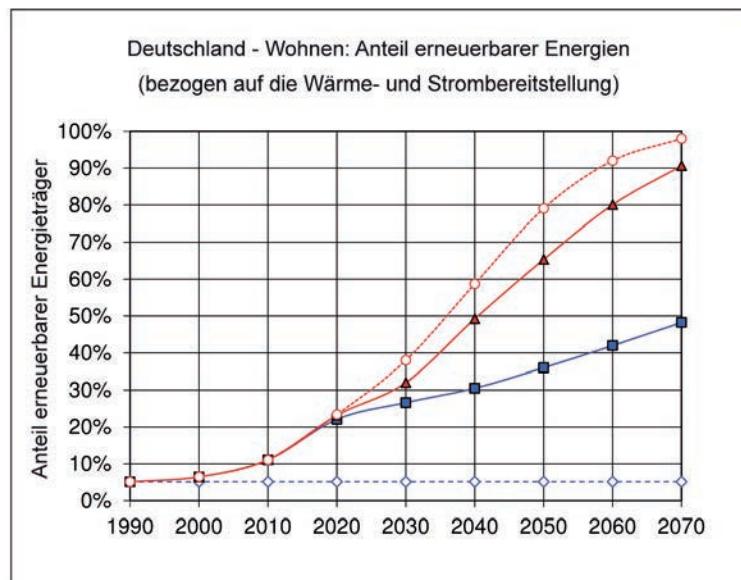
- Status quo
- Referenz
- ▲▲▲ Klimaschutz
- Klimaschutz-Plus

Abbildung 1.23:
Effizienzverbesserungen im Hinblick auf den Pro-Kopf-Primärenergiebedarf der privaten Haushalte in den vier Hauptszenarien im Zeitraum 1990 - 2070. Darstellung in Form der sog. Effizienzfaktoren.



- Status quo
- Referenz
- ▲▲▲ Klimaschutz
- Klimaschutz-Plus

Abbildung 1.24:
Entwicklung des Anteils erneuerbarer Energieträger der privaten Haushalte in den vier Hauptszenarien im Zeitraum 1990 - 2070.



die mit speicherbaren erneuerbaren Energieträgern (z.B. Wasserstoff oder Methan) geschlossen werden müssen. Um die Winterlücke möglichst klein zu halten sollte der Gebäudepark im Kernwinter möglichst wenig Energie benötigen. Das ist nur mit einer konsequent umgesetzten Effizienzstrategie erreichbar, die alle Strom- und Wärmeanwendungen umfasst. Sobald hier zusätzliche Stromverbraucher hinzutreten (z.B. Elektromobilität) wird die Aufgabe der Stabilität der Stromversorgung noch anspruchsvoller. Eine entscheidende Rolle spielen dafür Speicher auf verschiedenen Zeitebenen (Kurzzeit, Langzeit).

Systemdienlichkeit des Wohngebäudeparks

In einem erneuerbaren Energiesystem haben die Gebäude und deren Versorgungssysteme eine aktive und dienende Funktion und können nicht mehr alleine als passive Verbraucher interpretiert werden:

- Bei mit Wärmepumpen versorgten Gebäuden dient die Speichermasse dem Lastmanagement, indem in Zeiten von Stromüberschüssen Wärme zwischengespeichert wird. Dafür sind hocheffiziente Gebäude besonders gut geeignet.
- Die Rückverstromung saisonal gepeicherter Energie aus erneuerbaren Wasserstoff oder Methan findet am besten in Fernwärmesystemen mit Kraft-Wärmekopplung statt.
- Durch die Installation von Photovoltaik auf den Dachflächen und Fassaden werden Gebäude im Verbund mit regionalen Wind- und Wasserkraftanlagen zu einem virtuellen Kraftwerk.
- Darüber hinaus existieren weitere Möglichkeiten der Sektorenkopplung, z.B. Wohnen + Energie + Verkehr über eine Verknüpfung von gebäudeintegrierter Photovoltaik mit Batterien, Wärmepumpen und Elektromobilität.
- Die Größe des künftigen erneuerbaren Energiesystems hängt direkt mit den Effizienzerfolgen im Zuge des Paris-kompatiblen Umbaus des Wohngebäudeparks zusammen.
- Ein erneuerbares Energiesystem ist auch sicherheitspolitisch von Vorteil (Reduzierung der Abhängigkeit von fossilen Energieträgern, Robustheit, Sabotagegefährdung).

Effizienzfaktoren

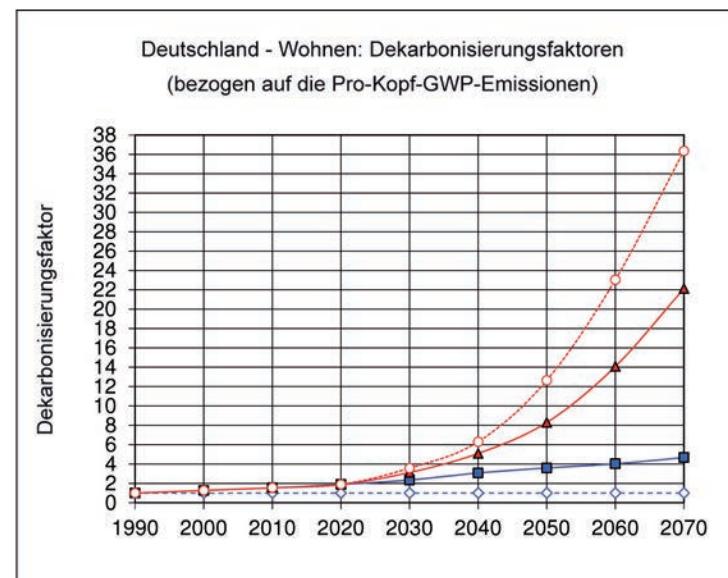
Der Erfolg der Effizienzstrategien in den Wohngebäuden lässt sich übersichtlich über sog. Effizienzfaktoren abbilden. Dabei wird das Status-quo-Szenario als Bezugsgröße mit einem durchgängig vorgegebenen Faktor von 1,0 definiert. Die Qualität der energetisch relevanten Bau- und Technikkomponenten wird dabei auf dem Stand von 1990 festgehalten. Für diesen Vergleich werden der Pro-Kopf-Primärenergiebedarf als Indikator für den energetischen Ressourceneinsatz gewählt. In Abbildung 1.23 wird erkennbar, dass im Referenzszenario die Effizienzverbesserungen nur mäßig ausfallen. Im Jahr 2050 lässt sich dort gerade einmal ein Faktor von 2,5 realisieren. Im Klimaschutzszenario liegt der Effizienzfaktor bereits bei 4,4 und im Klimaschutz-Plus-Szenario sogar 6,5 und steigt dort bis 2070 auf 11,3 an. Hier wird deutlich, dass eine längerfristige Effizienzstrategie spätestens ab dem Jahr 2030 auch künftige technologische Verbesserungen miteinbeziehen sollte.

Ausbau der erneuerbaren Energieträger

In Abbildung 1.24 ist dargestellt wie sich parallel zur Effizienzsentwicklung der Ausbau erneuerbarer Energieträger in den Szenarien entwickelt. Im Referenzszenario gelingt es nicht einmal bis 2050, die Dominanz der fossilen Energieträger zu überwinden, während im Klimaschutzszenario 2050 der Anteil erneuerbarer Energien bereits 65 % und im Klimaschutz-Plus-Szenario sogar 79 % beträgt. Bis 2070 geht der Anteil fossiler Energieträger in den beiden Klimaschutzszenarien stetig zurück, so dass bis dahin eine nahezu vollständig erneuerbare Energieversorgung (mit 91 bzw. 97 %) realisiert werden kann.

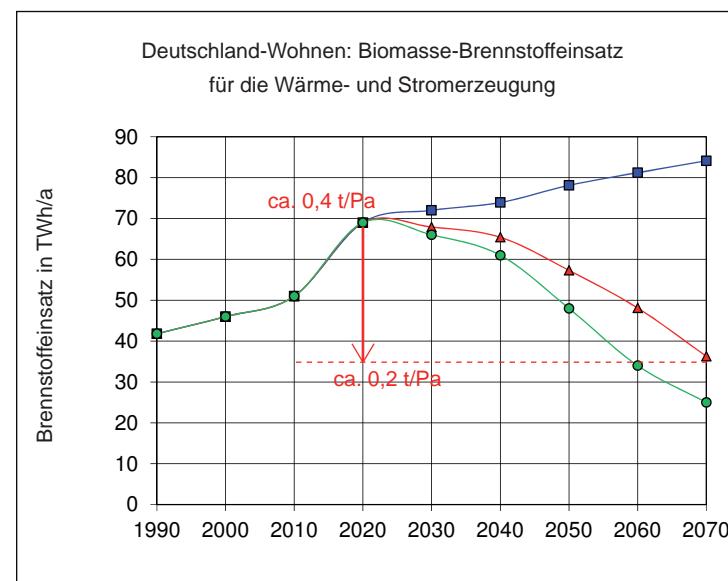
Dekarbonisierungsfaktoren

Noch deutlicher fallen die Unterschiede zwischen den Szenarien im Hinblick auf die Minderungserfolge bei den Treibhausgasemissionen aus. Diese lassen sich über sog. Dekarbonisierungsfaktoren abbilden. Dieser Faktor gibt an, in welchem Ausmaß die CO_2 -Äquivalent-Emissionen im Vergleich zur Status-quo-Entwicklung abgesenkt werden können. Im Referenz-



- Status quo
- Referenz
- ▲— Klimaschutz
- Klimaschutz-Plus

Abbildung 1.25:
Minderungserfolge hinsichtlich der Pro-Kopf-Treibhausgasemissionen in den vier Hauptszenarien im Zeitraum 1990 - 2070. Darstellung in Form der sog. Dekarbonisierungsfaktoren.

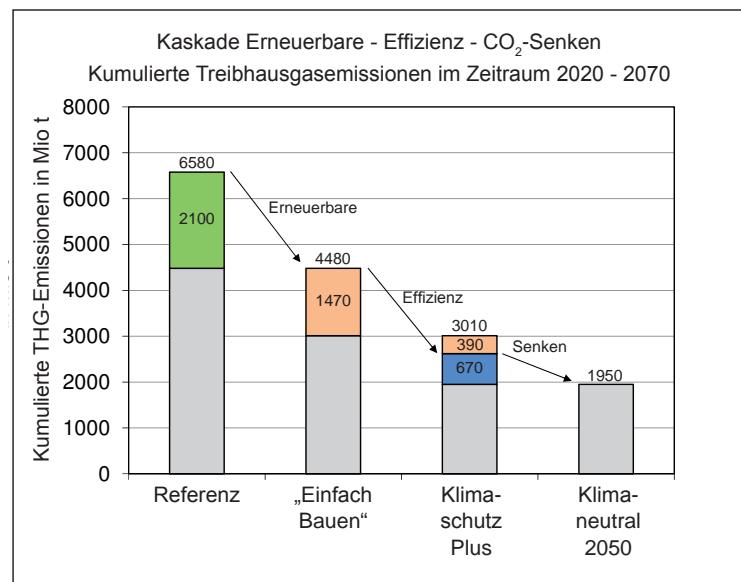


- Referenzentwicklung
- ▲— Klimaschutz-Plus-Entwicklung
- Klimaneutralität 2050

Abbildung 1.26:
Brennstoffeinsatz für Biomasse, Müll und Reststoffe für die Wärme- und Stromerzeugung der deutschen Wohngebäude in TWh/a. Beim Strom wurde der Biomasseeinsatz anteilig bezogen auf den Endenergiebedarf der privaten Haushalte bilanziert. In den beiden Klimaschutzszenarien gelingt es, die energetische Nutzung von Biomasse nach 2030 immer mehr zurückzudrängen und damit zusätzliche Potenziale für eine stoffliche Nutzung bzw. den Aufbau eines stärkeren Holzvorrats in Laub-Mischwäldern zu ermöglichen.

- █ Beitrag Erneuerbare (2100 Mio t)
- █ Beitrag Effizienz (1860 Mio t)
- █ Beitrag CO₂-Senken (670 Mio t)
- █ Verbleibender Rest

Abbildung 1.27:
Beiträge des Ausbaus erneuerbarer Energien, der Energieeffizienz und der CO₂-Senken zur Emissionsminderung der deutschen Wohngebäude im Zeitraum 2020 - 2070. Dargestellt ist der Fall, bei dem im ersten Schritt der Ausbau der erneuerbaren Energien Vorrang vor der Energieeffizienz hat.



szenario können die Pro-Kopf-GWP-Emissionen im Jahr 2050 gegenüber dem Stand von 1990 nur um einen Faktor von 3,6 abgesenkt werden. Im Klimaschutzszenario liegt dieser Faktor 2050 bereits bei 8,3 um bis 2070 weiter auf 22,1 anzusteigen. Nur im Klimaschutz-Plus-Szenario wird ein durchgreifender Klimaschutz realisiert. Die Dekarbonisierungsfaktoren steigen hier bis 2050 auf 12,7 und bis 2070 auf 36,4 an.

Energieautonomie

Um die Abhängigkeit von fossilen Energierägern zu reduzieren, sind folgende Strategieansätze entscheidend:

- Die Größe des künftigen erneuerbaren Energiesystems hängt vor allem von den Effizienzerfolgen und zusätzlich vom Erfolg der Suffizienzmaßnahmen ab.
- Kann, wie dies im Klimaschutz-Plus-Szenario der Fall ist, ab 2030 der Bedarf für erneuerbare Primärenergie reduziert werden, werden sogar Potenziale für die anstehende Dekarbonisierung der Materialbereitstellung freigesetzt. Besonders wichtig ist dies bei der Biomassenutzung, denn da-

mit wird es möglich eine stärkere stoffliche Nutzung von Holz mit einem Vorratsaufbau in klimaangepassten Wäldern zu kombinieren (siehe Abb. 1.26 und nähere Erläuterungen in Kapitel 12).

- Der Ausbau einheimischer erneuerbarer Energieträger (z.B. Wind, Solarstrom und -wärme, Biomasse, Geothermie und Meeresenergie) und der zugehörige Netzausbau müssen deutlich beschleunigt werden.
- Parallel dazu sind Speichertechnologien auszubauen (z.B. Pumpspeicherwerke, Saisonale Wärmespeicher, Power-to-Gas-Technologien, Batterien, Schwungradspeicher).
- Durch den hohen Flächenbedarf der Erneuerbaren und zur Berücksichtigung der Belange des Umwelt- und Kulturschutzes sind Spielräume für Standortentscheidungen von sehr großer Bedeutung. Hierfür können eine hohe Energieeffizienz der Gebäude und Doppelnutzungen (z.B. PV auf den Dachflächen, Windräder auf landwirtschaftlichen Flächen) entscheidende Beiträge leisten.

„Einfach Bauen“ und die Effizienzlücke

Im Kontext der Einführung der Wärmeschutzverordnung 1995 wurde von Professoren, die das Fachgebiet Architektur und die Fächer Entwerfen in Forschung und Lehre vertraten, Kritik an den „aufoktroyierten Superdämmungen“ und der energetischen Berücksichtigung der Wärmerückgewinnung bei Lüftungsanlagen geübt (vgl. Ackermann et al. 1992). In der Folge wurde die gesetzliche Einführung des bereits bewährten Niedrigeneriestandard u.a. von der Architektenchaft und der Wohnungswirtschaft verhindert. Das hat wesentlich zum Stillstand beim Klimaschutz während der letzten 15 Jahre beigetragen.

Ein aktuelles Beispiel der Zürückweisung der Effizienzstrategie ist der Konzeptansatz „Einfach Bauen“ (Nagler et al. 2020). Dort werden Gebäudefassaden mit einschaligen Konstruktionen vorgeschlagen, die gerade einmal den geforderten Wärmeschutz des aktuellen Gebäude-Energien-Gesetzes (GEG 2020) einhalten. Eine mittlere Qualität wird ferner für alle weite-

ren Hüllkonstruktionen und die Lüftung propagiert. Die für den Klimaschutz notwendigen Emissionsminderungen sollen allein durch den geringeren Herstellungsaufwand für die Lüftung und Gebäudehülle in Verbindung mit erneuerbaren Heizsystemen erreicht werden.

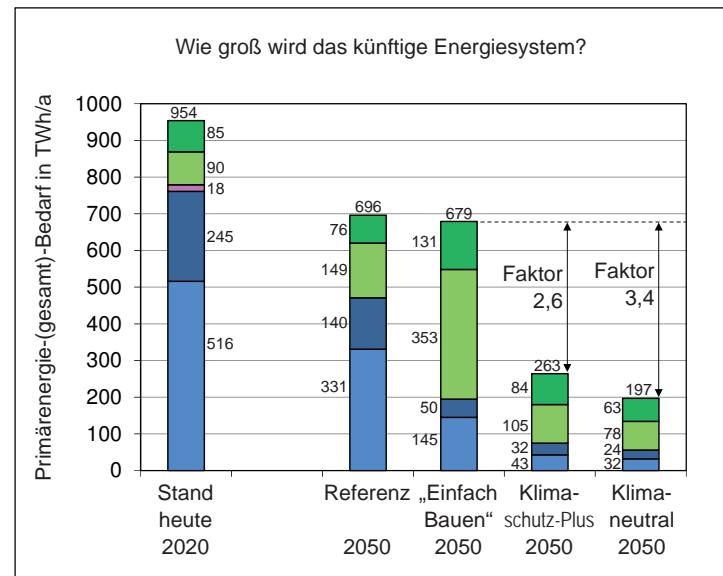
Exakt diese „Entweder-Oder“-Strategie wird im sog. Referenz-Switch-Szenario abgebildet und dort aus Konsistenzgründen auch auf die energetischen Modernisierungen im Bestand angewendet (12). Das ermöglicht eine Bewertung anhand der resultierenden GWP-Budgets (siehe Abbildung 1.27):

- Die Effizienzlücke beim Konzept „Einfach Bauen“ beläuft sich im Zeitraum 2020 - 2070 auf 1860 Mio t CO₂-Äquivalente und ist damit fast so groß wie das 1,7-Grad-Budget für Wohngebäude (1925 Mio t). „Einfach Bauen“ ist somit, anders als postuliert, kein Beitrag zu Klimaschutz (13).
- Der Primärenergiebedarf im Jahr 2050 liegt mit 679 TWh/a gegenüber dem Klimaschutz-Plus-Szenario (263 TWh/a) um einen Faktor 2,6 und gegenüber dem Klimaneutral-2050-Szenario (197 TWh/a) um einen Faktor 3,4 höher. Damit ist das Konzept „Einfach Bauen“ auch aus energie- und sicherheitspolitischer Sicht nicht wünschenswert (14).

Analyse der Einzelbeiträge der drei Hauptstrategien

Neben dieser klaren Zurückweisung des Konzeptansatzes „Einfach Bauen“ als Klimaschutzstrategie können aus der Analyse der Switch-Szenarien weitere methodisch aufschlussreiche Erkenntnisse gewonnen werden. Diese betreffen vor allem das Zusammenspiel der Hauptstrategien Erneuerbare, Effizienz und Senken im Zeitraum 2020 - 2070 und ihre Quantifizierung. Es kann nun abschließend bestimmt werden, welche Minderungsbeiträge im Szenario „Klimaneutral 2050“, das als einziges das 1,7-Grad-Budget einhält, im Vergleich zur Referenzentwicklung erreicht werden (Abb. 1.27):

- Im Vergleich zum Referenzszenario (6580 Mio t bzw. 79,2 t/P) wird im Szenario „Klimaneutral 2050“ (1950 Mio t bzw. 23,3 t/P) im Zeitraum 2020 - 2070 ein Minderungsbei-



█ Strom, erneuerbar
█ Wärme, erneuerbar
█ Strom, nuklear
█ Strom, fossil
█ Wärme, fossil

Abbildung 1.28:
 Primärenergiebedarf der deutschen Wohngebäude im Jahr 2020 und 2050. Für das Jahr 2050 sind zunächst die Ergebnisse für das Referenzszenario und das Konzept „Einfach Bauen“ gegenübergestellt. Erst das Klimaschutz-Plus-Szenario hält das 2-Grad-Limit und das Szenario „Klimaneutral 2050“ schließlich das 1,7-Grad-Limit bei der Erderwärmung ein. Zugleich wird deutlich, wie groß das künftige Energiesystem bei den unterschiedlichen Ansätzen ausfallen würde.

trag von insgesamt 4630 Mio t nachgewiesen.

- Der größte Minderungserfolg in Höhe von 45 Prozent wird mit 2100 Mio t durch den Ausbau erneuerbarer Energien erzielt.
- An zweiter Stelle stehen die Emissionseinsparungen durch Energieeffizienzmaßnahmen. Mit 1860 Mio t haben diese einen Anteil von 40 Prozent.
- Zusätzlich sind durch CO₂-Senken negative Emissionen in Höhe von minus 670 Mio t nachzuweisen. Diese machen am Ende 15 % der CO₂-Minderungen aus.

Nur in diesem „Dreiklang“, d.h. durch die konsequente Umsetzung und intensive Verknüpfung der Hauptstrategien Erneuerbare, Effizienz und CO₂-Senken gelingt ein Paris-kompatibler Umbau des Wohngebäudeparks, der nicht nur das 2,0- sondern darüber hinaus auch das 1,7-Grad-Budget einhält. Eine konsequente Steigerung der Energieeffizienz ist darüber hinaus entscheidend, um das Energiesystem für Gebäude gegenüber heute um einen Faktor 3-4 verkleinern zu können.

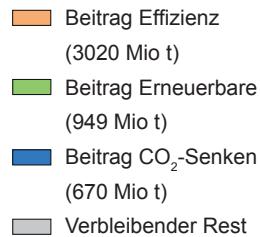


Abbildung 1.29:
Beiträge des Ausbaus erneuerbarer Energien, der Energieeffizienz und der CO₂-Senken zur Emissionsminderung der deutschen Wohngebäude im Zeitraum 2020 - 2070. Dargestellt ist der Fall, bei dem im ersten Schritt die Energieeffizienz vor dem Ausbau der Erneuerbaren hat.

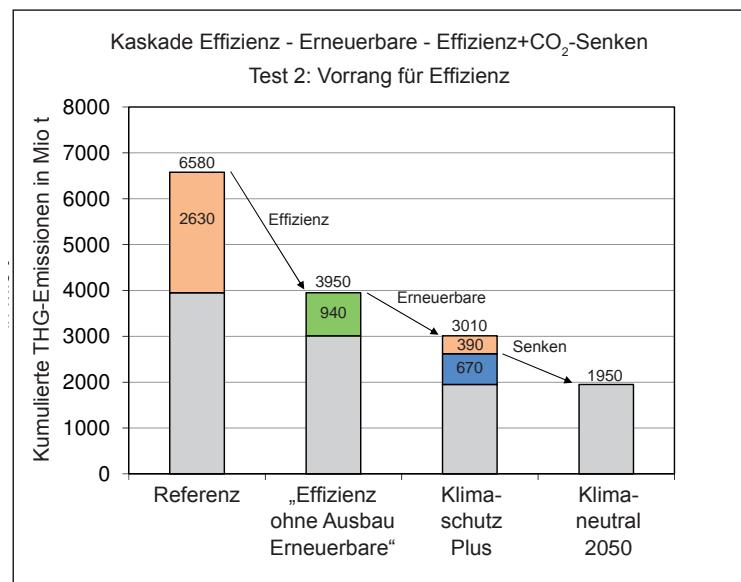
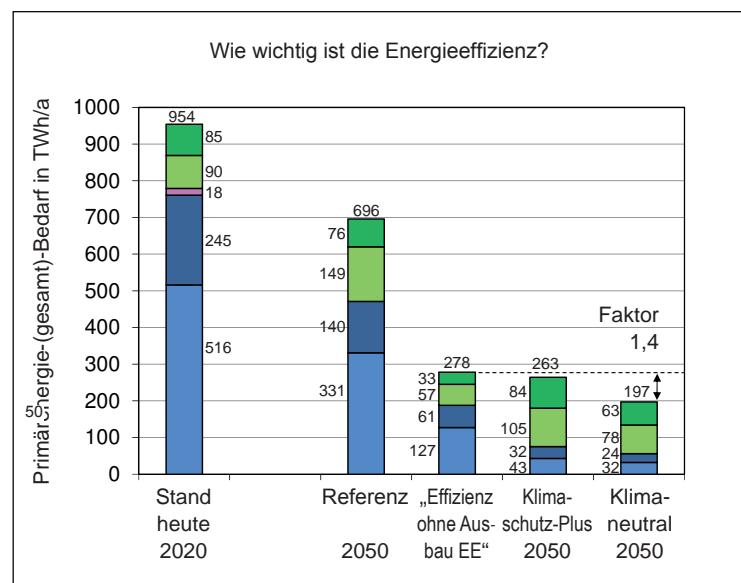


Abbildung 1.30:
Primärenergiebedarf der deutschen Wohngebäude im Jahr 2020 und 2050. Für das Jahr 2050 sind zunächst die Ergebnisse für das Referenzszenario und das Konzept „Effizienz ohne Ausbau Erneuerbare“ gegenübergestellt. Erst das Klimaschutz-Plus-Szenario hält das 2-Grad-Limit und das Szenario „Klimaneutral 2050“ schließlich das 1,7-Grad-Limit bei der Erderwärmung ein.



Exkurs 1: „Effizienz ohne konsequenteren Ausbau der Erneuerbaren“ und die Ausbaulücke

Als Gegenkonzept zu „Einfach Bauen“ kann man die Verfolgung einer konsequenteren Effizienzstrategie ansehen, bei der jedoch, wie dies im Referenzszenario erfolgt, wenig Augenmerk auf einen Ausbau der erneuerbaren Energien gelegt wird. Diese Kombination wird exakt durch das Klimaschutz-Plus-Switch-Szenario abgebildet. Wie immer bei Kaskadenbetrachtungen, gehen die Beiträge der Vorrangstrategie mit einem höheren Gewicht in die Gesamtbewertung ein. Daher ist zu erwarten, dass sich bei einem Wechsel des Vorrangs, die Gewichte zwischen den Kernstrategien im Vergleich zum Konzept „Einfach Bauen“ entscheidend verschieben:

- Im Vergleich zum Referenzszenario (6580 Mio t bzw. 79,2 t/P) wird im Szenario „Klimaneutral 2050“ (1950 Mio t bzw. 23,3 t/P) im Zeitraum 2020 - 2070 ein Minderungsbeitrag von insgesamt 4630 Mio t nachgewiesen.
- Der größte Minderungserfolg in Höhe von 65 Prozent wird mit 3020 Mio t durch die Effizienzmaßnahmen erzielt (15).
- An zweiter Stelle stehen nun die Emissionseinsparungen durch den Ausbau der Erneuerbaren. Mit 940 Mio t haben diese einen Anteil von 20 Prozent.
- Zusätzlich sind durch CO₂-Senken negative Emissionen in Höhe von minus 670 Mio t nachzuweisen. Diese machen am Ende 15 % der CO₂-Minderungen aus.

Die Ausbaulücke im Zeitraum 2020 - 2070 ist emissionsseitig mit 940 Mio t nur halb so groß wie die Effizienzlücke mit 1860 Mio t (Abb. 1.29). Im Hinblick auf die gesamte Primärenergie fällt die Ausbaulücke mit ca. 1180 TWh kaum ins Gewicht (Abb. 1.30). Damit erweist sich die Effizienzstrategie am Ende vor allem im Hinblick auf die künftige Größe des Energiesystems als risikobegrenzend und besonders robust. Als alleinige Strategie ist sie jedoch nicht in der Lage einen Paris-kompatiblen Klimaschutz sicherzustellen. In der bisherigen Praxis existiert dieses Problem jedoch nicht, weil besonders energieeffiziente Gebäude in der Vergangenheit dominant erneuerbar versorgt wurden (16).

Zusammenföhrung der Ergebnisse 2020 - 2100 unter Einbeziehung der Materialbereitstellung für alle Wohnbauten

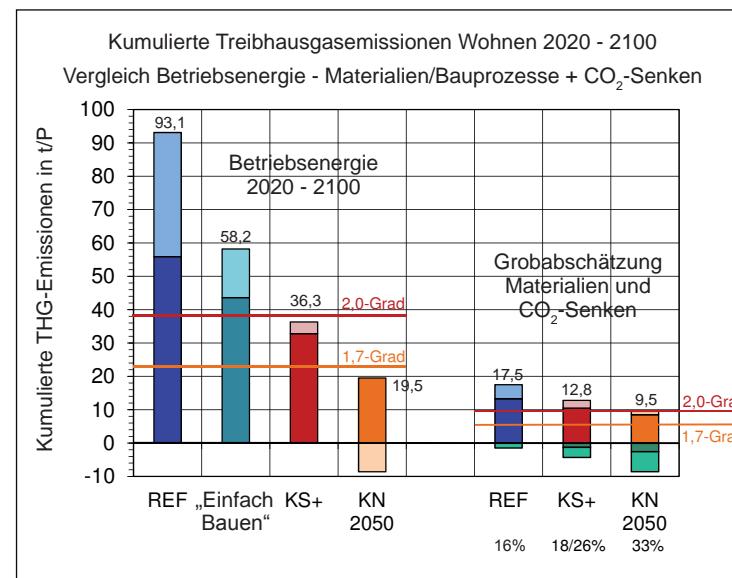
Abschließend werden die Ergebnisse der Szenarien für den Zeitraum 2020 - 2100 und unter Einbeziehung der materialbedingten Emissionen zusammengeführt (siehe Abb. 1.31 und 1.32). Das macht aus drei Gründen Sinn:

- 1 Bis 2100 kann in allen Szenarien auf der Ebene Betriebsenergie Klimaneutralität erreicht werden.
- 2 Die Abschätzung der Beiträge durch Materialbereitstellung und CO₂-Senken erweitert das Gesamtbild in Richtung einer Lebenszyklusbetrachtung.
- 3 Speziell der Aufbau der CO₂-Senken in den Baukonstruktionen und damit im Materiallager der Wohnbauten dauert sehr lange und findet in größerem Umfang erst nach 2050 statt, weil das Materiallager der Gebäude den Zufluss biogener Stoffe nur nach und nach aufnehmen kann.

Zu beachten ist, dass die kumulierten Treibhausgasemissionen der Materialbereitstellung und der CO₂-Senken nur grob abgeschätzt wurden. Hierbei wurden Annahmen zur Dekarbonisierung der Baustoffe und der durch Neubau, Modernisierung und Instandsetzung erzielbaren CO₂-Senken getroffen (vgl. Vallen-
tin 2023, S. 22 ff. und S. 53 ff.).

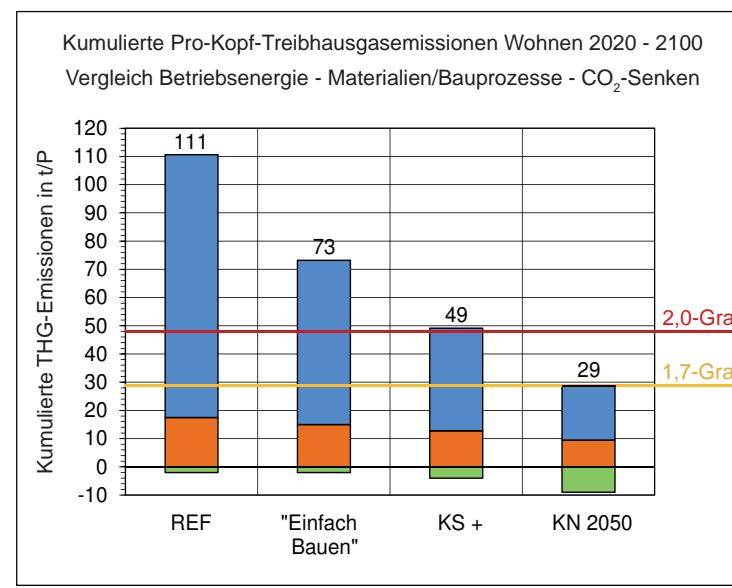
Auch in der Gesamtbetrachtung dominiert die Betriebsenergie während der Nutzungsphase. Für ein Paris-kompatibles Bauen ist es von daher eine unerlässliche Forderung, durch Energieeffizienz und den Ausstieg aus der fossilen Energieversorgung zunächst die Emissionen für Heizen, Warmwasser, Lüften und Strom möglichst bis 2050 auf nahezu Null zu führen.

Für einen Paris-kompatiblen Wohnbau ist es dann aber zusätzlich notwendig, die Emissionen der Materialbereitstellung in Verbindung mit der Bildung von CO₂-Senken nochmals zu reduzieren. Dies gelingt in erster Linie durch den Einsatz von schnell nachwachsenden Rohstoffen in hochwärmegedämmter Gebäudehüllen und in zweiter Linie durch den Holzbau.



- Referenzszenario 2050-2100
- Referenzszenario 2020-2050
- Einfach Bauen 2050 - 2100
- Einfach Bauen 2020-2050
- Klimaschutz-Plus 2050-2100
- Klimaschutz-Plus 2020-2050
- Klimaneutral 2050-2100
- Klimaneutral 2020-2050
- CO₂-Senken 2020-2050
- CO₂-Senken 2050-2100

Abbildung 1.31:
Vergleich der kumulierten Treibhausgasemissionen durch die Betriebsenergie der Wohnnutzung in Deutschland im Vergleich zu den Baumaterialien und CO₂-Senken im Zeitraum 2020 - 2100.



- Betriebsenergie
- Materialien / Bauprozesse
- CO₂-Senken

Abbildung 1.32:
Kumulierte Treibhausgasemissionen der Wohnnutzungen in Deutschland (Betriebsenergie / Materialbereitstellung / Schaffung von CO₂-Senken) im Zeitraum 2020 - 2100. Die Ergebnisse sind für das Referenzszenario, das Konzept „Einfach Bauen“, das Klimaschutz-Plus-Szenario und das Szenario, in dem im Jahr 2050 Klimaneutralität erreicht wird, ausgewiesen. Angabe der personenbezogenen Emissionen in Tonnen CO₂-Äquivalente. Zur besseren Einordnung sind die Schwellen für das 2,0 und das 1,7-Grad-Limit aufgetragen.

Wie kann der Holzbau zum Klimaschutz beitragen?

In der separaten gleichnamigen Studie (Vallentin 2023) wurde untersucht, wie das Bauen mit Holz und nachwachsenden Rohstoffen einen Beitrag zum Klimaschutz leisten kann. Das Ergebnis kann in 10 Punkten zusammengefasst werden:

- 1 Der Schutz der Wälder und ihrer Biodiversität, auch um ihrer selbst willen, steht an erster Stelle. Wälder erbringen vielfältige Öko- und Klimadienstleistungen und dienen als Kohlenstoffspeicher und -senken dem Klimaschutz.
- 2 Für die Entnahme von Holz aus den Wäldern existieren Grenzen der nachhaltigen Verfügbarkeit. Durch den Klimawandel und die notwendige Waldanpassung wird diese künftig zusätzlich zurückgehen. Leitplanken in Form eines Risikokorridors ergeben für Deutschland ein verträgliches Pro-Kopf-Holzbudget zwischen 0,8 und 1,1 m³/Pa.
- 3 Das nachhaltig nutzbare Holzaufkommen liegt damit niedriger als der derzeitige Holzverbrauch. Dadurch wird eine Priorisierung der Holznutzungen notwendig.
- 4 Aus Gründen des Klimaschutzes sind kurzlebige Holzverwendungen wenig zielführend. Kritisch zu bewerten sind die meisten Energienutzungen, insbesondere die Verbrennung in Heizsystemen von Gebäuden mit hohem Wärmebedarf.



Abbildung 1.33:
Totholz und stehendes Holz im
Hambacher Wald.

Auch die thermische Verwertung von Holzprodukten am Ende der Nutzungphase ist in Frage zu stellen, weil mit hohen Emissionen und der Zerstörung von prinzipiell erhaltbaren CO₂-Senken verbunden.

- 5 Aus der Perspektive der CO₂-Senkeneffektivität stellt der Einsatz von Holz in möglichst langlebigen Holzkonstruktionen den „Königsweg“ dar. Diese kann durch eine Kaskadennutzung noch gesteigert werden. Das anzustrebende Ideal ist der dauerhafte Erhalt des Holzes im Materialkreislauf.
- 6 Der Holzbau kann als isolierte Maßnahme nur wenig zum Klimaschutz beitragen. Erst durch seine Einbettung in eine Gesamtstrategie können die Vorteile des Holzbaus zur vollen Geltung kommen. In Verbindung mit hohen energetischen Qualitäten gelingt es, die Steigerung der Energieeffizienz und den Einsatz von erneuerbaren Energien sowie Materialien mit der Bildung von CO₂-Senken zu verknüpfen.
- 7 Einen Schlüssel hierfür bilden holzsparende Hüllkonstruktionen, die mit schnell nachwachsenden biogenen Materialien gedämmt werden. Sie sind universell einsetzbar: sowohl im Neubau als auch bei energetischen Modernisierungen, tragend und nichttragend, im reinen Holzbau oder im Holzhybridbau.
- 8 Bei der Klimaschutzbilanzierung ist der Zeitfaktor zu berücksichtigen. Eine Dynamisierung ist sowohl für alle Energie- und Herstellungsprozesse aber auch für die biogenen Emissionen von Holz und Nawaros erforderlich. Die Ökobilanzen sind in diesem Sinne komplett zu überarbeiten.
- 9 Wenn dies über sehr lange Zeiträume erfolgt, kann der konsequente Einsatz biobasierter Materialien in Gebäuden als „Reperaturmechanismus“ für das Klima dienen. Dies erfolgt über den generationenübergreifenden Aufbau und Erhalt von CO₂-Senken im Materiallager der Gebäude insgesamt.
- 10 Damit dieser Mechanismus gerade noch rechtzeitig greifen kann, sind zunächst im Zeitraum bis 2050 die energiebedingten Treibhausgasemissionen aller Gebäude mit Hilfe der beiden Hauptstrategien Effizienz und Erneuerbare auf nahezu Null zu führen.

So können wir uns aus der Energie- und Klimakrise herausbauen

Im Begriff des Herausbauens ist die Vision enthalten, dass wir Bauschaffenden selbst die Mittel in der Hand halten, um einen eigenständigen Beitrag zum Klimaschutz und zur Energieautonomie zu leisten.

Weg von den Fossilen hin zu hoher Energieeffizienz und Erneuerbaren ist das Motto dieses Umbaus - und wo möglich tun wir das mit Hilfe natürlicher Baumaterialien.

Auch die Nutzer und Bewohner können einen Beitrag durch ihr klimagerechtes Konsum- und Nutzerverhalten leisten, der sofort wirksam ist.

Der Umbau des Gebäudesektors betrifft alle Bauteile und Techniksysteme. Hierbei kommt es darauf an, mehr aus dem Vorhandenen zu machen, anstelle es immer weiter durch Neues zu ersetzen oder zu erweitern. Konkret betrifft dies die vorhandene Bausubstanz, eine bessere Raumorganisation und Flächennutzung des vorhandenen Gebäudebestands sowie die vielfältigen Möglichkeiten im Bereich Um- und Weiterbauen in Verbindung mit einer Nachverdichtung.

Klimaökonomie

Für eine zügige Umsetzung der Energieautonomie in Verbindung mit dem Pariser Klimazielen sind nicht zuletzt die ökonomischen Randbedingungen entscheidend:

- Wirtschaftlichkeits- und Kostenoptimalitätsbetrachtungen sollten auf der Basis von Lebenszykluskosten anstelle der bislang üblichen Investitionskosten aufgestellt werden.
- Für den Neubau konnte gezeigt werden, dass Paris-kompatible Wohngebäude bereits heute dem Kostenoptimum bei den Lebenszykluskosten entsprechen (vgl. EIV 2022).
- Daher sollte im Neubau ab sofort Effizienzstandards mit hoher Qualität (z.B. Effizienzhaus 40-EE, Passivhaus) im GEG verpflichtend vorgeschrieben werden.

- Ab sofort dürfen im Neubau und im Bestand keine neuen fossilen Heizsysteme, insbesondere Gasheizungen (17), mehr eingebaut werden. Parallel ist die Verbrennung von Biomasse in Gebäudeheizungen möglichst weitgehend zurückzufahren. Insgesamt bedeutet dies den Ausstieg aus allen brennstoffgestützten Heizsystemen.
- Im Gebäudebestand sollten im GEG die bedingten Anforderungen an Bauteile in Richtung hoher Qualitäten angepasst werden (siehe Tabelle 1.9 und Abb. 1.20).
- Förderungen sollten vor allem dem Bestandserhalt in Verbindung mit energetischen Modernisierungen dienen. Der Wechsel von fossilen hin zu erneuerbaren Heizsystemen (Wärmepumpen, Fernwärme) ist hierbei miteinzubeziehen.
- Ein hoher CO₂-Preis mit Pro-Kopf-Rückvergütung ist nicht nur als Marktinstrument mit sozialem Ausgleich wirksam, sondern setzt auch Anreize für eine breite Anwendung der Suffizienzstrategien.
- Zur Verknüpfung des schnellen Ausbaus der Erneuerbaren mit den Zielen Diversifizierung, Energiesicherheit und Akzeptanz sollten künftig Bürgerenergieanlagen, Mieterstrommodelle und kommunale Investitionen privilegiert werden.
- Für den Aufbau einer Senkenökonomie sind Vergütungsmodelle für die Schaffung von CO₂-Senken zu etablieren.

Abbildung 1.34:
Blick vom Münchener Olympiaberg Richtung Westen auf das Häusermeer. Hier wird die enorme Herausforderung sichtbar, den Gebäudebestand innerhalb der nächsten drei Jahrzehnte energetisch zu sanieren und erneuerbar zu versorgen. Nur so kann ein Paris-kompatibler Umbau des Gebäudeparks gelingen.



2 Neubestimmung der Klimaschutzziele auf der Basis von CO₂-Globalbudgets

In der Dissertation wurde das (damalige) Ziel der deutschen Bundesregierung zugrunde gelegt. Dieses wurde als Reduktion der Treibhausgasemissionen bis 2050 um 80 % gegenüber dem Stand von 1990 definiert. Dieses stimmt jedoch nach heutigem Stand nicht mehr mit dem Klimaschutzziel überein, wie es in dem Übereinkommen der Pariser Klimakonferenz international verbindlich beschlossen wurde (vgl. COP-21 2015):

- Es ist dort funktional definiert. Der Anstieg der durchschnittlichen Erdtemperatur soll deutlich unter 2 °C gehalten und wenn möglich auf unter 1,5 Grad begrenzt werden. Nur so können die Risiken und Auswirkungen des Klimawandels erheblich verringert werden.
- Erhöhung der Fähigkeit zur Anpassung an die Klimaänderungen. Hierbei sind vor allem die Entwicklungsländer zu unterstützen; dabei steht die Bekämpfung globaler Armut und die Nahrungsmittelsicherheit an erster Stelle.
- Die Finanzmittelströme sollen in Einklang gebracht werden mit einem Weg in Richtung niedriger Treibhausgasemissionen und einer gegenüber Klimaänderungen widerstandsfähigen Entwicklung.

Mit Stand von Januar 2021 sind 189 von 195 der unterzeichneten Staaten der Erde dem Übereinkommen beigetreten. Die USA haben ihren angekündigten Rücktritt zurückgezogen.

In einem ersten, vorbereitenden Schritt ist es nun notwendig, das Klimaziel neu zu bestimmen und damit die Grundlage für eine Neubewertung der Szenarien zu legen. Es zeigt sich, dass die in diesem Zusammenhang stehenden politischen Festlegungen - seien es die Deutschlands oder der EU bzw. die von anderen Staaten - mit großer Vorsicht zu genießen sind. Im Folgenden werden hierzu zwei methodische Ansätze erläutert und miteinander kombiniert.

Als Einstieg in das Thema werden zunächst die Entwicklung der energiebedingten Treibhausgas(THG)-Emissionen weltweit und der daraus resultierenden CO₂-Konzentrationen seit 1860 betrachtet (siehe Abbildung 2.1). Dabei besteht ein Zusammenhang zwischen den THG-Emissionen und dem Anstieg der CO₂-Konzentrationen in der Atmosphäre. Zu erkennen ist, dass die jährlichen CO₂-Emissionen ab 1950 überproportional ansteigen, gefolgt von einem etwas langsameren Anstieg nach 1980, um dann nach dem Jahr 2000 wieder sprunghaft nach oben zu schnellen.

Die Stabilisierungsniveaus der CO₂-Konzentrationen, die mit dem 2-Grad-Ziel übereinstimmen (d.h. Wahrscheinlichkeit der Verfehlung kleiner 33 %) liegen unter 450 ppm. Um diese zu erreichen, ist es notwendig, spätestens innerhalb der nächsten 10 Jahre eine Trendumkehr bei den bislang immer noch ansteigenden Treibhausgasemissionen zu erreichen, um danach in effektive Minderungspfade überzugehen, die über mehrere Jahrzehnte fortzusetzen sind (siehe Abbildung 2.2). Eine weitere Verzögerung würde derart starke Reduktionsraten erfordern, die weder technologisch noch gesellschaftlich, vor allem aber politisch und ökonomisch nicht durchsetzbar wären. Jedoch entsprechen die auf der Pariser Klimakonferenz von den einzelnen Ländern vorgelegten Klimaschutzpläne selbst bei einer vollständigen Umsetzung lediglich einer Begrenzung der globalen Erwärmung auf 3 Grad Celsius (vgl. Bals et al. 2016).

Im Hinblick auf die Energiesysteme stellt der Klimaschutz gegenüber der Ressourcenfrage das eindeutig drängendere Problem dar. Die CO₂-Emissionen bei energetischer Nutzung der sicher förderbaren fossilen Energieträger liegen um einen Faktor 2, die der vermuteten Reserven sogar um einen Faktor

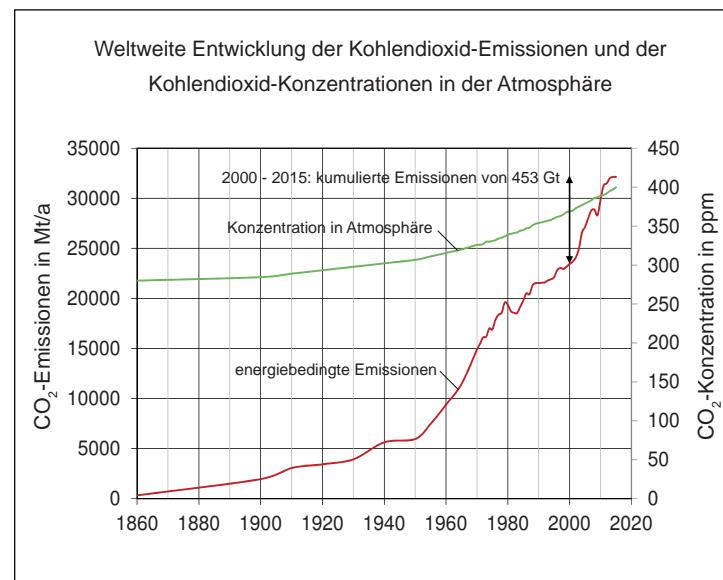
120 höher, als das aus Klimaschutzgründen gerade noch verträgliche CO_2 -Budget.

Bei den erneuerbaren Energieträgern, speziell Biomasse und Wasserkraft, bestehen hingegen aus Nachhaltigkeitssicht deutliche Grenzen der Verfügbarkeit (Nahrungsmittelsicherheit, Nutzungskonkurrenzen, Natur-, Landschafts- und Kulturschutz). Zusätzlich ist zu beachten, dass der Ausbau der anderen erneuerbaren Energiesysteme nicht beliebig schnell erfolgen kann, dies nicht alleine wegen der Pfadabhängigkeiten im bisherigen Energiesystem sondern auch aus Akzeptanzgründen.

Klimaschutz-Korridor und -Zielfeld (Kern 2016)

Zur Bewertung von Klimaschutzkonzepten von Gebäuden wurde von Michaela Kern eine Kombination von Klimaschutz-Korridor und -Zielfeld entwickelt (Kern 2016). Ausgangspunkt sind ausgewählte Verteilmodelle, in denen unterschiedliche Gerechtigkeitsansätze verfolgt werden (siehe Tabelle 2.1). Diese wurden im Hinblick auf die Anforderungen für Deutschland im Jahr 2050 ausgewertet. Als Kennwert sind die spezifischen Treibhausgasemissionen pro Person gewählt. Dabei lassen sich im Hinblick auf die Gerechtigkeitsansätze und die resultierenden Ergebnisse zwei Gruppen unterscheiden (siehe Tabelle 2.1 und Abb. 2.4):

- Die erste Gruppe mit „Contraction & Convergence“ (Meyer 2000), „Global Triptych“ (Den Elzen et al. 2007), „Common but differentiated Convergence“ (Hoene et al. 2006) sowie der „WBGU Budgetansatz - Option 2 Zukunftsverantwortung“ (WBGU 2009) betrachten nur die Verantwortung für künftige Emissionen. Daraus resultieren für Deutschland und die meisten der Industrieländer Zielwerte für das Jahr 2050 zwischen 0,6 bis 2,2 t/P.
- Die zweite Gruppe, vertreten durch „Global Development Rights“ (Baer et al. 2009) und dem „WBGU Budgetansatz - Option 1 Historische Verantwortung“ (WBGU 2009) betrachtet auch die Treibhausgasemissionen der Vergangen-



Weltweite Entwicklung der Kohlendioxid-Emissionen und der Kohlendioxid-Konzentrationen in der Atmosphäre

CO₂ - Konzentration
CO₂ - Emissionen pro Jahr

Abbildung 2.1
Entwicklung der globalen CO₂-Konzentration in der Atmosphäre (grüne Linie, rechte Skala) und der energiebedingten jährlichen CO₂-Emissionen (rote Linie, linke Skala).
Quelle: (Quaschning 2024).

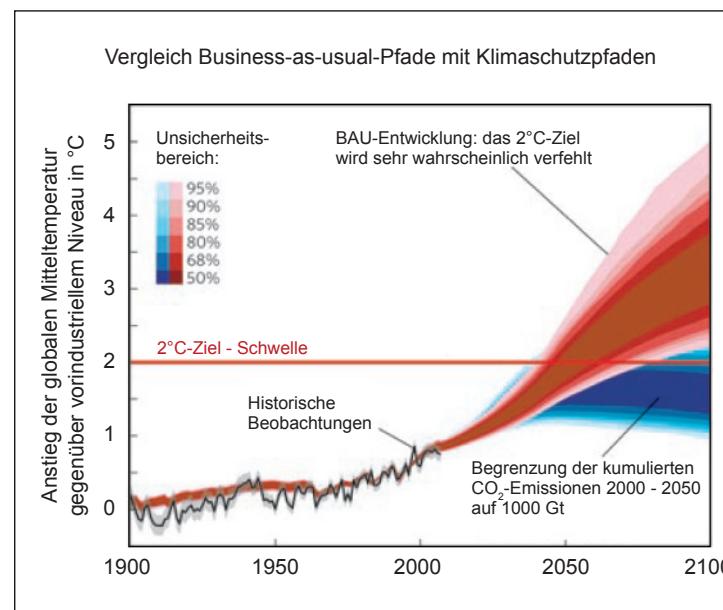


Abbildung 2.2
Über die Auswertung einer Vielzahl von Emissionsszenarien kann die Wahrscheinlichkeit berechnet werden, das 2-Grad-Ziel einzuhalten oder zu verfehlt. Sowohl die kumulierten globalen CO₂-Emissionen 2000 – 2050 als auch die Emissionen im Jahr 2050 sind hierfür geeignete Indikatoren. Betragen die kumulierten CO₂-Emissionen 1000 Gt CO₂ so liegt die Wahrscheinlichkeit das 2-Grad-Ziel zu überschreiten bei ca. 25 %. Bei einer „business-as-usual“ (BAU) - Entwicklung wird dieses Ziel hingegen mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit verfehlt. Quelle: (Meinshausen et al. 2009, S. 82).

Verteilungsmodell	Einführung	Zeitraum	Gerechtigkeitsprinzip	Kurzbeschreibung	Kriterien / Anforderungen Deutschland
C&C Contraction & Convergence (Meyer 2000)	1990er	2000-2050	Gleichheitsprinzip in Bezug auf Ressoucengerechtigkeit	Minderung und Konvergenz der Emissionswerte aller Länder auf ein gemeinsames und klimaverträgliches Niveau zu einem festgelegten Konvergenzjahr (z.B. 2050)	Pro - Kopf - Emissionen 0,7 bis 2,2 t/P (Ø GER, 2050)
Global Triptych (Den Elzen et al. 2007)	1997	1995 - 2020 1995 - 2050	Verantwortlichkeitsprinzip Beitrag nach Kapazität	Ähnlicher Verlauf wie bei CDC. Ergänzung durch freiwillige Vorstufen für Schwellen- und Entwicklungsländer.	Pro - Kopf - Emissionen 1,9 t/P (Ø GER, 2050)
CDC (Hoene et al. 2006) Common but differentiated convergence	2006	2010 - 2050	Verantwortlichkeitsprinzip Beitrag nach Kapazität	Zeitliche Staffelung der Emissionsreduktionen zwischen Entwicklungs- und Schwellenländern. Einstieg ab Überschreitung eines bestimmten Prozentsatzes der Pro-Kopf-Emissionen in Bezug zum globalen Durchschnitt. Sonst wie C&C.	Pro - Kopf - Emissionen 0,6 bis 1,9 t/P (Ø GER, 2050)
GDR Global Development Rights (Baer et al. 2009)	2007	1990 - 2050	Verantwortlichkeitsprinzip Historische Verantwortung Beitrag nach Kapazität	Berechnung der Emissionsreduktion anhand von Verantwortung und Kapazität. Anrechnung von Emissionen und BIP nur oberhalb der Entwicklungsgrenze. Negative Emissionen von Industrieländern zur Unterstützungsleistung von Entwicklungsländern.	Negative Pro-Kopf-Emissionen - 4,4 bis - 9,5 t/P (Ø GER, 2050)
WBGU Budgetansatz (WBGU 2009) Option 1: Historische Verantwortung	2009	1990 - 2050	Verantwortlichkeitsprinzip mit Einbeziehung der historischen Verantwortung	Abzug bisheriger Emissionen vom errechneten Budget wodurch auch negative Budgets entstehen können, die durch Emissionshandel bzw. technische Speicherung von CO ₂ ausgeglichen werden müssen.	Negatives Pro-Kopf-Budget - 11,3 bis - 12,8 t/P (Ø GER, 2010 - 2050)
WBGU Budgetansatz (WBGU 2009) Option 2: Zukunftsverantwortung	2009	(2010) - 2050 heute - 2050	Gleichheitsprinzip Tragung der Verantwortung ab Startbeginn	Einbezug aller Länder in Emissionsreduktionen. Möglichkeit von Emissionshandel.	Pro - Kopf - Emissionsbudget 112,5 - 128,6 t/P (Ø GER, 2010 - 2050); das entspricht jährlich durchschnittlichen Emissionen von 2,8 - 3,2 t/P

Tabelle 2.1: Vergleich verschiedener Klimaschutz-Verteilmodelle mit Angabe der zulässigen Pro-Kopf-Treibhausgas-Emissionswerte für Deutschland bis 2050 (Quelle: Vallentin 2019, S. 61).

heit. Als Bezugszeitpunkt dient hierbei das Jahr 1990, weil spätestens seit der UN-Konferenz in Rio allen Regierungen die Problematik der drohenden Klimakrise bekannt sein muss. Hier resultieren für Deutschland negative Emissionen zwischen - 0,3 und - 9,5 t/Pa. Die hohen Negativwerte beim GDR-Ansatz berücksichtigen zusätzlich die begrenzte Wirtschaftskraft der Entwicklungsländer.

Folgt man aus Gründen der praktischen Umsetzbarkeit der ersten Gruppe von Verteilmodellen, um klimaverträgliche Emissionspfade für einzelne Länder zu bilden, so kann man für die Industriestaaten einheitliche Anforderungen stellen. Angesichts der erheblichen Unsicherheiten (z.B. in den Klimamodellen, Risikoeinschätzungen, uneinheitliche Gerechtigkeitsansätze) erscheint es sinnvoller, die Anforderungen nicht in Form eines Zielwertes (z.B. 1t/Pa CO₂-Äquivalente), sondern in Form eines Zielfeldes zu formulieren. Wie in (Kern 2016) vorgeschlagen, sollte ein derartiges Zielfeld eine gewisse Flexibilität hinsichtlich der anzustrebenden Pro-Kopf-THG-Emissionen (z.B. 0,5 - 2,0 t/Pa CO₂-Äquivalente) und des Zeitraums (z.B. 2045 - 2055) beinhalten. Je nach den Emissionen im Ausgangszustand sind die Minderungspfade von Land zu Land dann doch unterschiedlich auszustalten.

Mit Hilfe von Klimaschutzkorridoren und den genannten Zielfeldern lassen sich Emissionspfade dahingehend beurteilen, ob sie nach derzeitiger Stand in Übereinstimmung mit dem 2-Grad-Ziel stehen oder nicht (siehe Abb. 2.3):

- Liegen sie über dem Zielfeld, ist keine Übereinstimmung vorhanden. Sie sind von daher keine Klimaschutzpfade.
- Kommen sie im oberen Teil zu liegen, passen sie eher zu weltweiten Entwicklungen, die immer noch ein relevantes Risiko beinhalten, das 2-Grad-Ziel zu verfehlen.
- Liegen sie hingegen im unteren Bereich des Zielfeldes, ist nach heutigem Wissen eine Übereinstimmung gegeben, u.U. sogar in Richtung der gewünschten Unterschreitung in Richtung des 1,5-Grad-Ziels.

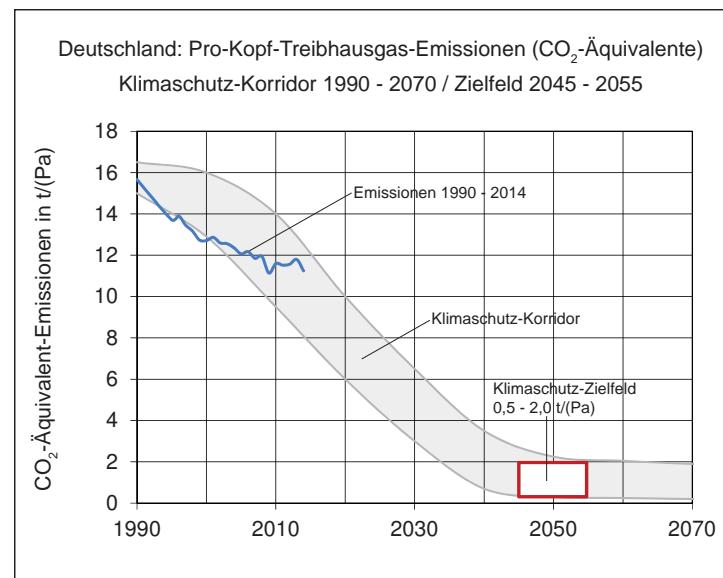


Abbildung 2.3
Darstellung des Klimaschutzkorridors und Klimaschutz-Zielfelds für Deutschland. Zur besseren Orientierung sind die bisherigen Pro-Kopf-Emissionen im Zeitraum 1990 - 2014 als blaue Linie einge tragen. Quelle: (Kern 2016).

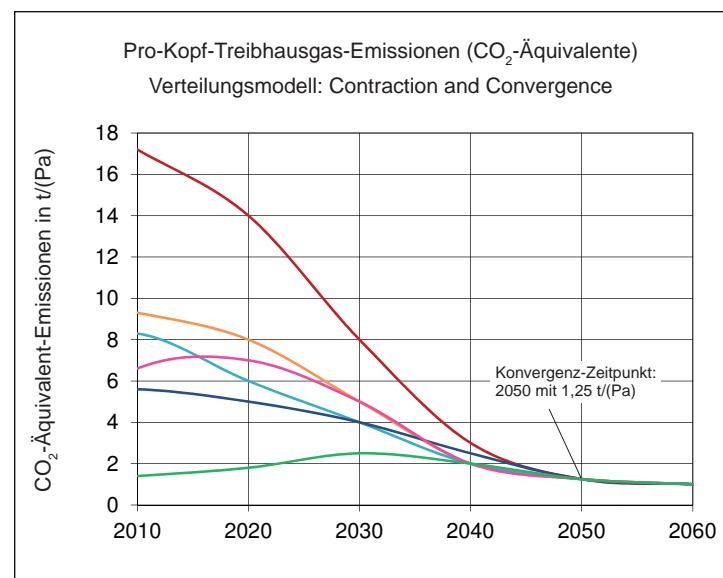


Abbildung 2.4
Entwicklung der jährlichen Pro-Kopf-Treibhausgasemissionen (CO₂-Äquivalente) in Übereinstimmung mit dem 2-Grad-Ziel unter Anwendung des Verteilmodells „Contraction and Convergence“ (Meyer 2000). Ausgehend von stark unterschiedlichen Ausgangswerten im Jahr 2010 nähern sich die Pro-Kopf-Emissionen bis 2050 auf 1,25 t/Pa einander an. Quelle: (Gonzalo/Vallentin 2013, S. 18)

Tabelle 2.2
Bestimmung der verbleibenden CO₂-Globalbudgets ab 2018, um ein bestimmtes Klimaschutzziel mit der angegebenen Wahrscheinlichkeit erreichen zu können. Die CO₂-Budgets für Deutschland beruhen auf dem Anteil von 1,1 % der deutschen Bevölkerung (83 Mio) an der Weltbevölkerung (7,8 Mrd.). Weitere Erläuterungen: siehe Text. Quelle: (IPCC 2021, SPM, S. 38) und eigene Berechnungen.

Klimaschutz-Ziel	Wahrscheinlichkeit	CO ₂ -Globalbudget	CO ₂ -Budget Deutschland	CO ₂ -Budget Dtl./Person
1,5 °C	67%	400 Gt	4,4 Gt	53 t/P
1,5 °C	50%	500 Gt	5,5 Gt	66 t/P
1,7 °C	67%	700 Gt	7,7 Gt	93 t/P
1,7 °C	50%	850 Gt	9,4 Gt	113 t/P
2,0 °C	67%	1150 Gt	12,7 Gt	154 t/P
2,0 °C	50%	1350 Gt	14,9 Gt	180 t/P

2.1 Bestimmung von Klimaschutzpfaden anhand von CO₂-Globalbudgets (IPCC 2021)

Im Sachstandsreport Nr. 6 des IPCC werden in Angaben zu den zulässigen CO₂-Budgets mit Bezug auf bestimmte Klimaschutzziele gemacht (IPCC 2021, SPM, S. 38). Diese definieren die Restmenge noch emittierbarer Treibhausgase ab einem bestimmten Zeitpunkt. Sie wurden über eine Vielzahl von Klimamodellen, die mit Langfrist-Szenarien zur weltweiten gesamtgesellschaftlichen Entwicklung gekoppelt sind, ermittelt. Hintergrund ist ein annähernd linearer Zusammenhang zwischen der kumulierten Gesamtmenge an Treibhausgasen und dem dadurch verursachten Anstieg der globalen Mitteltemperatur (1). Dies gilt jedoch nur dann, wenn man den vermuteten Kippunktes des Klimasystems (z.B. Abschmelzen des Meereseises in der Arktis, Erlahmen der atlantischen thermohalinen Zirkulation, Auftauen Permafrostböden) nicht zu nahe

kommt. Diese lösen durch positive Rückkopplungen bzw. Kaskadeneffekte einen sich verstärkenden Klimawandel aus (vgl. Lenton et al. 2008). Bei den folgenden Budgetangaben ist zu beachten, dass in den zugrundeliegenden Klimamodellen diese Kippunkte ausdrücklich nicht berücksichtigt sind.

In Tabelle 2.2 sind bezogen auf ein bestimmtes Klimaschutzziel und die Wahrscheinlichkeit, dass es eingehalten werden kann, das weltweite CO₂-Budget sowie der Anteil für Deutschland als Absolut- und Pro-Kopf-Wert angegeben. Der Anteil für Deutschland beträgt 1,1 % und entspricht dem Verhältnis der deutschen Bevölkerung zur Weltbevölkerung.

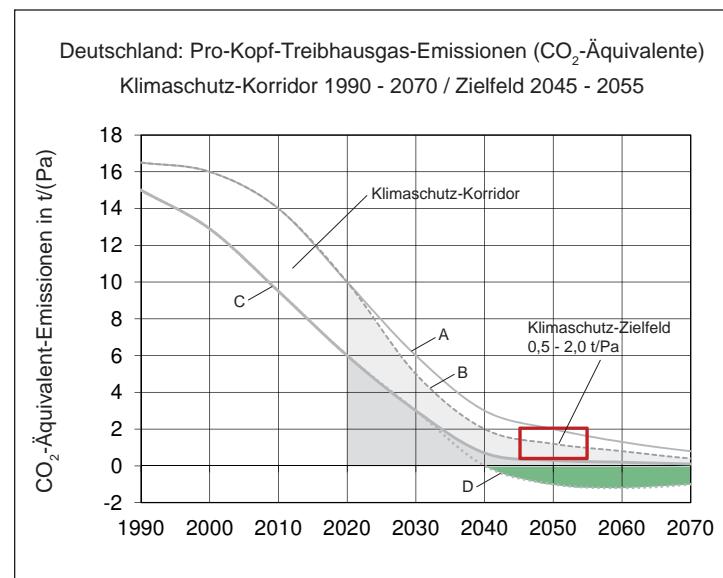
In einem weiteren Schritt wurden die so ermittelten Budgets als analoge Pfade A - D in das Modell der zuvor erläuterten Klimaschutz-Korridore und -Zielfelder übertragen (Tabelle 2.3 und Abbildung 2.5):

Tabelle 2.3
Bestimmung eines Klimaschutzkorridors für Deutschland auf der Basis der CO₂-Budgetmethode und den Ergebnissen der Tabelle 2.1 (s.o.). Die Werte beziehen sich hier auf CO₂-Äquivalente um das gesamte Global-Warming-Potential abzubilden.

Bestimmung Klimaschutzkorridor für Deutschland mit Budgetmethode			Stützpunkte der jährlichen pro-Kopf-CO ₂ -Äquivalent-Emissionen in t/P					
Pfad	Klimaschutzziel / Wahrscheinlichkeit	Budget 2020 - 70	2020	2030	2040	2050	2060	2070
A	2 °C / 50%	177 t/P	10,0	6,0	3,0	2,0	1,3	0,8
B	2 °C / 67%	142 t/P	10,0	5,0	2,0	1,2	0,8	0,4
C	1,7 °C / 67%	91,5 t/P	7,0	4,0	1,0	0,3	0,2	0,1
D	1,5 °C / 67%	47,5 t/P	7,0	3,5	0,0	- 1,0	- 1,5	- 1,0

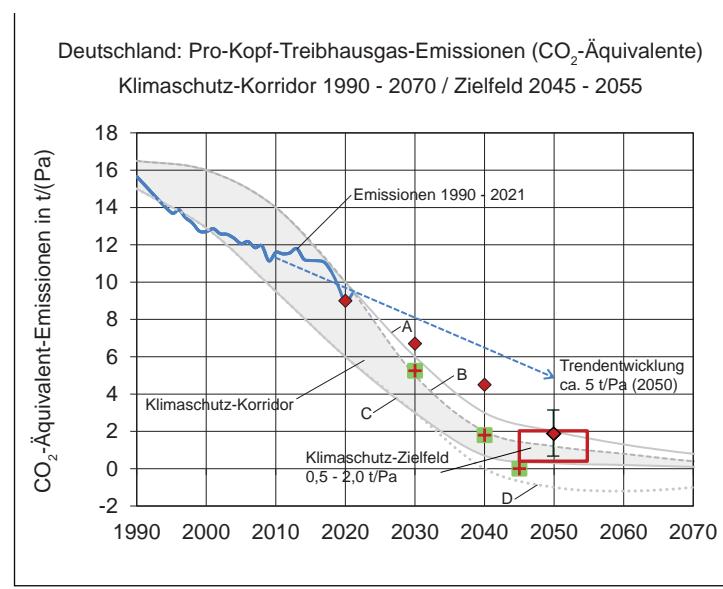
- **Pfad A** kann als absolute Obergrenze für ein gerade noch dem Pariser Klimaabkommen verträgliches Treibhausgasbudget werden. Die Wahrscheinlichkeit für die Einhaltung des 2-Grad-Ziels beträgt hier nur 50 %.
- **Pfad B** ermöglicht die Einhaltung des 2-Grad-Zieles mit einer Wahrscheinlichkeit von 67 %.
- **Pfad C** stimmt mit dem Pariser Klimaschutzziel überein, in dem mit einer Wahrscheinlichkeit von 67 % eine Überschreitung von 1,75°C gegenüber dem vorindustriellen Niveau kalkuliert wurde.
- **Pfad D** wurde für eine Einhaltung des 1,5 Grad Ziels konstruiert, der bis 2035 dem Pfad C folgt, um ab 2040 in negative Emissionen überzugehen. Damit ist die Schaffung von CO₂-Senken zu verstehen, d.h. eine über lange Zeit wirksame Kohlenstoffspeicherung (z.B. Aufforstung von Wäldern, Einbringung von Biokohle in Böden, Wiedervernässung von ehemaligen Mooren, Speicherung von CO₂ in sicheren geologischen Lagern in Verbindung mit energetischer Biomassenutzung). Je später die Treibhausgas-Emissionen auf Netto-Null absinken, desto umfangreicher und länger andauernd müsste die Senkenbildung erfolgen (IPCC 2018, Abb. 2.5, S. 113). Um nicht umfangreich in risikobehaftete Geo-Engineering-Technologien einsteigen zu müssen, wurde der Wert der maximalen negativen Pro-Kopf-Emissionen auf -1,5 t/Pa begrenzt.

In Abbildung 2.6 werden zusätzlich die Entwicklung der bisherigen Pro-Kopf-Emissionen 1990 - 2019 und die Klimaschutzziele der deutschen Bundesregierung 2020, 2030, 2040 und 2050 (vgl. BMUB 2016) aufgetragen. Die Analyse zeigt auf, dass sich die Treibhausgasemissionen seit 2000 vom unteren Rand zum äußersten Rand des Korridors entwickelt haben, mit einem Trend zu 5 t/Pa im Jahr 2050 und damit weit außerhalb des Zielfelds. Die Ziele der Bundesregierung 2030 und 2040 liegen außerhalb des Korridors und nur ein Reduktionsziel 2050 von wenigstens 90% gegenüber dem Stand von 1990 stünde in Übereinstimmung mit dem Klimaziel der Pariskonferenz.



- Klimaschutz-Budget (2,0°C)
- Klimaschutz-Budget (1,75°C)
- Klimaschutz-Zielfeld
- CO₂-Senke (1,5°C-Pfad)

Abbildung 2.5
Klimaschutz-Korridor und Klimaschutz-Zielfeld als Modell zur Identifizierung wirksamer Klimaschutz-Minderungspfade für Deutschland im Zeitraum 1990 - 2050. Die dunkelgraue Fläche entspricht einem Pro-Kopf-Budget 2020 - 2070 von ca. 91,5 t. Die hellgraue Fläche (gedacht bis zur Nulllinie) entspricht einem Pro-Kopf-Budget 2020 - 2070 von ca. 142 t. Die grüne Fläche stellt negative CO₂-Emissionen dar, wie sie für das 1,5 Grad-Ziel mit einem Budget 2020 - 2070 von ca. 50 t/P notwendig sind.



- Klimaschutz-Korridor
- Klimaschutz-Zielfeld
- IST-Emissionen 1990 - 2021
- Alte Ziele Bundesregierung
- Neue Ziele Bundesregierung

im Vergleich zum Stand 1990

2020: - 40%

2030: - 65%

2040: - 88%

2045: Klimaneutral

Abbildung 2.6
Entwicklung der Pro-Kopf-Treibhausgas-Emissionen in Deutschland im Zeitraum 1990 - 2021. Zur besseren Einordnung sind Klimaschutz-Korridor und -Zielfeld sowie die Klimaschutzziele der Bundesregierung und eine Trendentwicklung bis zum Jahr 2050 dargestellt.

2.2 Interpretation der Ergebnisse

Die wichtigste Neuerung gegenüber der Methodik der Dissertation ist die Verwendung von Treibhausgas-Budgets anstelle von zeitgebundenen Zielmarken. Verwendet werden hier die Budgets aller Treibhausgase (CO₂-Äquivalente). Grundlage dafür bilden die CO₂-Globalbudgets ab 2020 auf der Basis gekoppelter Klimamodelle und Szenarienentwicklungen (IPCC 2021). Verwendet man anstelle von Zielmarken bzw. Zielfeldern diese Budgets wird der Bereich von Klimaschutzwegen, die mit dem 2-Grad-Ziel übereinstimmen, spürbar eingeschränkt. Erkennbar wird dies am Unterschied zwischen dem A- und dem B-Pfad in Abb. 2.5 und Tab. 2.3. Möchte man das 2-Grad-Ziel mit einer Wahrscheinlichkeit von 67 % einhalten, entspricht dem für Deutschland ein durchschnittliches Pro-Kopf-Budget von ca. 150 - 160 Tonnen pro Person. Dies unter der Bedingung, dass der deutsche Anteil gemäß der Bevölkerung zugeordnet wird (derzeit ca. 1,1 % der Weltbevölkerung).

Für den Fall, dass man weiterhin mit einer Zielmarke für den Klimaschutz arbeiten möchte, ist nach derzeitigem Stand des Wissens bis zum Jahr 2050 eine Tonne pro Person und Jahr übereinstimmend mit dem 2-Grad-Ziel.

Die zweite Neuerung gegenüber der Dissertation stellt die Wahl der Pro-Kopf-Treibhausgas-Emissionen als Maßstab und Zielgröße dar. Hintergrund ist der direkte Bezug zu den vorher in Kürze dargestellten Gerechtigkeitsmodellen. Darüber hinaus sind personenbezogene Kennwerte ohnehin sinnvoll, um da-

mit verschiedene Aspekte von Nachhaltigkeit wenigstens näherungsweise abbilden zu können.

Spätestens seit dem Jahr 2000 entwickeln sich die Pro-Kopf-Emissionen von unteren Rand des Klimaschutz-Korridors zum oberen Rand. Sofern dieser Trend fortgesetzt wird wäre mit ca. 5 Tonnen pro Person im Jahr 2050 ein Pfad eingeschlagen, der definitiv keinen Bezug zu den Pariser Klimazielen aufweist.

Selbst die Ziele der Bundesregierung für 2030 und 2040 liegen außerhalb des Klimaschutz-Korridors. Von der großen Spannweite der Zielwerte für 2050 sind nur die strengeren Reduktionsraten größer gleich 90 % vertretbar.

Das gilt entsprechend auch für das Zielfeld selbst. Der Bereich oberhalb des B-Pfades ist als wenigstens grenzwertig einzustufen und erfordert für Pfade, die dort landen, einen späteren Ausgleich über negative Emissionen (CO₂-Senken).

Angesichts der Entwicklung der letzten 10 Jahre erscheinen Pfade, die die Einhaltung des 1,5 Grad-Ziels anstreben als schwierig umsetzbar, bzw. bei weiterer Verzögerung als kaum mehr erreichbar. Sofern dabei der Zeitpunkt der Netto-Null-Emissionen später als 2040 ausfällt, müssten Umfang und Zeitraum negativer Emissionen deutlich größer ausfallen als dargestellt. Damit würde man sich jenseits des Potenzials natürlicher Senkenbildung (z.B. Wiederaufforstung, Kohlenstoffspeicherung in Böden und Mooren) bewegen und risikobehaftete Geo-Engineering-Maßnahmen in Betracht ziehen müssen.

Tabelle 2.4
Bestimmung eines Klimaschutzkorridors für das Handlungsfeld Wohnen in Deutschland auf der Basis der CO₂-Budgetmethode und den Ergebnissen der Tabellen 2.1 und 2.2. Die Werte beziehen sich auf CO₂-Äquivalente um das Global-Warming-Potential abzubilden.

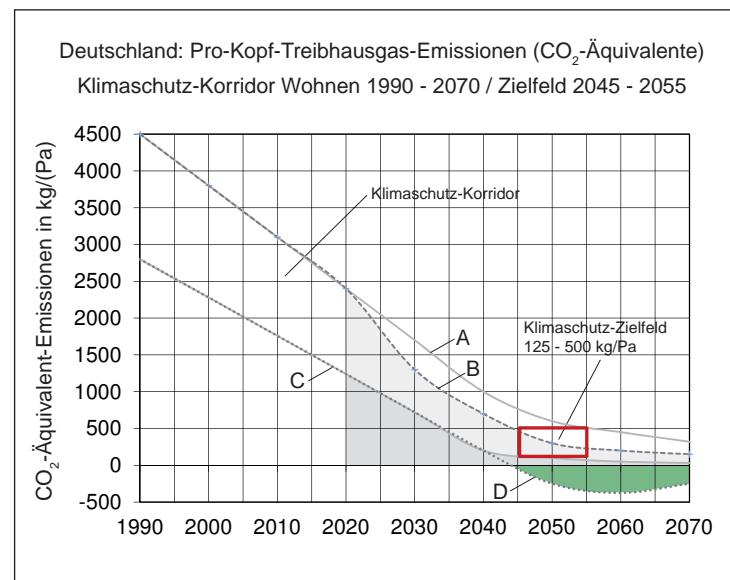
Bestimmung Klimaschutzkorridor Wohnen für Deutschland mit Budgetmethode			Stützpunkte der jährlichen pro-Kopf-CO ₂ -Äquivalent-Emissionen in t/P					
Pfad	Klimaschutzziel / Wahrscheinlichkeit	Budget 2020 - 70	2020	2030	2040	2050	2060	2070
A	2 °C / 50%	47,6 t/P	2,40	1,60	0,80	0,55	0,45	0,30
B	2 °C / 67%	38,3 t/P	2,40	1,40	0,70	0,30	0,20	0,15
C	1,7 °C / 67%	22,6 t/P	1,80	1,00	0,20	0,10	0,05	0,03
D	1,5 °C / 67%	13,3 t/P	1,80	1,00	0,20	-0,25	-0,40	-0,25

2.3 Entwicklung von Klimaschutzpfaden für das Handlungsfeld Wohnen (Sektor der privaten Haushalte)

Analog kann nun ein Klimaschutz-Korridor und -Zielfeld für das Handlungsfeld Wohnen in Deutschland entwickelt werden. Hierbei werden alle Energieanwendungen in den privaten Haushalten (Raumwärme, Warmwasser, Lüftung, sämtliche Stromanwendungen in den Gebäuden und Haushalten) berücksichtigt. Anders als in den nationalen Energiebilanzen werden hier – wie auch in der Dissertation – verursachergerecht auch der Primärenergieaufwand und die Treibhausgasemissionen für die Strom- und Fernwärmeverzeugung mitbilanziert. Unter dieser Prämisse und der Annahme, dass der Anteil des künftigen Endenergiebedarfs bzw. der Treibhausgasemissionen des Handlungsfelds Wohnen auch künftig etwa ein Viertel beträgt, lässt sich der Klimaschutzkorridor und das Zielfeld recht einfach bestimmen.

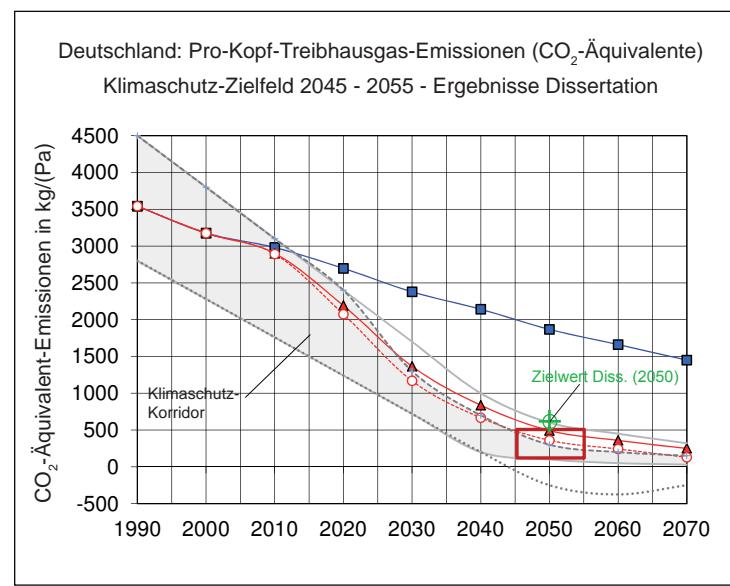
In Tabelle 2.4 sind die Pro-Kopf-Budgets und die Stützpunkte 2020 - 2070 für die Pfade A - D aufgelistet und in Abbildung 2.7 für das Handlungsfeld Wohnen visualisiert. Der Verlauf des Korridors ist in der Anfangsphase etwas einfacher, d.h. linear ausgestaltet, weil der Wohngebäudepark im Hinblick auf die Gebäudeeigenschaften und den Wandel der Energiesysteme sehr träge reagiert.

In Abbildung 2.8 sind die Ergebnisse der Hauptszenarien der Dissertation (vgl. Vallentin 2011, S. IV-96) in das neuentwickelte Modell des Klimaschutz-Korridors und -Zielfeldes aufgetragen. Die beiden Klimaschutz-Szenarien verlaufen relativ nahe entlang des Pfades B. Im Klimaschutz-Szenario beträgt das Pro-Kopf-Budget 2020-70 ca. 42,8 t/P und für das Klimaschutz-Plus-Szenario ca. 35,4 t/P. Während in Bezug auf das Klimaziel in der Dissertation (maximale CO₂-Äquivalent-Emissionen von 50 Mio t/a im Jahr 2050) beide Klimaschutzszenarien noch Spielräume aufweisen, ist dies in Bezug auf das 2-Grad-Ziel nur noch beim Plus-Szenario der Fall.



- Klimaschutz-Budget (2,0°C)
- Klimaschutz-Budget (1,75°C)
- Klimaschutz-Zielfeld
- CO₂-Senke (1,5°C-Pfad)

Abbildung 2.7
Klimaschutz-Korridor und -Zielfeld als Modell zur Identifizierung wirksamer Klimaschutz-Minderungspfade für das Handlungsfeld Wohnen in Deutschland. Die dunkelgraue Fläche entspricht einem Pro-Kopf-Budget 2020-2070 von ca. 17,5 t. Die hellgraue Fläche (gedacht bis zur Nulllinie) entspricht einem Pro-Kopf-Budget 2020-2070 von ca. 37,8 t. Die grüne Fläche stellt negative CO₂-Emissionen dar, wie sie für das 1,5 Grad-Ziel mit einem Budget 2020 - 2070 von ca. 7,9 t/P notwendig sind.



- Referenz-Szenario
- ▲ Klimaschutz-Szenario
- Klimaschutz-Plus-Szenario
- Klimaschutz-Korridor
- Klimaschutz-Zielfeld
- ◆ Zielwert Dissertation (2050)

Abbildung 2.8
Auftragen der Ergebnisse der Hauptszenarien der Dissertation (vgl. Vallentin 2011, S. IV-96) in das neuentwickelte Modell des Klimaschutz-Korridors und -Zielfelds. Zur besseren Orientierung ist die Zielmarke der Dissertation (ca. 600 kg/Pa) für das Jahr 2050 eingetragen.

3 Aktualisierung der Basis- und Eckdaten

Nach 10 Jahren ist es nun notwendig, die Klimaschutz-Szenarien zum Wohngebäudepark Deutschlands zu überarbeiten und auf den neuesten Stand zu bringen. Dies betrifft auch „technische“ Anpassungen im Sinne einer Aktualisierung der Basis- und Eckdaten, die in die Szenarien einfließen:

- Berücksichtigung der Bevölkerungs-, Haushalts- und Wohnflächenentwicklung im Zeitraum 2005 - 2020 und deren Fortschreibungen in Bevölkerungs- und Wohnungsprognosen, weil diese wesentliche Mengenkomponenten in den Szenarien darstellen.
- Modellierung der Entwicklung der Heizstruktur im Zeitraum 2005 - 2020, weil sich daraus wichtige Hinweise für Strategien zur notwendigen Dekarbonisierung der Heizsysteme bis 2050 ableiten lassen. Für die künftige Entwicklung werden zusätzlich Szenarien anderer Autoren herangezogen und auf Plausibilität hinsichtlich ihrer Anwendung auf den Wohngebäudepark geprüft.
- Einarbeiten der Veränderungen der Stromerzeugungsstruktur Deutschlands seit 2005 und der Beschlüsse zum Kohleausstieg. Hierzu werden Szenarien anderer Autoren ausgewertet, die unterschiedliche Annahmen zur Substitution der heute brennstoffgestützten Systeme durch Strom treffen. Dies betrifft insbesondere die künftige Wärmeerzeugung und Mobilität sowie Industrieprozesse.
- Abgleich mit Verbrauchsdaten zum Endenergiebedarf des Wohngebäudeparks für Wärme und Strom mit Hilfe der Daten aus verschiedenen Veröffentlichungen.
- Abschätzung zum Stand der energetischen Sanierungen im Wohngebäudebestand aufgrund von Studien zur Sanierungsrate bzw. zur Sanierungstiefe.
- Einarbeiten der Konsequenzen der politischen Beschlüsse zu gebäudebezogenen Energiestandards (z.B. GEG, KfW-Förderprogramme)

Entwicklung Bevölkerung - Haushalte - Wohnfläche

In die Szenarien zum Wohngebäudepark fließen eine Vielzahl von Randbedingungen ein, die einen Einfluss auf die Mengenkomponenten der Energie- und Treibhausgasemissionsbilanzen haben. Dazu gehört die Entwicklung der Bevölkerung, der Anzahl und der Struktur der privaten Haushalte sowie der Wohnungsanzahl, -größe und -struktur. Daraus kann schließlich die Veränderung der Wohnflächen abgeleitet werden inkl. ihrer Zuordnung zu Wohntypen und Baualtersklassen.

In Tabelle 3.1 sind die wesentlichen Mengenkomponenten Bevölkerung, Anzahl der Haushalte und die Gesamtwohnläche des Wohngebäudeparks für den Zeitraum 1990 - 2070 zusammengestellt. Die Werte, die für die Dissertation verwendet wurden, sind grau hinterlegt und den Werten der Aktualisierung gegenübergestellt. Für die Haushalte und die Wohnfläche sind zur besseren Einordnung ergänzend auch die spezifischen Kennwerte (Personen pro Haushalt und Wohnfläche je Person) aufgeführt.

Als Datenquellen für die Aktualisierung wurden verwendet:

- Die Annahmen der Bevölkerungsentwicklung entsprechen der Variante 3 der 14. aktualisierten Bevölkerungsvorausberechnung (DESTASIS 2019). Dabei sind eine moderate Entwicklung der Fertilität und Lebenserwartung mit einem hohen Wanderungssaldo kombiniert.
- Die Zahl der Haushalte wurde unter Beachtung der Entwicklung seit 1990 (vgl. gbe-bund 2020a) anhand der aktuellen Haushaltsvorausberechnung (vgl. Destatis 2017) und unter Einbeziehung der o.g. Bevölkerungsvorausberechnung für die nächsten Jahrzehnte abgeschätzt.
- Zur Entwicklung der Wohnfläche sind statistische Angaben zum Zeitraum 1990 - 2018 vorhanden (gbe-bund 2020).

		1990	2000	2010	2020	2030	2040	2050	2060	2070
Bevölkerung (Mio)	Dissertation	79,75	82,21	82,41	81,39	79,42	77,3	75,12		
	Aktualisierung	79,75	82,21	81,75	83,41	84,35	84,24	83,64	83,01	82,00
Haushalte (Mio)	Dissertation	35,13	38,15	39,67	40,02	39,72	39,20	38,50		
	Aktualisierung	35,13	38,15	39,35	41,01	42,18	42,72	42,87	43,21	43,16
	spezifisch (Personen/Haushalt)	2,27	2,16	2,08	2,03	2,00	1,97	1,95	1,92	1,90
Wohnfläche (Mio m ²)	Dissertation	2775	3250	3520	3750	3940	3990	3950		
	Aktualisierung	2755	3250	3680	3960	4150	4260	4280	4280	4260
	spezifisch (m ² /Person)	34,8	39,5	45,0	47,5	49,2	50,6	51,2	51,5	52,0

Tabelle 3.1
Basis- und Eckdaten zu den Szenarien im Zeitraum 1990 - 2070.
Vergleich zwischen den ursprünglichen Werten der Dissertation (grau hinterlegt) und den Werten der Aktualisierung.

Die Annahmen der Bevölkerungs-entwicklung entsprechen Variante 3 der 14. aktualisierten Bevölke- rungsvorausberechnung (DESTA- SIS 2019). Der Entwicklung der Haushalte und Wohnflächen liegen eigene Annahmen zugrunde. Weitere Hinweise: siehe Text.

- Für die künftige Entwicklung finden sich bis zum Jahr 2030 Hinweise in der Wohnungsmarktprognose (BBSR 2015), die jedoch das deutliche Bevölkerungswachstum nach 2015 noch nicht berücksichtigen konnte. Daher wurde hier eine eigene Modellierung vorgenommen, die sich an der aktuellen Bevölkerungsprognose und einem weiteren Anstieg der spezifischen Wohnfläche orientiert; dieser verläuft jedoch nach 2030 etwas flacher als in den Jahrzehnten davor.
- Direktelektrische Heizsysteme verlieren hingegen immer mehr an Bedeutung.
- Elektrische Wärmepumpen verzeichnen zwar nach 2010 deutliche Zuwächse, ihr Anteil liegt jedoch 2018 bei gerade einmal 2,2 % aller Wohngebäude.
- Kohleheizungen verschwinden seit dem Jahr 2000 immer mehr aus dem Bestand.
- Heizungen, die mit Holz bzw. sonstiger Biomasse betrieben werden können ihren Anteil allmählich vergrößern. Dieser liegt im Jahr 2018 bei etwa 12 %.

Entwicklung der Wärmeversorgung

Zur Entwicklung der Heizstruktur des Wohngebäudebestandes liegen Daten seit 1995 bis 2018 vor (vgl. BDEW 2019). Hierbei werden einige Tendenzen, die jeweils gleichzeitig wirksam waren, sichtbar (siehe auch Abb. 3.1):

- Erdgasheizungen haben die höchsten Anteile und bauen diese immer weiter aus, von 37,4 % im Jahr 1995 auf nun 39,4 % im Jahr 2018.
- Der Anteil von Ölheizungen nimmt hingegen kontinuierlich ab, von 34,0 % im Jahr 1995 auf 25,9 % im Jahr 2018.
- Fernwärme kann ihren Anteil leicht von 12 % im Jahr 1995 auf knapp 14 % heute steigern.

Angaben zur Heizstruktur im Neubau werden im Zuge der Bau- genehmigungen erhoben. Hier wird nebenbei auch deutlich, in welcher Richtung sich der Wandel der Wärmeversorgungen insgesamt entwickeln könnte (siehe Abb. 3.2):

- Im gesamten Zeitverlauf stellen Gasheizungen die häufigste Versorgungsvariante dar, jedoch mit fallender Tendenz. Beträgt der Anteil im Jahr 2000 noch 77 % sind es im Jahr 2019 nur noch 37 % aller Neubauten.
- Nach 2005 steigt der Anteil der mit Wärmepumpen versorgten Gebäude beginnend mit 5,4 % immer stärker an, um im Jahr 2019 knapp 30 % zu erreichen.



Abbildung 3.1
Entwicklung der Heizstruktur des
Wohngebäudeparks in Deutschland
1995 - 2018. Quelle: (BDEW 2019).

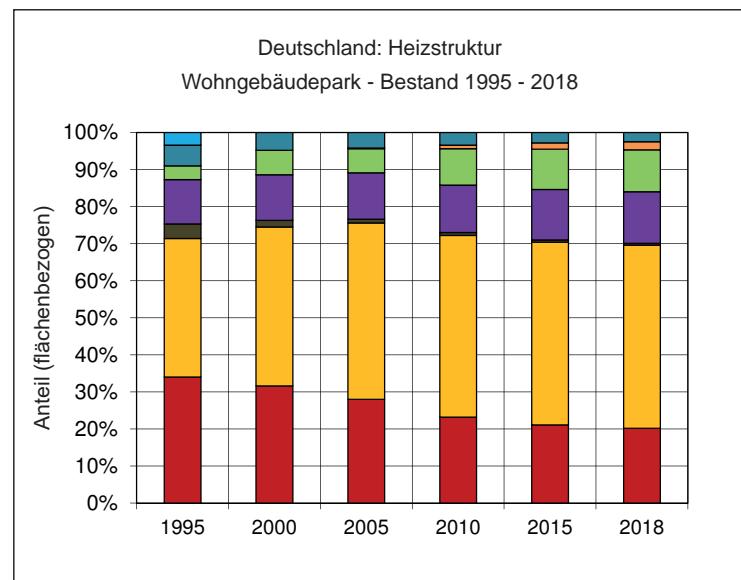
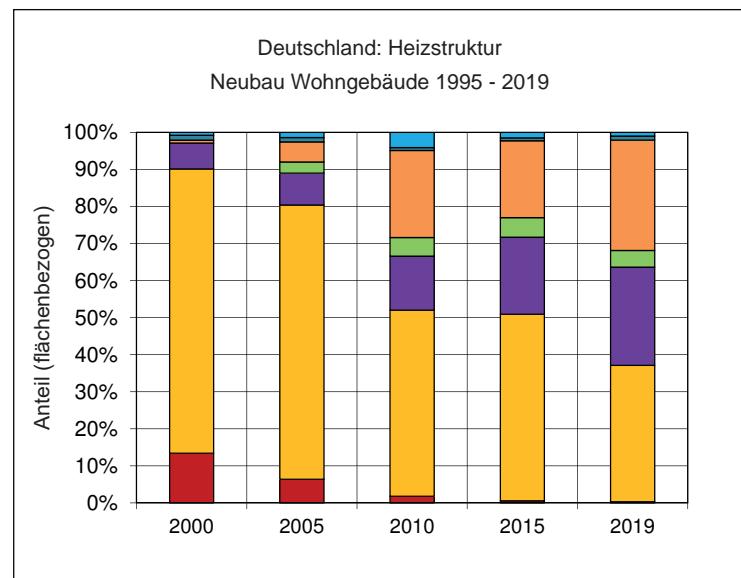


Abbildung 3.2
Entwicklung der Heizstruktur aller
Neubauten im deutschen Woh-
nungsbau in den Jahren 2000 -
2019. Quelle: (BDEW 2019a).



- Ähnliches gilt für die Fernwärme, die ihren Anteil von 7 % im Jahr 2000 kontinuierlich auf 26,5 % im Jahr vergrößern kann. Sie basiert jedoch nach wie vor dominant auf fossilen Energieträgern.
- Der Einbau von Holzheizungen erfolgt im Jahr 2000 gerade einmal in 0,8 % der Neubauten und kann bis 2013 auf 6,4 % gesteigert werden, ist jedoch seither wieder leicht rückläufig und liegt im Jahr 2019 um 4 % aller Neubauten.
- Auffällig ist ferner der starke Rückgang der Ölheizungen im Zeitraum 2000 - 2010. Sie spielen heute im Neubau kaum noch eine Rolle.
- Direktelektrische Heizungen verzeichnen im Zeitraum Anteile von 1,0 - 2,5 % der neu zu versorgenden Gebäude.

Der Vergleich zwischen den langsamen Entwicklungen im Gesamtbestand und dem Neubau zeigt auf, dass der Wandel der Wärmeversorgung sehr träge verläuft. Hierbei spielen auch „Lock-in-Effekte“ eine große Rolle, d.h. ein vorhandenes Heizsystem wird nicht ohne weiteres durch ein Heizsystem mit anderem Energieträger oder grundlegend anderer Technologie ersetzt. Von daher dominieren immer noch fossile Systeme. Die Beheizungsstruktur der Neubauten lässt Schlüsse in Bezug auf die künftigen Entscheidungen zur Energieträgerwahl zu. Dies gilt speziell auch für die bislang kaum genutzten Chancen, die sich beim Austausch von Heizsystemen im Bestand nach Ablauf ihrer Lebensdauer ergeben.

Entwicklung der Stromerzeugung

Im Vergleich zur Wärmeerzeugung zeigt sich bei der Stromerzeugung eine deutlich dynamischere Entwicklung. Hierfür sind eine Reihe politischer Entscheidungen verantwortlich, die aufzeigen, wie Klimapolitik insgesamt funktionieren könnte. Für den Ausbau erneuerbaren Stromerzeugung ist vor allem das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) im Jahr 2000 und seine Neufassungen in den Jahren 2004, 2009, 2012, 2014 und 2016/17 verantwortlich. Kernpunkt des EEG's ist, dass Strom aus erneuerbaren Energien bevorzugt in das Stromnetz einge-

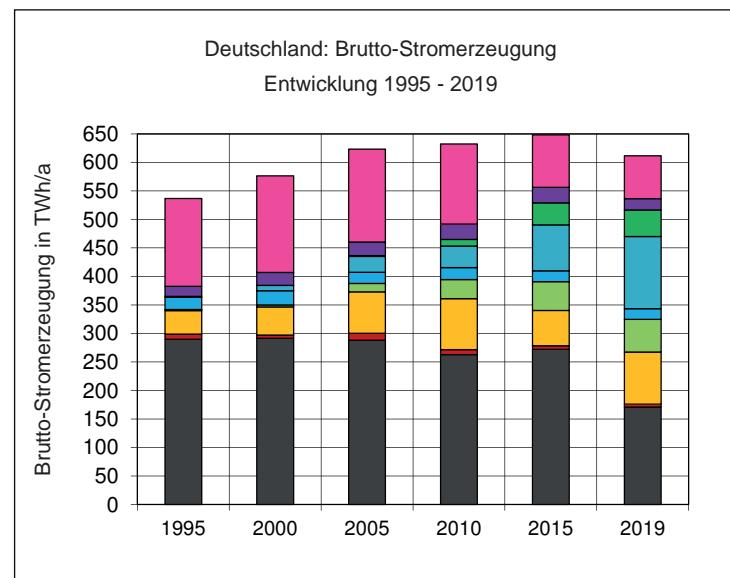
speist wird und dafür feste Vergütungssätze gewährt werden. Als zweites zentrales Momentum ist der Atomenergieausstieg mit entsprechenden Gesetzen 2002, 2010 und 2011 wirksam. Die letzten Kernkraftwerke wurden im Jahr 2023 abgeschaltet. In der Darstellung der Stromerzeugungsstruktur (Abb. 3.3) ist der Ausbau der erneuerbaren Energien, vor allem der Windkraft und Photovoltaik und der allmähliche Ausstieg aus der Kernenergienutzung deutlich zu erkennen. Ebenfalls sichtbar ist ein Rückgang der Kohlenutzung seit 2015. Erdgas-Kraftwerke werden künftig als Brückentechnologie eine Rolle im Bereich Regelenergie und potenziell zur Rückverstromung von Speicherenergie (z.B. EE-Methan aus power-to-gas-Anlagen) spielen.

Kohleausstieg und seine Folgen

In jüngster Zeit ist der Kohleausstieg im Zusammenhang mit den Pariser Klimaschutzz Zielen vor allem für die künftige Zusammensetzung des deutschen Stromerzeugung von Bedeutung. Kohlekraftwerke sollen spätestens 2038 abgeschaltet werden. Das Kohleausstiegsgesetz ist als Gesetzgebungsverfahren inzwischen abgeschlossen. In den Szenarien ist der Kohleausstieg durch die getroffenen Vereinbarungen vorhersehbar und mit größerer Klarheit modellierbar geworden.

Endenergieverbrauch der privaten Haushalte seit 1990

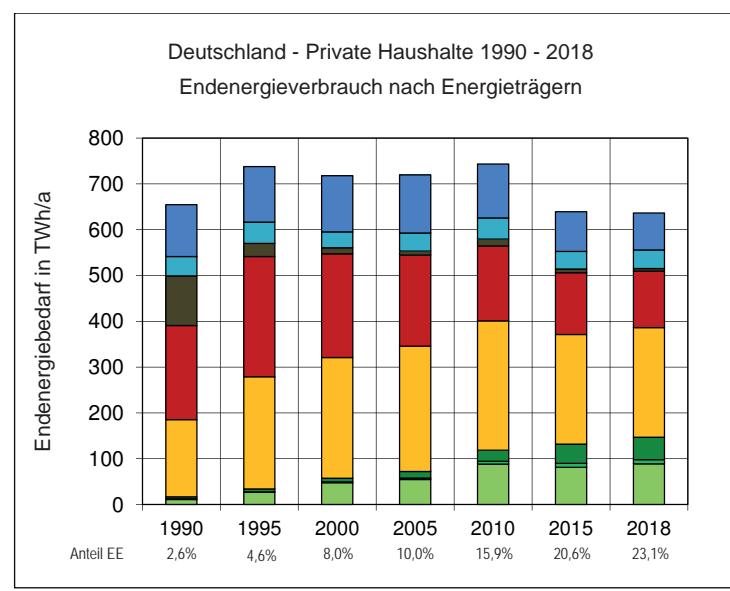
Abbildung 3.4 zeigt die Entwicklung des Endenergieverbrauchs der privaten Haushalte im Zeitraum 1990 - 2017 nach Energieträgern. Hinsichtlich der Gesamtwerte liegen die Werte 1990 (= 662 TWh/a) und 2018 (= 651 TWh/a) nahezu gleichauf; nachfolgend findet bis 1996 ein Anstieg auf ca. 720 TWh/a statt und danach ein wellenartiger Verlauf auf insgesamt hohen Niveau (Jahreswerte zwischen 800 und 600 TWh/a). Die Schwankungen sind witterungsbedingt (milde Winter im Wechsel mit strengen Wintern) und haben auch andere, u.a. auch wirtschaftliche Gründe. Bei der Verteilung der Energieträger ist der Ausbau der Erneuerbaren nach 1995 und der Rückgang beim Einsatz von Braunkohle und Steinkohle sowie Heizöl bei der Wärmeerzeu-



Deutschland: Brutto-Stromerzeugung
Entwicklung 1995 - 2019

Kernenergie
Sonstige
Fotovoltaik
Windkraft
Wasserkraft
Biomasse / Müll
Erdgas
Mineralöl
Kohle

Abbildung 3.3
Entwicklung der Brutto-Stromerzeugung nach Energieträgern in Deutschland im Zeitraum 1995 - 2019. Quelle: (AGEB 2019)



Deutschland - Private Haushalte 1990 - 2018
Endenergieverbrauch nach Energieträgern

Strom, fossil + nuklear
Fernwärme, fossil
Kohlen
Heizöl
Erd- und Flüssiggas
Strom, erneuerbar
Fernwärme, erneuerbar
Brennstoffe, erneuerbar

Abbildung 3.4
Endenergieverbrauch der privaten Haushalte in Deutschland nach Energieträgern im Zeitraum 1990 - 2018. Zusätzlich sind unten die Anteile erneuerbarer Energieträger am Endenergieverbrauch angegeben. Quelle: (UBA 2018a) und eigene Berechnungen.

- ▲ Wärme (Brennstoffe)
- Strom (inkl. Wärmeerzeugung)

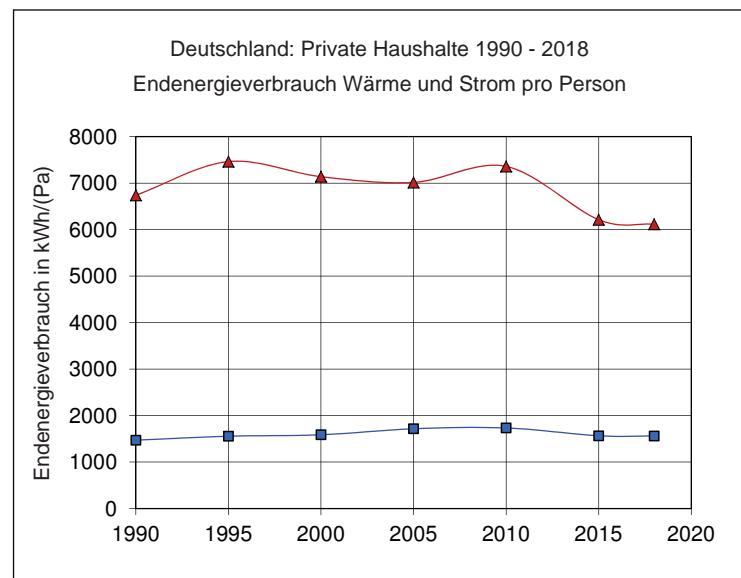


Abbildung 3.5
Endenergieverbrauch pro Person für Wärme und Strom in den privaten Haushalten 1990 - 2018.
Quelle: (AGEB 2019a, Tab. 6.2).

- ▲ Wärme (Brennstoffe)
- Strom (inkl. Wärmeerzeugung)

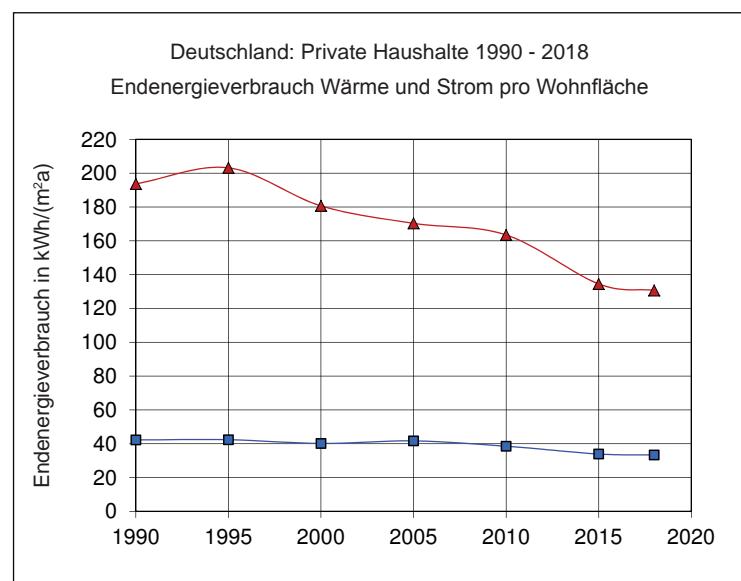


Abbildung 3.6
Endenergieverbrauch pro Quadratmeter Wohnfläche für Wärme und Strom in den privaten Haushalten 1990 - 2018. Quelle: (AGEB 2019a, Tab. 6.1).

gung besonders auffällig. Dominant in der Entwicklung ist der Ersatz der letztgenannten fossilen Energieträger durch Erdgas und Biomasse. Seit 2010 findet ein Rückgang von dem hohen Niveau mit einem Wert um 750 TWh/a auf ca. 650 TWh/a statt, was in etwa dem Ausgangsniveau von 1990 entspricht.

Der Anteil der erneuerbaren Energien (Strom, Fernwärme, Brennstoffe) kann von 2,6 % im Jahr 1990 kontinuierlich auf 23,1% im Jahr 2018 gesteigert werden. Gleichwohl basiert die Energieversorgung der privaten Haushalte immer noch dominant auf fossilen Energieträgern ohne dass sich gleichzeitig ein durchgreifender Effizienzerfolg zeigen würde. Dieses Grundproblem wird später, bei der Analyse der THG-Emissionen, noch genauer zu diskutieren sein.

Sortiert nach Anwendungsbereichen zeigt sich vor allem ein spürbarer Rückgang des Raumwärmeverbrauchs, während der Warmwasser- und Stromverbrauch stagniert oder sogar leicht ansteigt (siehe auch Tab. 3.2).

In den Abbildungen 3.5 und 3.6 sind die Endenergieverbräuche für Wärme und Strom im Sektor der privaten Haushalte mit der Bezugsgröße Person und Wohnfläche aufgetragen. Weil seit 1990 die Wohnflächen um gut 40 % gestiegen sind, zeigt sich bei den flächenbezogenen Kennwerten durchaus eine spürbare Effizienzsteigerung. Das gilt vor allem im Bereich Raumwärme. Bei personenbezogener Betrachtung fällt der Effizienzerfolg jedoch nur noch gering aus.

Abschätzung der Sanierungstiefe und Sanierungsrate im deutschen Wohngebäudebestand

In einer Studie zum Wohngebäudebestand in Deutschland und Hessen wurde ermittelt, dass die Modernisierungsrate beim Wärmeschutz (Außenwände, Kellerdecke, Dach, Fenster) im Zeitraum 2010 - 2016 im Mittel bei ungefähr 1 % pro Jahr (vgl. IWU 2018, S. 149) und damit etwas höher als in der Vorgängeruntersuchung lag, die für den Zeitraum 2005 - 2008 eine ent-

sprechende Rate von ca. 0,8 % pro Jahr ergeben hatte (vgl. BEI/IWU 2016). Die Rate ist als statistischer Mittelwert zu interpretieren, in welchem Umfang die Hüllfläche aller Bestandsgebäude energetisch saniert wurde. Die Verteilung auf unterschiedliche Bauteile fällt dabei recht unterschiedlich aus (Außenwände 0,8%, Dach bzw. oberste Geschossdecke 1,5%, Kellerdecke bzw. Bodenplatten 0,4 % und Fenster mit Verglasungen 1,8 % pro Jahr). Die Verfasser merken zusammenfassend an, dass man trotz des erreichten Zuwachses von dem aus Gründen des Klimaschutzes notwendig erscheinenden Ziels einer Verdopplung der Rate noch deutlich entfernt sei (vgl. IWU 2018, S. 149).

Im Hinblick auf die Modernisierung der Wärmeversorgung, definiert als Anteil der jährliche Anteil, bei denen der Haupt-Wärmeerzeuger erneuert wurde bzw. erstmalig ein Nah- bzw. Fernwärmeanschluss realisiert wurde, liegt die Modernisierungsrate bei ca. 3 %. Sowohl im Bestand, als auch im stattfindenden Neubau dominieren mit 85% der Anlagen fossile Systeme. Hierzu merken die Autoren kritisch an, dass es im Bereich der Heizsysteme somit weniger auf eine Steigerung der Erneuerungsrate ankomme, sondern aus Klimaschutzgründen die Erneuerungszyklen für einen Ausbau erneuerbarer Wärmeversorgungen genutzt werden müssten, was derzeit kaum stattfindet (vgl. IWU 2018, S. 149 f.).

Politische Beschlüsse

Für den Gebäudebereich ist vor allem das Gebäude-Energie-Gesetz (GEG) entscheidend für die künftige Entwicklung. Es löst das bisherigen Energieeinsparungsgesetz (EnEG), die Energieeinsparverordnung (EnEV) und das Erneuerbar-Energie-Wärmegegesetz (EEWärmeG) ab und fasst alle gebäudebezogenen Anforderungen zusammen. Die Vorgaben an die energetische Qualität der Gebäude wird gegenüber dem Stand der EnEV 2016 kaum verschärft. Es ist von daher fraglich, dass das GEG der europäischen Forderung an „nearly-zero-energy-buildings“ gerecht werden kann (vgl. EnEV-online 2019),

wie es in der europäischen Richtlinie über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden (EPBD 2010) festgelegt worden ist.

Von Bedeutung für die Entwicklung der energetischen Qualität der Wohngebäude in Vergangenheit und Zukunft sind ferner das Förderprogramm der Kreditanstalt für Wiederaufbau (KfW) für Effizienzhäuser und ausgewählte Einzelmaßnahmen im Bestand sowie weitere Fördprogramme von Bund, Ländern und Kommunen. Sie betreffen ein weites Spektrum von Heiz- und sonstigen Versorgungssystemen, Energieeffizienzstandards und Qualitätssicherungsmaßnahmen.

Bei einer repräsentativen Befragung wurde ermittelt, dass 2010 - 2016 mehr als 75 % aller Neubauten als Effizienzhäuser (KfW-Effizienzhäuser 70, 55 und 40 bzw. Passivhäuser) geplant wurden, wobei etwas mehr als die Hälfte Förderprogramme der KfW in Anspruch nahmen (vgl. IWU 2018, S. 150) (1).

Jahr	Raumwärme	Warmwasser	Stromanwendungen	Gesamt
2008	509	94	107	711
2009	489	93	106	688
2010	549	90	104	743
2011	433	106	109	648
2012	460	104	110	674
2013	505	96	109	710
2014	409	92	107	608
2015	440	92	107	639
2016	459	94	107	660
2017	464	103	108	675
2018	427	101	108	636

Tabelle 3.2:
Endenergieverbrauch der privaten Haushalte 2008 - 2018 in TWh/a und Zuordnung zu den wichtigsten Anwendungsbereichen. Quelle: (BMWi 2020, Tab. 7b).

4 Kurzanalyse der Entwicklungen 2005 - 2020

Die folgende Kurzanalyse der Entwicklungen im Wohngebäudepark im Zeitraum 2005 - 2020 hat neben der generellen Einordnung in Bezug auf die Klimaschutzziele auch die Funktion, die Neuaufstellung der Szenarien vorzustruktrieren. Für Szenarien spielt generell die Abbildung der Vorlaufphase eine wichtige Rolle, weil sich nur so eine realitätsnahe Modellierung künftiger Klimaschutzwägen ableiten lässt.

Direkte und indirekte CO₂-Emissionen der privaten Haushalte

Im Hinblick auf den Klimaschutz ist es besonders aufschlussreich, die resultierenden CO₂-Emissionen der privaten Haushalte zu analysieren und dabei auch die indirekten Emissionen durch die Stromerzeugung und Fernwärmeversorgung miteinzubeziehen. In der üblichen sektorenbezogenen Betrachtung bleiben diese normalerweise unberücksichtigt. Abbildung 4.1 zeigt, dass sich durch die indirekten Emissionen die Werte nahezu verdoppeln. Bezogen auf die entsprechenden Gesamtemissionen der privaten Haushalte machen sie ca. 45 % aus. Folgt man dem Verursacherprinzip, können sie demnach nicht vernachlässigt werden. Schon in der Dissertation wurden in der Energie- und Emissionsbilanzierung die indirekten Energieströme und daraus resultierenden Emissionen berücksichtigt. Dies wird auch bei der Aktualisierung der Szenarien so beibehalten.

Bei Betrachtung der direkten und indirekten CO₂-Emissionen der privaten Haushalte sinken diese zwischen 2005 und 2015 von 220 Mio t/a auf ca. 213 Mio t/a und damit nur um 3 % ab (siehe Abbildung 4.1). Wie zusätzlich Tabelle 4.1 dargelegt, liegt der Anteil der privaten Haushalte an den gesamten CO₂-Emissionen in diesem Zeitraum bei 25 % oder leicht darüber. Dies stützt die bereits zuvor getroffene Annahme, dass den pri-

vaten Haushalten bei verursachergerechten Bilanzierung etwa ein Viertel der gesamten Treibhausgasemissionen zuzuordnen sind. Diese Annahme wird auch in die Szenarien und deren klimarelevante Zielsetzung für den Wohngebäudepark (z.B. Anteil Globalbudget, Verlauf Klimaschutz-Korridor, Definition Klimaschutz-Zielfeld) übernommen.

Entwicklung der Pro-Kopf-Treibhausgasemissionen

Im nächsten Analyseschritt werden nun die Pro-Kopf-Emissionen der privaten Haushalte ab 1990 in das zuvor entwickelte Erklärungsmodell des Klimaschutz-Korridors aufgetragen (siehe Abbildungen 2.7 und 4.2). Bis 2005 liegen diese in der Mitte des Korridors, um danach immer mehr in Richtung oberer Rand zu verlaufen. Ab 2012 verlässt der Pfad der Ist-Entwicklung schließlich in einer Art Seitwärtsbewegung den Korridor.

Verwendet man die Pro-Kopf-Emissionen seit 2010 als Grundlage für eine Trendentwicklung, so landen die Pro-Kopf-Emissionen im Handlungsfeld Wohnen im Jahr 2050 bei etwa 1500 kg/Pa. Dieser Wert liegt um einen Faktor 1,5 höher, als die durchschnittlichen Pro-Kopf-Emissionen jeden deutschen Bürgers in allen Sektoren sein dürften, um noch eine Übereinstimmung mit dem 2-Grad-Ziel nachweisen zu können. Unter der Annahme, dass die privaten Haushalte auch im Jahr 2050 ein Viertel der Gesamtemissionen beanspruchen dürfen, wären die Treibhausgasemissionen im Sektor der privaten Haushalte dann um einen **Faktor sechs zu hoch**.

Von einem Klimaschutzwägen kann bei einer solchen Entwicklung überhaupt keine Rede mehr sein. Vielmehr ist erkennbar, dass das Handlungsfeld Wohnen für die Klimaschutzstrategie Deutschlands einen überaus kritischen Sektor darstellt. Das wird im Folgenden näher zu begründen sein.

Tab. 4.1

Vergleich der CO₂-Emissionen der privaten Haushalte mit den gesamten CO₂-Emissionen in Deutschland 2005, 2010 und 2015. Angaben als Absolutwerte in Mio t/a und als prozentualer Anteil. Quelle: (UBA 2018).

CO ₂ -Emissionen (Mio t)			
Jahr	2005	2010	2015
Wohnen	220	221	213
Gesamt	867	832	796
Anteil (%)	25,1	26,4	26,8

Kurzanalyse der Ursachen

Eine zusammenfassende Gesamtschau zu den Ursachen des aufgezeigten Stillstands zeigt folgendes Ergebnis:

- In den letzten 15 Jahren sind im Handlungsfeld Wohnen kaum Effizienzfortschritte bei den personenbezogenen Energie- und Emissions-Kennwerten feststellbar.
- Der Anteil erneuerbarer Energieträger bei Wärmeversorgungen liegt immer noch bei etwa 80 %.
- Die Sanierungsrate von 1 % ist zu niedrig, um im Bestand eine durchgreifende Bedarfsreduzierung zu erreichen.
- Wegen dem stetig hinzu kommenden Neubau verbleiben Endenergieverbrauch und Treibhausgasemissionen in etwa konstant auf einem viel zu hohen Niveau.
- Die umfangreiche Kohleverstromung und die zu geringen Effizienzfortschritte bei Stromgeräten in Verbindung mit neu hinzukommenden neuen Anwendungen sind das größte Hemmnis für einen wirksamen Klimaschutz im Strombereich.
- Die gesetzlichen Vorschriften zum Energiebedarf von Gebäuden haben ein viel zu geringes Anforderungsniveau, um den Wärmebedarf des Wohngebäudeparks insgesamt nennenswert abzusenken. Wegen fehlender Ausstiegsfahrpläne für fossile Heizsysteme kommt der Ausbau erneuerbarer Wärmeversorgungen nicht voran.
- Die umfangreichen und gleichzeitig kostenintensiven Förderprogramme (z.B. KfW, Bafa) konnten in der Vergangenheit diese Trends nicht umkehren. Immer noch wird überwiegend mit mittleren energetischen Qualitäten gebaut und der für den Klimaschutz notwendige Ausstieg aus den fossilen Heizsystemen weiter verschleppt.

Fazit: 15 verlorene Jahre für den Klimaschutz

Für das Handlungsfeld Wohnen sind die letzten 15 Jahre eindeutig als „verlorene Jahre“ zu kennzeichnen. Das Handlungsfeld Wohnen hat sich in dieser Zeit von einem relativ einfach umsetzbaren zu einem besonders kritischen Sektor für den Klimaschutz Deutschlands gewandelt.

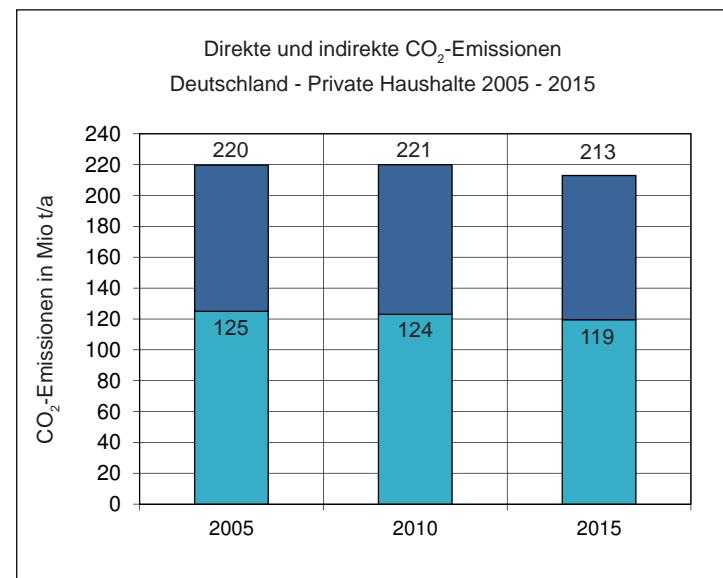


Abbildung 4.1
Direkte und indirekte CO₂-Emissionen der privaten Haushalte in Deutschland in den Jahren 2005, 2010 und 2015. Quelle: (UBA 2018).

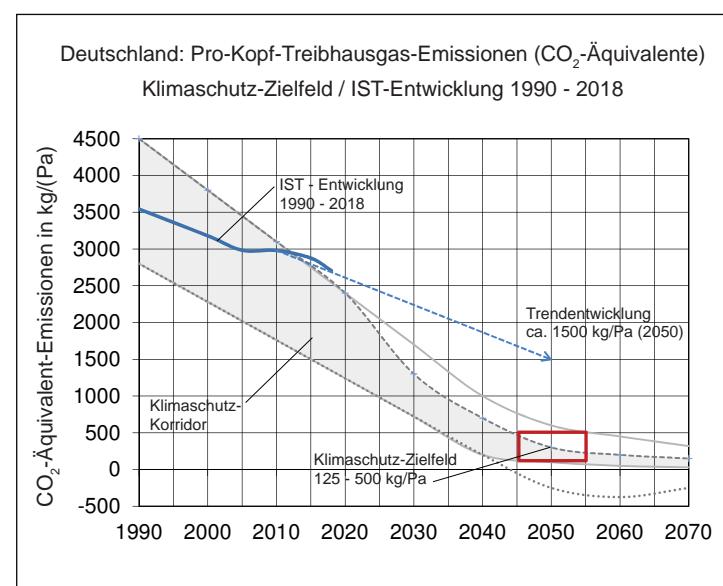


Abbildung 4.2
Pro-Kopf-Treibhausgasemissionen der privaten Haushalte im Zeitraum 1990 - 2018. Zur besseren Einordnung sind eine Trendentwicklung bis 2050 und der Klimaschutz-Korridor und das Klimaschutz-Zielfeld mit dargestellt (siehe hierzu auch Abb. 1.7).
Quelle: (UBA 2018) und eigene Berechnungen.



Abb. 5.1
Denkmalgeschützter Bestand



Abb. 5.2
Bedingt sanierbarer Bestand



Abb. 5.3
Voll sanierbarer Bestand

5 Ausgangssituation und -zustand der Wohngebäude

Die Erfassung und Dokumentation von Ausgangssituation und -zustand des deutschen Wohngebäudebestandes ist wesentlicher Bestandteil der Studie und stellt zugleich eine unverzichtbare Vorarbeit für die späteren szenarienbasierten Modellrechnungen dar. Im Mittelpunkt stehen hierbei die städtebaulichen und siedlungsstrukturellen Merkmale sowie die Gebäudegeometrien und die baulich-energetischen Eigenschaften der Gebäude und deren Nutzung. Weiter ist die Versorgungsstruktur der Wärmeversorgung zu erheben. Auf dieser Basis können die Energiekennwerte der Gebäude anhand von Bedarfsberechnungen bestimmt werden. Eine weitere für die Aufgabenstellung zentrale Erhebung betrifft die Klassifizierung der Eingriffsempfindlichkeit der vorhandenen Bausubstanz.

5.1 Strategische Gruppen im Hinblick auf die Bewertung der Eingriffsempfindlichkeit und Hemmnisse

Eine denkmal- und gestaltverträgliche Durchführung von energetischen Maßnahmen an Gebäuden muss die Empfindlichkeit der Bausubstanz gegenüber den jeweiligen Eingriffen berücksichtigen. Am augenscheinlichsten sind Fälle, bei denen ein Außenwärmeschutz nicht in Frage kommt. Die Spannbreite möglichen Lösungsansätze reicht von alternativen Maßnahmen (z.B. Innendämmungen mit neuen Innenfenstern bei Erhalt der vorhandenen Fenster) bis hin zum Verzicht auf jegliche Energieeffizienzmaßnahmen. Zur Bestimmung der verträglichen Ausführbarkeit von Energieeffizienzmaßnahmen im Bestand ist es daher notwendig, jedes Gebäude für sich in Augenschein zu nehmen und sinnvolle Bewertungs- und Abgrenzungskriterien zu entwickeln. Für die Modellbildung im Kohortenmodell werden aus Gründen der Vereinfachung nur folgende drei strategische Gruppen unterschieden:

Bedingt sanierbarer Bestand

Diese Fälle umfassen alle Bestandsbauten, bei denen aus baukulturellen Gründen bestimmte Energieverbesserungsmaßnahmen (z.B. Außendämmungen, Fensteraustausch, Einzellüftungsgeräte an der Fassade) nicht ausgeführt werden können. Dies umfasst vollumfänglich den denkmalgeschützten Bestand, bei dem nur in Abstimmung mit den Denkmalschutzbehörden energetische Maßnahmen ausgeführt werden können. Hinzu kommen weitere Gebäudebestände, die zwar nicht unter Denkmalschutz stehen, jedoch gleichwohl nicht in vollem Umfang energetisch modernisiert werden. Häufig betrifft dies nur bestimmte Bauteile (z.B. Hauptfassaden zur Straße; Innenräume mit schutzwürdigen Bauelementen wie Stuckdecken o.ä.). Bestandserhalt und Sicherung des ursprünglichen Erscheinungsbildes haben in all diesen Fällen Vorrang. Welche Effizienzmaßnahmen verträglich ausgeführt werden können, ist in jedem Einzelfall genau zu prüfen. Diese Gruppe wird in den Szenarien recht weit gefasst und beinhaltet sämtliche Wohngebäude, die vor 1918 fertiggestellt wurden (**Anm.**).

Voll sanierbarer Bestand

Hier lassen sich alle Energieeffizienzmaßnahmen aus baukultureller Sicht vollumfänglich ausführen. Jedoch können aus konstruktiven Gründen oder Platzmangel bestimmte Anschlusspunkte nicht optimal umgesetzt werden (z.B. Sockeldetail, Kellerdeckendämmung). Die Energiekennwerte liegen hier systematisch höher als bei vergleichbaren Neubauten.

Neubau seit 1990

Im Neubau liegen im Regelfall keine Einschränkungen hinsichtlich der Durchführbarkeit von Effizienztechnologien oder bei der Integration von Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung oder von erneuerbaren Heizsystemen vor.

5.2 Einteilung des Bestands in Baualtersklassen

Die Bildung einer Gebäudetypologie beruht ganz wesentlich auf Einteilung des Gebäudebestands in Baualtersklassen (BAK). Aus drei Gründen ist das Baualter ein Schlüsselmerkmal für die energetischen Untersuchungen: Erstens lassen sich so in erster Näherung die energetischen Eigenschaften der Gebäudehülle (z.B. U-Werte von Außenwänden, Dächen, Kellerdecken, Fenstern) bestimmen. Dahinter steht die Beobachtung, dass die Baukonstruktionen von bestimmten Baupochen in dieser Hinsicht relativ einheitlich sind. Zweitens ist die Kenntnis des Baujahres wichtig, weil es den Ausgangspunkt für die Bestimmung der allfälligen Instandsetzungs- und Erneuerungszyklen darstellt. Dies ist für die energetische Untersuchung elementar, weil im Berechnungsmodell die Zeitpunkte für die energetischen Modernisierungsmaßnahmen aus ökonomischen Gründen immer mit ohnehin anstehenden Instandsetzungen und Erneuerungen zusammenfallen. Dieses „Koppungsprinzip“ wird im nächsten Kapitel näher begründet und erläutert.

Die Einteilung in Baualtersklassen orientiert sich im Wesentlichen an der Gebäudetypologie des IWU (vgl. IWU 2003):

BAK A (bis 1918): Wohnbauten die vor 1918 in Fachwerk- oder sonstigen Holzbauweisen errichtet wurden.

BAK B (bis 1918): Wohnbauten die vor 1918 in Massivbauweisen errichtet wurden..

BAK C (1919 - 1948): Bauten aus der Zeit der Weimarer Republik und des Nationalsozialismus.

BAK D (1949 - 1957): Gebäude aus der frühen Nachkriegszeit bis 1957. Aufgrund von Materialengpässen wurden häufig sehr geringe Konstruktionsstärken ausgeführt. Die Mindestanforderungen an den Wärmeschutz von Außenbauteilen gemäß DIN 4108 werden nicht immer eingehalten.

BAK E (1958 - 1968): Die Bauwirtschaft leidet nicht mehr unter Materialmangel. Die Mindestanforderungen gemäß DIN 4108

sind zumeist eingehalten.

BAK F (1969 - 1978): Die Mindestanforderungen gemäß DIN 4108 sind eingehalten. Nach der ersten Ölpreiskrise werden diese häufiger übererfüllt.

BAK G (1979 - 1983): Gebäude gemäß der 1. Wärmeschutzverordnung 1977.

BAK H (1984 - 1994): Gebäude gemäß der 2. Wärmeschutzverordnung 1984.

BAK I (1995 - 2001): Gebäude gemäß der 3. Wärmeschutzverordnung 1995.

BAK J (2002 - 2009): Gebäude gemäß Energieeinsparverordnung (EnEV 2002)

BAK K (2009 - 2019): Jüngste Bestandsbauten nach der Novellierung der Energieeinsparverordnung (EnEV 2009).

5.3 Bestimmung des energetischen Ausgangszustands der Gebäude

Die realitätsnahe Bestimmung der Ausgangssituation und des Ausgangszustandes ist eine wichtige Grundvoraussetzung für alle zukunftsorientierten energetischen Untersuchungen. Hierbei stellen sich eine Reihe von Fragen, die die aktuelle Diskussion, wie sich die Ziele der Pariser Klimakonferenz im Wohngebäudebestand umsetzen lassen, im Kern betreffen. Dazu zählen:

- Wie hoch ist der Energieverbrauch der Bestandsgebäude?
- Welche Rolle spielen hierbei die Besonderheiten des Einzelfalls?
- Lassen sich systematische Zusammenhänge identifizieren, die es ermöglichen, im Hinblick auf Baualter, Nutzungs- und Gebäudeart sowie Hauptkonstruktionen homogene Gebäude in einer Typologie zusammenzuführen?
- Welche Rechenansätze zur Bestimmung der Heizwärme-, Endenergie- und Primärenergiebilanz sowie zur Bestimmung der Treibhausgasemissionen ermöglichen es, die Verbrauchswerte realitätsnah abzubilden?

- Wie lassen sich verlässliche Nutzungsrandbedingungen bestimmen bzw. klassifizieren?
- Was ist bei der Bestimmung der Klimarandbedingungen mittel- und langfristig zu beachten?

Die Beantwortung dieser Fragen ist wichtig, wenn es um die Bewertung von Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz und die Verfolgung der langfristigen Klimaschutzziele im Gebäudebestand geht. Benötigt wird eine verlässliche Basis, um die Wirksamkeit, die Kosten sowie die Wirtschaftlichkeit dieser Maßnahmen zuverlässig abschätzen zu können.

Heute übliche Berechnungsverfahren führen in der Praxis häufig zu unrealistisch hohen Bedarfsabschätzungen und damit zu Überschätzungen der Einsparpotenziale (vgl. Schröder et al. 2012 und Schnieders 2018). Bildlich gesprochen wird der Gebäudebestand „systematisch schlechtgerechnet“. Auf der Basis von unrichtigen Rechenwerten für Ausgangs- und Sanierungszustand kann keine belastbare Wirtschaftlichkeitsberechnung erfolgen. Ebenso gilt, dass sofern bereits der Ausgangszustand unzutreffend bestimmt ist, auch die künftigen Sanierungsschritte nicht realitätsnah abgebildet werden. Derartig methodisch fragwürdige Rechenansätze sind für die hier vorgesehene Untersuchung somit nicht geeignet.

Andererseits existieren im deutschsprachigen Raum eine Reihe systematischer Untersuchungen und daraus entwickelter Rechenverfahren, die es ermöglichen die Verbrauchswerte von Neubauten und Bestandgebäuden hinreichend genau zu berechnen. Sie basieren auf Rechenansätze der internationalen Norm ISO 13790. Entscheidend ist ferner, dass die Nutzungs- und Klimarandbedingungen sorgfältig und realitätsnah bestimmt werden. Beispiele hierfür sind das Berechnungsverfahren des Instituts für Wohnen und Umwelt (LEG Energiepass Heizung-Warmwasser) und das Passivhaus-Projektierungs-Paket (PHPP). Entscheidend für ihre Eignung ist, dass die Rechenansätze über Messungen und dynamischen Simu-

lationen validiert wurden. Für die Bestimmung der Bedarfswerte wird in dieser Studie ein einfaches stationäres Jahresbilanzverfahren verwendet, das sich eng an die beiden der o.g. Rechenverfahren anlehnt. Es wird im folgenden Abschnitt genauer vorgestellt.

Teil- und Vollbeheizung

Als nutzungsspezifischer Aspekt spielt im un- und teilsanierten Bestand die räumliche und zeitliche Teilbeheizung der Wohnungen eine große Rolle. Häufig werden von den Bewohnern nur die Küchen, Ess- und Wohnzimmer vollständig beheizt, während bestimmte Zimmer bzw. Raumgruppen nur zeitweise oder gar nicht geheizt werden. Dadurch befindet sich die durchschnittliche Raumtemperatur der gesamten Wohnung deutlich unter der Normtemperatur von 20 °C, die bei Bedarfsberechnungen verwendet wird. Typischerweise liegen diese dann im Bereich zwischen 17 und 19 °C, fallweise sogar noch niedriger. Berücksichtigt man diesen Aspekt nicht bei den Berechnungen, sind die Heizenergie-Verbrauchswerte systematisch niedriger als die Heizenergie-Bedarfswerte.

Zusätzlich finden sich in umfangreicherem Beständen auch immer gewisse Anteile von Leerständen oder temporären Nutzungen (z.B. Ferienwohnungen), die ebenfalls zu geringeren Verbräuchen führen. Der gegenteilige Effekt zeigt sich, sobald diese Bestandbauten wenigstens auf Niedrigenergiestandard-niveau modernisiert werden. Dann realisieren die Bewohner, wie auch in heutigen Neubauten, höhere Temperaturniveaus von 20 - 24 °C (typischer Mittelwert: 21°C) indem sie von Teil- auf Vollbeheizung übergehen.

Lüftungsverhalten und energetisch wirksamer Luftwechsel

Ein weiterer stark nutzungsabhängiger energetischer Parameter ist der Außenluftwechsel. Dieser setzt sich aus dem Fugen- und dem Fensterluftwechsel zusammen. Messungen in bewohnten Häusern zeigen neben den starken Unterschieden zwischen einzelnen Nutzern, die in „Viel-, Mittel- und Wenig-

Kennwerte Bestand im Ausgangszustand 2010				Hüllflächen in m ²				Kompaktheit	Dämmqualität	Heizwärmebed.
Kürzel	BAK	Geschoßzahl	EBF (m ²)	Dach	Wand	Kellerdecke	Fenster	A _{gew} /EBF	Um-Wert	HWB
EFH_A	bis 1918	2	199	134	172	85	29	1,90	1,59	216
EFH_B	bis 1918	2	129	83	196	78	22	2,64	0,53	134
EFH_C	1919-1848	2	275	214	237	145	52	1,94	0,84	127
EFH_D	1949-1957	1	101	125	120	80	18	3,01	0,73	174
EFH_E	1958-1968	1	242	181	185	196	39	2,08	0,87	155
EFH_F	1969-1978	1	158	183	171	152	34	3,00	0,62	148
EFH_G	1979-1983	2	196	101	161	83	27	1,69	0,53	85
EFH_H	1984-1994	1	137	123	213	75	30	2,96	0,52	130
EFH_I	1995-2001	1	111	116	129	84	32	2,88	0,43	123
EFH_J	2002-2009	2	133	86	191	80	28	2,59	0,38	107
EFH_K	2010-2019	2	275	214	237	145	39	2,35	0,25	81
RH_B	bis 1918	2	87	60	76	60	18	2,12	1,15	178
RH_C	1919-1848	2	103	50	66	50	21	1,59	1,03	125
RH_D	1949-1957	2	136	81	137	81	42	2,21	0,65	130
RH_E	1958-1968	2	107	46	42	46	14	1,17	0,75	97
RH_F	1969-1978	2	97	61	56	61	23	1,76	0,68	102
RH_G	1979-1983	2	98	98	56	73	20	2,14	0,57	128
RH_H	1984-1994	2	116	65	53	56	19	1,42	0,59	89
RH_I	1995-2001	2	135	77	45	52	26	1,33	0,42	74
RH_J	2002-2009	2	138	91	143	71	36	1,49	0,45	80
MFH_A	bis 1918	4	616	284	629	174	107	2,00	1,47	202
MFH_B	bis 1918	4	284	103	148	103	54	1,25	1,11	123
MFH_C	1919-1848	3	350	159	326	159	65	1,88	0,87	142
MFH_D	1949-1957	3	575	355	464	355	99	1,91	0,80	134
MFH_E	1958-1968	4	2845	971	2041	971	507	1,41	1,31	143
MFH_F	1969-1978	4	426	217	338	217	81	1,75	0,65	115
MFH_G	1979-1983	3	595	248	449	248	99	1,55	0,61	99
MFH_H	1984-1994	3	707	249	777	249	161	1,85	0,60	94
MFH_I	1995-2001	4	759	284	698	284	163	1,69	0,39	80
MFH_J	2002-2009	3	1991	580	1700	620	307	1,45	0,41	78
MFH_K	2010-2019	6	870	251	890	135	174	1,60	0,43	74
GMH_B	2001 -2010	5	754	232	307	164	136	1,00	1,85	158,00
GMH_C	bis 1919	5	1349	384	1246	396	279	1,56	1,09	135,00
GMH_D	1920 - 1945	5	1457	354	1378	354	295	1,51	0,80	115,00
GMH_E	1946 - 1960	8	3534	480	3250	459	687	1,31	1,11	122,00
GMH_F	1961 - 1970	8	3020	540	2132	540	545	1,15	1,05	124,00
HH_E	1971 - 1980	16	10408	501	5579	485	1947	0,95	1,12	106,00
HH_F	1981 - 1990	14	18012	1469	10094	1469	2581	1,08	0,76	82,00
NBL_MFH	1946-1990	4 - 6	1753 - 2825	559 - 812	1160 - 1602	559 - 812	320 - 547	1,05 - 1,32	0,75 - 0,84	87 - 114
NBL_HH	1970-1985	10 - 16	4796 - 7270	598 - 695	2994 - 4224	598 - 696	756 - 1471	0,93 - 0,97	1,00 - 1,08	101 - 105

Tabelle 5.1:
Auflistung der 45 Bestandstypen der Gebäudetypologie in Anlehnung an (IWU 2003) mit Angabe der Baualtersklasse, Geschosszahl, der Energiebezugsfläche (= beheizte Wohnfläche), den Größen der Hüllflächen (Dach, Wand, Kellerdecke, Fenster), der Kompaktheit ($A_{\text{gew}}/\text{EBF}$), dem mittleren U-Wert der Gebäudehülle und dem spezifischen Jahresheizenergiebedarf.

Die Werte beziehen sich auf den Ausgangszustand im Jahr 2010. Die Vergleichswerte für das Jahr 1990 finden sich in (Vallentin 2011, S. IV- f.).

Die Gebäudetypen des bedingt sanierbaren Bestandes sind grau hinterlegt.

Die 7 Gebäudetypen der neuen Bundesländer wurden aus Platzgründen in zwei Gruppen NBL-MFH

lüfter“ (vgl. Reiß/Erhorn/Ohl 2001) eingeteilt werden können, auch eine starke jahreszeitliche Abhängigkeit des Außenluftwechsels. Während im Sommer und in den Übergangszeiten viel gelüftet wird, sinken die Luftwechselraten bei Fensterlüftung im Kernwinter stark ab. Dies führt einerseits häufig zu ungenügender Luftqualität in Wohnungen, Klassenzimmern und anderen Hauptnutzungsräumen. Andererseits liegen dadurch die Lüftungswärmeverluste in Bestandsgebäuden häufig deutlich unter den Bedarfswerten, die unter Zugrundelegung von Standardnutzungskennwerten berechnet wurden und die sich aus guten Gründen an einem hygienisch ausreichenden Luftwechsel orientieren. Diese Frage wird im folgenden Kapitel nochmals aufgegriffen, wenn es um die Bestimmung des Rechenwertes für den energetisch wirksamen Luftwechsel im Kohortenmodell geht.

Letzte umfangreiche Sanierung

In den meisten Fällen stimmen die Zustände der vorgefundenen Gebäude nicht mehr mit dem ursprünglichen Zustand überein. Selbst bei denkmalgeschützten Gebäuden sind in der Vergangenheit bestimmte Instandsetzungs- und Erneuerungsmaßnahmen durchgeführt worden, allerdings nur in wenigen Fällen auch in Kombination mit energetischen Maßnahmen. Von den voll sanierbaren Gebäuden haben bereits einige umfangreichere energetische Sanierungen hinter sich, die

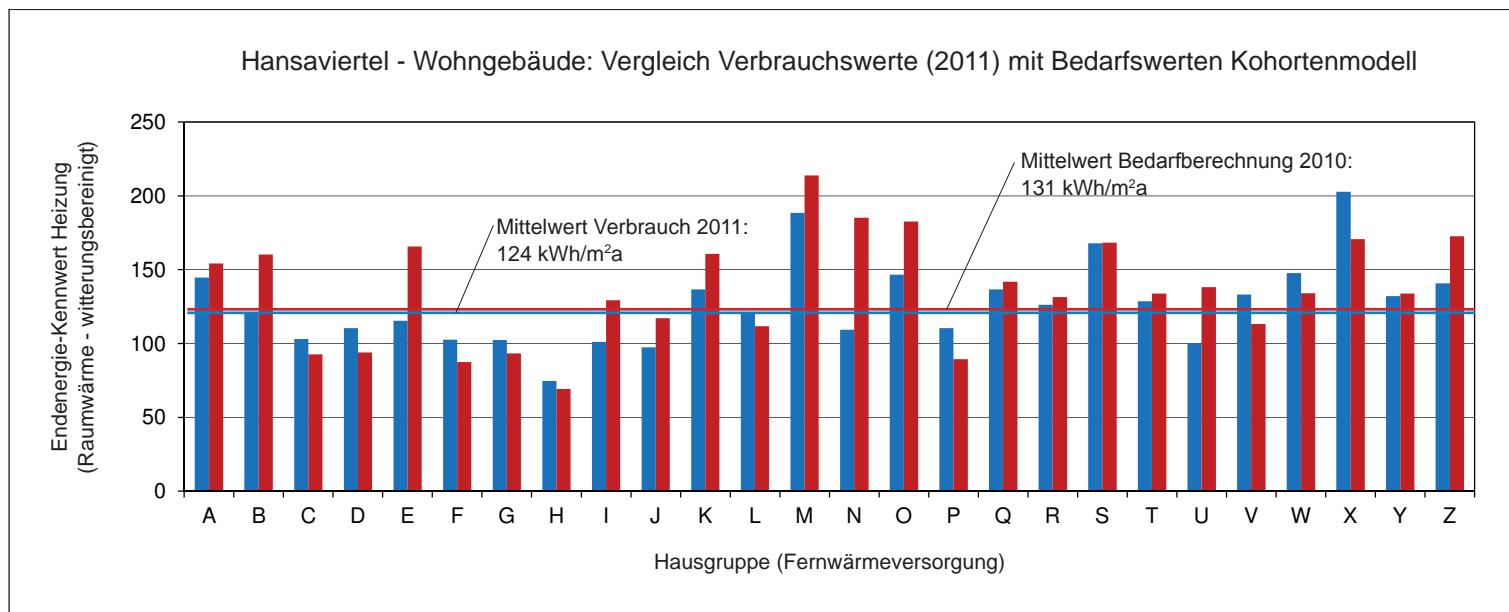
jedoch nicht immer eine zukunftsweisende Qualität aufweisen. In den anderen Fällen sind die bislang ausgeführten energetischen Maßnahmen am Gebäude auf Teilschritte beschränkt, die oftmals wenig systematisch ausgeführt worden sind. Typisch hierfür sind beispielsweise:

- Teildämmung bestimmter Fassadenbereiche (z.B. Brandwände).
- Austausch von einzelnen Fenstern und Verglasungen mit unterschiedlichen energetischen Qualitäten.
- Bei Flachdachsanierungen und Dachausbauten wurden regelmäßig Dachdämmungen mit ausgeführt.
- Heizungsaustausch bei älteren Anlagen

Soweit möglich, wurden die bisher bereits durchgeführten Sanierungen bei der Bestimmung der Ausgangswerte, die in Tabelle 3.1 für jeden Gebäudetyp dokumentiert ist, berücksichtigt. Dies erfolgte über eine Auswertung von Untersuchungen (z.B. Walberg et al. 2012, IWU 2018), die Befragung von Experten und eigene Vor-Ort-Begehungen. Jedoch ist hier darauf hinzuwiesen, dass die genannten Werte größere Unsicherheiten beinhalten. Im Laufe des Betrachtungszeitraums, d.h. nach einigen Instandsetzungs- und Erneuerungszyklen im Bestand, spielen diese Fehler jedoch eine immer geringere Rolle bei der Bestimmung der Heizwärme-Kennwerte. Sie geraten, bildlich gesprochen, immer mehr „in Vergessenheit“.

Ausgangszustand 2010: Dämmqualität der Gebäudehülle (U-Werte in W/m ² K)								
		Dach		Außenwand		Kellerwand		Fenster
Bedingt sanierbarer Bestand / Baudenkmale	EFH	0,8 - 1,8		1,7 - 1,9		0,8 - 1,0		2,0 - 2,6
	MFH	0,7 - 0,8		1,4 - 1,9		0,8 - 1,4		1,8 - 2,0
		bis 1980	ab 1980	bis 1980	ab 1980	bis 1980	ab 1980	bis 1980
Voll sanierbarer Bestand	EFH	0,3 - 1,0	0,2 - 0,45	0,6 - 1,2	0,35 - 0,55	0,5 - 1,6	0,35 - 0,65	1,6 - 2,8
	MFH	0,3 - 2,1	0,25 - 0,3	0,55 - 1,2	0,35 - 0,55	0,5 - 1,1	0,25 - 0,35	1,6 - 2,3
Neubau	EFH	0,22		0,30		0,40		1,30
	MFH	0,25		0,35		0,32		1,00

Tabelle 5.2:
Zusammenstellung der U-Werte für die Konstruktionen der Gebäudehülle im Jahr 2010 (Ausgangszustand). Es wird differenziert zwischen Ein- und Mehrfamilienhäusern und Baudenkmälern, Bestandsgebäuden und dem Neubau. Angabe der Werte in W/m²K.



■ Verbrauch (Fernwärme 2011)
■ Bedarfswert Kohortenmodell

Abbildung 5.4
Vergleich zwischen witterungsberücksichtigten Verbrauchswerten (2011) und Bedarfswerten (Ausgangszustand 2010) zum Endenergiebedarf für Raumwärme der fernwärmeverSORGten Wohnbauten im Hansaviertel. Quelle: (Vallentin 2013, S. 57).

Überprüfung anhand eines Vergleichs von Bedarfs- und Verbrauchswerten (Hansaviertel Berlin)

Das hier zur Anwendung kommende Jahresbilanzverfahren konnte in einer anderen Szenarienstudie, die das Hansaviertel in Berlin zum Untersuchungsgegenstand hatte, überprüft werden (vgl. Vallentin 2013, S. 56 ff.). Die Überprüfung erfolgte anhand der Endenergie-Kennwerte für Raumwärme und nicht über den Jahresheizwärmebedarf. Der durchschnittliche spezifische Endenergieverbrauch für Raumwärme aller fernwärmeverSORGten Gebäude im Hansaviertel betrug im Jahr 2011 etwa 133 kWh/m²a. Im Vergleich dazu liegt der im Kohortenmodell berechnete entsprechende Kennwert für 2010 bei 138 kWh/m²a und damit um 4 % höher.

Bei den Wohngebäuden liegt der von der Vattenfall Wärme AG übermittelte wohnflächengemittelte Endenergie-Verbrauchswert für Raumwärme im Jahr 2011 bei 124 kWh/m²a, während der Bedarfswert für 2010 im Kohortenmodell 131 kWh/m²a be-

trägt und damit rund 6 % höher abgeschätzt wird (2). Bei Betrachtung der einzelnen Gruppen (Abb. 5.4) wird sichtbar, dass in einigen Fällen größere Unterschiede zwischen Verbrauchs- und Bedarfswerten vorliegen. Zur Erklärung dieser Unterschiede wäre jedoch eine gebäudebezogene Feinanalyse im Rahmen einer Bestandsaufnahme notwendig, die im Rahmen der Studie jedoch nicht vorgesehen war. Die Unterschiede mitteln sich auf Quartierebene weitgehend heraus.

Aufgrund des vorhandenen 3-Leiter-Netzes konnten die Endenergie-Verbrauchswerte für die Warmwasserbereitung separat erfasst werden. Die von der Vattenfall AG übermittelten Werte ergeben einen wohnflächenbezogenen Verbrauchswert von etwa 19 kWh/m²a (3). Der personenbezogene Kennwert bei einer angenommenen spezifischen Wohnfläche von 38 m²/Person, die heute als Durchschnittswert für Berlin-Mitte zutrifft, liegt bei 710 kWh/Pa. Die Warmwasser-Verbrauchswerte sind somit im Vergleich zu Literaturwerten gering. Im Kohortenmo-

dell wurden im Jahr 2010 ein höherer Bedarfswert von 26 kWh/m²a bzw. 856 kWh/Pa kalkuliert. Hierbei ist zu beachten, dass nur ein Teil der Gebäude, die an die Fernwärme angeschlossen sind, auch einen Warmwasseranschluss besitzen. Zudem ist möglich, dass in den fernwärmeverSORgter Wohnungen zusätzlich direktelektrische Warmwasserbereiter vorhanden sind.

Insgesamt ergibt sich eine gute Übereinstimmung zwischen den Verbrauchs- und den Bedarfswerten in den Szenarienrechnungen für die fernwärmeverSORgte Gebäude im Hansaviertel. Nicht zuletzt konnte durch diese Überprüfung das Vertrauen in die gewählten Rechenansätze gestärkt werden.

5.4 Wärmeversorgung

Die Struktur der Wärmeversorgung des Wohngebäudeparks wurde anhand der verfügbaren aktuellen statistischen Auswertungen modelliert. Diese wurden bereits in Kapitel 3 vorgestellt und analysiert. Die Daten liegen sowohl als Zeitreihen für den Wohngebäudebestand (siehe Abbildung 3.1) als auch für den Neubau der Jahre 1995 - 2019 vor (siehe Abbildung 3.2). Daraus kann einerseits der Ausgangszustand für das Jahr 2010 recht genau bestimmt werden. Andererseits ergeben sich darüber hinaus wertvolle Hinweise für die Modellierung der Heizstruktur für die kommenden Jahrzehnte.

Die Wärmeerzeugung für den Wohngebäudepark im Jahr 2010 ist mit etwa 80 - 85 % immer noch in sehr hohem Maße auf fossile Energieträger gestützt. Im Wesentlichen wurde hier der Energieträger Heizöl durch Erdgas ersetzt. Ein sich abzeichnender grundlegender Wandel ist trotz der im Vergleich zum Bestand anderen Heizstruktur der Neubauten weg von einer fossilen Wärmeerzeugung ist derzeit nicht erkennbar oder vollzieht sich so langsam, dass er dem Klimaschutzthema nicht gerecht zu werden droht.

5.5 Stromerzeugung

Für die Stromerzeugung liegen ebenfalls belastbare statistische Daten für die Jahre 1995 - 2019 vor, die ebenfalls in Kapitel 3 präsentiert wurden (siehe Abbildung 3.3). Der Wandel hin zu einer erneuerbaren Energieerzeugung ist bei der Elektrizität viel größer ausgeprägt als bei der Wärmeerzeugung. Im Jahr 2010 lag der erneuerbare Anteil der Stromerzeugung bei 30 % und ist in den letzten 10 Jahren auf ca. 40 % angestiegen.

Die künftige Struktur der Stromerzeugung ist darüberhinaus sehr viel stärker von politischen Entscheidungen (z.B. Atomenergie- und Kohleausstieg, CO₂-Preis, europäische Klimapolitik) abhängig als die Wärmeerzeugung, die bislang auffällig wenig politische Aufmerksamkeit auf sich zieht.

Für Deutschland existieren eine Vielzahl von Energie-Langfristszenarien, in denen die künftige Entwicklung der Stromversorgung jedoch sehr unterschiedlich dargestellt wird. Die jüngeren Szenarien, die zugleich einen ambitionierten Klimaschutz verfolgen, gehen von viel umfangreicheren Stromanwendungen aus, als die älteren Szenarien. Dies betrifft z.B. stromgestützte Wärmeversorgungen (Wärmepumpen), Elektromobilität und die Erzeugung von erneuerbar hergestellten Wasserstoff und Methan als saisonaler Speicher sowie für industrielle Zwecke und für Schwerverkehr und Luftfahrt. Von daher wird in den Berechnungsmodellen zum Wohngebäudepark die Stromerzeugung abhängig von den Grundannahmen in den Szenarien unterschiedlich modelliert. Darin werden verschiedene Pfade beschrieben, die eine hohe Kohärenz zu den Entwicklungen im Gebäudebereich aufweisen und auf deren Randbedingungen aufbauen.

Insgesamt findet derzeit eine Entwicklung weg von den brennstoffgestützten hin zu stromgeführten Systemen statt. Der Gebäudesektor hat dort eine systemdienliche Funktion, indem er wegen seiner Speichermasse zum Lastausgleich beitragen

kann und die Rückverstromung der saisonal gespeicherten Energie vom Sommer in den Winter am besten in Fernwärmesystemen passiert, um in diesem Prozess gleichzeitig Strom und Wärme bereitstellen zu können.

5.6 Vergleich der Ausgangswerte 2010 zwischen statischen Daten und Modellberechnungen in den Szenarien

Zum Abschluss werden die Werte für den Endenergiebedarf und für die CO₂-Emissionen miteinander verglichen. Dies ermöglicht eine erste Aussage zur Plausibilität der Entwicklungen in den Szenarien und zur Aussagekraft der ihnen zugrunde liegenden Modellrechnungen (siehe Tabelle 5.3).

Bei den Endenergie-Kennwerten ergeben sich je nach Anwendungsfeld verschiedene große Abweichungen zwischen den Werten der nationalen Energiebilanzen und den Rechenwerten in den Szenarienmodellen:

- Im Hinblick auf die Raumwärme liegt der Endenergie-Kennwert in den Szenarien um 1 % höher als in den nationalen Energiebianzen
- Der Warmwasserbedarf wird in den Szenarien unterschätzt und liegt dort um 11% niedriger als in den nationalen Erhebung für das Jahr 2010.
- Bei den Stromanwendungen ist es genau umgekehrt. Hier liegen die Bedarfswerte in den Szenarienrechnungen um ca. 10% höher als die Verbrauchswerte der nationalen Energiestatistik.
- In der Summe stimmen die Ergebnisse zum Endenergiebedarf sehr gut mit den veröffentlichten nationalen Verbrauchswerten überein.

Bei den CO₂-Emissionen der privaten Haushalte sind die Abweichungen zwischen den rechnerischen Bedarfswerten in den Szenarien und den Werten der nationalen Emissionsbilanz sehr gering. Das gilt auch für die Verteilung zwischen direkten und indirekten Treibhausgasemissionen.

Endenergie-Kennwerte private Haushalte Deutschland 2010 (TWh/a)		
	(BMWi 2020)	Szenarien
Raumwärme	549	555
Warmwasser	90	80*
Stromanwendungen	104	114
Summe	743	749

CO ₂ -Emissionen der privaten Haushalte Deutschland 2010 (Mio t/a)		
	(UBA 2018)	Szenarien
direkt	124	123
indirekt	97	98
Summe	221	221

5.7 Festlegungen in den Szenarien

Auf dieser Basis war es nun möglich, den Ausgangszustand der Gebäude abschließend festzulegen. Dafür war nicht zuletzt ausschlaggebend, dass in den Szenarien die bisherige Entwicklung in den Jahren 1990 - 2010 hinreichend genau nachvollzogen werden konnte.

In den Tabellen 5.1 und 5.2 ist die Gebäudetypologie der Bestandsgebäude und des Neubaus im Jahr 2010 im Hinblick auf deren Geometrien sowie der energetische Kennwerte der Gebäudehülle zusammengestellt. Die Heiz- und Stromerzeugungsstruktur wird in den Szenarien nicht differenziert für die 45 Bestandstypen sondern nur für den Gesamtbestand modelliert. Hintergrund ist, dass für eine derartige differenzierte Betrachtung die notwendige Datenbasis nicht vorhanden ist und die Modellbildung deutlich komplexer machen würde (4).

Tabelle 5.3:
Vergleich der Daten aus nationalen Energiebilanzen bzw. zu den Treibhausgasemissionen für die privaten Haushalte in Deutschland im Jahr 2010 mit den Berechnungen in den Szenarien dieser Arbeit.

oben: Angaben zu den Endenergie-Kennwerten für Raumwärme, Warmwasser- und Stromanwendungen.

unten: Angaben zu den direkten und den indirekten CO₂-Emissionen. Die indirekten Emissionen betreffen die Strom- und Fernwärmeverzeugung, die in den nationalen Energiebilanzen dem Energiesektor zugeordnet sind.

Quellen: (BMWi 2020) und (UBA 2018) sowie eigene Berechnungen.

6 Szenarien und Modellbildung

Die zentrale Untersuchungsfrage der Studie lautet, wie die Ziele der Pariser Klimakonferenz für den deutschen Wohnbau eingehalten werden können und welche praktischen Konsequenzen aus der kurz- mittel- und langfristigen Perspektive daraus folgen. Hierbei wird nur die Betriebsenergie (Heizen, Lüften, Warmwasser und sämtliche Stromanwendungen in den Wohngebäuden) betrachtet. Eine derartige Fragestellung lässt sich nicht direkt beantworten, sondern erfordert das Durchspielen verschiedener Handlungsstrategien, z.B. mit Hilfe von Modellen und Szenarien. In diesen werden die wesentlichen dynamischen Veränderungen, ausgehend von heute zu beobachtenden Entwicklungen, über verhältnismäßig lange Zeiträume von mehreren Jahrzehnten abgebildet.

Szenarien stellen komplexe „Wenn-Dann“-Aussagen dar. Dabei können unterschiedliche Motivationen oder Zielsetzungen zum Tragen kommen. Zunächst ist es wichtig, Szenari-

en von Prophezeiungen oder Prognosen zu unterscheiden, die entweder unbedingte Aussagen enthalten oder Vorhersagen mit (behaupteter) hoher Eintrittswahrscheinlichkeit aufstellen. Szenarien hingegen können immer nur bedingte Aussagen treffen, d.h., sie sind an die getroffenen Randbedingungen und Annahmen gebunden und haben nicht den Anspruch, dass die beschriebenen Entwicklungen auch tatsächlich so eintreffen werden. Szenarien haben vielmehr das Ziel aufzuzeigen, welchen Einfluss bestimmte Entscheidungen oder Handlungsoptionen auf die künftige Entwicklung eines Systems oder einer Gesellschaft haben können. Aus methodischen Gründen werden häufig mehrere Szenarien entwickelt. Dabei werden prinzipielle Handlungspfade in Bezug auf gesellschaftliche und politische Entscheidungsoptionen und deren Konsequenzen gegenübergestellt. Je nach Aufgabenstellung, Motivation oder Zielsetzung lassen sich verschiedene Typen von Szenarien unterscheiden (siehe Abb. 6.1):

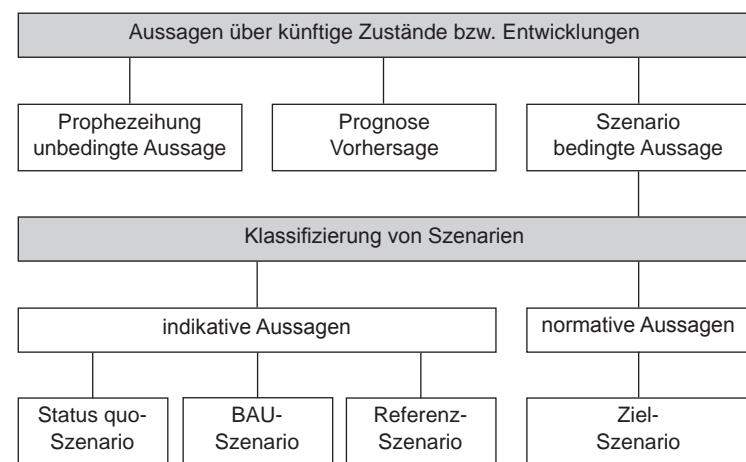


Abb. 6.1
Abgrenzung zwischen Prophe-
zeiung, Prognose und Szenario.
Klassifizierung von Szenarien nach
Art und Weise der beabsichtigten
Aussagen. Inhalt und Darstellung
wurden in Anlehnung an (EWI/pro-
gnos 2005, S. 2) leicht abgewandelt.

- In Referenz- bzw. Business-as-usual-(BAU)-Szenarien werden langfristige Entwicklungstrends mit wahrscheinlichen Reaktionen von Wirtschaft, Gesellschaft und Politik auf heute bereits übersehbare künftige Problemstellungen und Herausforderungen verknüpft. Beispielsweise werden energiepolitische Weichenstellungen wie die Wohnbauförderung und der bisher erfolgte Ausbau der erneuerbarer Energieversorgungen oder die bisherige Klimaschutzpolitik miteinbezogen („Weiter-so-wie-bisher-Entwicklung“).
- Im Gegensatz dazu wird in Zielszenarien versucht das Augenmerk auf normative Aussagen zu richten, d.h., sie orientieren sich an übergeordneten Zielen, die als allgemein wünschenswert gelten und versuchen herauszuarbeiten, unter welchen Randbedingungen und mit welchen Mitteln diese Ziele erreicht werden können.

Kurzbezeichnung Szenario	Raumwärme - Heizung	Warmwasserbereitung	Lüftung	Haushaltsgeräte / Beleuchtung
REFERENZ	<p>Effizienzverbesserungen (Nutzenergiebedarf, energetische Qualität der Komponenten) orientieren sich an heute absehbaren Tendenzen (z.B. leichte Verschärfungen der EnEV bzw. GEG alle 3-4 Jahre für Neubau und Sanierung), Technologieverbesserungen bei Geräten und Haustechnik wie in der Vergangenheit zu beobachten; Stromversorgung gemäß „Trendszenario“ der Referenzprognose (ewi/gws/prognos 2014)*.</p>			
	Moderate Effizienzsteigerungen (GEG und Fortschreibungen)	Dezentrale Systeme werden nach und nach durch zentrale ersetzt	Ab 2010: Abluftanlagen Anteil der Lüftungen mit Wärmerückgewinnung, im Bestand und im Neubau, wie bisher	Moderate Effizienzverbesserungen, wie in der Vergangenheit zu beobachten
KLIMASCHUTZ	<p>Die energetischen Qualitäten der Bau- und Technikkomponenten orientieren sich am Kostenoptimum im Neubau (vgl. KliNaWo-Studie) bzw. dem Kostenoptimum bei energetischen Sanierungen im Bestand (EnerPhit-Standard).</p> <p>Bei Erneuerungen von Technikkomponenten (Haustechnik, Haushaltsgeräte, Beleuchtung) werden Altgeräte durch energieeffiziente Geräte ersetzt.</p> <p>Der Ausstieg aus Ölheizungen wird bis 2060 und für Erdgasheizungen bis 2070 vollzogen.</p> <p>Die Stromerzeugung erfolgt gemäß dem „Szenario 2011 A“ (Nitsch et al. 2012). **</p>			
	Ab 2020: Neubau gleichwertig wie Passivhaus-Standard; Energetische Modernisierungen mit Passivhauskomponenten	Einsatz wassersparender Armaturen; WW-Anschlüsse für Waschmaschinen und Geschirrspüler Hochwertige Dämmung Leitungen	Ab 2020: vermehrt Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung bei Neubauten und im Bestand	Ausstattung und Erneuerung von Geräten/Beleuchtung mit stromeffizienten Geräten (Bestgeräte)
KLIMASCHUTZ - PLUS	<p>Nochmals gesteigerte Energieeffizienz durch heute absehbare technologische Weiterentwicklungen, insbesondere bei Bauteilen (Hüllkonstruktionen Hochleistungsfenster, Vorgefertigte wärmebrückenfreie Anschlusskomponenten) und Technikkomponenten (Wärmepumpensysteme, Pumpen und sonstige Hilfsaggregate, Lüftungsanlagen, Haushaltsgeräte); Stromerzeugung gemäß dem „Szenario 2013“ (Nitsch 2013).***</p> <p>Der Ausstieg aus Ölheizungen wird bis 2050 und für Erdgasheizungen bis 2060 vollzogen.</p>			
	Gegenüber Effizienz-Szenario nochmals verbesserte Qualitäten: - Hüllkonstruktionen (Dämmqualitäten, Vakuumdämmung, u.ä.) - Wärmebrückenfreie Anschlüsse - Verbesserte Passivhausfenster - Effizientere Wärmepumpen	Besonders wassersparende Armaturen und Haushaltsgeräte Abwasser-Wärmerückgewinnung (z.B. Duschwasser)	Entwicklung von hochwertigen Lüftungsanlagen mit höherer Stromeffizienz, verbesserter Dichtigkeit und Gerätedämmung. Luftqualitätsgesteuerte Volumenregelung bzw. Kaskadenlüftung.	Technologische Weiterentwicklungen bei Hauptverbrauchern im Haushalt (Kühlgeräte, Waschmaschinen, Trockner, Geschirrspüler) durch den Einsatz von Steuerelektronik, Wärmepumpen und Vakuumdämmungen

Anmerkungen: * Ausstieg aus Kohleverstromung 2038 / ** Ausstieg aus Kohleverstromung 2035 / *** Ausstieg aus Kohleverstromung 2030

Tab. 6.1: Kurzübersicht zu den wesentlichen Randbedingungen und Annahmen in den Szenarien. Quelle: abgeändert nach (Vallentin 2011, S. IV-3).

6.1 Beschreibung der Szenarien

Szenarien erzählen eine Geschichte, indem sie versuchen, künftige Entwicklungen zu beschreiben. Das hier betrachtete System ist der deutsche Wohngebäudepark und sein künftig zu erwartender Energiebedarf sowie die dadurch verursachten Treibhausgasemissionen. Geklärt werden soll, mit welchen Maßnahmen, Standards und Strategien das 2-Grad-Klimaschutzziel, wie es in Kapitel 1 anhand des CO₂-Globalbudgets begründet wurde, erreicht werden kann. Um diese Frage beantworten zu können, wurden vier Hauptzonen gebildet (siehe Tab. 6.1):

Status-quo-Szenario

Das Status-quo-Szenario hat eine methodische Funktion als Vergleichsmaßstab. Die energetischen Qualitäten des Jahres 1990 werden hier unverändert in die Zukunft fortgeführt, d.h. es wird angenommen, dass danach keine technologischen Veränderungen stattfinden. Im Gegensatz dazu werden die Mengenkomponenten (z.B. Bevölkerung, Wohnflächen) wie in den anderen Szenarien weiterentwickelt. Dadurch wird es möglich, die Effizienzsteigerungen und Dekarbonisierungserfolge der anderen Szenarien zu quantifizieren. Damit dient das Status-quo-Szenario quasi als Eichmaßstab für die seit 1990 erreichten Energie- und Emissionsminderungen.

Referenz-Szenario

Das Referenz-Szenario beschreibt eine Strategie des „Weiter wie bisher“. Bei energetischen Modernisierungen werden zunächst die heute üblichen Baukonstruktionen eingesetzt. Nur zögerlich kommen bessere Qualitäten zum Zuge. Die energetischen Kennwerte der sanierten Bauteile und Lüftungskonzepte entsprechen damit erst auf längere Sicht in etwa Niedrigenergiequalität. Die Wärme- und Stromversorgung im Referenz-Szenario bleibt auch nach 2020/30 wegen der weiterhin hohen Bedarfswerte noch länger auf fossile Energieträger gestützt. Im Hinblick auf die Struktur der Wärmeversorgung wer-

den die beobachteten Trends der letzten Jahre unverändert fortgesetzt. Die Struktur der Stromerzeugung entspricht dem „Trend-Szenario“ der Energie-Referenzprognose (ewi/gws/prognos 2014), in dem die bisherige Entwicklung des Kraftwerksparks und die zum damaligen Zeitpunkt bekannten politischen Beschlüsse eingearbeitet wurden. Abweichend davon wurde jedoch der kürzlich beschlossene Kohleausstieg bis 2038 bzw. 2030 in die Modellierung mit aufgenommen.

Klimaschutz-Szenario

Im Klimaschutz-Szenario wird eine andere Zukunft beschrieben, in der die energetische Ausrichtung im Neubau, bei Modernisierungen im Bestand und bei den Versorgungslösungen auf die Klimaschutzziele der deutschen Bundesregierung im Jahr 2050 bezogen sind. Hier weisen die gebäudebezogenen Komponenten (Außenwände, Fenster, Dächer, Kellerdecken, Lüftungskonzepte, Elektrogeräte) eine hohe Qualität auf und orientieren sich an den Vorgaben des Passivstandards ohne diese im Einzelnen einhalten zu müssen. Der Einsatz von Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung setzt sich ab 2020/30 sowohl im Neubau als auch im Bestand allmählich durch. Im bedingt sanierbaren Bestand werden Effizienzmaßnahmen (z.B. Außenwärmeschutz) nur dort ausgeführt, wo dies unter Denkmalschutzaspekten verträglich erscheint. Innendämmungen werden erst ab 2040 verbreitet ausgeführt. Wegen des geringeren Wärme- und Strombedarfs der Gebäude kann der Anteil der erneuerbaren Energieträger im Vergleich zum Referenz-Szenario deutlich gesteigert werden. Dies hat mittel- bis langfristig direkte Auswirkungen auf die Struktur der Wärmeversorgung, die einen Ausstieg aus den fossilen Brennstoffen im Zeitraum 2050 - 2060 in greifbare Nähe rücken. Die Stromerzeugung wurde gemäß dem „Szenario 2011 A“ (Nitsch et al. 2012) modelliert. Dieses Stromszenario orientiert sich an dem Ziel, die Treibhausgas-Emissionen im Jahre 2050 gegenüber dem Stand 1990 um 80 % zu reduzieren. Zusätzlich wurde hierbei ein Ausstieg aus der Kohleverstromung bis 2035 angenommen.

Klimaschutz-Plus-Szenario

Dieses explorative Szenario versucht abzuschätzen, wie die Auswirkungen von künftigen, bereits heute absehbaren, technologischen Weiterentwicklungen bei den bau- und haustechnischen Systemen auf die Effizienz- und Klimaschutzstrategien sein könnten. Im Klimaschutz-Plus-Szenario werden darüberhinaus bei Modernisierungen im Bestand Innendämmungen eingesetzt, wenn ein Außenwärmeschutz nicht in Frage kommt. Sie werden immer dann ausgeführt, wenn ohnehin eine Fenstererneuerung ansteht. Zusätzlich kommen ab 2020/30 im Neubau und bei allen energetischen Modernisierungen gegenüber dem Klimaschutz-Szenario nochmals deutlich verbesserte Technologien bei Fenstern, Dämmsystemen und Lüftungsanlagen zum Einsatz.

Zusätzlich werden ab 2030 die Gebäude konsequent mit Elektrogeräten mit besonders hoher Stromeffizienz ausgestattet. Es wird erwartet, dass diese höheren Qualitäten bis dahin dem Kostenoptimum entsprechen und von daher auch wirtschaftlich sinnvoll einsetzbar sind. Dahinter steht die Beobachtung, dass die technologischen Entwicklungen im Bereich der Effizienzmaßnahmen und bei den regenerativen Energiesystemen i.d.R. viel schneller und durchgreifender erfolgen, als zunächst vermutet.

Dies hat auch Auswirkungen auf die Struktur der WärmeverSORGUNGEN, weil durch den gegenüber dem Referenz-Szenario nochmals geringeren Wärmebedarf, auch der Anteil regenerativ gestützter WärmeverSORGUNGEN ansteigen kann. Dadurch können Ölheizungen bis 2050 und Erdgasheizungen bis 2060 aus dem Gesamtbestand verschwinden. Im Hinblick auf die Stromerzeugung folgt das Klimaschutz-Plus-Szenario den Vorgaben des Szenario „Szenario 2013“ (Nitsch 2013), in dem bis zum Jahr 2060 eine nahezu klimaneutrale Energieversorgung für Deutschland angestrebt wird. Zusätzlich wird in der Modellierung der Ausstieg aus der Kohleverstromung bis 2030 vollzogen.

6.2. Bilanzierung in den Szenarien

In der Übersichtsdarstellung Abbildung 6.2 sind die wesentlichen Bilanzgrößen und deren gegenseitigen Abhängigkeiten zusammengestellt:

- Der Heizwärmebedarf Q_H wird anhand der Bilanz der Wärmeströme innerhalb der Bilanzgrenze der Gebäudehülle (in Abb. 4.2 gestrichelt dargestellt) bestimmt. Die Wärmeverluste bestehen aus der Summe der Transmissions- und Lüftungswärmeverluste. Die Wärmegewinne setzen sich aus den passiv-solaren und den internen Wärmegewinnen zusammen. Genauere Angaben zu den einzelnen Berechnungsschritten der in dieser Arbeit verwendeten statio-nären Bilanzverfahren (LEG Energiepass Heizung und Warmwasser) und (PHPP), die sich an der internationalen Norm ISO 13790 orientieren, finden sich in den ent-sprechenden Handbüchern und in (Vallentin 2011, S. IV- 6 ff.; VI-46 ff. und VI-60).
- Der Heizenergiebedarf $Q_{E,H}$ setzt sich aus dem Heizwärmebedarf und den Verlusten des Heizungssystem zusam-men. Letztere beinhalten die Speicher-, Verteil- und Über-gabeverluste sowie die Verluste der Wärmeerzeugung.
- Analog wird der Energiebedarf für Warmwasser $Q_{E,TW}$ aus dem Nutzwärmebedarf für Warmwasser, den Speicher-, und Verteilverlusten sowie den Verlusten der Wärmeerzeu-gung bestimmt.
- Es werden **alle** Stromnutzungen in den Gebäuden be-rücksichtigt. Für die Szenarien ist dies deshalb zwingend, weil ansonsten die Energieströme innerhalb der Bilanz-grenze der thermischen Gebäudehülle und darüber hinaus der Energiebedarfs des Sektors der privaten Haushalte nur unvollständig wiedergegeben werden würden. Die Stromanwendungen umfassen den Hilfsstromeinsatz in der Haustechnik (z.B. Ventilatoren, Pumpen, Regelung), den Haushaltsstrombedarf (z.B. Kochen, Waschen, Trock-nen, Kühlgeräte, Küchengeräte) und alle sonstigen Stromanwendungen (z.B. Beleuchtung, Telekommunika-

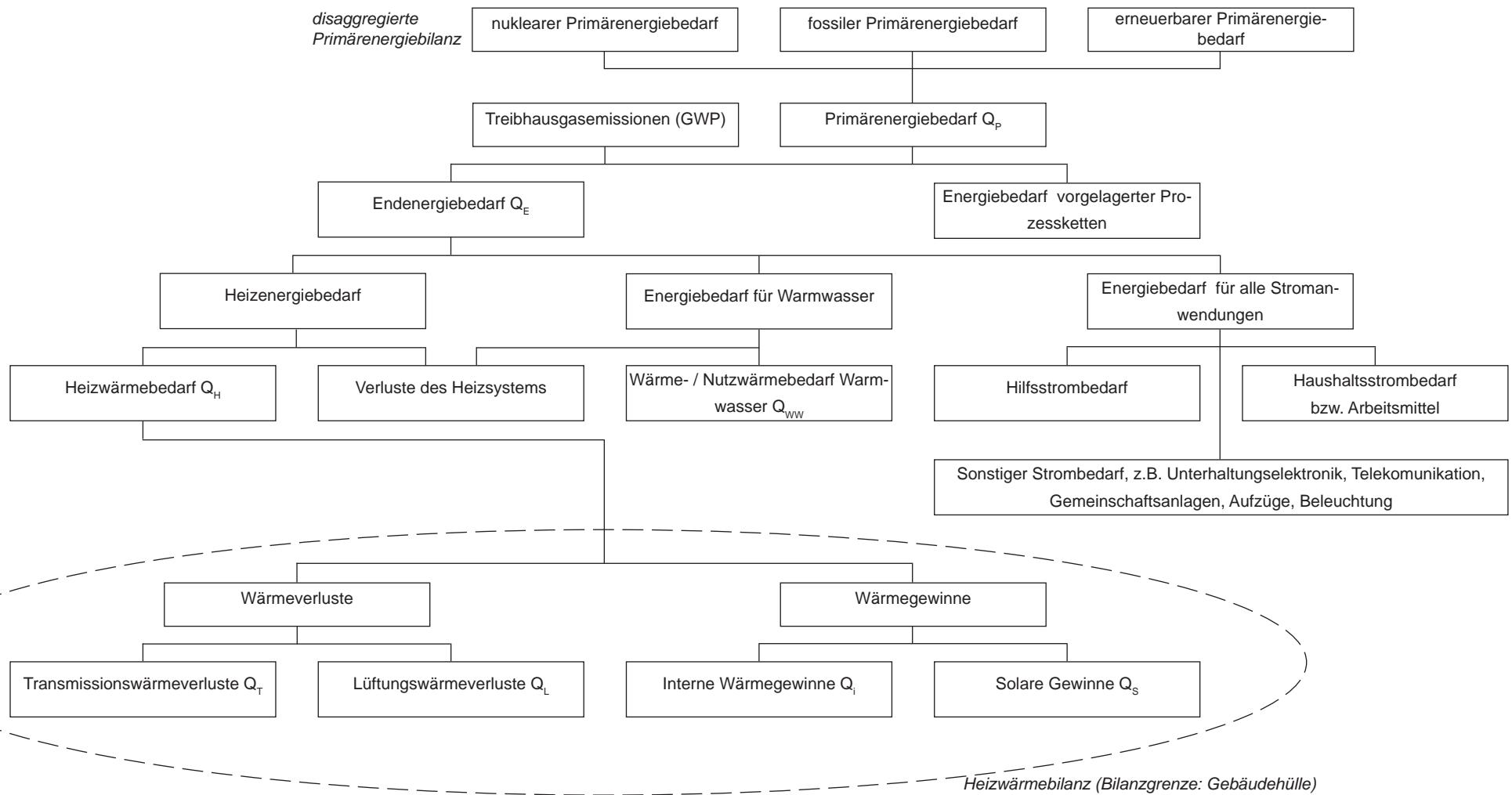


Abb. 6.2: Systematik der Energiebilanzierung in den Untersuchungen. Bei der Primärenergiebilanz wird nur der nicht erneuerbare Teil (fossil, nuklear) ausgewiesen.
Quelle: (Vallentin 2011, S. IV-5).

- tion, Unterhaltungselektronik, Aufzüge und sonstige Gemeinschaftsanlagen).
- Aus der Summe von Heizenergie-, Warmwasser- und Strombedarf wird der Endenergiebedarf Q_E berechnet. Diese Größe entspricht genau dem Energieinhalt (z.B. Heizwert) der eingesetzten Energieträger, wie sie sich über Zähler oder die Lieferungen frei Haus ablesen bzw. bestimmen lassen.
- Der Primärenergiebedarf bezieht darüberhinaus alle Vorketten eines Energieträgers mit ein, d.h. es wird zusätzlich der Energieaufwand für Exploration, Förderung, Transport, Umwandlungen und Lieferung frei Haus aufaddiert. Über Primärenergiefaktoren wird abhängig vom eingesetzten Energieträger der Primärenergieaufwand je Endenergieeinheit ausgewiesen.
- Die Treibhausgasemissionen werden ähnlich wie die Primärenergie über endenergiebezogene Emissionsfaktoren bestimmt, die angeben wie groß die CO₂-Äquivalent-Emissionen je Endenergieeinheit sind. Dabei werden neben Kohlendioxid auch die anderen treibhauswirksamen Gase zu einer Wirkungsgröße, dem sog. „Global Warming Potential“ (GWP), zusammengeführt.

Durch die Systematik der Energie- und Emissionsberechnung sind die Bilanzgrenzen und damit auch der Betrachtungsrahmen der Szenarien festgelegt.

6.3 Kohortenmodell

Die denkbaren Entwicklungen im deutschen Wohngebäudepark 1990 - 2070 werden in einem Kohortenmodell dargestellt. Dort durchlebt jeder Repräsentant eines Gebäudetyps einen Lebenszyklus, d.h., es werden in vorgegebenen Zeitabständen Erneuerungs- und Ersatzmaßnahmen durchgeführt. Diese Zyklen sind von der mittleren Nutzungsdauer der entsprechenden Komponenten bzw. Bauteile abhängig (siehe Tab. 4.8). Wie

schon das Wort „Kohorte“ ausdrückt, wird eine größere Gruppe von repräsentativen Hausgruppen bzw. Gebäuden über den gesamten Betrachtungszeitraum im Hinblick auf die Veränderungen des energetischen Zustands abgebildet. Dieses Modell hat den Vorteil, dass die Gesamtentwicklung als Folge vieler individueller Einzelschritte nachvollziehbar bleibt. Damit kann gleichzeitig die Trägheit und Dynamik des Gesamtsystems separat abgebildet werden. Das Modell weist ein hohes Maß an Transparenz auf, weil jeder Einzelschritt in seinen Auswirkungen auf das Gesamtsystem abgebildet wird. Dadurch wird vermieden, dass im Modell schwierig kontrollierbare, pauschale Annahmen getroffen werden müssen. Dies betrifft in besonderem Maße die langfristigen Konsequenzen, die mit der Wahl verschiedener energetischer Qualitäten bei Sanierungs- bzw. Neubaumaßnahmen verbunden sind.

Gemäß dem Kopplungsprinzip wird davon ausgegangen, dass energetische Verbesserungen im Bestand immer in Kombination mit einer ohnehin anstehenden Maßnahme ausgeführt werden. Sobald beispielsweise der Anstrich oder der Außenputz einer Fassade erneuert wird, kann zusätzlich eine Außendämmung (z.B. in Form eines Wärmedämmverbundsystems) angebracht werden. Dies erhöht die Wirtschaftlichkeit der energetischen Maßnahmen erheblich und entspricht darüber hinaus dem zu beobachtenden Verhalten von Hausbesitzern und Wohnungseigentümern (vgl. Frondel et al. 2006, S. 89).

Das für die Rechengänge verwendete Kohortenmodell besteht aus insgesamt 51 Gebäudetypen. Dabei wurde die Systematik der deutschen Gebäudetypologie, wie sie in (IWU 2003) hergeleitet und dokumentiert ist, als Vorlage verwendet und auch für die künftigen Neubauten weitergeführt:

- Der heute vorhandene Gebäudebestand wird nach Baualter und Wohnform in Klassen eingeteilt.
- Die Abgrenzungen zwischen den Baualtersklassen orientieren sich an historischen Einschnitten, den Zeitpunkten statistischer Erhebungen und der Einführung neuer wär-

- meschutztechnischer Regelungen oder gesetzlicher Vorschriften zum Energiebedarf von Gebäuden.
- Bei den Gebäudetypen wird zwischen Ein- und Mehrfamilienhäusern unterschieden.
 - Beim Neubau werden für jede Dekade neue Gebäudetypen modelliert. Damit kann die Einführung neuer Energiestandards und die technologische Weiterentwicklung von Bau- und Haustechnik berücksichtigt werden.

Die Bestimmung des Jahresheizwärmebedarfs erfolgt über vollständige Energiebilanzen gem. (LEG Energiepass Heizung und Warmwasser) bzw. gem. (PHPP). Diese werden im Zeitabstand von 5 Jahren für alle 46 Gebäudetypen aufgestellt. Folgende Parameter fließen in die Berechnungen ein:

- die Außenabmessungen der Hüllflächen, die das beheizte Volumen umschließen,
- die U-Werte der opaken Hüllflächen,
- die Fenster werden orientierungsabhängig mit ihren Flächen, U_w -Werten im eingebauten Zustand und den g-Werten der Verglasung erfasst.
- Die solare Verschattung wird pauschal mit einem Faktor von 0,7 berücksichtigt. Für Rahmenanteil, nicht-senkrechten Strahlungseinfall und Verschmutzung wurde ein pauschaler Abminderungsfaktor von 0,5 angesetzt. Damit beträgt der Gesamtreduktionsfaktor für solare Einstrahlung insgesamt 0,35.
- Die energetische Güte des Lüftungskonzeptes (inklusive Einfluss der Luftdichtigkeit) wird über den resultierenden energetisch wirksamen Luftwechsel $n_{L,eff}$ abgebildet.

Energetisch wirksamer Luftwechsel

In Bestandsgebäuden erfolgt der Luftwechsel über Infiltration durch Leckagen in der Gebäudehülle und durch die Fensterlüftung der Bewohner. Hierbei stellt der Fensterluftwechsel eine stark nutzerabhängige Größe dar. Messungen in bewohnten Häusern zeigen, dass der Luftwechsel eine große jahreszeitliche Abhängigkeit hat und speziell im Kernwinter sehr ge-

ringe Werte annehmen kann. Die Fensteröffnungszeiten sinken dann auf Werte zwischen 0,03 - 0,2 h⁻¹ ab (Reiß/ Erhorn/ Ohl 2001). Die gemessenen Mittelwerte für Außenluftwechsel während der Heizperiode in sanierten Bestandsgebäuden liegen bei Fensterlüftung durch die Bewohner zwischen 0,18 und 0,33 h⁻¹. Wurden bei der energetischen Modernisierung Lüftungsanlagen eingebaut, lagen die Luftwechselraten hingegen bei 0,48 h⁻¹. In allen Fällen wurden die Gebäude luftdicht ausgebildet. Der geringe Außenluftwechsel bei Fensterlüftung weist auf eine schlechte Innenluftqualität hin (Kah et al. 2005).

Im un- und teilsanierten Bestand liegt der effektive Luftwechsel n_L aufgrund der vielen Fugen und Leckagen höher als derjenige über Fensterlüftung alleine und wurde in den Berechnungen pauschal auf 0,45 h⁻¹ festgelegt. Dieser Wert liegt zwar deutlich geringer als die Standardannahmen in den gesetzlichen Bilanzverfahren vorsehen, liegt aber immer noch deutlich höher als die sich in der konkreten Nutzung einstellenden Werte. Es ist jedoch nicht sinnvoll, diese geringen Luftwechsel bei der Bestimmung von Bedarfswerten heranzuziehen, weil diese wegen der daraus resultierenden schlechten Innenluftqualität angreifbar sind. Für Abluftanlagen wird der n_L -Kennwert auf 0,35 h⁻¹ festgelegt, weil hier eine luftdichte Bauweise angenommen wird.

Für Gebäude mit Wärmerückgewinnung ergeben sich niedrigere Werte des effektiven energetisch wirksamen Luftwechsels n_L zwischen 0,07 und 0,15 h⁻¹. Zusätzlich wird hier generell von einer luftdichten Gebäudehülle ausgegangen. Die Annahmen für die verschiedenen Szenarien sind in den Tabellen 6.5, 6.6 und 6.7 beschrieben.

In den Klimaschutz-Szenarien wird unterstellt, dass sich Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung nur allmählich durchsetzen, d.h., es wird angenommen, dass zunächst nicht alle Gebäude eines Gebäudetyps damit ausgestattet werden. Dieser Zubau erfolgt zudem in jedem Szenario unterschiedlich.

Nutzungs- und Klimaparameter

In der Heizwärmebilanz tauchen weitere Parameter auf, die die Nutzungs- und Klimarandbedingungen widerspiegeln. Dazu zählen die Höhe der spezifischen internen Gewinne q_i , die Gradtagszahl G_t , die Anzahl der Heiztage, die Heizgrenztemperatur und der Reduktionsfaktor für Nachtabsenkung r_{NA} . Diese Kenngrößen sind teilweise abhängig vom energetischen Standard der Gebäude. Zur Bestimmung dieser Werte für die Berechnungen im Kohortenmodell wurde daher für die Wohnbauten eine Klassifizierung nach der energetischen Qualität vorgenommen (siehe Tab. 6.2):

- Die spezifischen internen Gewinne wurden generell niedriger als in den Rechenverfahren gem. (GEG) angesetzt. Heutige realitätsnahe Werte können künftig bei geringer Belegung und Ausstattung der Gebäude mit stromeffizienten Geräten und durch die Reduktion der Verluste durch Wärmeverteilung und -speicherung innerhalb der Gebäudehülle noch weiter abnehmen (siehe Abb. 6.3).
- Eine Nachtabsenkung hat vor allem in schlecht oder gering gedämmten Gebäuden eine verbrauchsmindernde Wirkung. Der entsprechende Reduktionsfaktor wird mit Verbesserung der Standards immer geringer.
- Über die Anpassung der Gradtagszahl wird bereits berücksichtigt, dass im unsanierten Bestand die mittleren Raumtemperaturen aufgrund von Teilbeheizung (z.B. der Schlafräume) niedriger liegen. Aufgrund von Erfahrungswerten wurden sowohl die Heizgrenztemperatur als auch die mittlere Innentemperatur angepasst. Probeläufe zeigen jedoch, dass selbst dann noch die berechneten Bedarfswerte im Bestand deutlich höher liegen können als die gemessenen Verbrauchswerte.

Neben der Teilbeheizung der Wohnungen sind offensichtlich weitere verbrauchsmindernde Effekte, z.B. aufgrund vorhandener Möbel an den Außenwänden, Dämmtapeten und geringeren Wärmebrücken bei Holzdeckenanschlüssen u.a. vor-

Energetischer Standard	Luftwechsel mit/ohne LA* in h^{-1}	Spez. interne Gewinne in W/m^2	Gradtagszahl in kKh/a	Heizgrenztemperatur in °C	Reduktionsfaktor Nachtab- senkung
Wohngebäude:					
Unsanierter Bestand	0,20 - 0,60	2,5 / 3,0***	63 - 70	15	0,92
Teilsanierter Bestand	0,20 - 0,60	2,5 / 3,0***	65 - 70	12 - 14	0,92
Bestand ab 1980	0,30 - 0,50	2,1 / 2,5***	65 - 75	12 - 14	0,95
Niedrigenergie(-sanierung)	0,40 / 0,35**	1,8 / 2,1***	75 - 80	11 - 13	0,98
Passivhaus(-sanierung)	0,06 - 0,15*	1,2 / 1,5***	80 - 83	10	1,00

handen; über einen Vergleich von berechneten Bedarfswerten mit gemessenen Verbrauchswerten wurde in (IWU 2003a, S. 2) ein empirischer „Nutzungsfaktor“ hergeleitet. Dieser berücksichtigt andererseits bei Niedrigenergie- und Passivhäusern deren Vollbeheizung und die dort regelmäßig vorhandenen höheren mittleren Raumtemperaturen im Winter von 21 - 22 °C. Diese Randbedingungen führen in der Tendenz zu höheren Bedarfswerten als die klassische Berechnung ohne Nutzungsfaktor. Der Nutzungsfaktor variiert zwischen Werten von 0,85 (unsanierte Altbauten) und 1,1 (Passivhäuser) und wird im Kohortenmodell bei der Berechnung der Heizwärmebilanzen berücksichtigt. Er ist wie folgt definiert:

$$f_{Nutzung} = 0,5 + 2 / (3 + 0,6 h)$$

Dabei ist h der temperatur- und nutzflächenbezogene Wärmeverlust, mit:

$$h = (H_T + H_V) / A_{EB} \text{ (in } W/m^2K\text{)}$$

mit:

H_T : temperaturbezogener Transmissionswärmeverlust (in W/K)

H_V : temperaturbezogener Lüftungswärmeverlust (in W/K)

A_{EB} : Energiebezugsfläche = beheizte Wohnfläche (in m^2)

Mit dem Nutzungsfaktor können die unterschiedlichen thermi-

Tab. 6.2
Zusammenstellung der gewählten Kennwerte zu den Nutzungs- und Klimarandbedingungen bei der Berechnung der Heizwärmebilanz im Kohortenmodell. Quellen: Eigene Berechnungen unter Verwendung der Daten in (IWU 2012) und (Valentin 2011, S. IV-17).

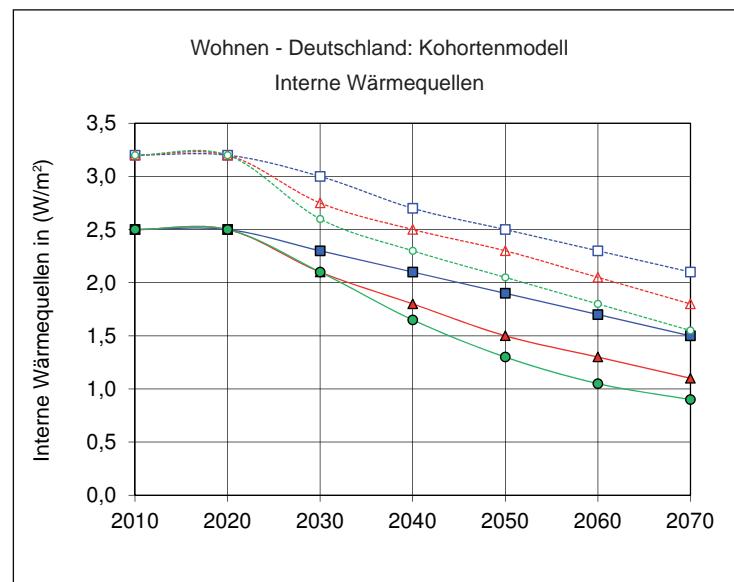
* Werte für Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung

** Werte für Abluftanlagen

*** Werte für Einfamilienhäuser/ Mehrfamilienhäuser, siehe auch exakte Werte in Abb. 4.5.

- EFH (Referenz)
- MFH (Referenz)
- ▲ EFH (Klimaschutz)
- △ MFH (Klimaschutz)
- EFH (Klimaschutz-Plus)
- MFH (Klimaschutz-Plus)

Abbildung 6.3:
Zeitlicher Verlauf der mittleren internen Wärmequellen in Wohngebäuden, wie er im Kohortenmodell verwendet wird. Dabei wird zwischen Einfamilien- (EFH) und Mehrfamilienhäusern (MFH) unterschieden. Zusätzlich findet eine Differenzierung zwischen Referenz-, Klimaschutz- und Klimaschutz-Plus-Szenario aufgrund der unterschiedlichen Stromeffizienz und Vermeidung von Wärmeverlusten statt.



Solarstrahlung auf Fensterflächen (Standort: Deutschland)	
Süd:	557 kWh/(m²a)
Ost/West:	272 kWh/(m²a)
Nord:	105 kWh/(m²a)
Horizontal:	419 kWh/(m²a)

Tab. 6.3
Angebot an Solarstrahlung auf Fensterflächen während der Heizperiode für Deutschland. Quelle: (PHPP).

niveaus, die sich abhängig vom Dämmstandard in den Wohngebäuden realisieren lassen, berücksichtigt werden. Bei energetischen Modernisierungen wird demnach zunächst ein Teil der Effizienzauswirkungen durch verbesserten Komfort kompensiert. Dieser sog. „Reboundeffekt“ lässt sich anhand der Verbrauchswerte im Vergleich zwischen un- und vollsanierter Gebäudefassade nachweisen. Andere Studien zu Verbrauchswerten großer Wohngebäudebestände kommen zu ähnlichen Ergebnissen (vgl. Schröder et al. 2012 und Schnieders 2018).

Klimarandbedingungen

Die Klimarandbedingungen entsprechen dem Standardklima für Deutschland im (PHPP) und wurden unverändert weiter verwendet. In Tabelle 6.3 finden sich die gewählten Rechenwerte für das orientierungsabhängige Solarstrahlungsangebot auf die Fensterflächen. Der Einfluss der Regional- und Standortklimas innerhalb Deutschlands ist nicht unerheblich (vgl. Vallentin 2011, S. VI-73 ff.). Für die Modellrechnungen in den Szena-

rien ist es jedoch vertretbar, ein Standardklima für Deutschland insgesamt zugrunde zu legen.

Ein zwar nur in geringem Ausmaß klimaabhängiger Faktor ist der Reduktionsfaktor von normal beheizten Wohnräumen zum Erdreich bzw. zu unbeheizten Kellern. Dieser wurde pauschal mit 0,5 gewählt. Hier spielt künftig u.U. eine Rolle, dass Kellerräume zunehmend in die thermische Hülle integriert werden. Dies führt einerseits zu einer spürbaren Vergrößerung der Energiebezugsfläche (man könnte diese Räume, wie im (PHPP) vorgeschlagen mit einem Faktor von 0,6 anrechnen) und andererseits zu geringeren Wärmeverlusten der erdgeschossigen Wohnräume zu den Kellerbereichen. Dieser Punkt wurde jedoch im Kohortenmodell nicht weiter verfolgt, weil er sowohl im Ausgangszustand als auch im künftigen Verlauf nur schwer abschätzbar ist.

Klimawandel als Randbedingung

In letzter Zeit gibt es eine Diskussion um die Änderungen der Klimarandbedingungen durch den zu erwartenden Klimawandel. Dies wird sehr wahrscheinlich mittel- und noch stärker langfristig zu geringeren Heizwärmeverbräuchen führen. Während der neueste IPCC-Bericht weltweit einen Anstieg der globalen Mitteltemperatur in der letzten Dekade (2011 - 2020) gegenüber dem vorindustriellen Niveau (1850 - 1900) um ca. +1,1 Kelvin feststellt, beträgt dieser laut diesem Bericht über Landflächen bereits etwa +1,6 Grad (vgl. IPCC 2021, S. SPM-6). Der letzte Wert stimmt sehr gut mit den langjährigen meteorologischen Temperaturmessungen in Deutschland überein. Der Temperaturanstieg beträgt hier zwischen 1881 und 2018 +1,5 Kelvin. Räumliche Unterschiede zeigen sich vor allem bei den Wintertemperaturen. Diese sind in den nordöstlichen Bundesländern mit +1,2 Kelvin am geringsten und in Bayern mit +1,7 Kelvin am höchsten (vgl. Quelle UBA 2019).

Ein gewisses spekulatives Element besteht jedoch gerade in den künftigen Auswirkungen. Sofern sich beispielsweise der

Golfstrom abschwächen sollte, wofür sich bereits erste Anzeichen finden lassen könnte anstelle einer Erhöhung der mittleren Jahrestemperatur auch eine Reduktion stehen. Andererseits ist bekannt, dass in den Gebirgsregionen der Alpen der Temperaturanstieg deutlich höher ausfällt als im Tiefland. Für die Berechnungen in den Szenarien wurde von daher keine Anpassung der Randbedingungen an einen künftigen Klimawandel vorgenommen. Im Rahmen der kritischen Prüfung der Randbedingungen in Abschnitt 13 wird jedoch untersucht, wie groß dieser Einfluss auf den Heizwärmebedarf und die resultierenden Treibhausgasemissionen vor allem in der langfristigen Projektion sein könnte.

Als Grundlage für diese Berechnungen werden die Klimaparameter Monatsmitteltemperatur und Solarstrahlung über eine Anpassung von Meteonorm-Testreferenzjahren vorgenommen, die sich am IPCC Szenario RCP 4,5 (entspricht in etwa dem alten B1-Szenario) für die beiden Standorte Würzburg und Potsdam orientieren. Wie die Abbildungen 6.4. und 6.5 zeigen, steigen die Monatsmitteltemperaturen über das ganze Jahr gesessen spürbar an, die Globalstrahlung erhöht sich hingegen vor allem im Sommer. Mit Hilfe des (PHPP) konnten diese Daten in Jahreswerte für Heizgradstunden und Solarstrahlung während der Heizperiode umgewandelt werden. Die Modellläufe wurden anschließend unter den Randbedingungen des zu erwartenden Klimawandels wiederholt. Hierfür wurden Anpassungsfaktoren für die Heizgradstunden im Betrachtungszeitraum für 2010 - 2070 ermittelt. Auch die Solarstrahlungsdaten wurden entsprechend angepasst.

Die größte Auswirkung ergibt sich jedoch auf die thermische Behaglichkeit im Sommer. Testläufe mit einem typischen Mehrfamilienhaus zeigen einen Anstieg der Maximaltemperaturen um 2-3 Kelvin und eine entsprechende Erhöhung der Übertemperturhäufigkeiten (vgl. EIV 2018). Dies erfordert in jedem Fall eine Anpassung der thermischen Eigenschaften der Wohngebäude (Fensterflächen, Verschattung, ggf. Kühlung).

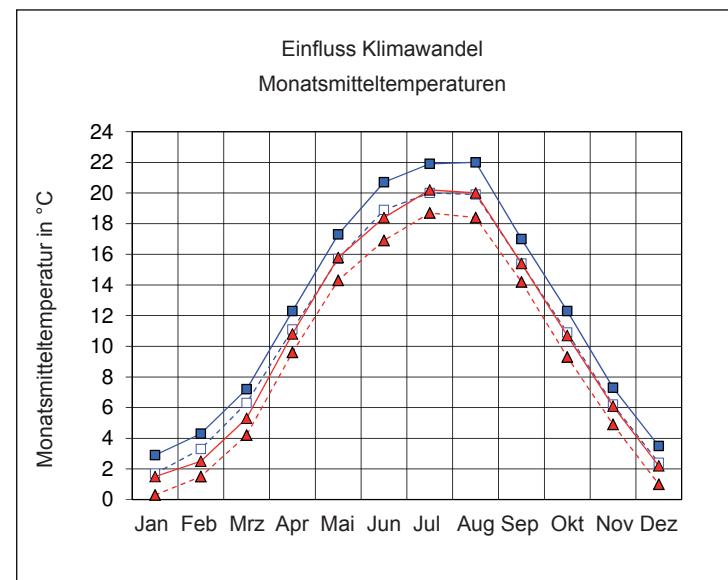


Abbildung 6.4:
Vergleich der Standardwetterdaten (Zeitraum 1995 - 2015) mit den künftigen Wetterdaten unter Einbeziehung des Klimawandels (2050) für die beiden Standorte Würzburg und Potsdam. Gezeigt sind die Unterschiede für die Monatsmitteltemperaturen. Quelle: (Metenorm 2021)

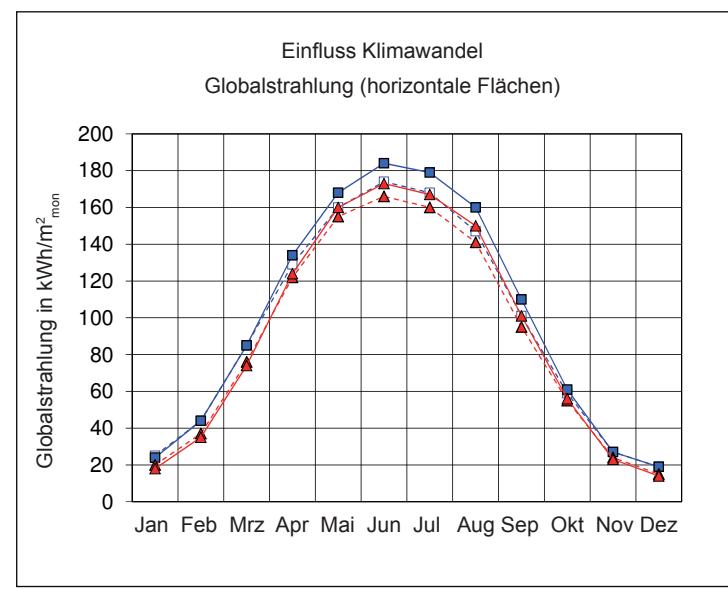
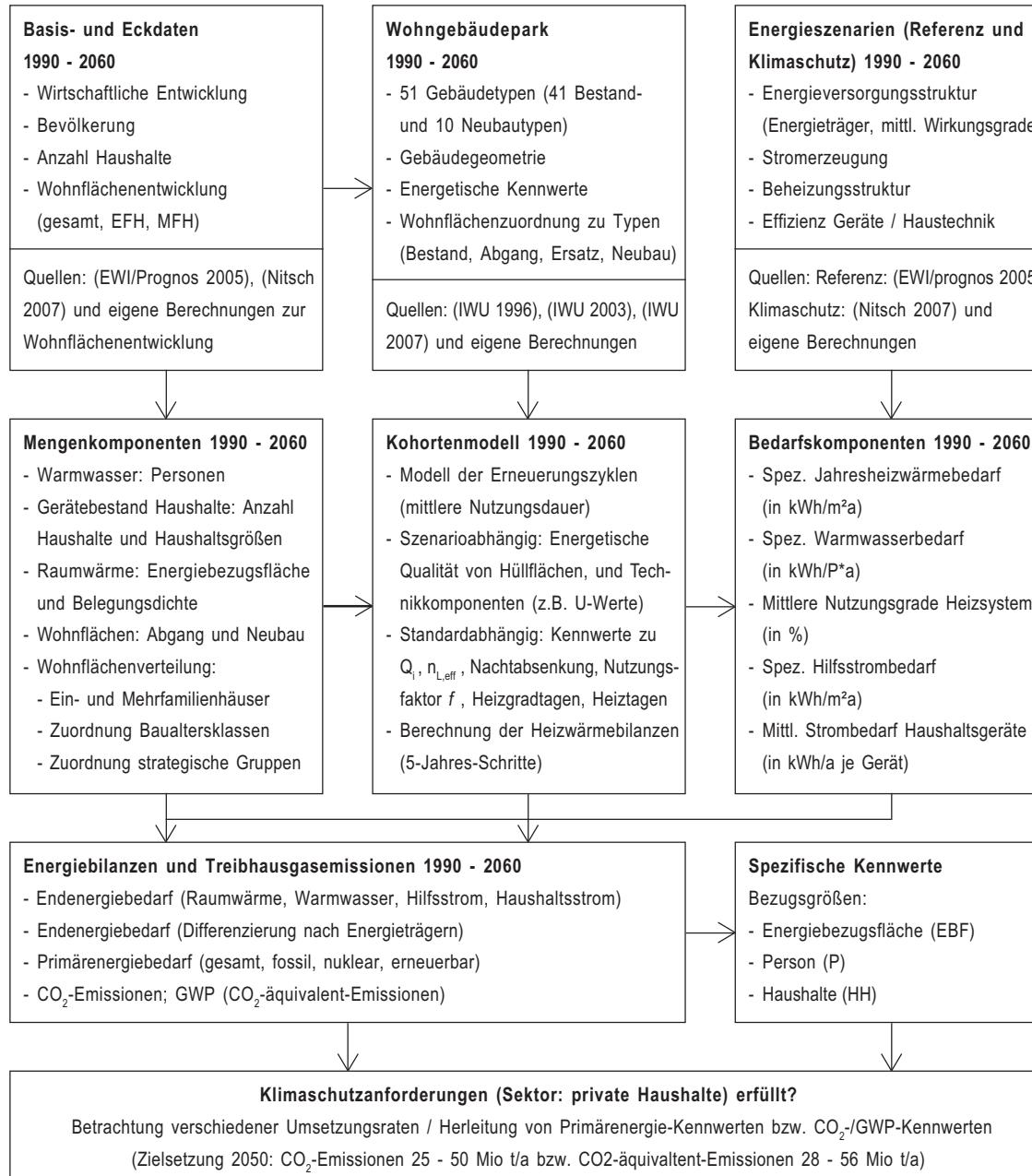


Abbildung 6.5:
Vergleich der Standardwetterdaten (Zeitraum 1995 - 2015) mit den künftigen Wetterdaten unter Einbeziehung des Klimawandels (2050) für die beiden Standorte Würzburg und Potsdam. Gezeigt sind die Unterschiede für die Globalstrahlung auf horizontalen Flächen. Quelle: (Metenorm 2021)



Berechnungsmodell

In Abbildung 6.6 ist das Berechnungsmodell dargestellt, das zur Aufstellung der Energiebilanzen im Zeitraum 1990 - 2060 für den Sektor der privaten Haushalte in Deutschland verwendet wurde.

Die Basis- und Eckdaten im Zeitraum 1995 - 2030 wurden im Wesentlichen aus der Referenzprognose des Energiereports IV (EWI/prognos 2005, S. 191) übernommen. Für den Zeitraum 2030 - 2050 wurden die Fortschreibungen aus dem Leitszenario 2006 (Nitsch 2007, S. 16) verwendet. Abweichend davon wurde für die Wohnflächenentwicklung eine eigene Abschätzung vorgenommen.

Der deutsche Wohngebäudepark wird in einem Kohortenmodell abgebildet, das insgesamt 51 Gebäudetypen enthält, die sich hinsichtlich Baualter, Gebäudetyp und Hauptabmessungen voneinander unterscheiden. Diese Gebäudetypologie ist eng an die IWU-Gebäudetypologien angelehnt (vgl. IWU 2003). Im Rahmen der Neubau- und Erneuerungsaktivitäten ändern sich ständig die Heizwärme-Bedarfswerte der Wohnbauten. Im Modell werden alle 5 Jahre die Heizwärmebilanzen aller Gebäudetypen neu berechnet.

Die anderen energierelevanten Bereiche (Warmwasser, Heizungen, Lüftungsanlagen, Haushaltsgeräte) werden über pauschale Ansätze zum spezifischen Verbrauch und geeigneten Bezugsgrößen für die Mengenkomponenten dargestellt. Die Modellbildung orientiert sich an den Szenarien zu den privaten Haushalten in (EWI/prognos 2005, S. 191 ff.) und wurde für die beiden Jahrzehnte nach 2050 vom Autor weiterentwickelt.

Schließlich lassen sich die Bedarfswerte für End- und Primärenergie sowie für die Treibhausgasemissionen mit Hilfe von berechneten Nutzungsgraden der Heizsysteme bzw. über Primärenergie- und CO₂- bzw. GWP-Faktoren ermitteln.

Abbildung 6.6: Rechenmodell zur Bestimmung der Energiekennwerte und Treibhausgasemissionen in den Szenarien

Kennwerte Neubau nach 2020				Hüllflächen in m ²				Kompaktheit	Dämmqualität	Heizwärmebed.
Kürzel	BAK	Geschoßzahl	EBF (m ²)	Dach	Wand	Kellerdecke	Fenster	A _{gew} /EBF	Um-Wert	HWB
EFH_L	2020-2029	2	101	125	120	80	30	2,52	0,29 / 0,16 / 0,13	87 / 37 / 27
EFH_M	2030-2040	2	242	181	185	196	30	2,48	0,23 / 0,13 / 0,11	70 / 23 / 17
EFH_N	2040-2060	2	158	183	171	152	36	2,08	0,22 / 0,12 / 0,10	53 / 13 / 8
MFH_L	2020-2029	4	1540	394	1325	387	270	1,42	0,38 / 0,26 / 0,18	64 / 40 / 18
MFH_M	2030-2040	3	607	212	566	225	153	1,72	0,31 / 0,23 / 0,16	56 / 25 / 14
MFH_N	2040-2060	3	440	218	430	142	90	1,84	0,24 / 0,15 / 0,10	54 / 18 / 8

6.4 Szenarioabhängige Annahmen zu den energetischen Qualitäten der Baukomponenten im Kohortenmodell.

Die energetischen Qualitäten der baulichen und technischen Komponenten stellen wichtige Parameter der Energiebilanz zur Bestimmung des Heizwärmebedarfs dar.

Während die energetisch-technischen Qualitäten der Komponenten aller Bestandsgebäude im Jahr 2010 (Ausgangszustand), abhängig vom Baualter, Gebäudetyp und sonstigen Eigenschaften variieren (siehe Tab. 5.1), werden für die anstehenden Sanierungsmaßnahmen und künftige Neubauten in den Szenarien festgelegte Standards bzw. Qualitäten vorgegeben (siehe Tabellen 6.5 - 6.7). Aus Gründen der besseren Übersichtlichkeit gelten diese für alle gleichartigen Fälle und es wird hier nur noch zwischen Ein- und Mehrfamilienhäusern unterschieden.

Im Betrachtungszeitraum werden die Anforderungen an die energetischen Qualitäten nach und nach erhöht, so dass sich ein dynamischer Verlauf der Anforderungsniveaus in den nächsten Dekaden ergibt. Für die Hüllflächen (Außenwände, Dächer, Decken bzw. Bodenplatten zum Keller oder Erdreich) werden pauschale mittlere U-Werte in Ansatz gebracht, die bereits alle Anschlussdetails und Wärmebrücken mitenthalten. Daher sind die genannten U-Werte nicht mit denen des ungestörten Bauteils gleichzusetzen. Bei den Fenstern wird der ge-

samte U_w-Wert des Fensters im eingebauten Zustand eingesetzt sowie der g-Wert der Verglasungen.

Für den künftigen Neubau wurden Typengebäude gemäß den Angaben in Tabelle 6.4 modelliert. Dabei wird neben der Geschoßzahl und Energiebezugsfläche auch alle Hüllflächen (Dach, Wand, Kellerdecke und Fenster) sowie die Kompaktheit (als A_{gew}/EBF-Kennwert), der U-Mittelwert der Gebäudehülle und der Heizwärmebedarf im Referenz-, Klimaschutz- und Klimaschutz-Plus-Szenario ausgewiesen.

Bei Sanierungen wird zwischen den ohne Einschränkungen sanierbaren und den bedingt sanierbaren Altbauten sowie Baudenkmälern unterschieden. Die möglichen Dämmqualitäten sind für den bedingt sanierbaren Bestand deutlich geringer angesetzt als für den voll sanierbaren (siehe Werte in Klammern in den oberen Tabellenteilen der Tabellen 6.5, 6.6 und 6.7). Das trifft insbesondere auf die Außenwände zu, die bei diesen Wohnbauten aus denkmalpflegerischen oder gestalterischen Gründen, falls überhaupt, nur mit Innendämmungen versehen werden können. Diese kommen ohnehin nur im Klimaschutz-Plus-Szenario zum Einsatz. Auch für alle anderen Bauteile wurden geringere energetische Qualitäten angenommen, um die vorhersehbaren Restriktionen und bautechnischen Schwierigkeiten der energetischen Sanierung unter denkmalpflegerischen Auflagen oder sonstigen typischen Hemmnissen im bedingt sanierbaren Bestand abzubilden.

Tabelle 6.4:
Auflistung der Neubautypen der Gebäudetypologie mit Angabe der Baualtersklasse, Geschoßzahl, der Energiebezugsfläche (= beheizte Wohnfläche), den Größen der Hüllflächen (Dach, Wand, Kellerdecke, Fenster), der Kompaktheit (A_{gew}/EBF), dem mittleren U-Wert der Gebäudehülle und dem spezifischen Jahresheizwärmebedarf. In den letzten zwei Spalten sind die Werte nacheinander für das Referenz- / Klimaschutz- / Klimaschutz-Plus-Szenario angegeben.

Referenz-Szenario: energetische Qualitäten Sanierungsmaßnahmen im Bestand (Werte in Klammern: bedingt sanierbarer Bestand)					
Komponente / Jahr	1990 - 2009	2010 - 2019	2020 - 2029	2030 - 2039	2040 - 2060
Außenwände (U-Wert)	0,60 (-)	0,50 (-)	0,35 (-)	0,30 (-)	0,25 (-)
Dach (U-Wert)	0,30 (0,80)	0,30 (0,70)	0,30 (0,65)	0,25 (0,60)	0,20 (0,60)
Kellerdecke (U-Wert)	0,50 (0,80)	0,45 (0,70)	0,40 (0,65)	0,35 (0,60)	0,30 (0,60)
Fenster (U-Wert)	1,80 (2,00)	1,60 (1,80)	1,50 (1,60)	1,30 (1,40)	1,00 (1,20)
Fenster (g-Wert)	0,63 (0,60)	0,63 (0,60)	0,63 (0,55)	0,63 (0,55)	0,55 (0,55)
Lüftung (n_L - Wert)	0,45 (0,45)	0,45 (0,45)	0,45 (0,45)	0,45 (0,45)	0,45 (0,45)

Referenz-Szenario: energetische Qualitäten Neubauten (Werte in Klammern: Mehrfamilienhäuser)					
Komponente / Jahr	1990 - 2009	2010 - 2019	2020 - 2029	2030 - 2039	2040 - 2060
Außenwände (U-Wert)	0,35 (0,35)	0,30 (0,35)	0,28 (0,30)	0,20 (0,22)	0,16 (0,18)
Dach (U-Wert)	0,22 (0,22)	0,22 (0,25)	0,20 (0,22)	0,18 (0,20)	0,14 (0,16)
Kellerdecke (U-Wert)	0,40 (0,34)	0,40 (0,45)	0,35 (0,38)	0,30 (0,35)	0,25 (0,30)
Fenster (U_w -Wert)	1,60 (1,60)	1,30 (1,30)	1,30 (1,30)	1,00 (1,00)	0,90 (0,90)
Fenster (g-Wert)	0,63 (0,63)	0,60 (0,60)	0,60 (0,60)	0,60 (0,60)	0,55 (0,55)
Lüftung (n_L - Wert)	0,45 (0,45)	0,45 (0,45)	0,45 (0,45)	0,40 (0,40)	0,35 (0,35)

Tabelle 6.5

Angaben zur energetischen Qualität der baulich-technischen Komponenten der Wohngebäude im Referenz-Szenario. Im oberen Teil der Tabelle sind die Kennwerte für die Sanierungsmaßnahmen im Bestand zusammengestellt. Hierbei ist zu beachten, dass diese jeweils nur für anstehende Erneuerungsmaßnahmen gelten. Gemäß dem Kopplungsprinzip bleibt die energetische Qualität von baulich-technischen Komponenten im Modell solange unverändert erhalten, bis nach Ablauf der Nutzungsdauer eine Erneuerung ansteht. Erst dann kommt eine bessere Qualität zum Zuge. Im unteren Teil der Tabelle sind die Kennwerte für künftige Neubauten genannt.

Die Angaben zu den U-Werten von Außenwänden, Dächern, Kellerdecken erfolgen in W/m²K. Die Angabe des U-Wertes der Fenster bezieht sich auf den Gesamt- U_w -Wert des Fensters in W/m²K im eingebauten Zustand. Die energetische Güte des Lüftungs- und Luftdichtigkeitskonzeptes wird über den Kennwert des effektiven energetisch wirksamen Luftwechsels n_L in 1/h charakterisiert. Dieser entspricht dem Mittelwert aller Gebäude mit und ohne Wärmerückgewinnung.

Im Referenz-Szenario (siehe Tabelle 6.5) orientieren sich die energetischen Qualitäten für Bau- und Technikkomponenten an den heute bereits erkennbaren Entwicklungen. Das Tempo der Weiterentwicklung entspricht dem in jüngerer Zeit zu beobachtenden Tempo von Verbesserungen und den Fortschreibungen der entsprechenden Verordnungen.

Im Klimaschutz-Szenario (siehe Tabelle 6.6) werden hingegen ab 2020 konsequent effizientere Komponenten und Baustandards zugrundegelegt. Beispielsweise weisen alle Neubauten ab 2020 die Güte des Passivhauskonzeptes auf, ohne dass der Standard jeweils im strengen Sinne eingehalten werden muss. Das gilt speziell für die Lüftungskonzepte, bei denen hier noch längere Zeit auch Abluftanlagen möglich sind. Die energetischen Sanierungen werden im Bereich der Hülle mit Passivhauskomponenten durchgeführt. Auch die energetische Qualität der Passivhauskomponenten wird am Ende des Betrachtungszeitraums durch technologische Entwicklungen gegenüber heute weiter verbessert sein.

Im Klimaschutz-Plus-Szenario werden ab 2020/30 technologische Weiterentwicklungen berücksichtigt, die sich heute noch im Erprobungsstadium befinden oder wenigstens theoretisch untersucht sind (siehe Tab. 6.7):

- Im Vergleich zum Klimaschutz-Szenario kommen bessere Dämmqualitäten bei allen Außenbauteilen zum Einsatz. Dabei wird davon ausgegangen, dass sowohl bei den konventionellen Dämmstoffen technologische Weiterentwicklungen stattfinden als auch für spezielle Anwendungen verstärkt neue Dämmmaterialien (z.B. Vakuumdämm-Paneele) zur Verfügung stehen. Sollten die Energiepreise künftig wieder steigen, könnten diese Komponenten ab ca. 2030 auch wirtschaftlich interessant werden.
- Bei der konstruktiven Bewältigung typischer Wärmebrücken kommen verstärkt kostengünstige Standardprodukte zum Einsatz, die z.B. statisch hochfester Verbindungen mit einem sehr guten Wärmeschutz kombinieren.

- Die Fenster stellen auch im Passivhaus weiterhin die thermisch schwächsten Bauteile mit den größten flächenbezogenen Wärmeverlusten dar. Technologische Weiterentwicklungen (Rahmen, Rahmenbreite, Verglasungen, Glasrandverbund) sind von besonderer strategischer Bedeutung für die Weiterentwicklung des Passivhauskonzeptes. Diese Entwicklungen sind bereits in vollem Gange. Eine spezielle Rolle spielen hierbei die geometrische und thermische Optimierung des Fensterrahmens sowie der Einbausituation sowie künftig kostengünstige und leichte Vakuumverglasungen. Aus heutiger Sicht erscheinen ab 2030 Fenster-U-Gesamt-Werte im eingebauten Zustand von 0,5 W/m²K durchaus erreichbar zu sein. Die heute verfügbaren marktbesten Fenster erreichen bereits Werte um 0,60 - 0,65 W/m²K. Die Entwicklungen bei Fenstern und Verglasungen sind darüberhinaus von größter Bedeutung für ihren Einsatz im Denkmalbestand, weil hier besonders hohe Anforderungen an Gewicht, Statik, Integrationsfähigkeit in alte Fensterkonstruktionen bzw. die Rekonstruktion alter Rahmenprofile gestellt werden.
- Auch bei Lüftungsanlagen sind weitere energetische Optimierungen absehbar, die zunächst vor allem die Elektroeffizienz der Lüftungsgeräte betreffen. Diese Verbesserungen werden bei der Berechnung des Hilfsstromeinsatzes berücksichtigt. In die Berechnung des Jahresheizwärmebedarfs fließt als Einflussgröße der energetisch wirksame Luftwechsel ein. Dieser wird durch den mittleren Anlagenluftwechsel, den Wärmebereitstellungsgrad der Wärmerückgewinnung und den Infiltrationsluftwechsel bestimmt. Verbesserungen sind bei allen der drei genannten Größen möglich. Der Anlagenluftwechsel lässt sich z.B. durch eine luftqualitätgesteuerte Volumenregelung oder eine Kaskadenlüftung reduzieren. Die zu erwartende geringere Belegungsdichte führt künftig zu kleineren mittleren Anlagenluftwechseln. Auch die energetische Qualität von Wärmetauschern, Gerätegehäuse und bei der Dämmung von Lüftungsleitungen kann weiter verbessert werden.

Klimaschutz-Szenario: energetische Qualitäten Sanierungsmaßnahmen im Bestand (Werte in Klammern: bedingt sanierbarer Bestand)					
Komponente / Jahr	1990 - 2009	2010 - 2019	2020 - 2029	2030 - 2039	2040 - 2060
Außenwände (U-Wert)	0,60 (-)	0,50 (0,85)	0,25 (0,80)	0,18 (0,75)	0,12 (0,75)
Dach (U-Wert)	0,30 (0,80)	0,30 (0,70)	0,25 (0,60)	0,15 (0,55)	0,08 (0,50)
Kellerdecke (U-Wert)	0,50 (0,80)	0,45 (0,70)	0,40 (0,65)	0,25 (0,60)	0,18 (0,60)
Fenster (U-Wert)	1,80 (2,00)	1,60 (1,80)	1,30 (1,60)	1,00 (1,30)	0,70 (1,00)
Fenster (g-Wert)	0,63 (0,60)	0,63 (0,625)	0,63 (0,55)	0,55 (0,55)	0,55 (0,55)
Lüftung (n _L - Wert)	0,45 (0,45)	0,45 (0,45)	0,10 (0,45)	0,09 (0,40)	0,08 (0,20)
Klimaschutz-Szenario: energetische Qualitäten Neubauten (Werte in Klammern: Mehrfamilienhäuser > 2 WE)					
Komponente / Jahr	1990 - 2009	2010 - 2019	2020 - 2029	2030 - 2039	2040 - 2060
Außenwände (U-Wert)	0,35 (0,35)	0,35 (0,30)	0,18 (0,15)	0,15 (0,10)	0,12 (0,08)
Dach (U-Wert)	0,30 (0,22)	0,25 (0,22)	0,15 (0,12)	0,12 (0,09)	0,08 (0,07)
Kellerdecke (U-Wert)	0,40 (0,34)	0,40 (0,32)	0,20 (0,15)	0,18 (0,12)	0,15 (0,10)
Fenster (U-Wert)	1,60 (1,60)	1,30 (1,30)	0,85 (1,00)	0,85 (0,70)	0,60 (0,60)
Fenster (g-Wert)	0,63 (0,63)	0,63 (0,63)	0,55 (0,55)	0,55 (0,55)	0,55 (0,55)
Lüftung (n _L - Wert)	0,45 (0,45)	0,45 (0,40)	0,15 (0,25)	0,08 (0,09)	0,07 (0,09)

Tabelle 6.6

Angaben zur energetischen Qualität der baulich-technischen Komponenten der Wohngebäude im Klimaschutz-Szenario. Im oberen Teil der Tabelle sind die Kennwerte für die Sanierungsmaßnahmen im Bestand zusammengestellt. Hierbei ist zu beachten, dass diese jeweils nur für anstehende Erneuerungsmaßnahmen gelten. Gemäß dem Kopplungsprinzip bleibt nämlich die energetische Qualität von baulich-technischen Komponenten im Modell solange unverändert erhalten, bis nach Ablauf der Nutzungsdauer eine Erneuerung ansteht. Erst dann kommt eine bessere Qualität zum Zuge. Im unteren Teil der Tabelle sind die Kennwerte für künftige Neubauten genannt.

Die Angaben zu den U-Werten von Außenwänden, Dächern, Kellerdecken erfolgen in W/m²K. Die Angabe des U-Wertes der Fenster bezieht sich auf den Gesamt-U_w-Wert des Fensters in W/m²K im eingebauten Zustand. Die energetische Güte des Lüftungs- und Luftdichtigkeitskonzeptes wird über den Kennwert des effektiven energetisch wirksamen Luftwechsels n_L in 1/h charakterisiert. Dieser entspricht dem Mittelwert aller Gebäude mit und ohne Wärmerückgewinnung.

Klimaschutz-Plus-Szenario: energetische Qualitäten Sanierungsmaßnahmen im Bestand (Werte in Klammern: bedingt sanierbarer Bestand)					
Komponente / Jahr	1990 - 2009	2010 - 2019	2020 - 2029	2030 - 2039	2040 - 2060
Außenwände (U-Wert)	0,60 (-)	0,50 (0,85)	0,20 (0,75)	0,15 (0,65)	0,10 (0,55)
Dach (U-Wert)	0,30 (0,80)	0,30 (0,70)	0,18 (0,50)	0,12 (0,40)	0,07 (0,30)
Kellerdecke (U-Wert)	0,50 (0,80)	0,45 (0,70)	0,30 (0,50)	0,20 (0,40)	0,15 (0,30)
Fenster (U-Wert)	1,80 (2,00)	1,60 (1,80)	0,80 (1,30)	0,60 (0,80)	0,40 (0,60)
Fenster (g-Wert)	0,63 (0,60)	0,63 (0,60)	0,60 (0,55)	0,55 (0,50)	0,60 (0,60)
Lüftung (n_L - Wert)	0,45 (0,45)	0,40 (0,45)	0,09 (0,30)	0,08 (0,20)	0,07 (0,15)
Klimaschutz-Plus-Szenario: energetische Qualitäten Neubauten (Werte in Klammern: Mehrfamilienhäuser > 2 WE)					
Komponente / Jahr	1990 - 2009	2010 - 2019	2020 - 2029	2030 - 2039	2040 - 2060
Außenwände (U-Wert)	0,35 (0,35)	0,30 (0,35)	0,10 (0,12)	0,08 (0,10)	0,07 (0,08)
Dach (U-Wert)	0,22 (0,30)	0,22 (0,25)	0,10 (0,10)	0,08 (0,08)	0,06 (0,07)
Kellerdecke (U-Wert)	0,34 (0,40)	0,32 (0,40)	0,15 (0,18)	0,09 (0,10)	0,08 (0,09)
Fenster (U-Wert)	1,60 (1,60)	1,30 (1,30)	0,70 (0,70)	0,60 (0,60)	0,40 (0,40)
Fenster (g-Wert)	0,63 (0,63)	0,63 (0,63)	0,55 (0,55)	0,55 (0,55)	0,60 (0,60)
Lüftung (n_L - Wert)	0,45 (0,45)	0,45 (0,40)	0,08 (0,10)	0,07 (0,08)	0,06 (0,07)

Tabelle 4.7

Angaben zur energetischen Qualität der baulich-technischen Komponenten der Wohngebäude im Klimaschutz-Plus-Szenario. Im oberen Teil der Tabelle sind die Kennwerte für die Sanierungsmaßnahmen im Bestand zusammengestellt. Hierbei ist zu beachten, dass diese jeweils nur für anstehende Erneuerungsmaßnahmen gelten. Gemäß dem Kopplungsprinzip bleibt nämlich die energetische Qualität von baulich-technischen Komponenten im Modell solange unverändert erhalten, bis nach Ablauf der Nutzungsdauer eine Erneuerung ansteht. Erst dann kommt eine bessere Qualität zum Zuge. Im unteren Teil der Tabelle sind die Kennwerte für künftige Neubauten genannt.

Die Angaben zu den U-Werten von Außenwänden, Dächern, Kellerdecken erfolgen in $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$. Die Angabe des U-Wertes der Fenster bezieht sich auf den Gesamt- U_w -Wert des Fensters in $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ im eingebauten Zustand. Die energetische Güte des Lüftungs- und Luftdichtigkeitskonzeptes wird über den Kennwert des effektiven energetisch wirksamen Luftwechsels n_L in $1/\text{h}$ charakterisiert. Dieser entspricht dem Mittelwert aller Gebäude mit und ohne Wärmerückgewinnung.

- Nicht zuletzt spielt die Luftdichtigkeit der Gebäudehülle energetisch und bauphysikalisch eine wichtige Rolle. Mit heute vorhandenen Dichtkonzepten und -mitteln lassen sich im Neubau bei konsequenter Anwendung gegenüber dem geforderten Passivhaus-Grenzwert von $n_{50} = 0,6 \text{ h}^{-1}$ regelmäßig deutlich günstigere Drucktest-Kennwerte um $0,4 - 0,2 \text{ h}^{-1}$ erzielen.

Die energetischen Kennwerte zu den Einzelkomponenten im Klimaschutz-Plus-Szenario sind in Tabelle 6.7 zusammenge stellt. Die Spannbreite der energetischen Qualitäten in den verschiedenen Szenarien umfasst das gesamte Spektrum der heute verfügbaren bautechnischen Komponenten und markt typischen Produkte. Spekulative Annahmen zu künftig vorstell baren bzw. wünschenswerten Technologien wurden jedoch selbst im explorativen Klimaschutz-Plus-Szenario vermieden.

Nutzungsdauern und Erneuerungszyklen

Die mittlere Nutzungsdauer der baulichen und technischen Komponenten ist ein wichtiger Parameter im Kohortenmodell, denn darüber werden die Erneuerungszyklen von Bauteilen und Technikkomponenten festgelegt, die dann Auslöser für daran gekoppelte energetische Maßnahmen sind. Diese Zyklen sollten möglichst realistisch bestimmt werden. Werden die Nutzungsdauern zu kurz gewählt, werden die Möglichkeiten für eine energetische Sanierung zu optimistisch eingeschätzt. Im umgekehrten Fall ergibt sich eine zu pessimistische Einschätzung.

In der Literatur finden sich erheblich voneinander abweichende Angaben zur mittleren Nutzungsdauer von Bau- und Technik komponenten. Hintergrund sind u.a. unterschiedliche Motivationen und Bewertungen. So werden die Nutzungsdauern bei Wirtschaftlichkeitsberechnungen i.d.R. deutlich geringer angesetzt, als die tatsächliche Haltbarkeit der Konstruktionen beträgt. Sie orientieren sich häufig an in der Wirtschaft üblichen Abschreibungszeiträumen. Dadurch werden jedoch an sich

wirtschaftlich tragfähige Lösungen „schlechtgerechnet“ und u.U. verhindert. Es existieren nur wenige empirische Untersuchungen zu Nutzungsdauern. In (Kleemann et al. 2000, S. 11) werden Renovierungszyklen von 30 - 60 Jahren genannt und eine Untersuchung von 1260 Wohneinheiten im Ruhrgebiet angeführt, für die ein mittlerer Renovationszyklus von 53 Jahren ermittelt wurde. Vollsaniierungen stellen jedoch nicht den Regelfall im Sanierungsgeschehen dar. Baukomponenten werden dann ersetzt oder erneuert, wenn deren Nutzungsdauer abgelaufen ist - und das ist davon abhängig, um welches Bauteil, um welche Konstruktionsart oder welche Technikkomponente es sich handelt. Daher werden Nutzungsdauern sinnvollerweise differenziert nach Bauteil oder Komponente ausgewiesen.

In Tabelle 6.8 sind die im Kohortenmodell verwendeten Nutzungsdauern ausgewiesen. Diese wurden in Anlehnung an (Kleemann et al. 2000) im oberen Bereich der in der Literatur genannten Werte gewählt, weil die Bauteile und Komponenten tatsächlich langlebiger sind, als häufig angenommen wird und sich daraus längere Erneuerungszyklen ergeben (s.o.). Dies ist von Bedeutung, damit die Berechnungen im Kohortenmodell nicht auf zu optimistischen Annahmen bzgl. Erneuerungsraten und Sanierungseffizienzen beruhen. Die Nutzungsdauern von tragenden Hauptkonstruktionen liegen bei 80 Jahren und mehr. Auch die sonstigen baulichen Komponenten sind mit 30 - 50 Jahren Nutzungsdauer im Vergleich zu üblichen Konsumgütern als eher langlebig einzustufen. Technische Anlagen wie Heizsysteme und Lüftungsanlagen weisen mit 25 - 30 Jahren bereits deutlich kürzere Erneuerungszyklen auf. Mit 5 - 20 Jahren sind Ausstattungsgegenstände, Wohnungseinrichtungen und Elektrogeräte am kurzlebigsten.

Der Erstellungszeitpunkt der Gebäude (bzw. der Gebäudetypen im Kohortenmodell) bildet jeweils den Ausgangspunkt für die anstehenden Erneuerungszyklen. Diese werden im Kohortenmodell in 5-Jahres-Schritten abgebildet, wobei die energeti-

Bauteil / Komponente	Mittlere Nutzungsdauer [a]	Sanierungsrate
Baukomponenten		
Außenwände (Putz / sonstige Bekleidungen / Dämmung)	50	2,0%
Anstriche / Beschichtungen	5 - 10	10,0 - 20,0%
Dach (Steildachaufbau)	50	2,0%
Dach (Flachdachaufbau)	30	3,5%
Kellerdecke (zugänglich)	40	2,5%
Kellerdecke (Bodenaufbau)	80	1,0%
Kellerwände und Bodenplatten	80 - 120	1,0%
Fenster (Verglasung)	20	5,0%
Fenster (Rahmen)	40	2,5%
Tragkonstruktionen	80 - 120	1,0%
Mittlere Nutzungsdauer (Baukomponenten)	50 - 60	1,5 - 2,0%
Technikkomponenten		
Haustechnik - Heizsystem	20	5,0%
Haustechnik - Wärmeverteilung	50	2,0%
Lüftungstechnik (Gerät)	20 - 25	4,0 - 5,0%
Lüftungsverteilung (Kanalnetz)	50	2,0%
Elektroinstallationen	30 - 50	2,0 - 3,5%
Beleuchtung	5 - 10	10,0 - 20,0%
Haushaltsgeräte	10 - 20	5,0 - 10,0%
Unterhaltungselektronik	5-10	10,0 - 20,0%
Computer u.ä.	5-10	10,0 - 20,0%
Mittlere Nutzungsdauer (Technikkomponenten)	15 - 25	4,0 - 6,5%

Tabelle 6.8:
Mittlere Nutzungsdauer und daraus abgeleitete Sanierungsrate für die energetisch relevanten Bau- und Technikkomponenten. Die Angabe erfolgt für die technische Standzeit (= tatsächliche Lebensdauer) und nicht als wirtschaftlicher Abschreibungszeitraum. Quelle: (Vallentin 2011, S. IV-19 und Ergänzungen).

Gesamt-Jahresanlagennutzungsgrade (Erzeugung, Speicherung, Verteilung)								
	Strom dir.	WP	Solar	Holz	FW	Kohle	Gas	Heizöl
Ausgangswerte								
2010 Heizung	0,98	2,10	1,00	0,65	0,84	0,66	0,73	0,70
2010 Warmwasser	0,90	2,00	1,00	0,48	0,67	0,48	0,68	0,50
Referenz-Szenario								
2030 Heizung	0,98	2,50	1,00	0,70	0,87	0,75	0,94	0,90
2030 Warmwasser	0,92	2,10	1,00	0,50	0,70	0,49	0,70	0,51
2050 Heizung	0,98	2,70	1,00	0,76	0,89	0,78	0,98	0,92
2050 Warmwasser	0,92	2,30	1,00	0,52	0,74	0,49	0,72	0,52
Klimaschutz-Szenario								
2030 Heizung	0,98	3,20	1,00	0,72	0,87	0,75	0,95	0,91
2030 Warmwasser	0,92	2,20	1,00	0,51	0,73	0,49	0,72	0,52
2050 Heizung	0,98	3,80	1,00	0,78	0,89	0,78	0,98	0,93
2050 Warmwasser	0,93	2,60	1,00	0,53	0,76	0,49	0,74	0,54
Klimaschutz-Plus-Szenario								
2030 Heizung	0,98	3,20	1,00	0,72	0,88	0,75	0,96	0,91
2030 Warmwasser	0,92	2,40	1,00	0,51	0,73	0,49	0,72	0,52
2050 Heizung	0,98	4,18	1,00	0,78	0,91	0,78	0,99	0,93
2050 Warmwasser	0,93	3,40	1,00	0,53	0,76	0,49	0,77	0,54

Tabelle 6.9
Entwicklung der Jahresnutzungsgrade der Heizsysteme (Raumwärme, Warmwasserbereitung) im Referenz-, Klimaschutz und im Klimaschutz-Plus-Szenario für Heizung und Warmwasser im Ausgangsjahr 2010 und in den Jahren 2030 und 2050.

tischen Kennwerte der betreffenden Bauteile bzw. Technikkomponenten – je nach Sanierungstiefe und Qualität entsprechend den Vorgaben in den Szenarien – angenommen werden.

Wie in Tab. 6.8 dargestellt, lassen sich die Nutzungsdauern über ihren Kehrwert in komponentenabhängige Sanierungsräten umrechnen. Bündelt man hier Maßnahmenpakete, so ergeben sich daraus realistische Sanierungszyklen. Denn man kann nicht pauschal annehmen, dass es im Interesse der Hauseigentümer bzw. Mieter liegt, alle 5 Jahre Einzelmaßnahmen mit ihren typischen Störfaktoren auszuführen. Auffällig ist, dass die mittlere Sanierungsrate im Bereich der Technikkomponenten mit 4,0 - 6,0 % deutlich höher liegt, als im Bereich der Baukomponenten mit 1,5 - 2,0 %. Bei der Gebäude-

technik können somit neue Qualitäten und die Umstellung von fossilen auf erneuerbare Systeme deutlich schneller den Bestand durchdringen, als dies bei den Baukonstruktionen der Fall ist.

Definition der Bezugsfläche

Bei der Bestimmung der spezifischen Kennwerte wird nicht die über einen pauschalen Umrechnungsfaktor aus dem Bauvolumen ermittelte Nutzfläche A_N gemäß EnEV bzw. GEG, sondern die tatsächlich vorhandene Nutzfläche verwendet. Bei der sog. Energiebezugsfläche A_{EB} werden nur die Nutzflächen innerhalb der thermischen Hülle angerechnet, z.B. die beheizte Wohnfläche (nicht jedoch Balkone, gedeckte Terrassen, Loggien oder Abstellräume etc. außerhalb der Gebäudehülle). Die Energiebezugsfläche wurde über die Außenmaße der Gebäudetypen und die Geschosszahl ermittelt. Die so ermittelten Geschossflächen GF wurden über pauschale Umrechnungsfaktoren in die Energiebezugsfläche umgerechnet. Diese Faktoren (ausgedrückt als Verhältnis A_{EB}/GF) liegen je nach Gebäudetyp zwischen 0,70 und 0,80.

6.5 Szenarioabhängige Modellierung der energetischen Qualitäten der Technikkomponenten im Kohortenmodell

Analog zu den Bauteilen wird bei den haustechnischen Komponenten (z.B. Heizung, Warmwassererzeuger, Lüftung) verfahren. Es wurden szenarioabhängige Annahmen zur energetischen Qualität der Systeme zusammengestellt. Diese werden in einfachen Kennwerten ausgedrückt (z.B. energieäquivalenter Luftwechsel des Lüftungskonzeptes bzw. Jahresnutzungsgrad der WärmeverSORGUNG inkl. Erzeugung, Speicherung und Verteilung) und zeitabhängig variiert. Für die Bestimmung des nutzerabhängigen Warmwasser- und Strombedarfs wird auf die Kennwerte anderer Szenarienstudien zurückgegriffen, und ein Abgleich mit Studien bzw. Daten, die auf den deutschen Wohngebäudepark bezogen sind, vorgenommen.

Entwicklung des Nutzenergiebedarfs für Raumwärme

Dieser wird, wie in den Abschnitten zuvor ausführlich dargestellt, über ein Kohortenmodell für den gesamten Wohngebäudepark Deutschlands kalkuliert. Abhängig von den Grundannahmen in den Szenarien kommen hierbei zeitabhängig unterschiedliche energetische Qualitäten der Gebäudehülle und Lüftungskonzepte zum Einsatz.

Entwicklung des Warmwasserbedarfs

Für den Nutzenergiebedarf der Warmwasseranwendungen in den privaten Haushalten wurde die Angaben der Dissertation (Vallentin 2011, S. IV-44) unverändert übernommen. Eine Ausnahme bildet hier das sog. Suffizienz-Szenario, in dem der Nutzwarmwasserbedarf ab 2020 spürbar abgesenkt wird.

Entwicklung des Strombedarfs

Für den Strombedarf in den privaten Haushalte wurden ebenfalls die Modellierungen aus der Dissertation (Vallentin 2011, S. IV-46 ff.) unverändert übernommen. Dort wird zwischen Hilfs- und Haushaltsstrom unterschieden, um verschiedene Haustechniklösungen differenziert betrachten zu können (z.B. Hilfstrombedarf von Lüftungs- und Solaranlagen). Im schon erwähnten Suffizienz-Szenario wird eine kombinierte Strategie von effizienten Geräten und reduzierter Geräteausstattung unterstellt.

Modellierung der Wärmeversorgungssysteme

Die energetische Qualität der Wärmeversorgungssysteme (Heizung/Warmwasser) wird im Rechenmodell durch ihre Gesamt-Jahresanlagennutzungsgrade für Erzeugung, Speicherung und Verteilung abgebildet. Diese wurden anhand von Literaturwerten und Ergebnissen aus Messprojekten hergeleitet (vgl. Vallentin 2011, S. IV-34 f. und IV-42 f.), (Peper/Feist 2008), (Peper 2009) und (Miara et al. 2011). Während die Werte für brennstoffbetriebene Wärmeversorgungssysteme und direktelektrische Systeme in den einzelnen Szenarien nicht differenziert wurden, wurden die Gesamt-Jahresanlagennutzungs-

grade der Wärmepumpensysteme im Klimaschutz-Plus-Szenario höher als im Klimaschutz-Szenario festgelegt, weil hier noch sehr weitgehende Technologieverbesserungen möglich sind (z.B. Direktverdampfer-Wärmepumpen).

Um die in Zukunft zu erwartenden technischen Weiterentwicklungen zu berücksichtigen, wurden die Systemeffizienzen im Betrachtungszeitraum immer weiter verbessert. Die heute marktbesten Geräte und Konzepte dienen als Maßstab für die künftig standardmäßig verbauten Wärmeere zugungsanlagen. Tabelle 6.9 zeigt exemplarisch die Werte für die Ausgangssituation 2010 und die weitere Entwicklungen im Referenz-, Klimaschutz- und das Klimaschutz-Plus-Szenario jeweils für die Jahre 2030 und 2050. Die Werte wurden unverändert aus der Dissertation übernommen (vgl. Vallentin 2011, S. IV-35). Dort sind sie näher hergeleitet und begründet. Die Unterscheidung zwischen zentralen und dezentralen Systemen (z.B. bei Öl-, Gas-, Kohle- und Holzheizungen) wurde jedoch aufgegeben. Im Kohortenmodell wird der Jahresnutzungsgrad des Heizsys-

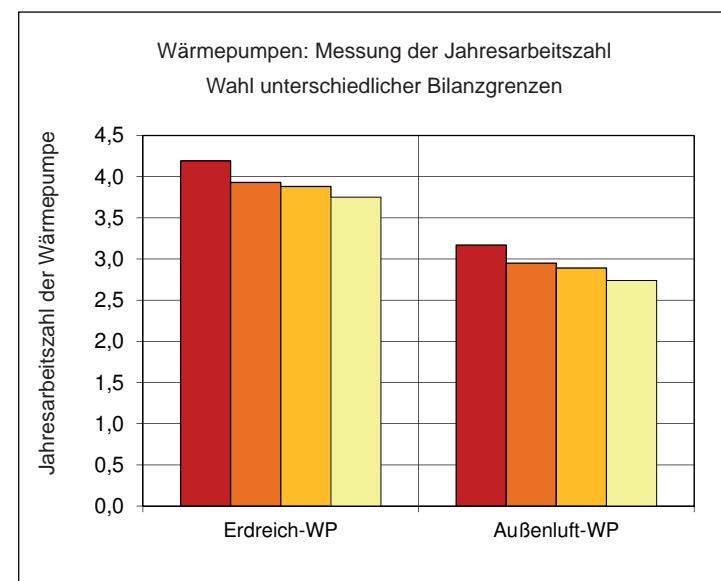


Abbildung 6.6
Messwerte der Jahresarbeitszahlen von Wärmepumpen unter Anwendung unterschiedlicher Bilanzgrenzen. Quelle: (Miara et al. 2011).

tems unter Berücksichtigung aller Verluste des Systems, wie Erzeugung, Speicherung, Verteilung und Wärmeübergabe, abgebildet.

Exemplarisch soll diese Entwicklung im Folgenden anhand der Wärmepumpensysteme verdeutlicht werden. Diese spielen als eines der wenigen Systeme zur Wärmeerzeugung, die nicht von Brennstoffen abhängig sind eine immer wichtigere Rolle. Sie sind dazu prädestiniert, fossile Heizsysteme zu ersetzen und zugleich einen Beitrag zur Sektorkopplung im künftigen stromdominierten Energiesystem zu leisten.

Zur Ermittlung der im Kohortenmodell verwendeten Werte für die Erzeuger-Effizienzen von Wärmepumpen wurden auf die Ergebnisse des Projekts „Wärmepumpeneffizienz“ des Fraunhofer Instituts für solare Energiesysteme zurückgegriffen. In diesem Projekt wurden die Effizienzen von 56 Sole-Wärmepumpen und 18 Luft-Wärmepumpen in einem Feldtest untersucht (Miara et al. 2011). In Abbildung 6.6 sind die Mittelwerte der gemessenen Jahresarbeitszahlen für je verschiedenen gewählte Bilanzgrenzen aufgezeigt. Die mittleren Jahresarbeitszahlen der messtechnisch untersuchten Erdreich-Wärmepumpen lagen in den drei vermessenen Jahren zwischen 4,19 und 3,75. Bei den Außenluft-Wärmepumpen liegen diese Werte mit 3,17 bis 2,74 deutlich niedriger. Nur der jeweils niedrigste Wert bildet alle Verluste des Wärmepumpensystems im engeren Sinne ab. Es fehlen jedoch dann immer noch die Speicher-, Verteil- und Übergabeverluste, um den Jahresnutzungsgrad zu bestimmen.

In den Rechengängen wurden diese daher definitiv auf der vorsichtigen Seite abgeschätzt. Im Referenzszenario dominieren Luft-Wasser-Wärmepumpen, während in den Klimaschutzszenarien höhere Anteile von Erdreich-Sole-Wärmepumpen und Grundwasser-Wärmepumpen zugrunde gelegt werden. Im Klimaschutz-Plus-Szenario werden dann auch Weiterentwicklungen (z.B. Direktverdampfer-Wärmepumpen) berücksichtigt.

Wärmeverluste für Verteilung und Speicherung

Die Wärmeverluste energetisch hochwertig saniertes Gebäude wurden in zwei Messprojekten des Passivhaus-Instituts Darmstadt untersucht (Peper/Feist 2008), (Peper 2009). In beiden Fällen traten Verluste für Wärmespeicherung und -verteilung zwischen 5 und 10 kWh/m²a für Heizung und Warmwasser auf. Dies setzt in jedem Fall eine sorgfältige Planung (kurze Verteilnetze) und eine sehr gute Dämmung der wärmeführenden Leitungen voraus.

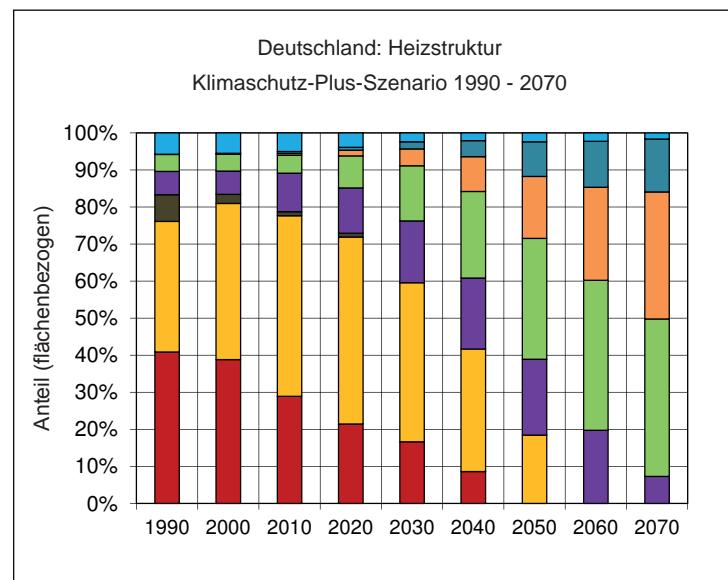
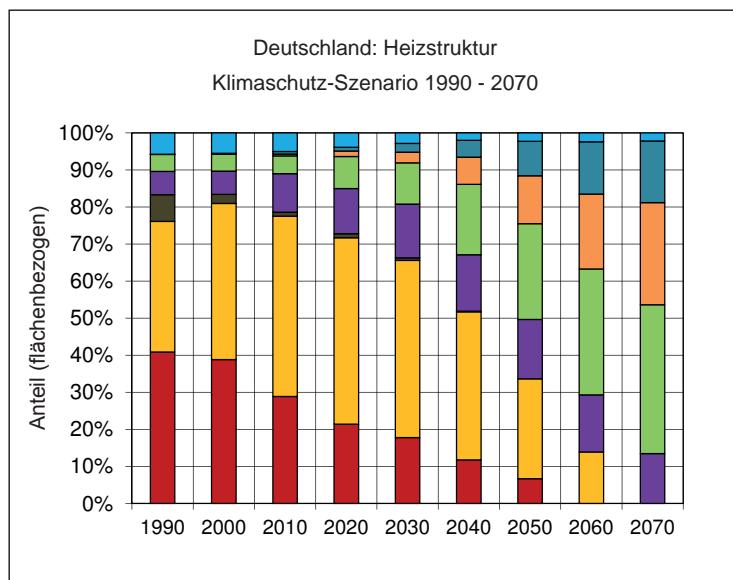
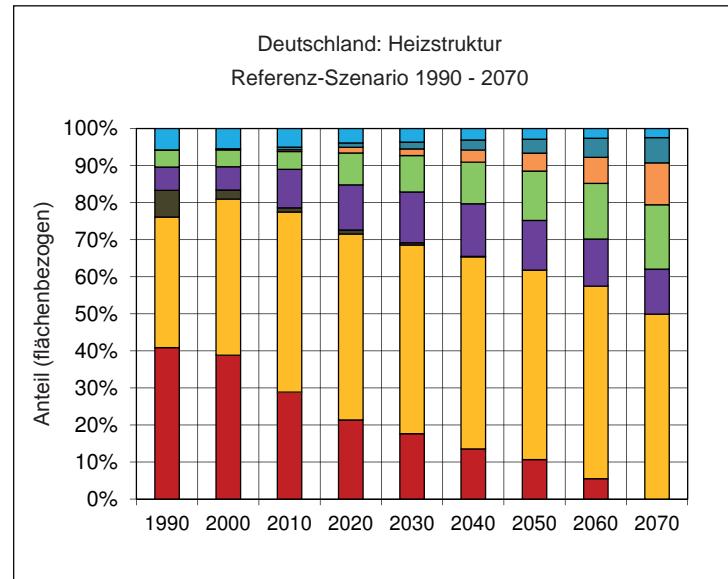
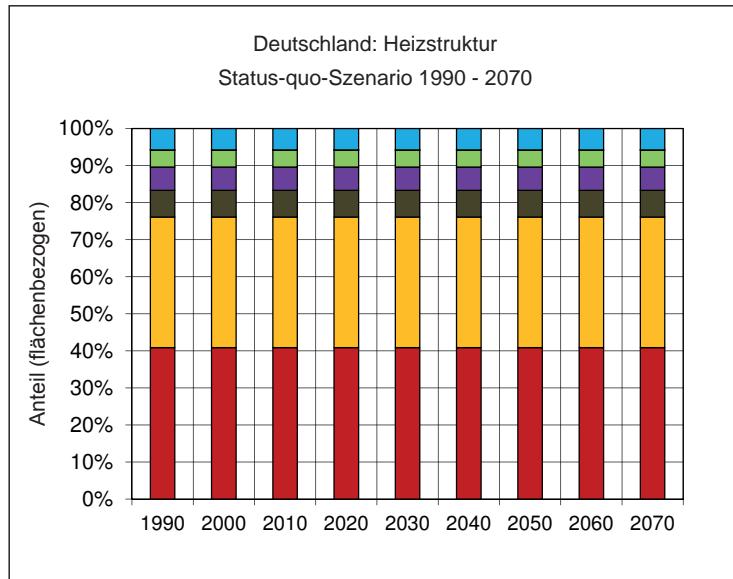
Modellierung der Lüftungs- und Solaranlagen

Die Anteile der Wohnungen, die über eine Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung verfügen, steigt in den beiden Klimaschutz-Szenarien deutlich an, während im Referenzszenario vor allem Fensterlüftung und Abluftanlagen die vorherrschenden Lüftungskonzepte bleiben. In den Klimaschutz-Szenarien werden nach 2020/2030 dann auch bei energetischen Modernisierungen immer mehr Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung eingebaut, während dies im Referenz-Szenario weitgehend unterbleibt.

Bei den thermischen Solaranlagen erfolgt in allen Szenarien ein stetiger Ausbau, der im Referenzszenario eher zurückhaltend erfolgt, im Klimaschutz-Szenario schon recht ausgeprägt und im Klimaschutz-Plus-Szenario dann noch umfassender ausfällt. Zu beachten ist hier, dass sich die Photovoltaik gegenüber der Solarthermie zunehmend als Konkurrenztechnologie etabliert hat. Dieser Zusammenhang wird an dieser Stelle nicht weiter vertieft. Die Photovoltaiknutzung auf Gebäuden ist hier als integraler Bestandteil der Stromerzeugung modelliert. Angesichts der Flächenkonkurrenz wäre hier allerdings eine weitgehende Untersuchung durchaus angebracht und soll zu einem späteren Zeitpunkt nachgeholt werden (**Anm.**).

Szenarioabhängige Modellierung der Heizstruktur

Die Anteile der Versorgungssysteme und der Energieträger der Wärmeversorgung werden in jedem Szenario individuell fest-



Strom-direkt
Strom - Wärmepumpen
Solar
Holz / Biomasse
Fern-/Nahwärme
Kohle
Erdgas
Heizöl

Abbildung 6.7
Darstellung der Heizstruktur des
Wohngebäudeparks Deutschlands
1990 - 2070, wie sie für die vier
Hauptszenarien modelliert wurde.
Die Anteile beziehen sich auf die
gesamte Endenergie, die in den
Heizsystemen eingesetzt wird.

Primärenergiefaktoren $f_{(PE,n.e.)}$		Wärmeerzeugung								
		1990	2000	2010	2020	2030	2040	2050	2060	2070
Referenz-Szenario										
Raumwärme		1,15	1,13	1,09	1,01	0,96	0,90	0,82	0,75	0,63
Warmwasser		1,49	1,39	1,32	1,09	1,02	0,93	0,85	0,79	0,73
Klimaschutz-Szenario										
Raumwärme		1,15	1,13	1,09	1,00	0,91	0,73	0,54	0,34	0,17
Warmwasser		1,49	1,39	1,32	1,08	0,89	0,75	0,61	0,45	0,41
Klimaschutz-Plus-Szenario										
Raumwärme		1,15	1,13	1,09	1,00	0,81	0,58	0,34	0,17	0,11
Warmwasser		1,49	1,39	1,32	1,08	0,85	0,66	0,46	0,39	0,43

Primärenergiefaktoren $f_{(PE,gesamt)}$		Wärmeerzeugung								
		1990	2000	2010	2020	2030	2040	2050	2060	2070
Referenz-Szenario										
Raumwärme		1,19	1,19	1,18	1,16	1,16	1,14	1,18	1,24	1,28
Warmwasser		1,54	1,45	1,41	1,26	1,23	1,17	1,19	1,24	1,28
Klimaschutz-Szenario										
Raumwärme		1,19	1,19	1,18	1,16	1,13	1,16	1,19	1,21	1,18
Warmwasser		1,54	1,45	1,41	1,26	1,20	1,15	1,18	1,19	1,18
Klimaschutz-Plus-Szenario										
Raumwärme		1,19	1,19	1,18	1,16	1,14	1,13	1,13	1,10	1,12
Warmwasser		1,54	1,45	1,41	1,26	1,21	1,13	1,12	1,08	1,10

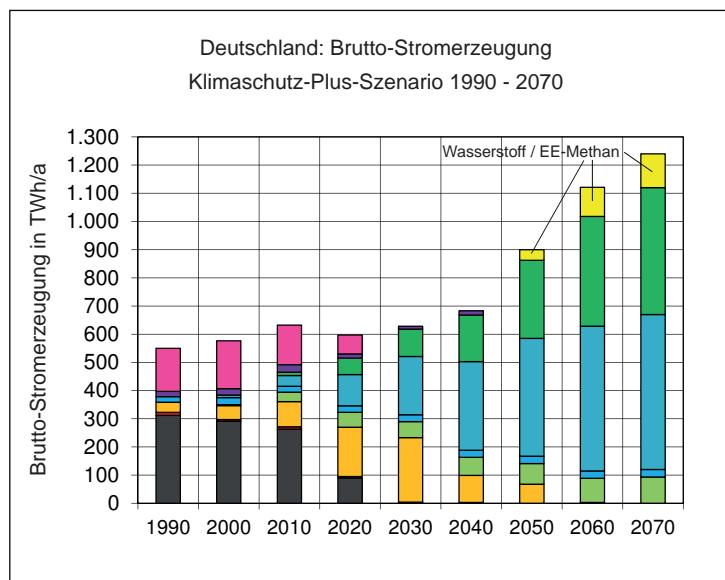
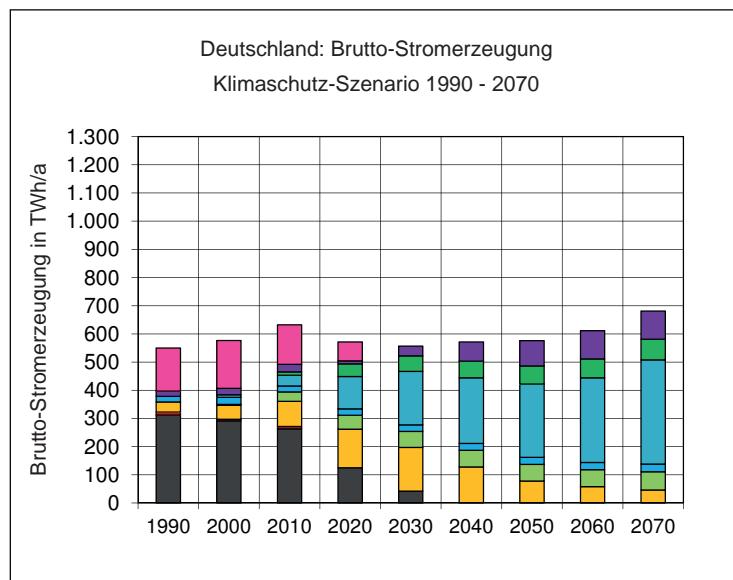
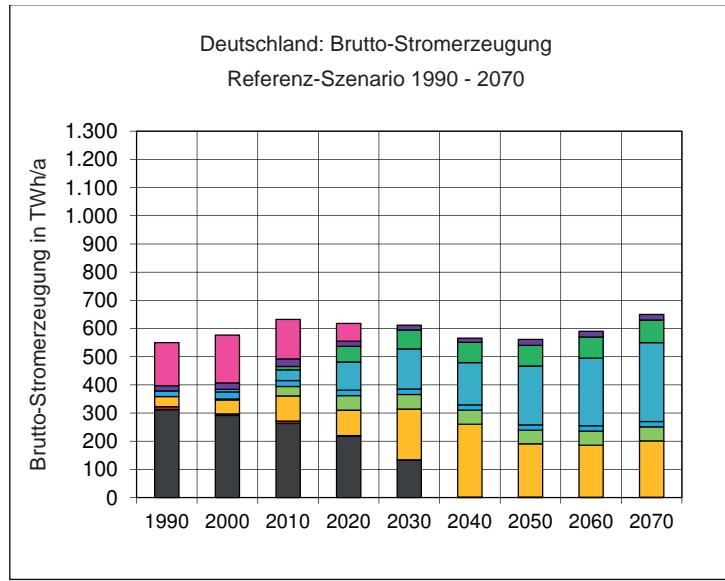
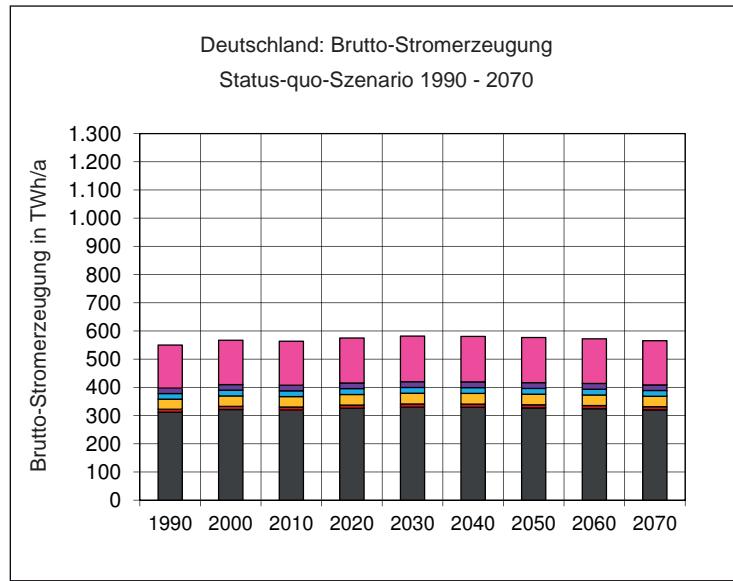
Tabelle 6.10
Entwicklung der Umrechnungsfaktoren von Endenergie in den nicht-erneuerbaren Anteil der Primärenergie (oben) und der gesamten Primärenergie (unten) in kWh/kWh. Es sind jeweils die Werte für das Referenz-, Klimaschutz und im Klimaschutz-Plus-Szenario in 10-Jahres-Schritten von 1990 - 2070 getrennt für die Heizung und die Warmwasserbereitung ausgewiesen.

gelegt. Sie unterliegen zudem Veränderungen über die Zeit. Für den Ausgangszustand der Heizstruktur wurden die vorhandenen Angaben jüngster statischer Auswerungen zu den Versorgungssystemen der Wohngebäude aus dem Jahre 2019 herangezogen (vgl. BDEW 2019 und BDEW 2019a). In den Abbildung 3.1, 3.2 und 6.7 wird deutlich sichtbar, welch ausgeprägte Dynamik bereits in der jüngsten Vergangenheit wirksam war. Auffällig ist hierbei vor allem der Rückgang der Ölheizungen im Bestand und Neubau und der gleichzeitige Anstieg der mit Wärmepumpen versorgten Neubauten. Die Sze-

narien unterscheiden sich vor allem darin, in welchem Tempo der Ausstieg aus den fossil gestützten Systemen erfolgt. Hier von hängt in starkem Maße der Erfolg der Klimaschutzstrategien ab. Am konsequentesten erfolgt dies im Klimaschutz-Plus-Szenario, in dem die Ölheizungen ab 2050 und Erdgasheizungen 2060 keine Rolle mehr spielen. Dies setzt allerdings eine Ausstiegsstrategie voraus, die einen Vorlauf von wenigstens 25 Jahren benötigt. Im Klimaschutz-Szenario erfolgt der Ausstieg aus den Ölheizungen im Jahr 2060 und von Erdgasheizungen im Jahr 2070. Am zurückhaltendsten verläuft diese Entwicklung im Referenz-Szenario, in dem der Ausstieg aus den Ölheizungen erst im Jahr 2070 gelingt. Dadurch werden im Referenz-Szenario im Jahr 2050 immer noch mehr als 60 % der Wohnflächen mit fossilen Energieträgern beheizt.

Aufgrund der begrenzten Verfügbarkeit kann nur ein begrenzter Anteil von Wohngebäuden mit Biomasse-Wärme versorgt werden. Aufgrund des vergleichsweise hohen Wärmebedarfs können im Referenzszenario mit diesen erneuerbaren Brennstoffen im Jahr 2050 nur 12 % der Wohngebäude beheizt werden, während dieser Anteil im Klimaschutz-Szenario bereits 25 % und im Klimaschutz-Plus-Szenario sogar 33 % betragen kann. Der Einsatz von Biomasse zu Heizzwecken ist aus Klimaschutzsicht ohnehin umstritten, weil hier Nutzungskonkurrenzen zur Nahrungsmittelherstellung und zur stofflichen Nutzung (z.B. für Holzkonstruktionen, Dämmstoffen, usw.) bestehen. Eine Ausnahme bilden hier Heizkraftwerke, die gleichzeitig Biokohle herstellen, die anschließend in landwirtschaftliche Böden als Klimasenke sowie zum Humusaufbau und Feuchtespeicher eingebracht wird (**Anm.**).

Die Anteile der über Nah- und Fernwärme versorgten Gebäude nimmt in allen Szenarien leicht zu. Aus wirtschaftlichen Gründen ist diese Versorgungsvariante vor allem in den Metropolen und Siedlungsgebieten mit hoher baulicher Dichte sinnvoll. Sofern künftig eine saisonale Speicherung von Strom über erneuerbar produzierten Wasserstoff oder Methan (sog. „Power-



█ Kernenergie
█ Sonstige
█ Fotovoltaik
█ Windkraft
█ Wasserkraft
█ Biomasse / Müll
█ Erdgas
█ Mineralöl
█ Kohle

Abbildung 6.8
Darstellung der Bruttostromerzeugung des deutschen Kraftwerksparks 1990 - 2070, wie sie für die vier Hauptszenarien modelliert wurde. Im Klimaschutz-Plus-Szenario sind ab 2040 relevante Anteile aus erneuerbaren Wasserstoff bzw. Methan als saisonaler Speicher an der Stromerzeugung beteiligt. Angabe der Werte in TWh/a.

Global-Warming-Potential-Faktoren $f_{(GWP)}$										Wärmeerzeugung
	1990	2000	2010	2020	2030	2040	2050	2060	2070	
Referenz-Szenario										
Raumwärme	0,304	0,286	0,264	0,247	0,232	0,213	0,196	0,181	0,157	
Warmwasser	0,380	0,228	0,314	0,262	0,236	0,199	0,181	0,167	0,150	
Klimaschutz-Szenario										
Raumwärme	0,304	0,286	0,264	0,247	0,228	0,188	0,149	0,101	0,064	
Warmwasser	0,380	0,228	0,314	0,262	0,209	0,171	0,131	0,082	0,063	
Klimaschutz-Plus-Szenario										
Raumwärme	0,304	0,286	0,264	0,247	0,208	0,167	0,118	0,074	0,050	
Warmwasser	0,380	0,228	0,314	0,262	0,201	0,160	0,107	0,069	0,051	

Tabelle 6.11
Entwicklung der Umrechnungsfaktoren von Endenergie in das Global-Warming-Potential in kg/kWh für die Wärmeerzeugung getrennt nach Raumwärme und Warmwasserbereitung im Referenz-, Klimaschutz- und im Klimaschutz-Plus-Szenario für den Zeitraum 1990 - 2070. Die Werte sind getrennt für die Heizung und die Warmwasserbereitung ausgewiesen

erfolgt, wäre seine Rückverstromung in GuD-Gas-Heizkraftwerken in Verbindung mit einer Nah- bzw. FernwärmeverSORGUNG der effizienteste Ansatz. Diese Technologie kommt im Klimaschutz-Plus-Szenario ab 2040 in größerem Umfang zum Einsatz.

Szenarioabhängige Modellierung der Stromerzeugung

Die Modellierung der Stromerzeugung musste gegenüber der Dissertation aus folgenden Gründen komplett überarbeitet werden:

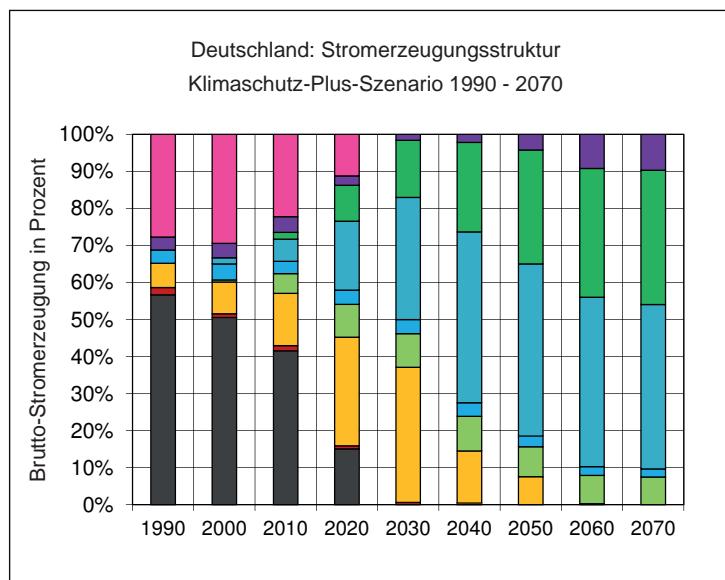
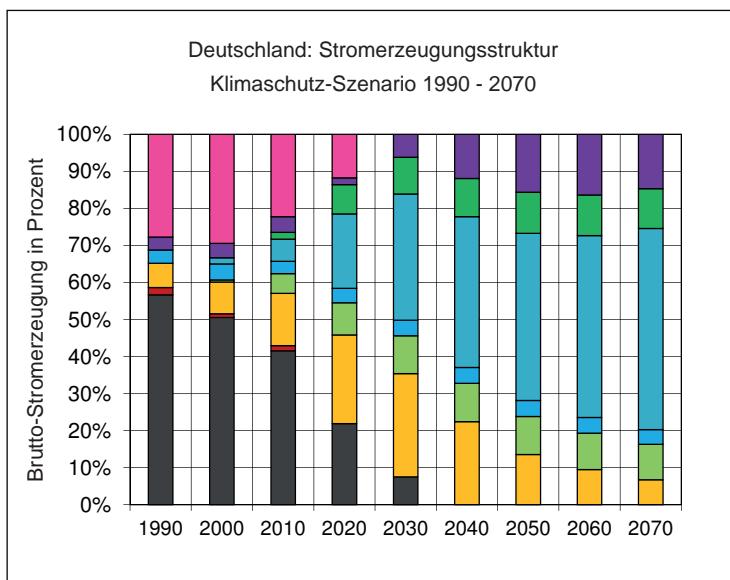
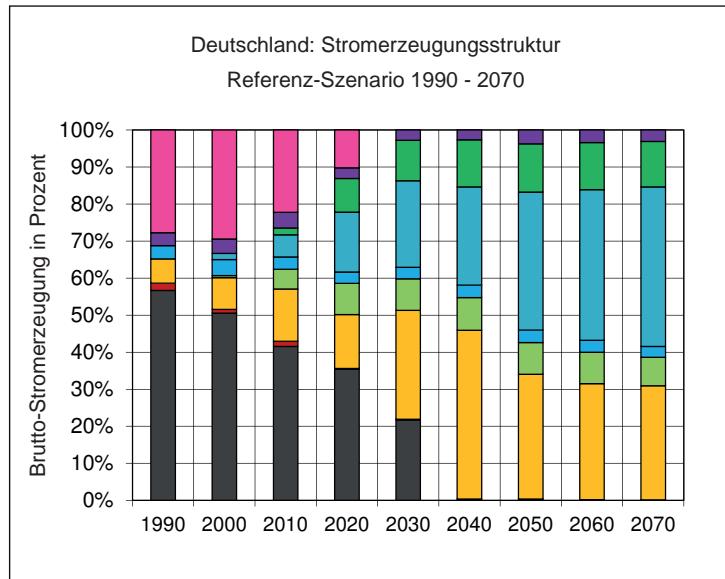
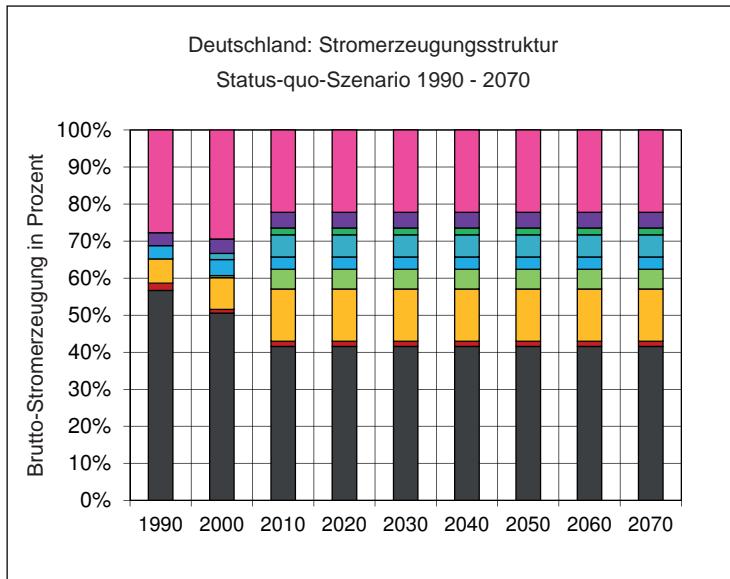
- 1 Die Veränderungen der Stromerzeugungsstruktur innerhalb der letzten 15 Jahre (vgl. AG Energiebilanzen 2019), wie sie in Abbildung 2.3 vereinfacht dargestellt sind, bilden in allen Szenarien die Grundlage der künftigen Stromerzeugung.
- 2 Immer klarer wird deutlich, dass aus Klimaschutzgründen ein kompletter Ausstieg aus der fossil gestützten Energieversorgung erfolgen muss. Das führt zu einem grundlegenden Wandel weg von allen brennstoffgestützten Systemen der Wärme- und Stromerzeugung hin zu erneuerbaren Systemen der Energieerzeugung (z.B. aus Sonnenenergie, Wind- und Wasserkraft). Dadurch kommen künftig

neue Stromanwendungen hinzu, speziell im Bereich Wärmeerzeugung (z.B. Wärmepumpen), Verkehr (z.B. Elektromobilität und aus Überschussstrom erzeugte synthetische Brenn- und Kraftstoffe für Schwerlasttransporte und Flugverkehr) sowie die Industrie (z.B. Stahlproduktion).

- 3 Hinzu kommt der künftige Energiebedarf für saisonal gespeicherte Energie zur Überbrückung der sog. „Winterlücke“, d.h. des Fehlbedarfs zwischen der erneuerbaren Erzeugung und dem Bedarf im Kernwinter. Perspektivisch wird dadurch die notwendige Stromerzeugung gegenüber dem heutigen Niveau spürbar ansteigen und nicht sinken. Besonders deutlich wird dies im Stromszenario für das Klimaschutz-Plus-Szenario, das eine komplett erneuerbare Stromerzeugung bis 2060 zum Ziel hat.
- 4 Der kürzlich erfolgte Beschluss zum Ausstieg aus der Kohleverstromung bis spätestens 2038 - 2030 war in der aktuellen Modellbildung zu berücksichtigen.

Auf der Grundlage dieser neuen Ausgangssituation wurden für das Kohortenmodell folgende Szenarien von anderen Autoren zur Modellierung der Stromerzeugung herangezogen:

- Im Referenz-Szenario wird die Stromerzeugung gemäß der Referenzprognose und dem Trendszenario der Studie „Entwicklung der Energiemärkte - Energiereferenzprognose“ (ewi/gws/prognos 2014) modelliert. Hier wird die bisherige Entwicklung des Kraftwerksparks und die bekannten politischen Beschlüsse zur Energiewende und zum Atomenergieausstieg abgebildet und gemäß den daraus ableitbaren Trend fortgeführt.
- Im Klimaschutz-Szenario wird das „Szenario 2011 A“ der Untersuchung „Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global“ (Nitsch et al. 2012) herangezogen. Dieses verfolgt das Ziel, die Treibhausgasemissionen Deutschlands gegenüber dem Stand 1990 bis 2050 um ca. 80 % zu reduzie-



█ Kernenergie
█ Sonstige
█ Fotovoltaik
█ Windkraft
█ Wasserkraft
█ Biomasse / Müll
█ Erdgas
█ Mineralöl
█ Kohle

Abbildung 6.9
Struktur der Stromerzeugung
Deutschlands im Zeitraum 1990 -
2070, wie sie in den vier Hauptszenarien
zugrundegelegt wurde. Die
Anteile verstehen sich als Strombezug
der Haushalte frei Steckdose.
Die Entwicklung bis 2010 wurde
gemäß den Angaben der Arbeitsge-
meinschaft Energiebilanzen (AGEB
2017) zusammengestellt. Die
weitere Entwicklung bis 2050/60
folgt verschiedenen Szenarien, die
im Text näher erläutert sind. Die
Fortführung bis 2070 wurde vom
Autor modelliert.

Global-Warming-Potential-Faktoren $f_{(GWP)}$										Stromerzeugung
	1990	2000	2010	2020	2030	2040	2050	2060	2070	
Kernenergie	0,005	0,005	0,005	0,005	-	-	-	-	-	
Photovoltaik	0,200	0,150	0,135	0,120	0,105	0,095	0,075	0,065	0,050	
Windkraft	0,009	0,009	0,009	0,009	0,009	0,009	0,009	0,009	0,009	
Wasserkraft	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	
Biomasse/Müll	0,055	0,055	0,055	0,055	0,055	0,055	0,055	0,055	0,055	
Erdgas	0,234	0,234	0,234	0,234	0,234	0,234	0,234	0,234	0,234	
Mineralöl	0,294	0,294	0,294	0,294	0,294	0,294	0,294	0,294	0,294	
Kohle	0,420	0,420	0,420	0,420	0,420	-	-	-	-	
Referenz-Szenario										
Strom frei Haus	0,813	0,672	0,628	0,585	0,449	0,246	0,194	0,182	0,179	
Klimaschutz-Szenario										
Strom frei Haus	0,813	0,672	0,628	0,585	0,256	0,142	0,104	0,086	0,074	
Klimaschutz-Plus-Szenario										
Strom frei Haus	0,813	0,672	0,628	0,585	0,221	0,130	0,091	0,062	0,062	

Tabelle 6.12
Entwicklung der Umrechnungsfaktoren von Endenergie in das Global-Warming-Potential in kg/kWh für die Stromerzeugung getrennt nach Energieträgern und für den Strombezug frei Haus im Referenz-, Klimaschutz und im Klimaschutz-Plus-Szenario für den Zeitraum 1990 - 2070.

ren. Die gesamte Bruttostromerzeugung bleibt bis 2050 in etwa auf dem Niveau von 2015 (585 TWh/a) erhalten, ob wohl hier in relevantem Ausmaß neue Stromnutzungen hinzukommen (z.B. Wärmepumpen, Mobilität). Deren Bedarf wird durch Effizienzsteigerungen an anderen Stellen kompensiert.

- Im Klimaschutz-Plus-Szenario wird das „Szenario 2013“, das eine Weiterentwicklung des zuvor genannten Leitszenarios 2011 darstellt, zugrundegelegt (vgl. Nitsch 2013). In diesem Szenario wird bis 2060 eine nahezu vollständig erneuerbare Energieversorgung modelliert, wodurch die Treibhausgasemissionen bis 2050 um 86 % und bis 2060 um 94 % gegenüber dem Stand von 1990 reduziert werden können. In diesem Stromszenario werden ab 2050 relevante Anteile der Stromerzeugung für die Produktion von erneuerbaren Wasserstoff und Methan verwendet. Dies ist notwendig, um eine vollständig erneuerbare Stromversorgung sicherzustellen (siehe zuvor diskutiertes Problem der

Winterlücke). Insgesamt steigt die Stromproduktion im Vergleich zu 2010 bis 2050 um einen Faktor 1,5 und bis 2070 um einen Faktor 2,0 an. Obwohl in diesem Szenario eine konsequente Effizienzstrategie integriert ist, erfordert das Ziel einer nahezu vollständigen Dekarbonisierung des Energiesystems mit Ausnahme der Biomassenutzungen den Ausstieg aus fast allen heutigen brennstoffgestützten Systemen - eben auch bei der Wärmeerzeugung, Mobilität und Industrieprozessen. Dies erfordert in der Konsequenz einen deutlichen Ausbau der Stromerzeugung gegenüber dem heutigen Niveau.

In den drei ausgewählten Stromszenarien ist der politische Beschluss zum Ausstieg aus der Kohleverstromung nicht berücksichtigt, weil dieser zum Zeitpunkt der Szenarienmodellierung nicht bekannt war. Daher wurden die drei ausgewählten Stromszenarien für die Szenarien der Aktualisierung insoweit angepasst, dass zu fest vorgegebenen Zeitpunkten alle Kohlekraftwerke abgeschaltet werden und die sich daraus ergebenen Fehlbeträge durch Gaskraftwerke (vor allem im Referenz-Szenario) bzw. zusätzliche erneuerbare Stromerzeugung (vor allem in den Klimaschutz-Szenarien) ersetzt werden.

Die Zeitpunkte für den Ausstieg aus der Kohleverstromung variieren in den Szenarien:

- Im Referenz-Szenario erfolgt dies im Jahr 2038, wie es im Kohleausstiegsgesetz beschlossen wurde.
- Für das Klimaschutz-Szenario erfolgt dies im Jahr 2035.
- Im Klimaschutz-Plus-Szenario wurde hierfür das Jahr 2030 bestimmt, weil ein früherer Zeitpunkt für die Einhaltung des 2-Grad-Ziels und noch mehr bei der Einhaltung des 1,7 Grad-Limits ein möglichst früher Zeitpunkt elementare Bedeutung hat.

In Abbildung 6.9 ist die Bruttostromerzeugung für alle vier Hauptszenarien gegenübergestellt. In allen Szenarien ist der Atomenergieausstieg, wie politisch beschlossen, bis 2022 voll-

zogen. In allen Szenarien (mit Ausnahme des Status-quo-Szenarios, dass nur eine modellstrategische Funktion hat und daher die Mengenentwicklung unzutreffend darstellt) steigt danach der Anteil der erneuerbaren Stromerzeugung an.

Im Hinblick auf die resultierenden spezifischen Treibhausgasemissionen (Tab. 6.12) unterscheiden sich Klimaschutz- und Klimaschutz-Plus-Szenario nur wenig. Aus dieser Perspektive wären sie austauschbar. Jedoch im Hinblick auf die Mengenentwicklung ist dies nicht der Fall, denn im Jahr 2050 liegt die benötigte Strommenge in letzterem um 24 % höher, im Jahr 2070 beträgt der Mehrbedarf dann bereits 87%. Die Gründe hierfür liegen einerseits in der künftig zu erwartenden Ausweitung der Stromanwendungen auf neue Anwendungsfelder wie Wärmeerzeugung, Mobilität und Industrieprozesse und andererseits im Bedarf an saisonaler Speicherenergie, speziell zur Überbrückung der Winterlücke. Für letzteres werden im Klimaschutz-Plus-Szenario ab 2040 in zunehmenden Maße erneuerbar hergestellter Wasserstoff oder Methan benötigt.

Hier wird bereits deutlich, dass es völlig unrealistisch wäre, eine „Weiter-so-Strategie“, wie sie im Referenzszenario dargestellt wird, mit einer Stromerzeugung zu verknüpfen, die das Ziel einer vollständig erneuerbaren Stromerzeugung bis 2060 zum Ziel hat. Wie in Tabelle 6.15 aufgezeigt, liegt im Referenzszenario der Strombedarf der privaten Haushalte im Jahr 2050 mit 214% bei mehr als dem Doppelten im Klimaschutz-Plus-Szenario und im Jahr 2070 mit 380% um fast den Faktor vier höher. Dies hätte einen langfristigen Ausbau der Stromerzeugung zur Konsequenz, der um einen Faktor 4 - 6 über dem heutigen Niveau liegen würde. Ein derart starker Ausbau ist aus ökonomischen, ökologischen und Akzeptanzgründen weder wünschenswert noch in den nächsten Jahrzehnten machbar.

Anhand der Diskussion wird erkennbar, dass der Stromsektor einen Schlüssel für die Klimaschutzstrategie insgesamt darstellt. Das bestätigt eine Grundannahme der Untersuchung -

	Stromerzeugung								
	Primärenergiefaktoren $f_{(PE, \text{gesamt})}$								
	1990	2000	2010	2020	2030	2040	2050	2060	2070
Kernenergie	1,02	1,02	1,02	1,02	-	-	-	-	-
Photovoltaik	1,84	1,80	1,74	1,63	1,52	1,41	1,33	1,26	1,20
Windkraft	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04
Wasserkraft	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04
Biomasse/Müll	1,13	1,13	1,13	1,13	1,13	1,13	1,13	1,13	1,13
Erdgas	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06
Mineralöl	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08
Kohle	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06
Referenz-Szenario									
Strom frei Haus	3,361	3,058	2,849	2,327	2,018	1,600	1,437	1,466	1,565
Klimaschutz-Szenario									
Strom frei Haus	3,361	3,058	2,849	2,327	1,721	1,673	1,766	1,776	1,771
Klimaschutz-Plus-Szenario									
Strom frei Haus	3,361	3,058	2,849	2,327	1,571	1,402	1,463	1,508	1,598

Tabelle 6.13
Entwicklung der Umrechnungsfaktoren von Endenergie in die dafür aufzubringende gesamte Primärenergie in kWh/kWh für die Stromerzeugung getrennt nach Energieträgern und für den Strombezug frei Haus im Referenz-, Klimaschutz und im Klimaschutz-Plus-Szenario für den Zeitraum 1990 - 2070.

nämlich dass erstens (anders als dies in den üblichen Energiebilanzen von Gebäuden der Fall ist) sämtliche Stromanwendungen in den Wohngebäuden zu bilanzieren sind und zweitens auch die künftige Stromerzeugung in den Szenarien mitzumodellieren ist. Nur so kann die künftige Entwicklung der Stromerzeugung, die sich einerseits aus dem Wandel der Struktur der Stromerzeugung ergibt und andererseits mit der künftigen notwendigen Größe des Stromsystems zusammenhängt, angemessen abgebildet werden.

Wieder wird deutlich, dass das Zusammenspiel von Energieeffizienz und zügigem Ausbau der erneuerbaren Energien elementarer Bestandteil aller Klimaschutzstrategien ist. Das gilt sowohl für die Wärme- als auch für die Stromerzeugung. Angeichts des knapp bemessenen CO_2 -Budgets und der dadurch verbunden geringen Zeitspanne, bis zu der die Treibhausgasemissionen nahe Null geführt werden müssen, sind keine Spielräume mehr für ein weitere Hinauszögern vorhanden.

Primärenergiefaktoren $f_{(PE,n.e.)}$		Stromerzeugung								
		1990	2000	2010	2020	2030	2040	2050	2060	2070
Kernenergie		1,02	1,02	1,02	1,02	-	-	-	-	-
Photovoltaik		0,73	0,70	0,65	0,55	0,45	0,35	0,28	0,22	0,20
Windkraft		0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
Wasserkraft		0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
Biomasse/Müll		0,10	0,10	0,10	0,09	0,09	0,08	0,07	0,06	0,06
Erdgas		1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06
Mineralöl		1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08
Kohle		1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06
Referenz-Szenario										
Strom frei Haus		3,193	2,871	2,604	2,050	1,641	1,163	0,929	0,865	0,845
Klimaschutz-Szenario										
Strom frei Haus		3,193	2,871	2,604	1,934	1,117	0,815	0,693	0,619	0,530
Klimaschutz-Plus-Szenario										
Strom frei Haus		3,193	2,871	2,604	1,934	0,967	0,544	0,410	0,351	0,357

Tabelle 6.14
Entwicklung der Umrechnungsfaktoren von Endenergie in die dafür aufzubringende nicht-erneuerbare Primärenergie in kWh/kWh für die Stromerzeugung getrennt nach Energieträgern und für den Strombezug frei Haus im Referenz-, Klimaschutz und im Klimaschutz-Plus-Szenario für den Zeitraum 1990 - 2070.

Tabelle 6.15:
Endenergiebedarf für alle Stromanwendungen der privaten Haushalte in Deutschland im Referenz-, Klimaschutz- und Klimaschutz-Plus-Szenario 2010 - 2070. Zum Vergleich sind die relativen Werte im Referenz- und Klimaschutz-Szenario im Vergleich zu den Werten im Klimaschutz-Plus-Szenario (= 100%) angegeben.

Bewertung von Holzheizungen

Ein kritischer Aspekt, der erst in den letzten Jahren mehr Aufmerksamkeit erhält, sind die Treibhausgasemissionen bei der Verbrennung von Holz und sonstiger Biomasse. Wird hier, wie dies auch in den Szenarien dieser Studie kalkuliert wurde, von einer klimaneutralen Bereitstellung von Holz und sonstiger Biomasse ausgegangen, ergeben sich sehr geringe spezifische Treibhausgasemissionen je Energieeinheit. In der wissenschaftlichen Diskussion wird diese Prämisse immer stärker

	2010	2030	2050	2070
Referenz	102,9 (100 %)	110,2 (119 %)	111,0 (214 %)	111,4 (380 %)
Klimaschutz	102,9 (100 %)	94,8 (102 %)	64,4 (124 %)	54,7 (187 %)
Klimaschutz-Plus	102,9 (100 %)	92,8 (100 %)	51,9 (100 %)	29,3 (100 %)

in Frage gestellt. Dabei werden folgende Gründe angeführt, die vor allem die zeitliche Dynamik der Holzproduktion und der Verbrennungsprozesse in Bezug zueinander setzen (2):

- Im Wachstumsprozess wird CO₂ in der Holzmasse eingelagert. Dieser Prozess liegt jedoch in der Vergangenheit und ist für den künftigen Klimaschutz nicht mehr wirksam.
- Die Entnahme von Holz aus dem Wald stellt eine Quelle dar, weil gefällte Bäume danach kein CO₂ aus der Atmosphäre mehr aufnehmen.
- Die Verbrennung von Holz ist mit besonders hohen Emissionen verbunden. Zudem sind die Energieumwandlungsprozesse bei der Wärme- und Stromerzeugung mit hohen Verlusten behaftet. Die direkten Emissionen liegen daher höher als bei üblichen fossilen Systemen (z.B. Gas-Brennwertheizungen bzw. Gas-GUD-Kraftwerke).
- Bei allen Verbrennungsprozessen wird das über das zuvor über lange Zeiträume gebundene CO₂ schlagartig freigesetzt und verbleibt lange in der Atmosphäre. Selbst bei einer nachhaltigen Holzwirtschaft werden abhängig von der Rotationsperiode der Bäume große Zeiträume benötigt, bis durch das nachwachsende Holz dieses CO₂ wieder aus der Atmosphäre entfernt werden kann.

In vielen wissenschaftlichen Studien wird inzwischen die Annahme einer klimaneutralen Verbrennung von Holz in Zweifel gezogen. Um die genannten Effekte abzubilden, ist eine dynamische Bilanzierung der Holznutzung notwendig. Ein einfacher Ansatz wurde mit dem halbstatistischen GWP(bio)-Index entwickelt (vgl. Guest et al 2012). Eine weitere Bilanzierungsviante behandelt die direkten Emissionen der Verbrennung analog wie fossile Emissionen (siehe Tab. 6.16 und Abb. 6.10). Sie fallen ohnehin in eine Zeitperiode, in der sämtliche Treibhausgasemissionen möglichst schnell auf Null zu führen sind, um überhaupt noch einen Paris-kompatiblen Klimaschutz erreichen zu können. Im Rahmen der kritischen Prüfung der Randbedingungen werden in Abschnitt 12.3 diese zwei alternativen Ansätze mit der Annahme der klimaneutralen Bereitstellung verglichen.

Auswertung und Darstellung der Ergebnisse

In den folgenden Kapiteln 7 - 12 erfolgt nun die Auswertung der Ergebnisse der szenarioabhängigen Berechnungen im Kohortenmodell in folgender Reihenfolge:

- Im ersten Schritt werden Heizwärme- und der sonstige Nutzenergiebedarf im Zeitraum 1990 - 2070 ausgewertet (Kapitel 7).
- Danach wird der Endenergiebedarf 1990 - 2070 analysiert (Kapitel 8).
- Es folgt die Auswertung im Hinblick auf den Primärnergiebedarf 1990 - 2070 (Kapitel 9).
- Zentral für den Klimaschutz ist die Analyse der Entwicklung der Treibhausgasemissionen 1990 - 2070 (Kapitel 10).
- Bis zu dieser Stelle werden nur die Standardszenarien (Referenz, Klimaschutz und Klimaschutz-Plus) ausgewertet. Um die Bandbreite der möglichen Zukunftsentwicklungen zu erweitern, werden neue Szenarienfamilien gebildet und durchgerechnet. Die Analyse erfolgt dabei unter besonderer Berücksichtigung des CO₂-Globalbudgets für Gebäude. Zudem wurde als zusätzliche Strategie die Bildung effektiver CO₂-Senken mit einbezogen (Kapitel 11).
- Schließlich werden in Kapitel 12 alle Randbedingungen und Annahmen einer kritischen Prüfung unterzogen.

Mit der gewählten Reihenfolge sollen Nachvollziehbarkeit und Transparenz geschaffen werden. Die Ergebnisse bauen aufeinander auf, indem ausgehend von den Anwendungsfeldern (Raumwärme, Warmwasser, Hilfsstrom, alle sonstigen Stromanwendungen in Wohngebäuden) im nächsten Schritt die Energieerzeugung und danach die vor- und nachgelagerten Energieprozesse miteinbezogen werden. Nur in diesem Kontext können letztlich die Treibhausgasemissionen (Global Warming Potential) ermittelt und die Ursachen zugeordnet werden. Die finale Auswertung anhand der kumulierten Pro-Kopf-Emissionen erlaubt am Ende den Vergleich unterschiedlicher Klimaschutzstrategien und -pfade anhand einer einfachen und zugleich aussagefähigen Größe.

Spezifische nutzenergiebezogene Treibhausgasemissionen in kg/kWh						
Klimaneutral (Standard)	2020	2030	2040	2050	2060	2070
Referenz	0,082	0,079	0,075	0,072	0,071	0,071
Klimaschutz	0,082	0,076	0,073	0,071	0,070	0,068
Klimaschutz-Plus	0,082	0,075	0,072	0,069	0,067	0,065
GWP(bio)-Index	2020	2030	2040	2050	2060	2070
Referenz	0,216	0,207	0,199	0,191	0,188	0,186
Klimaschutz	0,216	0,201	0,193	0,186	0,184	0,181
Klimaschutz-Plus	0,216	0,199	0,191	0,181	0,177	0,173
Direkte THG-Emissionen	2020	2030	2040	2050	2060	2070
Referenz	0,642	0,614	0,689	0,566	0,558	0,551
Klimaschutz	0,642	0,597	0,573	0,551	0,544	0,538
Klimaschutz-Plus	0,642	0,589	0,566	0,538	0,524	0,512

Tabelle 6.16

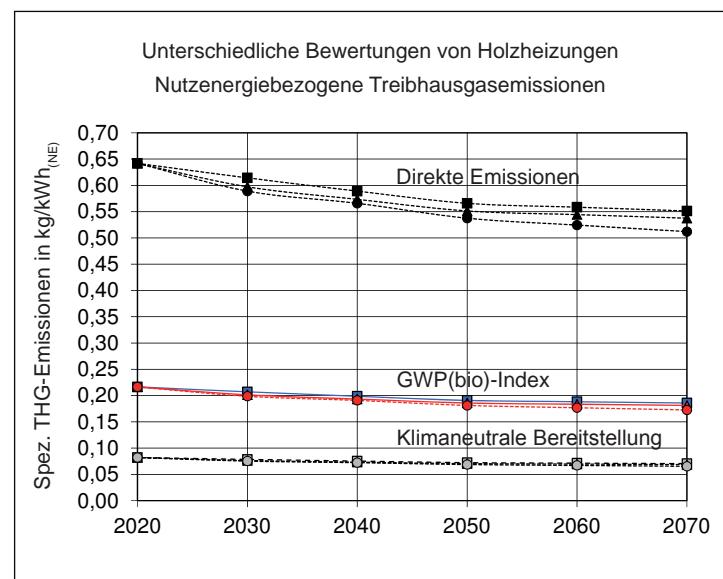
Unterschiedliche Bewertung der spezifischen Treibhausgasemissionen je kWh Nutzenergie-Raumwärme von Holzheizungen in kg/kWh.

In den Szenarien wurde mit den niedrigen Emissionskennwerten unter der Annahme einer klimaneutralen Bereitstellung gerechnet.

Beim GWP(bio)-Index werden die biogenen Emissionen unter Berücksichtigung der Rotationsperiode der Bäume kalkuliert.

Unten werden die direkten Emissionen der Verbrennung von Holz ausgewiesen. Diese gelten für den Fall, dass das Holz nicht aus nachhaltiger Bewirtschaftung stammt.

Quelle: (Vallentin 2023, S. 26 ff.)



Direktemissionen:

- ■ --- Referenz
- ▲ --- Klimaschutz
- ● --- Klimaschutz-Plus

GWP(bio)-Index:

- ■ --- Referenz
- ▲ --- Klimaschutz
- ○ --- Klimaschutz-Plus

Klimaneutrale Bereitstellung:

- □ --- Referenz
- ▲ --- Klimaschutz
- ○ --- Klimaschutz-Plus

Abbildung 6.10

Unterschiedliche Bewertung der spezifischen Treibhausgasemissionen je kWh Nutzenergie-Raumwärme von Holzheizungen (siehe auch Tab. 6.16).

7 Entwicklung des Heizwärme- und sonstigen Nutzenergiebedarfs 1990 - 2070

Auf der Basis des zuvor dokumentierten Kohortenmodells und den zugehörigen Rechenansätzen können nun die Ergebnisse zum Wärmebedarf des Wohngebäudeparks in Deutschland ausgewertet werden. Zunächst wird hier nur der Nutzwärmebedarf für Raumheizung, Warmwasserbereitung und alle Stromanwendungen betrachtet.

7.1 Entwicklung Heizwärmebedarf

Für den spezifischen Heizwärmebedarf werden die Nutzflächen in Form der Energiebezugsfläche A_{EB} (hier definiert als die beheizte Wohnfläche) als Bezugsgröße verwendet. Der mittlere Heizwärme-Kennwert ist eine Schlüsselgröße für die erreichte Energieeffizienz des gesamten Wohngebäudeparks, der mit einer Größe die energetische Qualität von Gebäudehülle und Lüftungskonzept beschreibt. Der Jahresheizwärmebedarf wird für jeden der 51 Gebäudetypen in 5-Jahres-Schritten in Form einer vollständigen Heizwärmobilanz bestimmt. Bei jedem Zeitschritt geprüft, ob und welche Erneuerungs- bzw. Sanierungsmaßnahmen anstehen und in welcher energetischen Qualität diese, gemäß den Vorgaben des jeweiligen Szenarios, auszuführen sind. Die Angaben zum Ausgangszustand im Jahr 2010 sind in Tabelle 5.1 beschreiben. Die Randbedingungen zur Bestimmung der Heizwärmobilanz, zu den Nutzungsduern sowie zu den zeitabhängigen energetischen Qualitäten wurden im Abschnitt 6 erläutert und zusammengestellt.

Im Hinblick auf den spezifischen Jahresheizwärmebedarf findet in allen Szenarien ein stetiges Absinken der Werte statt, wenn auch mit stark unterschiedlicher Ausprägung (siehe Abb. 8.1). Verantwortlich sind dafür einerseits die Effizienzverbesserungen bei allen Gebäudekomponenten sowie den Lüftungskonzepten, die gleichermaßen Neubauten und die energeti-

sche Modernisierung im Bestand betreffen, andererseits haben auch die umfassenden Neubauaktivitäten einen Einfluss auf den spezifischen Jahresheizwärmebedarf, weil die Kennwerte im Neubau deutlich unter denen im Bestand liegen. Der Neubau hat nicht alleine die Aufgabe, den steigenden Bedarf nach Wohnflächen zu decken, sondern dient auch als Ersatz für die Wohnungen und Wohnhäuser, die allmählich aus dem Bestand verschwinden, weil sie abgerissen oder anderweitig genutzt werden. Dies ist sehr gut im Status-quo-Szenario nachzuvollziehen, in dem das Absinken der Heizwärme-Kennwerte ausschließlich auf diesen Effekt zurückzuführen ist.

Die Entwicklung startet 1990 mit einem Ausgangswert von 154 kWh/m²a und geht 2010 auf 127,5 kWh/m²a zurück. Im Referenz-Szenario verbleibt der spezifische Heizwärme-Kennwert bis 2050 mit etwa 87 kWh/m²a auf einem hohen Niveau. Im Klimaschutz-Szenario sinkt er auf etwa 42 kWh/m²a und liegt im Klimaschutz-Plus-Szenario mit nur 31 kWh/m²a nochmals deutlich tiefer. Die genannten Zahlen verstehen sich jeweils als Mittelwerte des gesamten Wohngebäudeparks. Gut sichtbar ist, dass der konsequente Einsatz einer Passivhaushülle in Kombination mit der Wärmerückgewinnung bei der Lüftung zu einer deutlichen Reduktion des Raumwärmebedarfs führen.

Betrachtet man den gesamten Jahresheizwärmebedarf in TWh/a, so zeigt sich ein anderes Bild der Verläufe (siehe Abb. 8.2). Hier überlagern sich zwei Effekte, nämlich der deutliche Zuwachs an Wohnflächen über den gesamten Betrachtungszeitraum und die gleichzeitig sinkenden spezifischen Kennwerte je Nutzfläche. Im Status-quo-Szenario steigen daher die Bedarfswerte von 427 TWh/a im Jahr 1990 bis 2040 auf etwa 595 TWh/a an und verbleiben auch danach auf hohem Niveau. Im Referenz-Szenario wird ebenfalls keine durchgrei-

fende Minderung erzielt. Im Jahr 2050 liegt der Bedarf immer noch bei 370 TWh/a. Erst unter den Randbedingungen der Klimaschutz-Szenarien ergeben sich mittel- und langfristig spürbare Reduktionen. Der Heizwärmeverbrauch im Jahr 2030 beträgt im Klimaschutz-Szenario 360 TWh/a und kann bis 2050 auf ca. 180 TWh/a reduziert werden, was etwa 38 % des Bedarfs von 2010 entspricht. Im Klimaschutz-Plus-Szenario wird mit etwa 130 GWh/a im Jahr 2050 nochmals deutlich weniger Heizwärme benötigt. Der Bedarf von 2050 entspricht dort nur noch etwa 28 % des Ausgangswertes von 2010. Die hier aufgezeigten Entwicklungen setzen sich auch nach dem Jahr 2050 weiter fort.

Bei genauerer Betrachtung ist der Wohngebäudepark kein einheitliches Gebilde, sondern hinsichtlich Baualter, Gebäudeformen und -typen, Bauweisen und Eigentümerstruktur hoch ausdifferenziert. Um hier eine erste wesentliche Unterscheidung zu treffen, wird in einem ersten Schritt die Einteilung in drei strategische Typen vorgenommen. Hierbei wird der Neubau seit 1990 getrennt vom Bestand vor 1990 betrachtet. Im Gebäudebestand wird darüber hinaus zwischen voll und bedingt sanierbarem Bestand unterschieden. Letzterer weist aus baukultureller Sicht systematisch Einschränkungen auf, die einer umfassenden energetischen Modernisierung im Wege stehen und in der Modellierung berücksichtigt werden müssen.

Eine differenzierte Analyse nach strategischen Typen (siehe Abb. 8.3.a-d) zeigt, dass die größten Reduktionspotentiale im voll sanierbaren Bestand (blau markierte Balkenanteile) liegen. Die Bedarfswerte dieser Gruppe betragen im Jahr 1990 367 TWh/a (100%) und im Jahr 2010 ca. 338 TWh/a (91,2 %). Hier wird sichtbar, wie gering die Effizienzfortschritte im Schlüsselbereich der energetischen Modernisierung in der jüngeren Vergangenheit waren. Der Heizwärmeverbrauch sinkt bis zum Jahr 2050 im Referenzszenario auf ca. 193 TWh/a (52,6%), im Klimaschutz-Szenario auf ca. 108 TWh/a (29,5 %) und im Klimaschutz-Plus-Szenario auf nur noch 81,5 TWh/a (22,2 %).

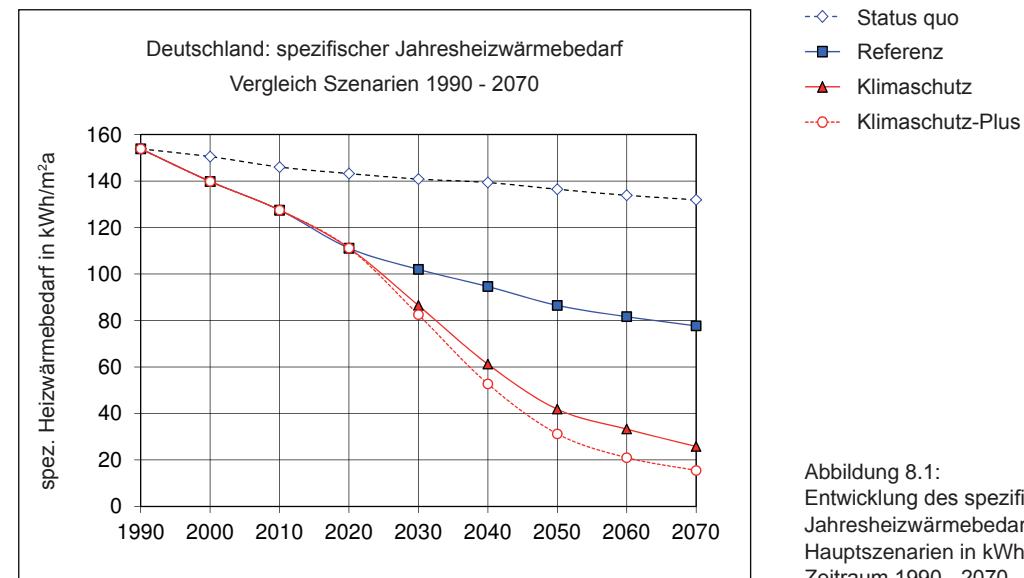


Abbildung 8.1:
Entwicklung des spezifischen
Jahresheizwärmeverbrauchs der vier
Hauptszenarien in kWh/m²a im
Zeitraum 1990 - 2070.

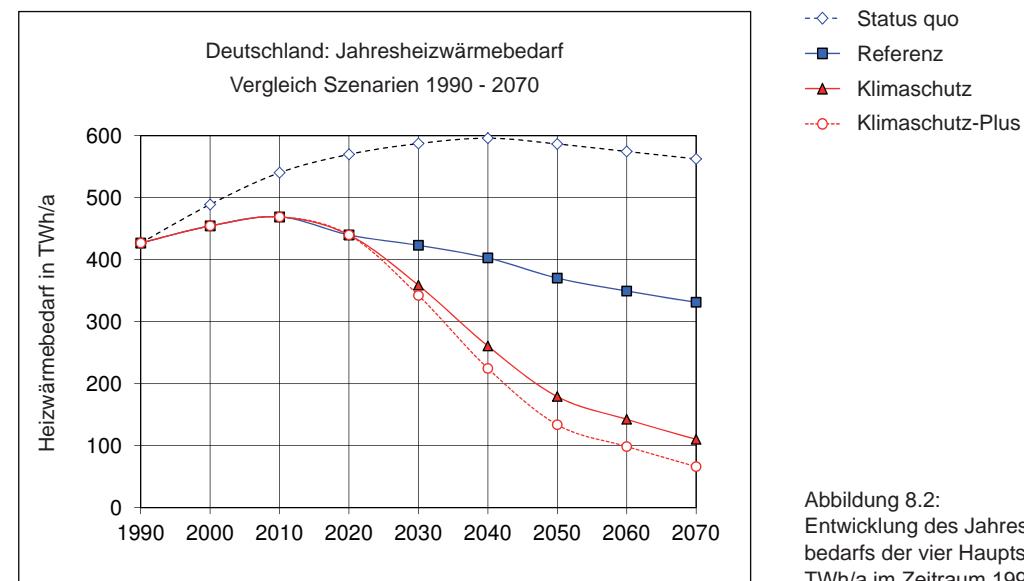


Abbildung 8.2:
Entwicklung des Jahresheizwärmeverbrauchs der vier Hauptszenarien in TWh/a im Zeitraum 1990 - 2070.

Neubau seit 1990
 Voll sanierbarer Bestand
 Bedingt sanierbarer Bestand

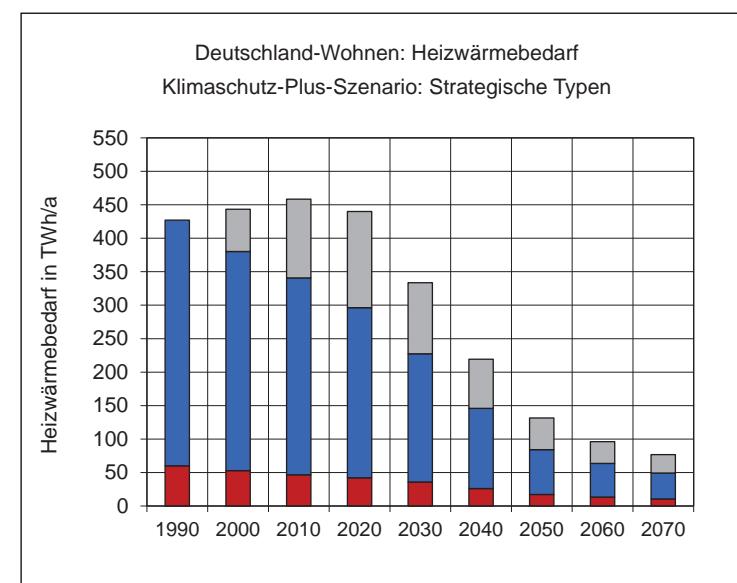
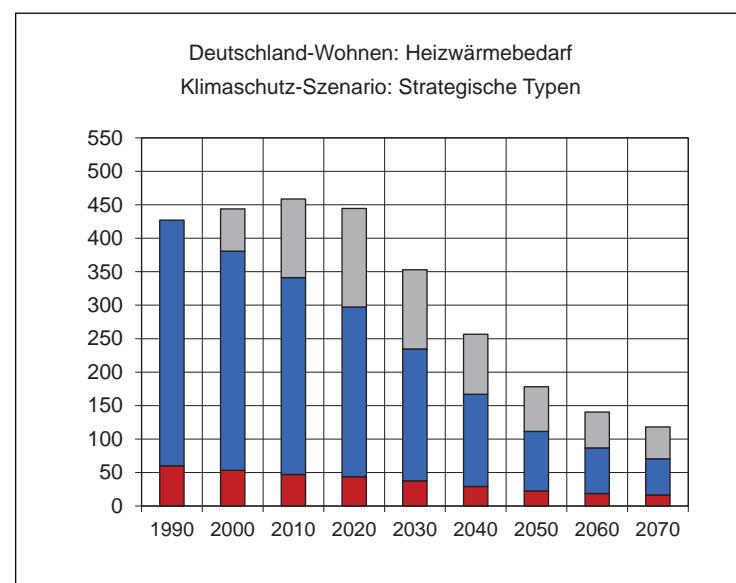
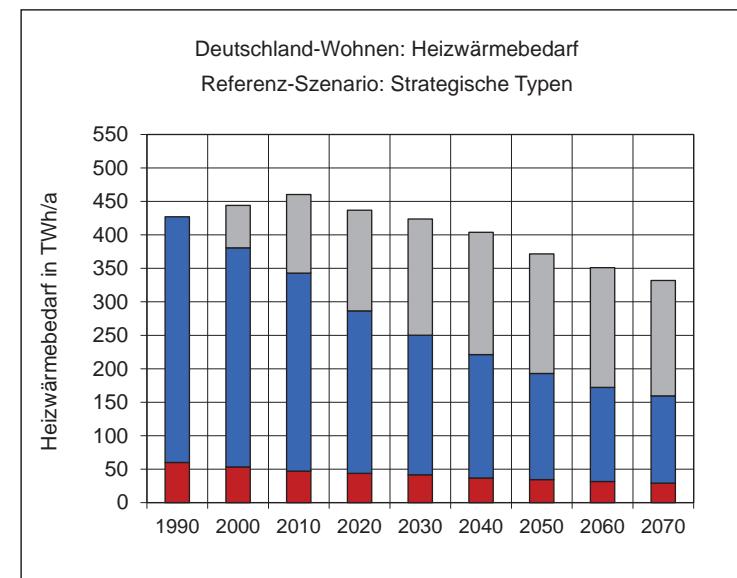
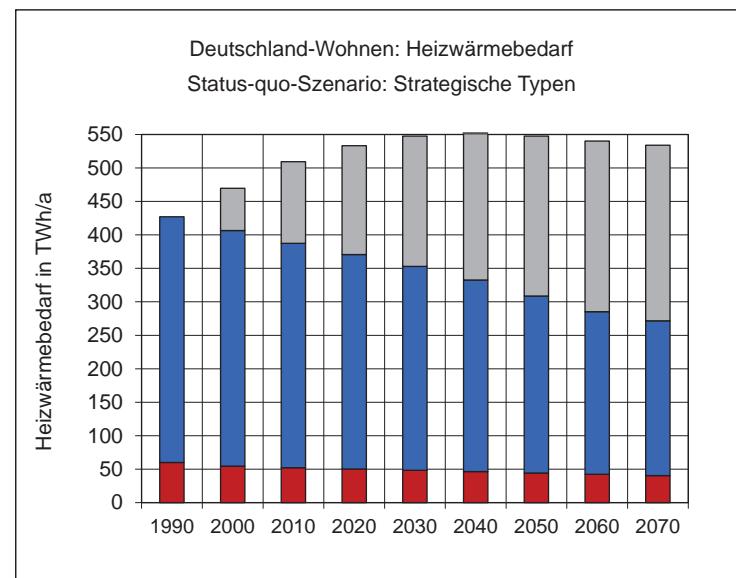
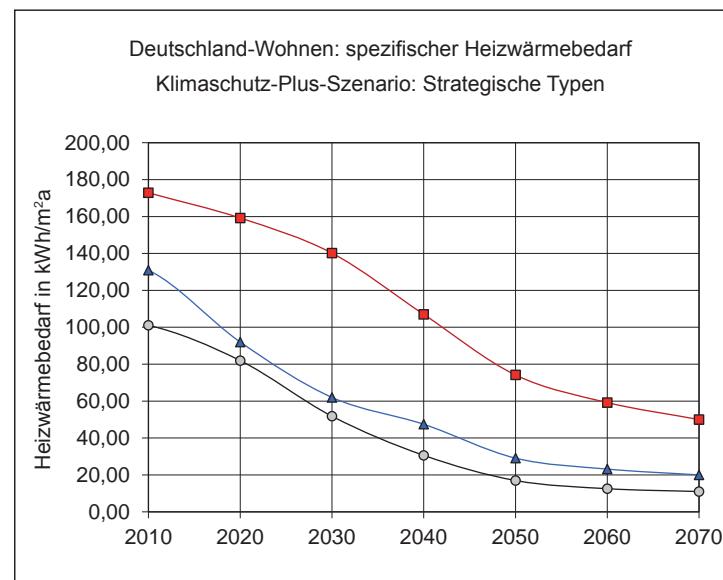
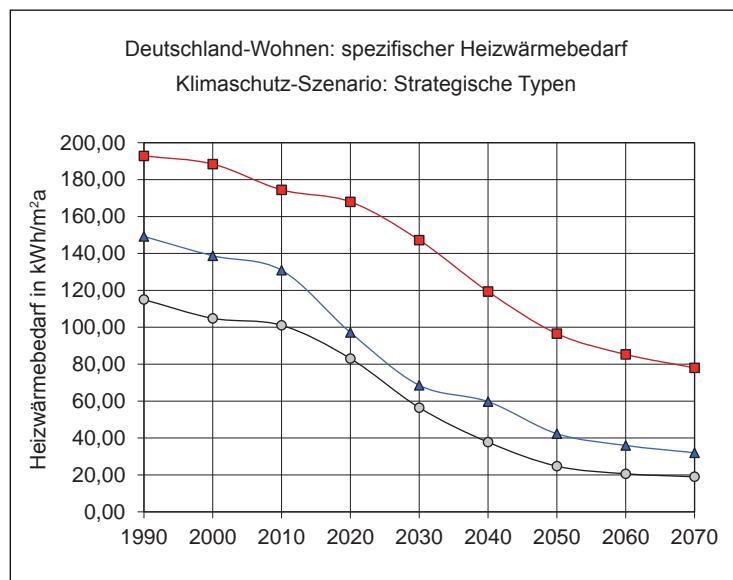
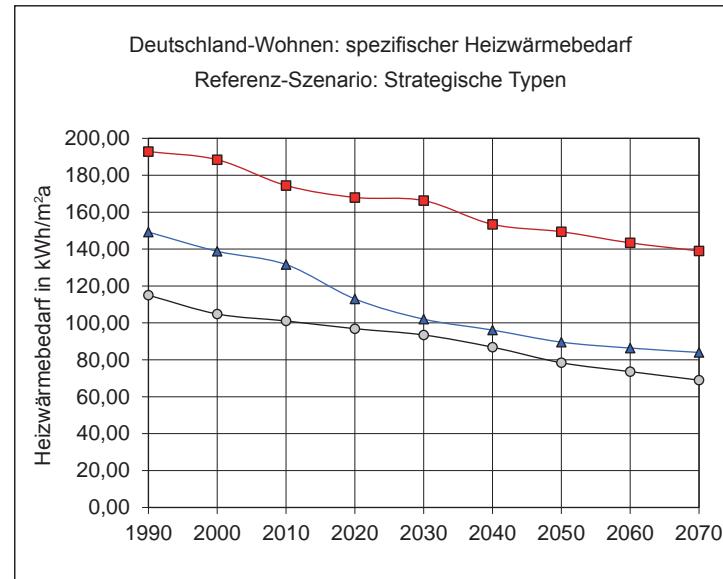
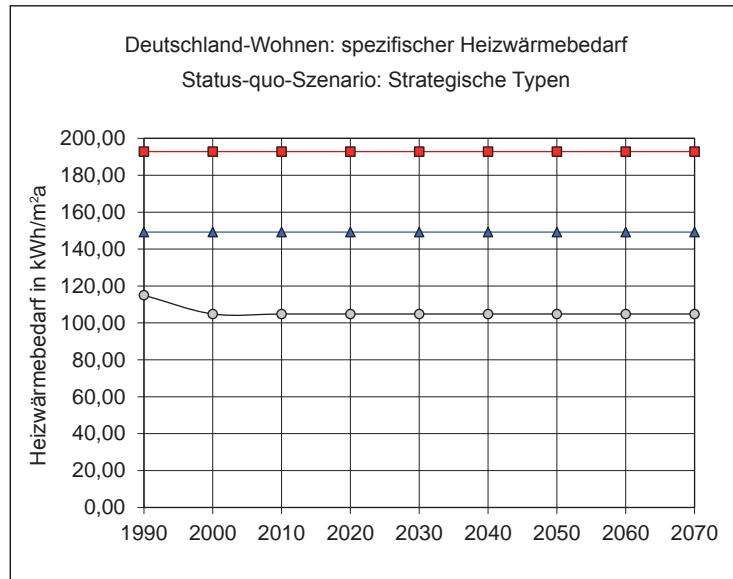


Abbildung 8.3:
Entwicklung des Jahresheizwärmebedarfs der vier Hauptszenarien
nach strategischen Gruppen in TWh/a im Zeitraum 1990 - 2070.



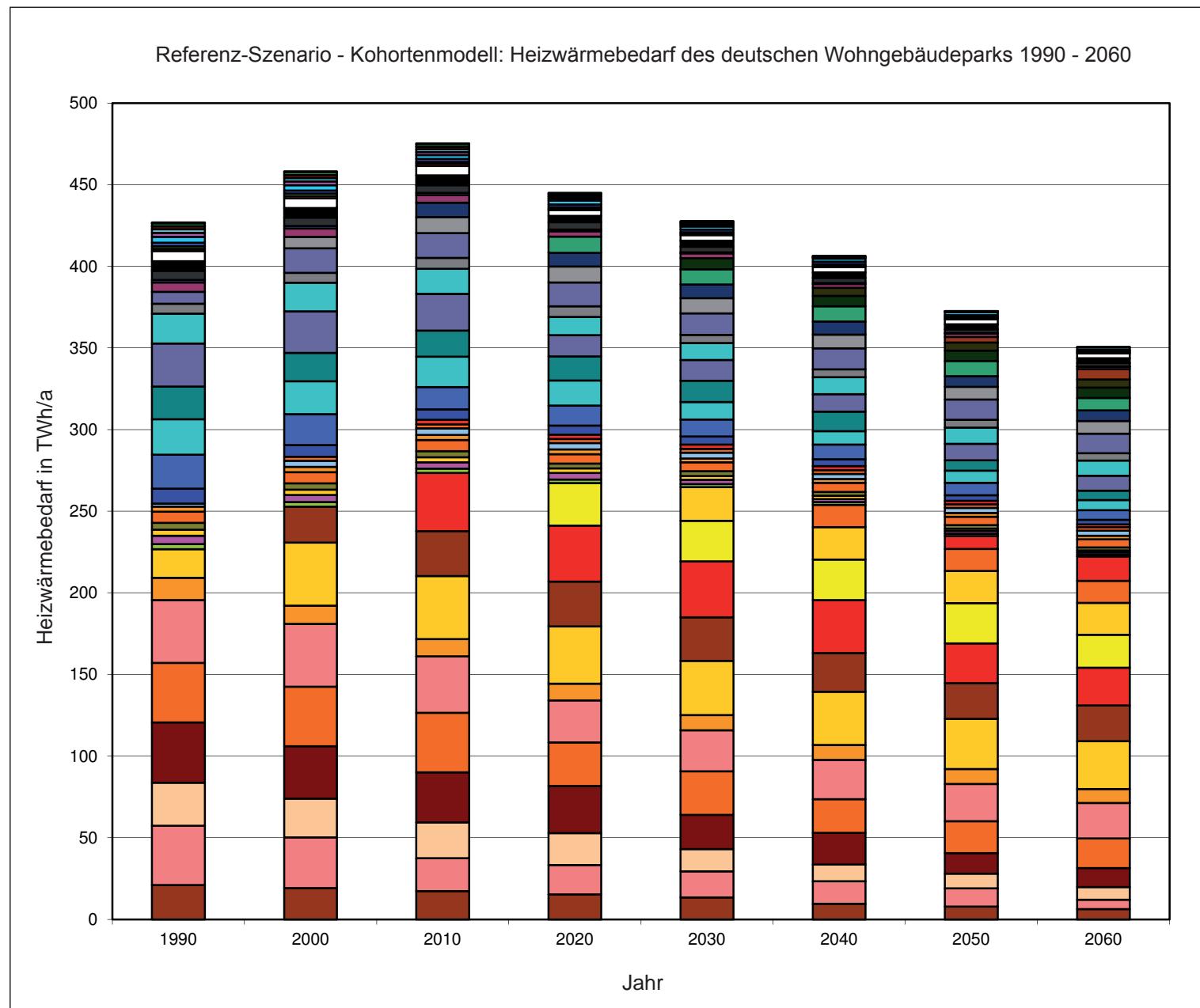
■ Bedingt sanierbarer Bestand
▲ Voll sanierbarer Bestand
○ Neubau seit 1990

Abbildung 8.4:
Entwicklung des spezifischen
Jahresheizwärmebedarfs der vier
Hauptszenarien nach strategischen
Gruppen in kWh/m²a im Zeitraum
1990 - 2070.

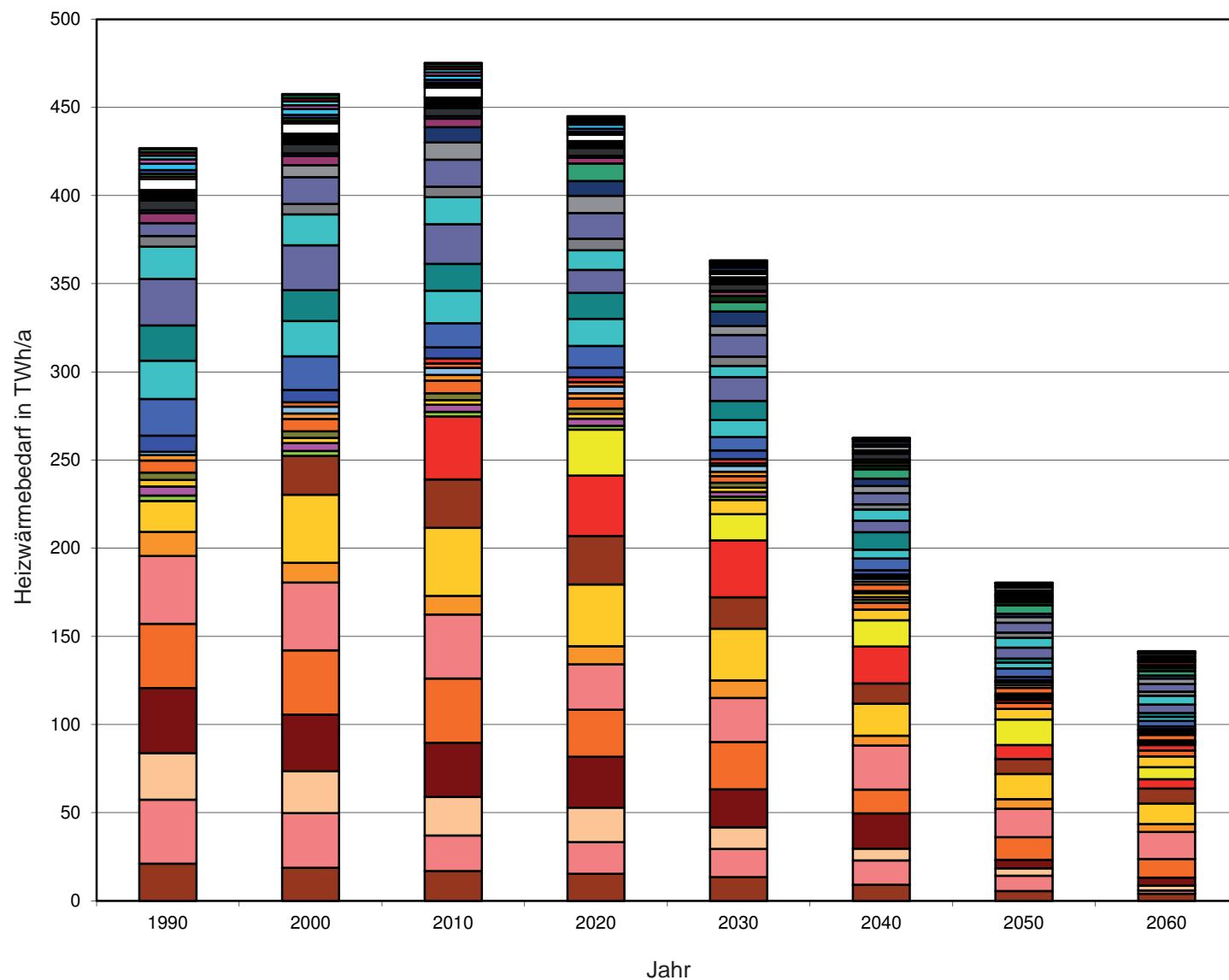
Die Gebäudetypen sind in folgender Reihenfolge übereinander gestapelt (siehe Vallentin 2011, S. IV-7 f.):

MFH	EFH
NBL_HH_G	RH_J (2002-2009)
NBL_HH_F	RH_I (1995-2001)
NBL_GMF_H	RH_H
NBL_GMH_G	RH_G
NBL_GMH_F	RH_F
NBL_MFH_E	RH_E
NBL_MFH_D	RH_D
HH_F	RH_C
HH_E	RH_B
GMH_F	EFH_N (ab 2040)
GMH_E	EFH_M (ab 2030)
GMH_D	EFH_L (ab 2020)
GMH_C	EFH_K (ab 2010)
GMH_B	EFH_J (2002-2009)
MFH_N (ab 2040)	EFH_I (1995-2001)
MFH_M (ab 2030)	EFH_H
MFH_L (ab 2020)	EFH_G
MFH_K (ab 2010)	EFH_F
MFH_J (ab 2002)	EFH_E
MFH_J (ab 1995)	EFH_D
MFH_H	EFH_C
MFH_G	EFH_B
MFH_F	EFH_A
MFH_E	
MFH_D	
MFH_C	
MFH_B	
MFH_A	

Abbildung 8.6:
Darstellung der Ergebnisse des Kohortenmodells zum Heizwärmebedarf im Referenz-Szenario. Dabei sind 51 Gebäudetypen, die den deutschen Wohngebäudepark repräsentieren übereinandergestapelt (siehe Legende oben). Angabe der Werte in 10-Jahres-Schritten in TWh/a. Die Einfamilienhaustypen sind in Rottönen und die Mehrfamilienhäuser in Blautönen dargestellt.



Klimaschutz-Szenario - Kohortenmodell: Heizwärmebedarf des deutschen Wohngebäudeparks 1990 - 2060



Die Gebäudetypen sind in folgender Reihenfolge übereinander gestapelt (siehe Vallentin 2011, S. IV-7 f.):

MFH	EFH
NBL_HH_G	RH_J (2002-2009)
NBL_HH_F	RH_I (1995-2001)
NBL_GMF_H	RH_H
NBL_GMH_G	RH_G
NBL_GMH_F	RH_F
NBL_MFH_E	RH_E
NBL_MFH_D	RH_D
HH_F	RH_C
HH_E	RH_B
GMH_F	EFH_N (ab 2040)
GMH_E	EFH_M (ab 2030)
GMH_D	EFH_L (ab 2020)
GMH_C	EFH_K (ab 2010)
GMH_B	EFH_J (2002-2009)
MFH_N (ab 2040)	EFH_I (1995-2001)
MFH_M (ab 2030)	EFH_H
MFH_L (ab 2020)	EFH_G
MFH_K (ab 2010)	EFH_F
MFH_J (ab 2002)	EFH_E
MFH_J (ab 1995)	EFH_D
MFH_H	EFH_C
MFH_G	EFH_B
MFH_F	EFH_A
MFH_E	
MFH_D	
MFH_C	
MFH_B	
MFH_A	

Abbildung 8.7:
Darstellung der Ergebnisse des Kohortenmodells zum Heizwärmebedarf im Klimaschutz-Szenario. Dabei sind 51 Gebäudetypen, die den deutschen Wohngebäudepark repräsentieren übereinander gestapelt (siehe Legende oben). Angabe der Werte in 10-Jahres-Schritten in TWh/a. Die Einfamilienhaustypen sind in Rottönen und die Mehrfamilienhäuser in Blautönen dargestellt.

Im bedingt sanierbaren Bestand (rote Balkenanteile) können aufgrund der hohen Eingriffsempfindlichkeit schon aus objektiven Gründen nicht im selben Ausmaß Effizienzverbesserungen erzielt werden. Diese Gruppe ist jedoch vom Umfang der Wohnflächen nicht so bedeutend, dass dies ein substanzielles Problem für den Gesamterfolg darstellen würde. Bei den Klimaschutzzszenarien kommt hinzu, dass im bedingt sanierbaren Bestand nicht sämtliche Bauteile schützenswert sind und auch bei schützenswerten Konstruktionen im Zuge von Erneuerungen Bauteile ausgetauscht werden müssen und sich dabei Gelegenheiten für energetische Verbesserungen ergeben (z.B. Erneuerung von Verglasungen bei gleichzeitigem Erhalt der Fensterprofile).

Der Neubau seit 1990 spielt ebenfalls eine wichtige Rolle für den Gesamterfolg. Im Referenzszenario entfallen vom Heizwärmebedarf im Jahr 2030 bereits 145 TWh/a auf diese Gruppe und im Jahr 2050 155 TWh/a. Dieser Wert liegt 2030 im Klimaschutz-Szenario bei etwa 88 TWh/a und sinkt aufgrund von wirksamen energetischen Modernisierungen der älteren Gebäude dieser Gruppe bis 2050 auf 49 TWh/a. Im Klimaschutz-Plus-Szenario liegt der Heizwärmebedarf in der Gruppe Neubau seit 1990 im Jahr 2030 bei 80 TWh/a und sinkt bis 2050 auf 33,5 TWh/a. Hier zeigt sich deutlich, dass der Neubau im Grunde den „Bestand von morgen“ bildet. Auch künftig werden die Wohnflächen weiter zunehmen. Aus Klimaschutzsicht ist dies ohnehin nur dann vertretbar, wenn dies durch Neubauten mit minimalen Energiebedarf erfolgt.

Im Status-quo-Szenario werden die energetischen Qualitäten im Betrachtungszeitraum unverändert belassen. Dies ist zwar völlig unrealistisch, jedoch kann durch diese fiktive Setzung methodisch sichtbar gemacht werden, wie sich die Gewichte zwischen den strategischen Gruppen verschieben. Durch stetigen Abgang (Abriss, Nutzungsänderungen) verschwinden immer mehr Bestandsgebäude aus dem Wohngebäudepark, die durch Neubau ersetzt werden. Der zusätzliche Wohnflä-

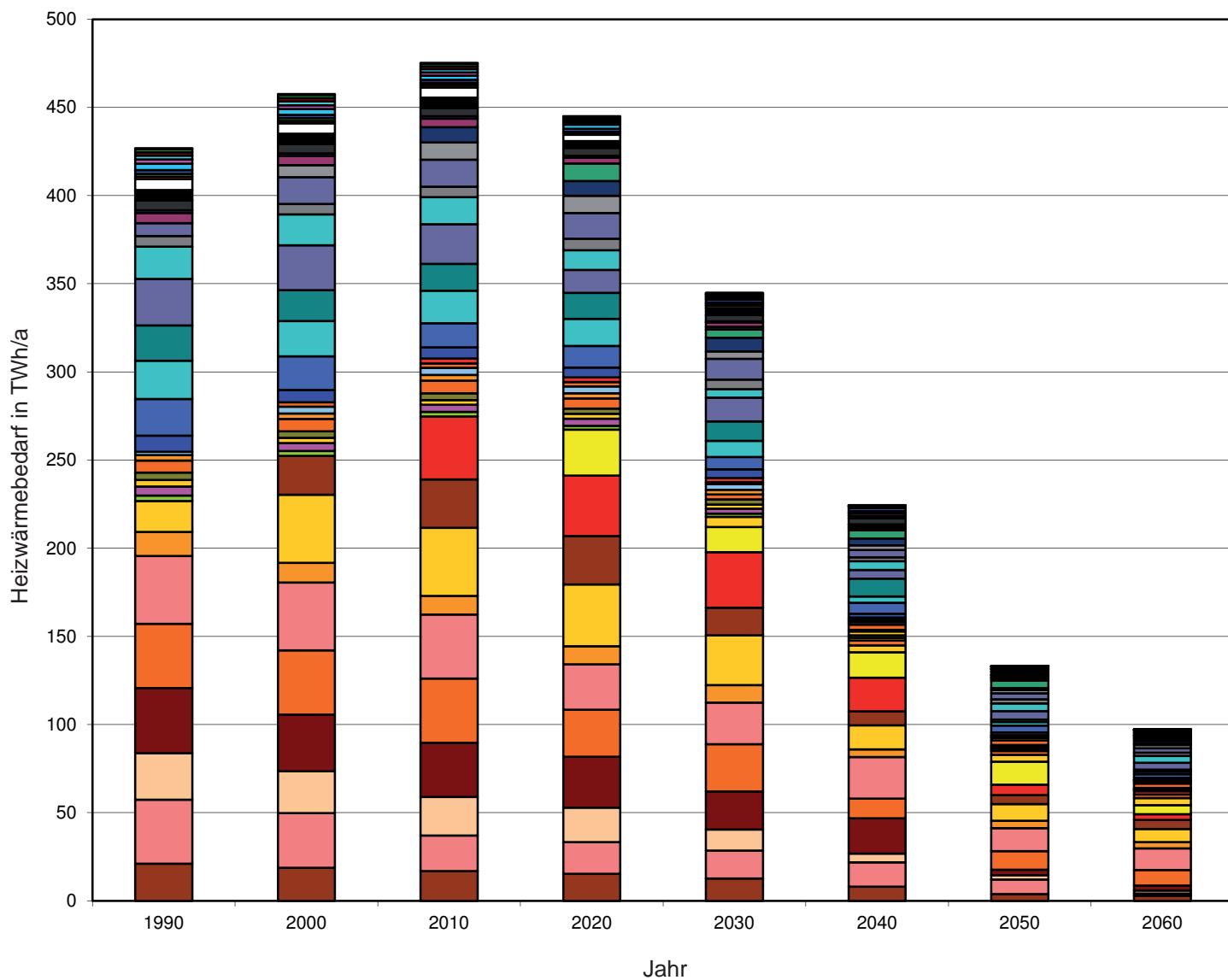
chenanstieg erfolgt ebenfalls zum allergrößten Teil durch Wohnungsneubau. In diesem Szenario bildet sich daher vor allem die Wohnflächenentwicklung insgesamt und in seiner Aufteilung zwischen den strategischen Typen ab.

Die Auswertung des spezifischen jährlichen Heizwärmebedarfs nach strategischen Typen (Abb. 8.4 a-d) zeigt auf, dass die spezifischen Bedarfswerte der Baudenkmale sowie des sonstigen bedingt sanierbaren Bestandes immer deutlich über denen der beiden anderen Gruppen liegen. Der Neubau nach 2010 wiederum weist durchgehend günstigere Heizwärme-Kennwerte auf als der umfassend sanierbare Bestand. Altbauten werden in der Regel Schritt für Schritt erneuert. Sie weisen viele Anschlüsse auf, die nicht wärmebrückenfrei ausgeführt werden können. Hinzu kommen weitere Umsetzungshindernisse (z.B. nachbarrechtliche Probleme, begrenzter Platz für Dämmmaßnahmen, usw.). Auch die Integration der haustechnischen Anlagen – speziell der Lüftungsanlagen – ist im Bestand oftmals schwieriger als im Neubau.

Der entscheidende Unterschied zwischen den Szenarien besteht in den eingesetzten energetischen Qualitäten im Bereich Hüllkonstruktionen und Lüftungssystemen. Während im Status-quo-Szenario (Abb. 8.4.a) gar keine Verbesserungen und im Referenzszenario (Abb. 8.4.b) nur geringe Verbesserungen auf Niedrigenergieniveau (mittlere Qualität) erfolgen werden, zeigt sich im Klimaschutz-Szenario (Abb. 8.4.c) nach 2020 der Erfolg der Dämm- und Lüftungsstrategien in der Güte von Passivhäusern (hohe Qualität) in deutlich absinkenden spezifischen Heizwärme-Kennwerten.

Zu beachten ist hierbei, dass im Klimaschutz-Szenario (Abb. 8.4.c) bei den Baudenkmälern und im bedingt sanierbaren Bestand vorerst keine Innendämmungen zum Einsatz kommen. Dies erfolgt erst im Klimaschutz-Plus-Szenario (Abb. 8.4.d), allerdings nur dort, wo dies aus baukulturellen Gründen vertreten werden kann. Neben Innendämmungen kommen dort zu-

Klimaschutz-Plus-Szenario - Kohortenmodell: Heizwärmebedarf des deutschen Wohngebäudeparks 1990 - 2060



Die Gebäudetypen sind in folgender Reihenfolge übereinander gestapelt (siehe Vallentin 2011, S. IV-7 f.):

MFH	EFH
NBL_HH_G	RH_J (2002-2009)
NBL_HH_F	RH_I (1995-2001)
NBL_GMF_H	RH_H
NBL_GMH_G	RH_G
NBL_GMH_F	RH_F
NBL_MFH_E	RH_E
NBL_MFH_D	RH_D
HH_F	RH_C
HH_E	RH_B
GMH_F	EFH_N (ab 2040)
GMH_E	EFH_M (ab 2030)
GMH_D	EFH_L (ab 2020)
GMH_C	EFH_K (ab 2010)
GMH_B	EFH_J (2002-2009)
MFH_N (ab 2040)	EFH_I (1995-2001)
MFH_M (ab 2030)	EFH_H
MFH_L (ab 2020)	EFH_G
MFH_K (ab 2010)	EFH_F
MFH_J (ab 2002)	EFH_E
MFH_J (ab 1995)	EFH_D
MFH_H	EFH_C
MFH_G	EFH_B
MFH_F	EFH_A
MFH_E	
MFH_D	
MFH_C	
MFH_B	
MFH_A	

Abbildung 8.8:
Darstellung der Ergebnisse des Kohortenmodells zum Heizwärmebedarf im Klimaschutz-Plus-Szenario. Dabei sind 51 Gebäudetypen, die den deutschen Wohngebäudepark repräsentieren übereinander gestapelt (siehe Legende oben). Angabe der Werte in 10-Jahres-Schritten in TWh/a. Die Einfamilienhaustypen sind in Rot- und die Mehrfamilienhäuser in Blau- und Grün- und Gelbtönen dargestellt.

sätzlich technologisch besonders hochwertige Komponenten zum Einsatz, deren Effizienz gegenüber heutigen Standards deutlich verbessert ist (z.B. Vakuumdämmung und -verglasungen). Dadurch kann nach 2040 auch in den eingriffsempfindlichen Beständen eine spürbare Reduktion des spezifischen Jahresheizwärmebedarfs erreicht werden. In allen strategischen Gruppen ergeben sich dadurch durchgängig nochmals geringere spezifische Bedarfswerte für Heizwärme als im Klimaschutz-Szenario.

Abschließend werden die Ergebnisse zum Heizwärmebedarf als Absolutwerte in TWh/a in detaillierter Form für jeden der 70 Gebäudetypen abgebildet. Durch die hier gewählte Darstellung in Abb. 5.7 - 5.9 wird deutlich, dass sich der Heizwärmebedarf als Summe der Einzelbeiträge aller Gebäudetypen zusammensetzt, die jeweils individuellen Veränderungen unterliegen:

- Im Bestand lassen sich die Absolutwerte in jedem Typ entweder durch energetische Verbesserungen oder durch Abgänge verbessern.
- Gleichzeitig kommen durch den Neubau neue Gebäudetypen mit neuen Bedarfswerten hinzu. Erst in der Überlagerung der zeitlich abgestimmten und im Modell genau festgelegten Einzeleffekte kann die Gesamtentwicklung verstanden und auch quantitativ nachvollzogen werden.
- Durch die gewählte Modellierung im Kohortenmodell wird die Entwicklung des Heizwärmebedarfs als evolutionärer Prozess schrittweiser Verbesserung erkennbar.
- Die Gelegenheiten für Effizienzverbesserungen ergeben sich nur nach und nach über den gesamten Betrachtungszeitraum und sind im Modell aus wirtschaftlichen und pragmatischen Gründen immer an ohnehin anstehende Instandhaltungs- und Erneuerungsmaßnahmen gekoppelt.

Die Unterschiede in den Szenarien liegen vor allem in den dort jeweils eingesetzten energetischen Qualitäten der Bau- und

Technikkomponenten. Liegt eine hohe Eingriffsempfindlichkeit vor, können die davon betroffenen Maßnahmen nicht oder nur in abgeänderter Form durchgeführt werden. Ein Monitoringsystem der Klimaschutzmaßnahmen ist ebenfalls auf eine derartige nach räumlichen und sonstigen Merkmalen (z.B. Eingriffsempfindlichkeit, Baualter, Gebäudetyp) differenzierte Typologie angewiesen. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass der Gebäudepark insgesamt ein sehr trüges System darstellt, in dem sich neue Qualitäten, Standards und die zugehörigen Planungskonzepte aufgrund der langen Nutzungsdauern der Bauteile und Komponenten nur langsam durchsetzen können. Für effektive Minderungspfade sind daher langfristige Orientierungen notwendig. Daher ist es sinnvoll als Bezugsjahr für klimapolitischen Ziele im Gebäudesektor Deutschlands das Jahr 2050 zu wählen und Zwischenziele für 2030 und 2040 zu definieren.

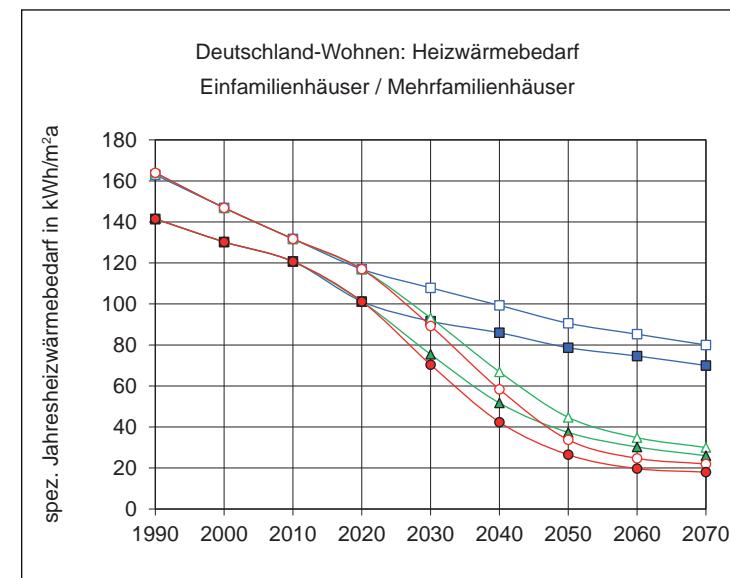
Die Entwicklung in der zurückliegenden Phase zwischen 1990 und 2020 ist ebenfalls aufschlussreich. Es ist gut zu erkennen, dass in diesem Zeitraum kaum energetische Verbesserungen beim Heizwärmebedarf des Bestandes erzielt werden konnten, während durch den Neubau immer neue Energieverbraucher hinzukamen. Als Folge hat der zusätzliche „Wohnkonsum“ die mäßigen Erfolge im Bestand nahezu neutralisiert.

Eine Trendwende ist bislang nicht eingeleitet. Dies erfordert eine andere Planungs- und Baupraxis, die sich zwar auf der Ebene eines „1%-Geschehen“ seit vielen Jahren bewährt hat und zuverlässig reproduzierbar ist. Der eigentlich entscheidende Schritt aus der Nische zu einer selbstverständlich ausgeübten Baupraxis bei allen Neubauten und energetischen Modernisierungen lässt aber weiter auf sich warten. Nur dieser Weg würde jedoch zu einem deutlichen Rückgang der Bedarfswerte führen, wie er für einen wirksamen Klimaschutz notwendig ist. Der mittlere spezifische Heizwärmebedarf von Ein- und Mehrfamilienhäusern unterscheidet sich in allen Szenarien. Generell liegen die spezifischen Bedarfswerte der Einfamilienhäu-

ser um 15 - 30 % höher höher als die der Mehrfamilienhäuser. Bei den hochwertigen Standards der beiden Klimaschutzszenarien sind die relativen Unterschiede größer, weil durch die Wärmerückgewinnung der Lüftung der Einfluss der Transmissionswärmeverluste größer ist, als im Referenzszenario, in dem durchgängig nur Fensterlüftung und Abluftanlagen zum Einsatz kommen. Mit steigender Energieeffizienz werden die Unterschiede bei den Absolutwerten jedoch erwartungsgemäß immer geringer. Insgesamt wird hier der bedeutende Einfluss der Kompaktheit (z.B. ausgedrückt im A/V- oder A/A_{EB}-Verhältnis) deutlich. Aus strategischer Sicht kommt hinzu, dass bei der Ausführung hoher energetischer Qualitäten im Bereich der Gebäudehülle mit besserer Kompaktheit der Gebäude sowohl der wirtschaftliche als auch materialgebundene Aufwand überproportional sinken. Dieser Zusammenhang tritt bei einer Pro-Kopf-Betrachtung nochmals stärker hervor, denn die Wohnfläche pro Person liegt in Einfamilienhäusern im Mittel deutlich höher als in Wohnungen von Mehrfamilienhäusern.

7.2 Warmwasserbedarf

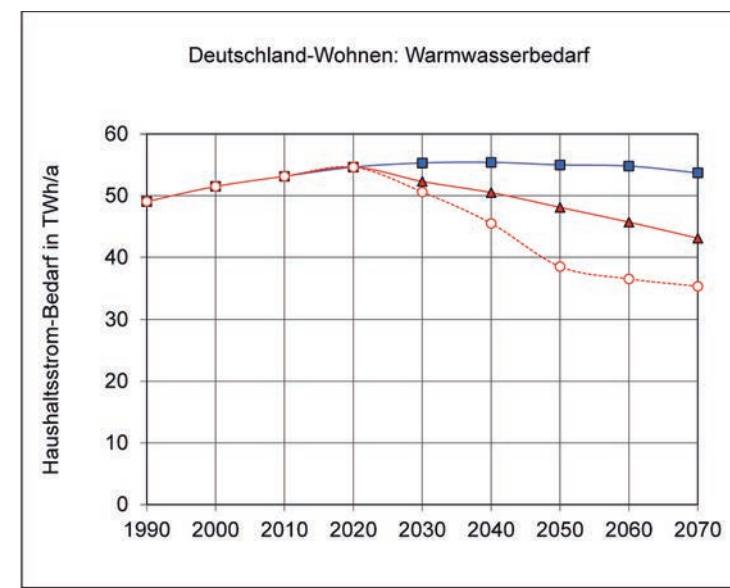
Bei den Warmwasseranwendungen sind gegenläufige Tendenzen vorhanden, die einerseits verbrauchserhörend sind (z.B. steigende Komfortansprüche, hygienische Anforderungen) und andererseits verbrauchsmindernd sind (z.B. wassersparende Armaturen, Duschwasser-Wärmerückgewinnung). Die Entwicklung des Nutzenergiebedarfs für Warmwasser ist in Abb. 8.10 dargestellt und orientiert sich an der ursprünglichen Modellierung (vgl. Vallentin 2011, S. IV-39 ff.) unter Anpassung an die Entwicklung der Bevölkerung und Heizstruktur nach aktuellen Erkenntnissen. Dieser steigt ab 1990 von etwas unter 50 bis 2020 auf etwa 55 TWh/a an und verbleibt im Referenzszenario in etwa auf diesem Niveau. Im Klimaschutzszenario kann der Warmwasserbedarf durch Effizienzverbesserungen bis 2050 auf ca. 48 TWh/a reduziert werden und im Klimaschutz-Plus-Szenario über den zusätzlichen Einsatz von Wärmerück-



Deutschland-Wohnen: Heizwärmebedarf
Einfamilienhäuser / Mehrfamilienhäuser

- Referenz - EFH
- Referenz - MFH
- △ Klimaschutz - EFH
- ▲ Klimaschutz - MFH
- Klimaschutz-Plus - EFH
- Klimaschutz-Plus - MFH

Abbildung 8.9:
Entwicklung des spezifischen Jahresheizwärmebedarfs der drei Hauptszenarien getrennt für Ein- und Mehrfamilienhäuser im Zeitraum 1990 - 2070 in kWh/m²a.



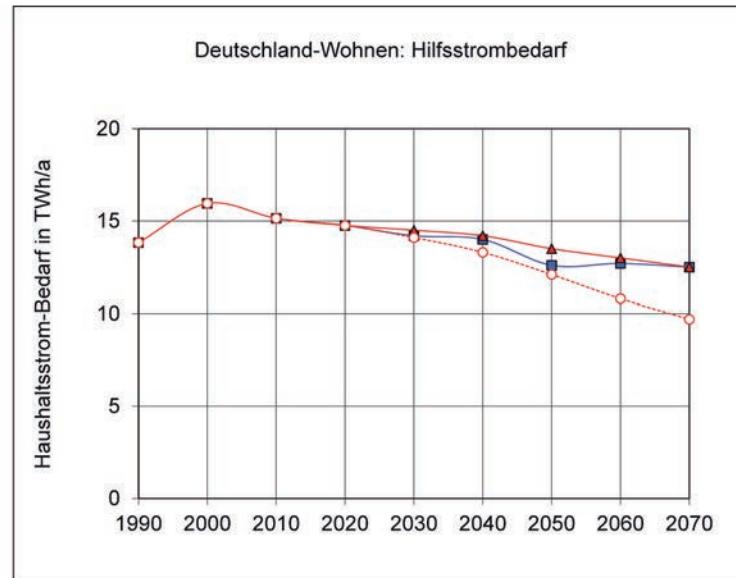
Deutschland-Wohnen: Warmwasserbedarf

- Referenz
- ▲ Klimaschutz
- Klimaschutz-Plus

Abbildung 8.10:
Entwicklung des Nutzwärmebedarfs für Warmwasser der drei Hauptszenarien in TWh/a im Zeitraum 1990 - 2070.

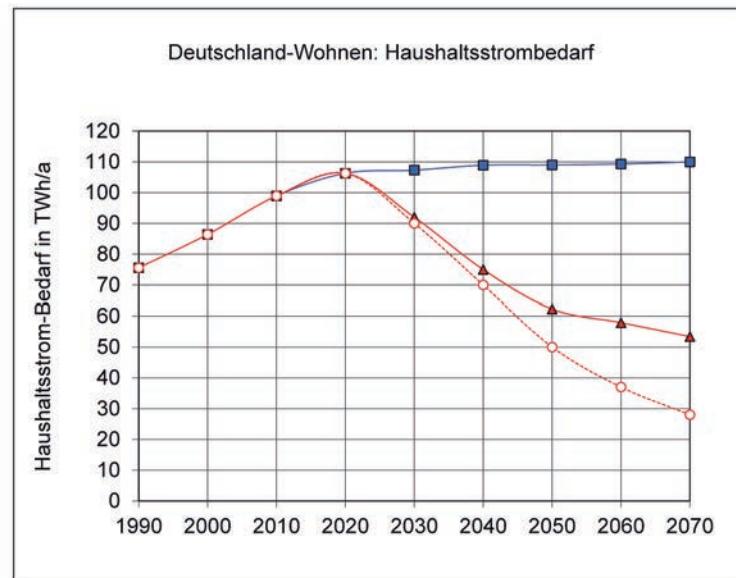
- Referenz
- ▲ Klimaschutz
- Klimaschutz-Plus

Abbildung 8.10:
Entwicklung des Jahresheizwärmebedarfs der vier Hauptzonen nach strategischen Gruppen in TWh/a im Zeitraum 1990 - 2070.



- Referenz
- ▲ Klimaschutz
- Klimaschutz-Plus

Abbildung 8.11:
Entwicklung des Jahresheizwärmebedarfs der vier Hauptzonen nach strategischen Gruppen in TWh/a im Zeitraum 1990 - 2070.



gewinnungskonzepten sogar auf ca. 39 TWh/a. Insgesamt ist festzustellen, dass im Bereich der Warmwasseranwendungen die Effizienzfortschritte hinsichtlich Nutzenergie deutlich geringer ausfallen als im Bereich Raumwärme. Die Gründe dafür wurden oben bereits genannt.

7.3 Hilfsstrombedarf

Ein ähnliches Bild zeigt sich auch bei den Hilfsstromanwendungen. Dazu zählen der Einsatz von Strom für Pumpen, Ventilatoren, Antriebe, Steuerungen für Haustechnik und Gemeinschaftsanlagen (z.B. Aufzüge, Tiefgaragen). Auch hier wurden die Annahmen der ursprünglichen Modellierung übernommen (vgl. Vallentin 2011, S. IV-46 ff.). In allen Szenarien zeigt sich eine leicht abnehmende Tendenz. In den Klimaschutzszenarien sind einerseits bedeutende Effizienzverbesserungen erzielbar, jedoch kommen andererseits neue Anwendungen durch Lüftungsanlagen und die stärkere Verbreitung von Solaranlagen hinzu. Zu beachten ist ferner, dass in den Klimaschutzszenarien die relative Bedeutung des Hilfsstroms am gesamten Strombedarf des Wohngebäudeparks dadurch zunimmt.

7.4 Haushaltsstrombedarf

Die Stromanwendungen stellen ein wichtiges Handlungsfeld für die Effizienz- und Klimaschutzstrategien dar. Aus nicht nachvollziehbaren Gründen werden diese nicht in den gesetzlich vorgeschriebenen Energiebilanzierungsverfahren für Gebäude berücksichtigt. Dies stellt bereits auf technisch-bilanzieller Ebene einen methodischen Fehler dar, der zu vielen unlogischen bzw. widersprüchlichen Ergebnissen führt (z.B. Unklarheiten bei der Bestimmung interner Wärmequellen, nicht nachvollziehbare Berechnung von Kühllasten usw.). In den Energiebilanzen der Szenarien sind daher alle Stromanwendungen innerhalb der Bilanzgrenzen berücksichtigt.

Die Modellierung des Haushaltstrombedarfs ist in (Vallentin 2011, S.IV-52 ff.) genauer erläutert und wurde anhand der Veröffentlichungen zu den marktbesten Stromgeräten und zur Entwicklung der Anzahl und Größe der Haushalte nochmals aktualisiert. In der zurückliegenden Phase 1990 - 2020 sind die Stromverbräuche für Haushaltsgärtze im gesamten Wohngebäudepark kontinuierlich von ca. 75 TWh/a auf etwa 108 TWh/a angestiegen. Im Referenzszenario verharrt der Strombedarf für Geräte im Haushalt auf diesem Niveau und steigt noch etwas an. Grund dafür ist, dass die Effizienzverbesserungen durch neue Anwendungen in etwa ausgeglichen werden.

In den Klimaschutzszenarien werden die Haushalte ab 2020 im Zuge der üblichen Erneuerungszyklen mit besonders stromeffizienten Geräten und Leuchtmitteln ausgestattet. Aufgrund der niedrigeren Nutzungsdauern der Stromgeräte von 5 - 20 Jahren kann dieser Prozess deutlich schneller geschehen als bei den langlebigen Baukomponenten. Der Strombedarf kann somit bis 2050 auf ca. 60 TWh/a und damit unter den Ausgangswert im Jahr 1990 sinken. Im Klimaschutz-Plus-Szenario werden ab 2025 nochmals verbesserte Geräte und Technologien zum Standard. Dies betrifft das gesamte Feld von Haushaltsgärtzen, Beleuchtung und Kommunikationselektronik. Dadurch kann der Bedarf bis 2050 nochmals um ca. 10 TWh/a auf dann nur noch 50 TWh/a reduziert werden. Auch danach sinken die Bedarfswerte in beiden Klimaschutzszenarien weiter ab.

7.5 Variation des Heizwärmebedarfs unter verschiedenen Randbedingungen in den anderen Szenarienfamilien

In diesem Unterabschnitt wird die Entwicklung des Heizwärmebedarfs unter gegenüber dem Standardszenarien geänderten Randbedingungen betrachtet. Diese liegen der Präsentation der Ergebnisse zu den Szenarienfamilien in Kapitel 11 zugrunde. Es werden gleichermaßen sowohl pessimistischere als auch optimistischere Annahmen untersucht.

Variation der Sanierungsrate (1% und 2%)

Den Standardszenarien liegt das Kopplungsprinzip zugrunde. Energetische Verbesserungen erfolgen dabei immer dann, wenn die Lebensdauer eines Bauteils oder einer Technikkomponente zu Ende geht und ohnehin eine Erneuerung ansteht. Dies würde in etwa einer Sanierungsrate von 2 % entsprechen. In der Vergangenheit betrug die Sanierungsrate jedoch nur etwa die Hälfte davon. Daher wurde eine Szenarienvariante modelliert, in der auch nach 2020 eine Sanierungsrate von nur 1 % zugrundegelegt wird (siehe Abb. 8.12). Die Auswirkungen einer derart abgeschwächten Umsetzung sind in allen Szenarien deutlich. Im Referenzszenario gelingt es kaum noch, die Bedarfswerte insgesamt abzusenken. In den Klimaschutzszenarien halbieren sich in etwa die Effizienzfortschritte gegenüber der Referenzentwicklung, was erhebliche Auswirkungen auf die Klimaschutzstrategie insgesamt hat. Selbst unter Einsatz der marktbesten Komponenten (Klimaschutz-Plus-Szenario) gelingt es nicht, wenigstens in die Nähe der Werte des Standard-Klimaschutzszenarios zu gelangen.

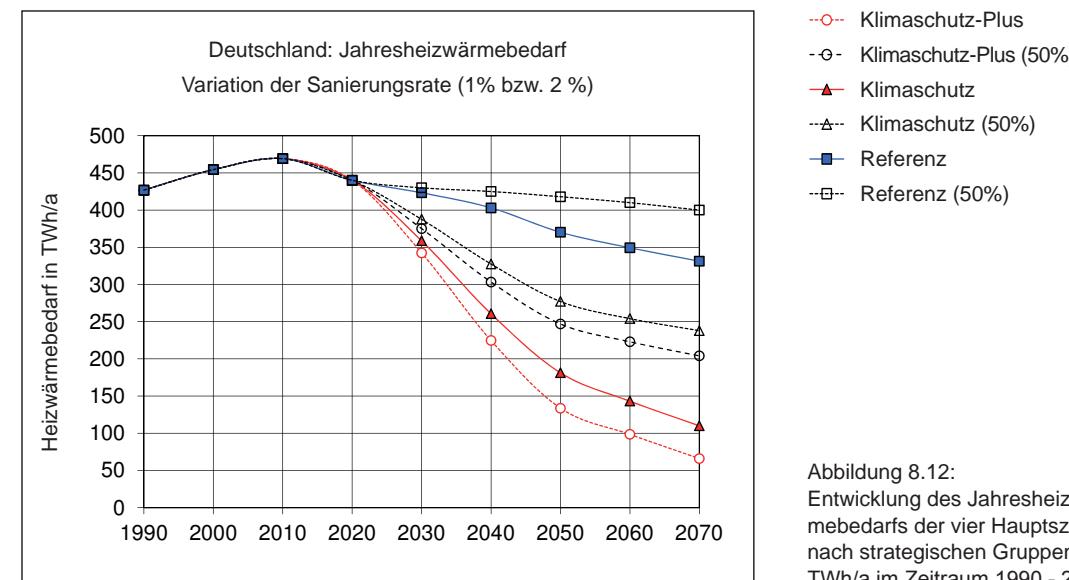
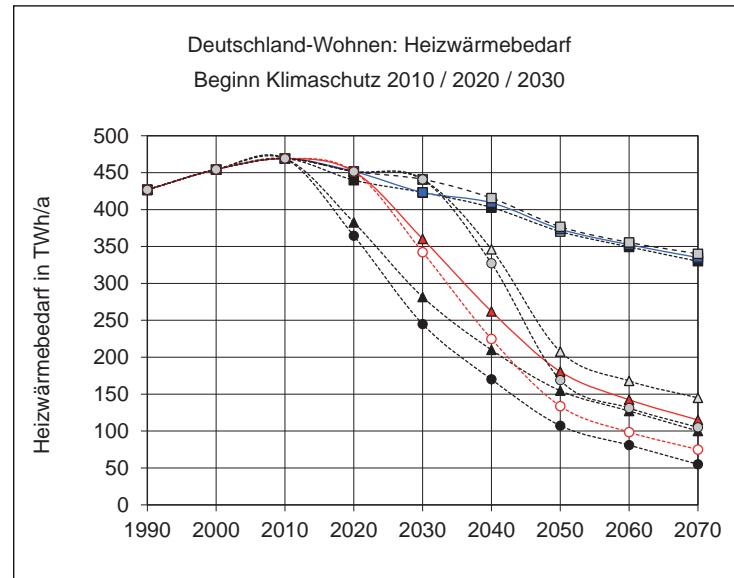


Abbildung 8.12:
Entwicklung des Jahresheizwärmebedarfs der vier Hauptszenarien nach strategischen Gruppen in TWh/a im Zeitraum 1990 - 2070.

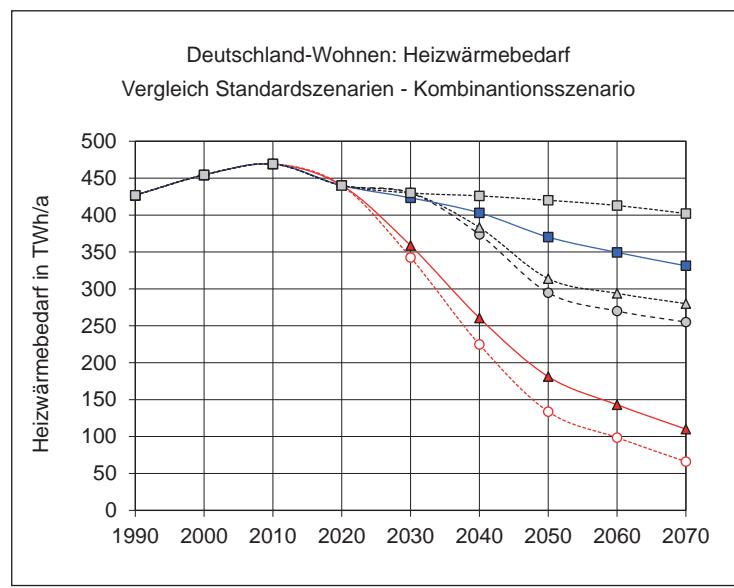
- Referenz-Beginn 2010
- Referenz-Beginn 2020
- Referenz-Beginn 2030
- ▲--- Klimaschutz-Beginn 2010
- ▲--- Klimaschutz-Beginn 2020
- ▲--- Klimaschutz-Beginn 2030
- Klimaschutz-Plus-Beginn 2010
- Klimaschutz-Plus-Beginn 2020
- Klimaschutz-Plus-Beginn 2030

Abbildung 8.13:
Entwicklung des Jahresheizwärmebedarfs im Referenz-, Klimaschutz- und Klimaschutz-Plus-Szenario mit jeweils unterschiedlichem Beginn der gebäudebezogenen Klimaschutzmaßnahmen im Jahr 2010, 2020 und 2030.



- Klimaschutz-Plus
- Klimaschutz-Plus-Kombination
- ▲--- Klimaschutz
- ▲--- Klimaschutz-Kombination
- Referenz
- Referenz-Kombination

Abbildung 8.14:
Entwicklung des Jahresheizwärmebedarfs im Referenz-, Klimaschutz- und Klimaschutz-Plus-Szenario als Vergleich der Standardannahmen mit den pessimistischen Annahmen einer Kombination von 1 % Sanierungsrate und Beginn Klimaschutz im Jahr 2030.



Beginn Klimaschutz 2010 / 2020 / 2030

Eine weitere Untersuchung widmet sich der Frage, wie stark sich ein früherer Beginn (z.B. im Jahr 2010) der gebäudebezogenen Klimaschutzmaßnahmen ausgewirkt hätte bzw. wie sich eine weitere Verzögerung auswirken würde (z.B. mit einem Beginn im Jahr 2030). Die Auswertung der Ergebnisse in Abbildung 8.13 zeigt, dass die Auswirkungen auf den gesamten Heizwärmebedarf in den Referenzszenarien gering ist. Die dort zum Einsatz kommenden mittleren Qualitäten bewirken so geringe Verbesserungen, dass deren Beginn minimale Konsequenzen auf das Gesamtergebnis hat. Für die Klimaschutzszenarien hingegen ist der Zeitpunkt des Beginns der konsequenten Umsetzung der Klimaschutzstrategien entscheidend. Hätte man damit früher begonnen, wären im gesamten Zeitraum ab 2010 erwartungsgemäß insgesamt niedrigere Bedarfswerte möglich gewesen. Eine Verzögerung des Beginns auf 2030 führt hingegen zu durchgängig höheren Bedarfswerten. Auffällig ist jedoch, dass in beiden Klimaschutzszenarien bis 2050 wenigstens eine Annäherung an die Werte der Standardszenarien (mit Beginn 2020) gelingen kann.

Kombination Sanierungsrate 1% mit Beginn Klimaschutz 2030

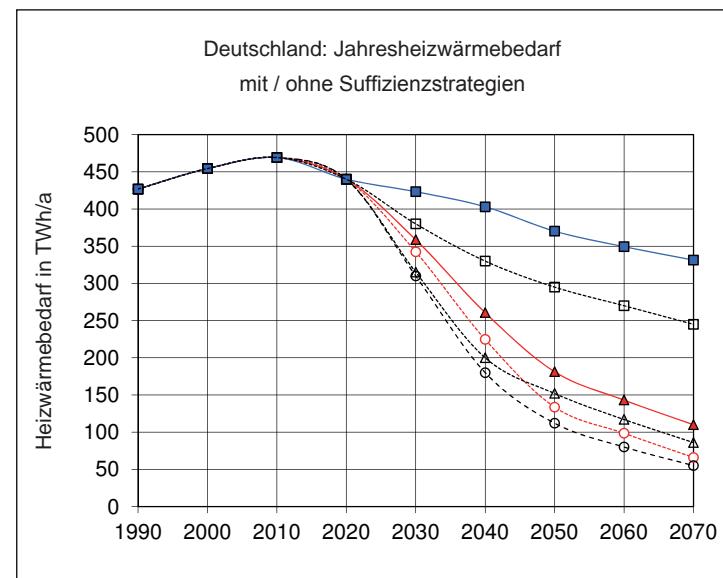
Zusätzlich wurde eine Kombination der beiden zuvor betrachteten pessimistischen Entwicklungen modelliert. Die Konsequenzen für die Klimaschutzszenarien sind sehr groß, denn die Ergebnisse liegen näher an denen des Standard-Referenz-Szenarios als an denen der Standard-Klimaschutz-Szenarien. Im Jahr 2050 liegt der Heizwärmebedarf des Kombinations-Referenz-Szenarios mit 405 TWh/a um 9,5 % höher als im Standardzenario. Im Kombinations-Klimaschutz-Szenario ist dieser Wert mit ca. 305 TWh/a um 170% und im Klimaschutz-Plus-Szenario mit ca. 295 TWh/a sogar um 225 % höher als in den Standardszenarien. Eine künftige Entwicklung des „Weiter-so“ in Form einer nur halbherzigen Umsetzung würde trotz des Einsatzes hoher Qualitäten die für einen wirksamen Klimaschutz notwendigen Effizienzsteigerungen verhindern.

Konsequenter Einsatz von Suffizienzmaßnahmen

Ein optimistischer Ausblick bezieht konsequent Suffizienzmaßnahmen in seine Überlegungen mit ein. Dabei wird unterstellt, dass die mittleren Raumtemperaturen um 2 Kelvin gegenüber den Standardannahmen abgesenkt werden. Dies ist mit Komforteinbußen verbunden, die jedoch mit einer angepassten Kleidung mit einfachen Mitteln ausgeglichen werden kann. Dies setzt jedoch eine Änderung der Wohngewohnheiten gerade in der jüngeren Bevölkerung voraus. Bei Gebäuden mit hohem energetischen Standard (Neubau mit Passivhäusern, energetische Modernisierung im EnerPhit-Standard) liegen dann die Raumtemperaturen im Bereich um 20 °C und damit sogar über dem Wert der gesetzlichen Rechenverfahren (19 °C). Die Auswirkungen (Abb. 8.15) sind besonders im Referenzszenario sehr ausgeprägt. Mit einem Wert von etwas unter 295 TWh/a im Jahr 2050 kann eine Reduktion gegenüber den Standardannahmen von 20 % erzielt werden. In beiden Klimaschutzszenarien sind die erzielbaren Minderungen jedoch etwas geringer und betragen im Jahr 2050 ca. 16%. Diese Maßnahme hat eine potenziell hohe strategische Bedeutung weil sie – eine entsprechende Bereitschaft der Bevölkerung vorausgesetzt – sofort wirksam werden könnte, was gerade in der schwierigen Anfangsphase wichtig wäre. Sie ist allerdings nicht in der Lage, langfristig die unzureichende Effizienzfortschritte im Referenzszenario auszugleichen.

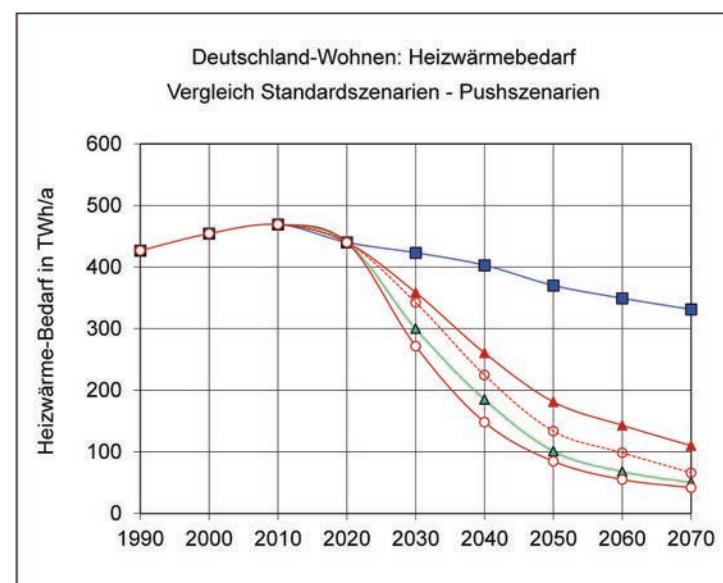
Forcierter technologischer Fortschritt (Pushszenarien)

In einem weiteren Szenario wurde untersucht, welche weiteren Effizienzsteigerungen mit einem forcierten technologischen Fortschritt erzielt werden könnten (Abb. 8.16). Die Annahmen sind in Tabelle 11.1 genauer dargestellt. Grundlage ist ein zügiger Einsatz der heute marktbesten Komponenten und entsprechender künftiger Neu- und Weiterentwicklungen. Die Heizwärmebedarf kann dadurch bis 2050 gegenüber dem Klimaschutz-Plus-Szenario nochmals um 25 % abgesenkt werden. Kommen zusätzlich die o.g. Suffizienzmaßnahmen zum Einsatz steigt dieser Wert sogar auf 33 % an.



- Klimaschutz-Plus
- Klimaschutz-Plus-Suffizienz
- ▲— Klimaschutz
- △··· Klimaschutz-Suffizienz
- Referenz
- Referenz-Suffizienz

Abbildung 8.15:
Entwicklung des Jahresheizwärmebedarfs im Referenz-, Klimaschutz- und Klimaschutz-Plus-Szenario mit und ohne Suffizienzmaßnahmen.

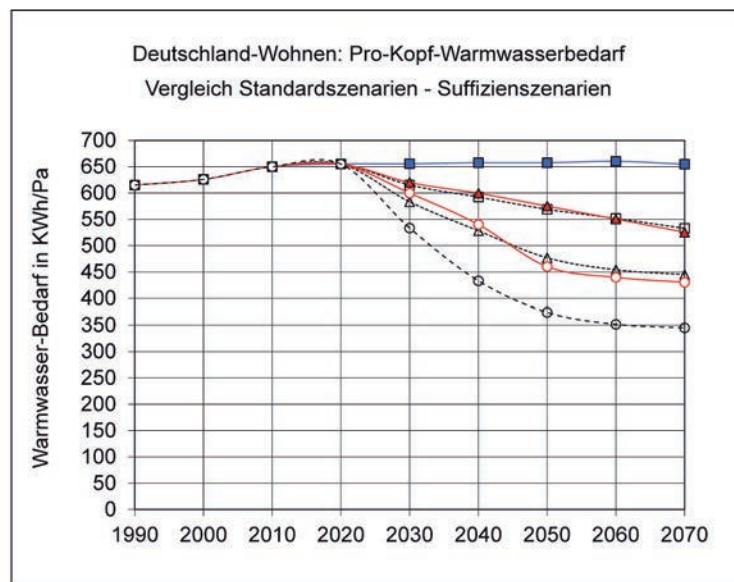


- Referenz
- ▲— Klimaschutz
- Klimaschutz-Plus
- ▲— Klimaschutz-Push
- Klimaschutz-Suffizienz-Push
- Klimaneutral 2050

Abbildung 8.16:
Entwicklung des Jahresheizwärmebedarfs im Referenz-, Klimaschutz- und Klimaschutz-Plus-Szenario. Bei letzterem wurde zusätzlich eine Variante mit einem forcierten technologischen Fortschritt und eine weitere Variante, die dann auch noch Suffizienzstrategien umfasst, modelliert.

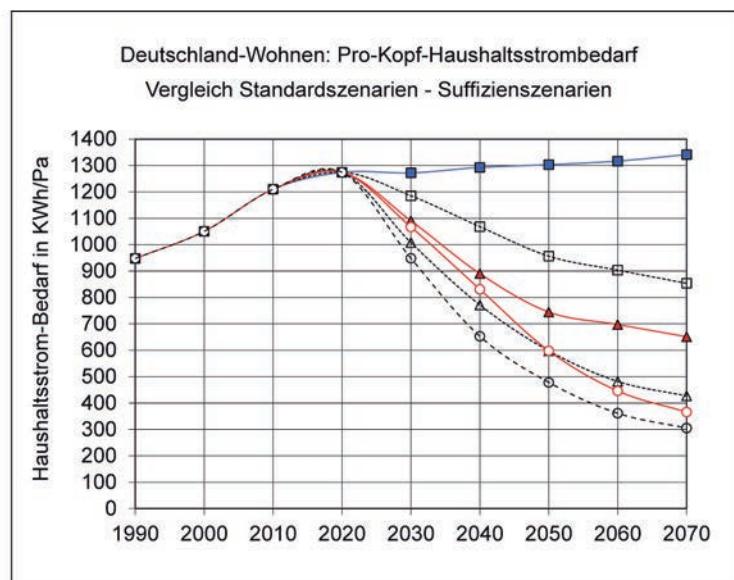
- Klimaschutz-Plus
- Klimaschutz-Plus-Suffizienz
- ▲- Klimaschutz
- △- Klimaschutz-Suffizienz
- Referenz
- Referenz-Suffizienz

Abbildung 8.17:
Entwicklung des spezifischen Pro-Kopf-Nutzwärmebedarfs für Warmwasser der drei Hauptzenarien in kWh/Pa im Zeitraum 1990 - 2070 als Vergleich zwischen den Standardannahmen und den Annahmen der Suffizienzszenarien .



- Klimaschutz-Plus
- Klimaschutz-Plus-Suffizienz
- ▲- Klimaschutz
- △- Klimaschutz-Suffizienz
- Referenz
- Referenz-Suffizienz

Abbildung 8.18:
Entwicklung des spezifischen Pro-Kopf-Nutzwärmebedarfs für Haushaltsstrom der drei Hauptzenarien in kWh/Pa im Zeitraum 1990 - 2070 als Vergleich zwischen den Standardannahmen und den Annahmen der Suffizienzszenarien .



7.6 Entwicklung des weiteren Nutzenergiebedarfs (Warmwasser, Stromanwendungen) in den Suffizienzszenarien

In den Suffizienzszenarien wurde nicht nur ein Komfortverzicht im Bereich der thermischen Behaglichkeit (Raumwärmebedarf) sondern auch bei den Warmwasser- und Stromanwendungen unterstellt. Damit wird der gesamte Bereich eines energiesparenden Verhaltens der Bewohner abgedeckt (vgl. UBA 2018). Konkret werden in den Suffizienzszenarien folgende Annahmen gegenüber den Standardszenarien verändert:

- Der spezifische Warmwasserverbrauch wird gegenüber den Annahmen in den Standardszenarien um 20 % reduziert. Dies erfolgt z.B. durch kürzere Duschdauern und/ oder seltener Badewannennutzung sowie nur Kaltwasser Nutzung in den WCs und effiziente Warmwassernutzungen in den Küchen und Hauswirtschaftsräumen.
- Reduzierung der Elektroausstattungen in den Wohnungen (Einfrieren der Ausstattungstiefe in den Haushalten auf dem Stand von 2020) und zeitliche Beschränkungen bei den Nutzungen der Elektrogeräten.

Hinsichtlich des Warmwasserbedarfs ist der Suffizienzansatz durchaus wirksam. Damit kann im Referenzszenario ein ähnliche Minderung, wie durch die Effizienzverbesserungen im Klimaschutzszenario (bis 2050: - 13%) erreicht werden. Sogar etwas größer ist dieser Effekt im Klimaschutz-Szenario (bis 2050: - 17%) und im Klimaschutz-Plus-Szenario (bis 2050: - 19 %). Es spricht daher vieles dafür Effizienz- und Suffizienzmaßnahmen zu kombinieren.

Beim Haushaltsstrombedarf lässt sich ein ähnlicher Effekt nachweisen. Im Referenzszenario gelingt es somit, wenigstens den Anstieg der Bedarfswerte zu stoppen, während im Klimaschutz-Szenario bis 2050 damit exakt der Bedarfswert des Klimaschutz-Plus-Szenarios erreicht werden kann sowie im Klimaschutz-Plus-Szenario der Stromkennwert für Haushaltsgeräte bis 2050 nochmals um 20 % geringer ausfällt.

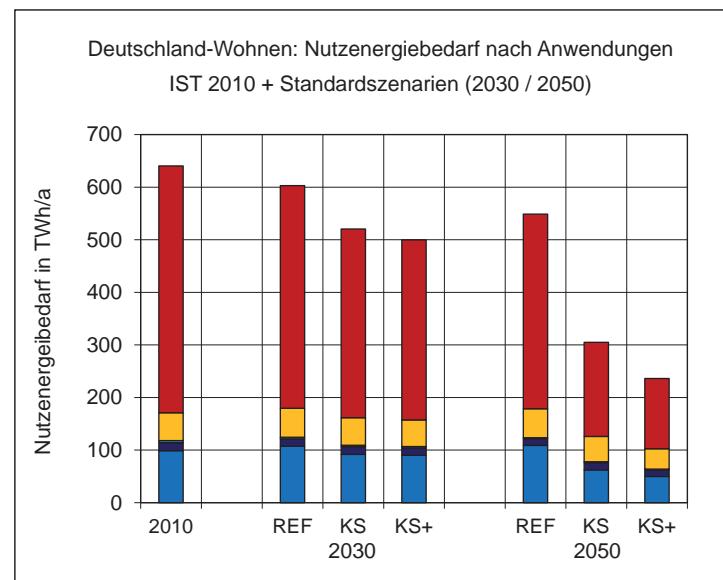
7.7 Nutzenergiebedarf in den Szenarienfamilien

Im Vorgriff auf die Vorstellung und Analyse der Ergebnisse der Szenarienfamilien in Kapitel 11 werden hier die Entwicklung der Nutzenergie-Bedarfswerte für das Jahr 2010 – Bestimmung des Ausgangszustands (in allen Szenarien gleich) – und für die Jahre 2030 und 2050 getrennt nach Anwendungen ausgewiesen und diskutiert. Dabei wird deutlich, wie sich einerseits die unterschiedlichen Effizienzstandards, wie sie im Referenz-, Klimaschutz und Klimaschutz-Plus-Szenario hinterlegt sind, und andererseits die sonstigen Randbedingungen auf den Nutzenergiebedarf im Wohnungsbau auswirken. Dadurch können erste Rückschlüsse auf die konkrete Umsetzung mit ihren Potenzialen und Schwierigkeiten gezogen werden.

Standard (Abb. 8.19)

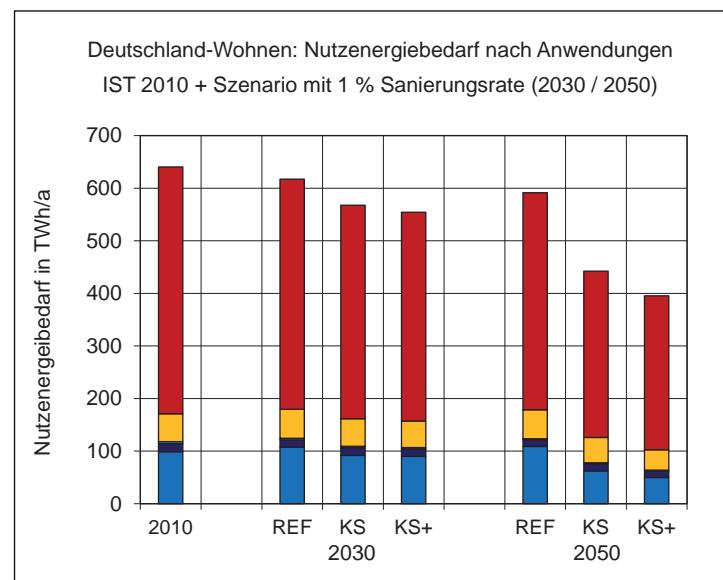
Die Standardannahmen bilden den Bezugspunkt für die folgenden Vergleiche und sind daher genauer zu analysieren. Im Ausgangszustand dominiert eindeutig der Raumwärmebedarf mit 75 % (469 TWh/a). Es folgt der Haushaltsstrombedarf mit 15 % (99 TWh/a) und der Warmwasserbedarf (8%) 53 TWh/a. Der Bedarf für Hilfsstrom (2%) und für Kochen mit Gas (0,6%) sind hingegen untergeordnet.

Bis 2030 ergeben sich nur geringe Änderungen, jedoch sinken bereits die Bedarfswerte für die Klimaschutz-Szenarien gegenüber dem Referenzszenario. Bis 2050 entwickeln sich die Bedarfswerte dann deutlich auseinander. Im Referenzszenario ergeben sich in allen Anwendungsfeldern nur geringe Minderungen. Der Nutzenergiebedarf liegt 2050 immer noch bei ca. 549 TWh/a (82 % des Wertes von 2010). In den Klimaschutzszenarien sinken vor allem die Werte für Raumwärme und Haushaltsstrom, während die Effizienzfortschritte bei Warmwasser und Hilfsstrom geringer aus fallen. Im Klimaschutz-Szenario beträgt der Nutzenergiebedarf 2050 305 TWh/a (46% des Wertes von 2010) und im Klimaschutz-Plus-Szenario 236 TWh/a (35% des Wertes von 2010).



Raumwärme
Warmwasser
Gas für Kochen
Hilfsstrom
Haushaltsstrom

Abbildung 8.19:
Nutzenergiebedarf nach Anwendungen für das Ausgangsjahr 2010 und für 2030 sowie 2050 für das Referenz-Szenario (REF), Klimaschutz-Szenario (KS) und das Klimaschutz-Plus-Szenario (KS+). Dargestellt sind die Ergebnisse für die Standardszenarien.

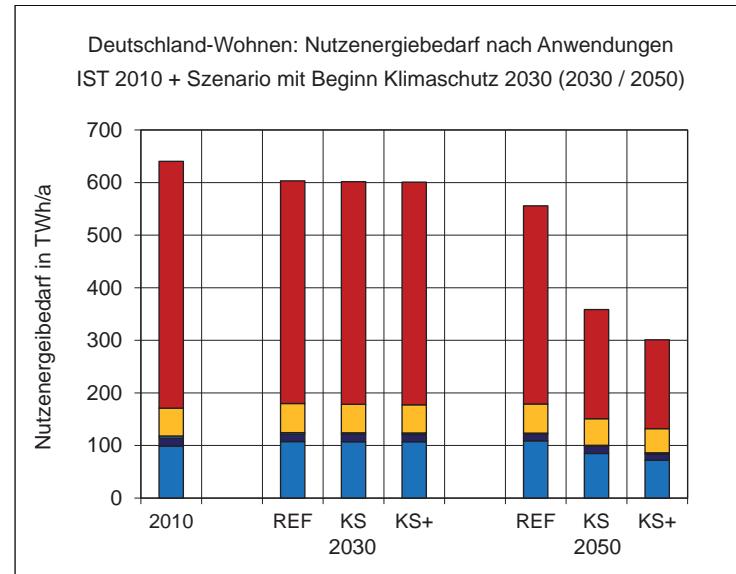


Raumwärme
Warmwasser
Gas für Kochen
Hilfsstrom
Haushaltsstrom

Abbildung 8.20:
Nutzenergiebedarf nach Anwendungen für das Ausgangsjahr 2010 und für 2030 sowie 2050 für das Referenz-Szenario (REF), Klimaschutz-Szenario (KS) und das Klimaschutz-Plus-Szenario (KS+). Dargestellt sind die Ergebnisse für die Szenarien mit 1 % Sanierungsrate.

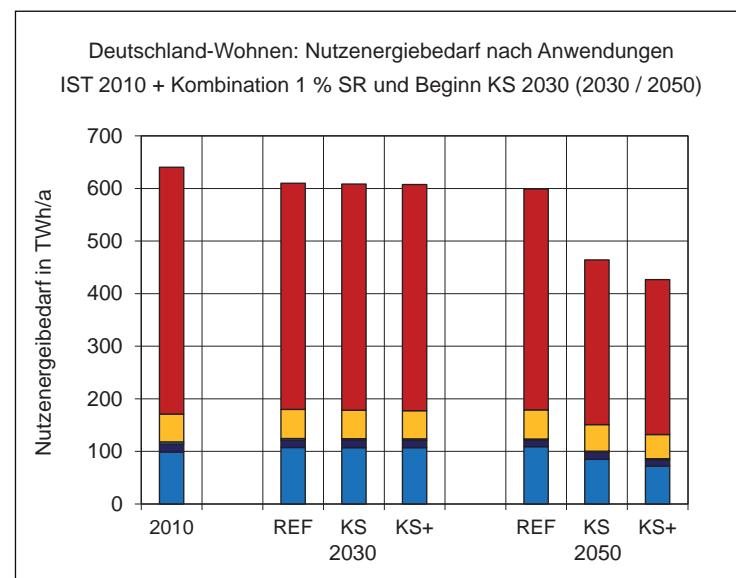
- Raumwärme
- Warmwasser
- Gas für Kochen
- Hilfsstrom
- Haushaltstrom

Abbildung 8.21:
Nutzenergiebedarf nach Anwendungen für das Ausgangsjahr 2010 und für 2030 sowie 2050 für das Referenz-Szenario (REF), Klimaschutz-Szenario (KS) und das Klimaschutz-Plus-Szenario (KS+). Dargestellt sind die Ergebnisse für die Szenarien mit Beginn Klimaschutz im Jahr 2030.



- Raumwärme
- Warmwasser
- Gas für Kochen
- Hilfsstrom
- Haushaltstrom

Abbildung 8.22:
Nutzenergiebedarf nach Anwendungen für das Ausgangsjahr 2010 und für 2030 sowie 2050 für das Referenz-Szenario (REF), Klimaschutz-Szenario (KS) und das Klimaschutz-Plus-Szenario (KS+). Dargestellt sind die Ergebnisse für die Szenarien mit Kombination 1 % Sanierungsrate und Beginn Klimaschutz 2030.



1% - Sanierungsrate (Abb. 8.20)

In dieser Szenarienfamilie beträgt die Sanierungsrate durchgängig nur 1 % (statt der ca. 2 % in den Standardszenarien). Die Konsequenzen werden im Vergleich zwischen Abbildung 8.19 zu 8.20 deutlich. Im Vergleich zu den Standardszenarien sinken die Effizienzverbesserungen im Klimaschutz-Szenario auf 66% (442 TWh/a) und im Klimaschutz-Plus-Szenario auf 59% (395 TWh/a). Zu beachten ist, dass die Auswirkungen ausschließlich den Raumwärmebedarf betreffen.

Beginn Klimaschutz 2030 (Abb. 8.21)

Wird der Beginn der gebäudebezogenen Klimaschutzmaßnahmen auf 2030 verschoben ergeben sich 2030 so gut wie keine Unterschiede zwischen den Szenarien. Im Jahr 2050 liegen dann erwartungsgemäß die Werte in den Klimaschutzszenarien spürbar über denen der Standardszenarien. Hier betreffen die zeitliche Verzögerungen alle Anwendungsfelder. Im Jahr 2050 liegen die Nutzenergiebedarfswerte im Referenzszenario bei 556 TWh/a (83% des Wertes von 2010), im Klimaschutz-Szenario bei 359 TWh/a (54% des Wertes von 2010) und im Klimaschutz-Plus-Szenario bei 301 TWh/a (45 % des Wertes von 2010).

Kombination 1% - Sanierungsrate mit Beginn Klimaschutz 2030 (Abb. 8.22)

Das Szenario, das mit einem konsequenten „Weiter-So“ eine pessimistische Einschätzung der künftigen Entwicklung gibt, kombiniert 1 % Sanierungsrate mit dem Beginn des gebäudebezogenen Klimaschutzes 2030. Unter diesen Randbedingungen findet im Referenzszenario kaum noch eine Effizienzverbesserung statt. In den Klimaschutzszenarien wird der Effizienzfortschritt damit gegenüber den Standardannahmen in etwa halbiert. Der Nutzenergiebedarf im Jahr 2050 beträgt im Klimaschutz-Kombinations-Szenario 464 TWh/a (73 % des Wertes von 2010) und im entsprechenden Klimaschutz-Plus-Szenario 427 TWh/a (67 % des Wertes von 2010). Hier wird deutlich, wie wichtig neben dem Einsatz hochwertiger energeti-

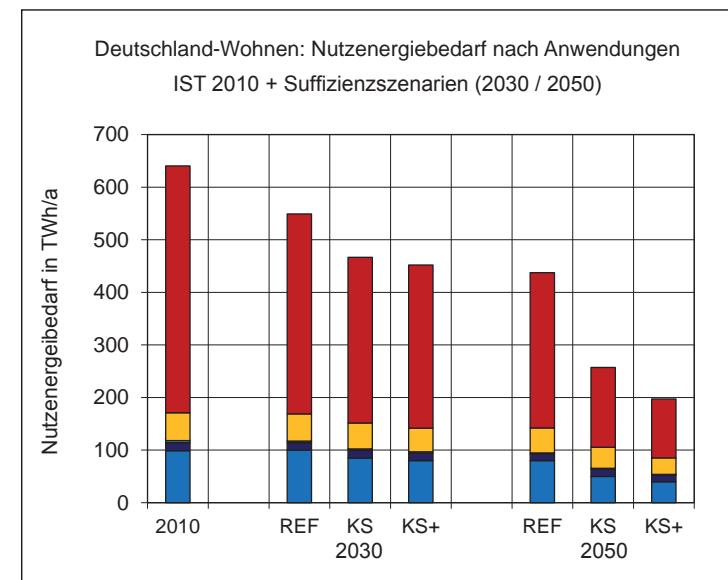
tischer Komponenten auch die Umsetzungsgeschwindigkeit und -tiefe für die Effizienzstrategie insgesamt ist.

Konsequenter Einsatz von Suffizienzmaßnahmen

In dieser Szenarienfamilie (Abb. 8.23) wird abgeschätzt, welche Nutzenergiereduktionen durch ein klimagerechtes Verhalten erschlossen werden können (Verzicht auf Wohnflächenwachstum, geringere mittlere Raumtemperatur, geringerer Warmwasserbedarf, reduziertes Wachstum der Stromausstattungen und deren Nutzungsdauern). Bei konsequenter Umsetzung ergeben sich bereits 2030 in allen Szenarien eine spürbare Reduktion der Nutzenergie-Bedarfswerte. Wird dies bis 2050 fortgesetzt, so sinken die Werte im Referenzszenario bis dahin auf 466 TWh/a (73% des Ausgangswertes im Jahr 2010), im Klimaschutz-Szenario auf 270 TWh/a (42%) und im Klimaschutz-Plus-Szenario auf 207 TWh/a (32%). Die Bedeutung der Suffizienzmaßnahmen liegt in deren sofortigen Umsetzbarkeit und darin, dass sie den konsumbedingten Anstieg der Mengenkomponenten etwas entgegensetzen können.

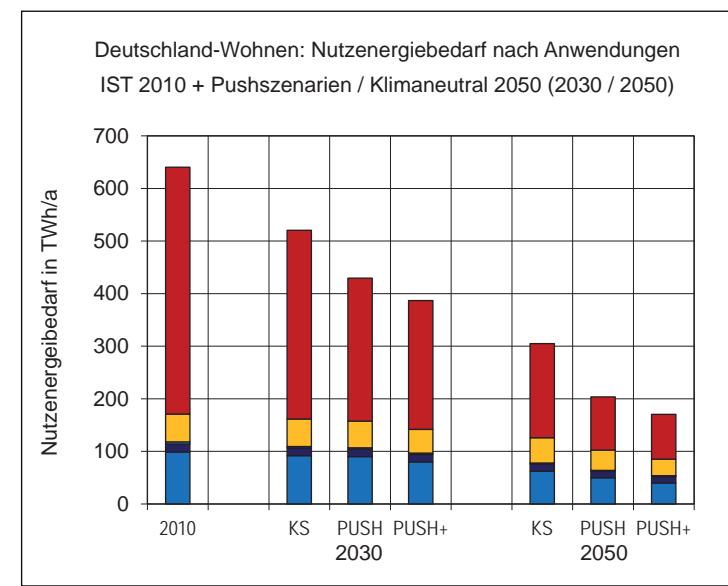
Forcierter technologischer Fortschritt (Push-Szenarien)

In diesem Szenario (Abb. 8.24) wird ausgelotet, wie sich ein forciert technologischer Fortschritt, der noch über das Klimaschutz-Plus-Szenario hinausgeht und mit einer möglichst knappen Übergangsphase in der Breite startet, auswirken würde. Im Push-Szenario ergeben sich dadurch nochmals geringere Nutzenergie-Bedarfswerte, die dort im Jahr 2050 mit 203,5 TWh/a nur noch 32 % des Ausgangswertes im Jahr 2010 entsprechen. Im Push-Plus-Szenario werden zusätzlich auch die Maßnahmen des Suffizienzszenarios umgesetzt. Dadurch sinkt der Nutzenergiebedarf bis 2050 auf dann noch 170 TWh/a (27%). Beide Szenarien geben einen optimistischen Ausblick und nutzen alle Möglichkeiten der Bedarfsreduzierung, die aus heutiger Sicht zum Einsatz kommen können. Das setzt allerdings die Bereitschaft einer breiten Mehrheit aller Akteure voraus, diese Potenziale immer dann zu nutzen, wenn sich Gelegenheiten dafür ergeben.



- Raumwärme
- Warmwasser
- Gas für Kochen
- Hilfsstrom
- Haushaltstrom

Abbildung 8.23:
Nutzenergiebedarf nach Anwendungen für das Ausgangsjahr 2010 und für 2030 sowie 2050 für das Referenz-Szenario (REF), Klimaschutz-Szenario (KS) und das Klimaschutz-Plus-Szenario (KS+). Dargestellt sind die Ergebnisse für die Suffizienzzenarien.



- Raumwärme
- Warmwasser
- Gas für Kochen
- Hilfsstrom
- Haushaltstrom

Abbildung 8.24:
Nutzenergiebedarf nach Anwendungen für das Ausgangsjahr 2010 und für 2030 sowie 2050 für das Klimaschutz-Szenario (KS) und das Push-Szenario (PUSH) sowie das Push-Szenario mit Suffizienzmaßnahmen (PUSH+).

8 Entwicklung Endenergiebedarf 1990 - 2070

An der Entwicklung des gesamten Endenergiebedarfs wird deutlich, welche Effizienzfortschritte beim Energieeinsatz insgesamt und in den verschiedenen Handlungsfeldern innerhalb des Betrachtungszeitraums bis 2050 bzw. 2070 erreicht werden können. Wird der Endenergiebedarf getrennt nach Energiträgern aufgeschlüsselt kann zudem bewertet werden, in welchem Tempo sich die Heizsysteme weg von einer fossilen hin zu erneuerbaren WärmeverSORGUNG entwickeln.

Erkennbar ist zunächst, dass eine schnelle Verringerung des Endenergieeinsatzes bis 2030 nicht erwartet werden kann. Grund ist die große Trägheit des Gebäudeparks als Energiesystem. Somit kommt es darauf an, die sich bietenden Gelegenheiten konsequent für den Einsatz hoher Qualitäten zu nutzen, wie dies in den Klimaschutzszenarien der Fall ist. Auf längere Sicht ist dann sehr wohl eine durchgreifende Effizienzsteigerung im Wohngebäudepark erreichbar. Dies stellt im Übrigen auch die Voraussetzung für eine künftige Versorgung Deutschlands mit erneuerbaren Energien dar. Deren Ausbau kann vor allem im Zuge eines ohnehin anstehenden Kessel austausches bzw. im Neubau erfolgen. Biomasse ist einerseits eine begrenzte Ressource, deren energetische Nutzung in Konkurrenz zu einer stofflichen Nutzung steht. Dies spielt dann bei der Frage des Ausbaus von CO₂-Senken eine große Rolle. Der eher langsame Prozess hilft aber auch, die dafür notwendige Umstellung der Energieversorgungssysteme ohne abrupte Systembrüche durchführen zu können.

Werden, wie im Referenzszenario, nur mittlere Qualitäten gewählt, bleiben die Bedarfswerte auch längerfristig auf einem hohen Niveau. Sie stellen, weil dies zu spät – ab etwa 2030/2040 – erkannt wird, dann ein bedeutendes Hemmnis für das Erreichen der klimapolitischen Ziele im Gebäudebereich dar.

In Abbildung 8.1 ist der Verlauf des gesamten Endenergiebedarfs im Zeitraum 1990 - 2070 dargestellt. Von 1990 bis 2010 bleibt der gesamte Endenergieverbrauch mit Werten zwischen ca. 760 TWh/a und 750 TWh/a in etwa konstant. Im fiktiven Status-quo-Szenario steigen hingegen die Werte wegen der starken Zunahme der Wohnflächen kontinuierlich von ca. 760 bis 2010 auf 945 TWh/a und bis 2050 sogar auf 1050 TWh/a an. Im Referenzszenario ergibt sich eine zwar eine stetige jedoch nur geringe Minderung der Bedarfswerte, die im Jahr 2030 bei 640 TWh/a und im Jahr 2050 bei 560 TWh/a zu liegen kommen. Nur in den Klimaschutzszenarien kann eine deutliche Reduktion der gesamten Endenergie erreicht werden. Die Kennwerte betragen im Klimaschutz-Szenario ca. 550 TWh/a (2030) und ca. 290 TWh/a (2050) sowie im Klimaschutz-Plus-Szenario ca. 525 TWh/a (2030) und ca. 210 TWh/a (2050).

In Abbildung 8.2 ist der Endenergiebedarf nach Anwendungen im Jahr 2010 denjenigen im Jahr 2030 und 2050 gegenübergestellt. Im Jahr 2010 dominiert eindeutig der Raumwärmebedarf mit 74 % den Endenergiebedarf. Für die Verbesserung der Effizienz kommt es auf kombinierte Strategien im Gesamtbestand an, sowohl im Bereich der Gebäudehülle und der Lüftungskonzepte als auch bei der WärmeverSORGUNG (Erzeugung, Speicherung, Verteilung). Werden hierbei, wie dies im Referenzszenario der Fall ist, nur mittlere Qualitäten eingesetzt, gelingt es kaum, eine spürbare Reduzierung des Endenergiebedarfs in diesem zentralen Anwendungsfeld zu erreichen. Ausgehend von ca. 551,5 TWh/a liegen die Bedarfswerte hier im Jahr 2030 bei 433 TWh/a und im Jahr 2050 bei etwa 354 TWh/a. Durch den Einsatz höherer Qualitäten wie im Klimaschutz-Szenario, sinken diese Werte spürbar ab und betragen 2030 etwa 360 TWh/a und im Jahr 2050 ca. 142 TWh/a, was ca. 26 % des Wertes von 2010 entspricht. Unter den Bedingungen des Kli-

maschutz-Plus-Szenarios gelingt ein noch durchgreifenderer Minderungserfolg bei der Raumbeheizung des Gesamtbestandes. Die Werte sinken hier im Jahr 2030 auf 341 TWh/a und im Jahr 2050 sogar auf 98 TWh/a ab und betragen dann nur noch 18% des Wertes von 2010.

Für die Warmwasseranwendungen fallen die Effizienzverbesserungen im Vergleich geringer aus. Das liegt einerseits an den Hygienebestimmungen (z.B. Schutz vor Legionellen), die hohe Betriebstemperaturen oder aufwändige Verteilsysteme erfordern und andererseits an den steigenden Komfortansprüchen der Nutzer. Informativ seien auch hier die Werte 2030 und 2050 genannt. Ausgehend von ca. 75 TWh/a im Jahr 2010 sinken sie im Referenzszenario nur wenig auf 74 bzw. 68 TWh/a ab. Im Klimaschutz-Szenario liegen die Werte bei 70,5 und 48 TWh/a und schließlich im Klimaschutz-Plus-Szenario bei 67 und 36 TWh/a. Gerade im Bereich der Warmwasseranwendungen sind daher neue Effizienzstrategien (z.B. Duschwasser-Wärmerückgewinnung) von hohem Interesse. Diese kommen vor allem im Klimaschutz-Plus-Szenario zum Einsatz.

Bei den Stromanwendungen sind die Unterschiede zwischen den Szenarien ebenfalls groß. Im Referenzszenario steigen die Bedarfswerte von 99 TWh/a im Jahr 2010 auf 107 TWh/a 2030 bzw. 109 TWh/a im Jahr 2050 an. Hintergründe sind kleinere Haushaltsgrößen und neue Stromanwendungen in den Haushalten, die durch die zurückhaltenden Effizienzverbesserungen der Geräte und Ausstattungen nicht ausgeglichen werden können. In den Klimaschutzszenarien gelingt vor allem durch Effizienzsteigerungen bei Haushaltsgeräten, Beleuchtung und Kleinanwendungen (z.B. Stand-by- Funktionen, Kommunikationselektronik) aber auch durch Verbesserung der Nutzeffizienz (z.B. durch Bewegungsmelder, schaltbare Steckdosen und Zeitschaltuhren) eine deutliche Reduktion des Strombedarfs. Im Klimaschutz-Szenario liegen die Strombedarfswerte daher 2030 bei 92 TWh/a und 2050 bei 62,5 TWh/a. Bezieht man zusätzlich technologische Fortschritte mit ein, wie dies im

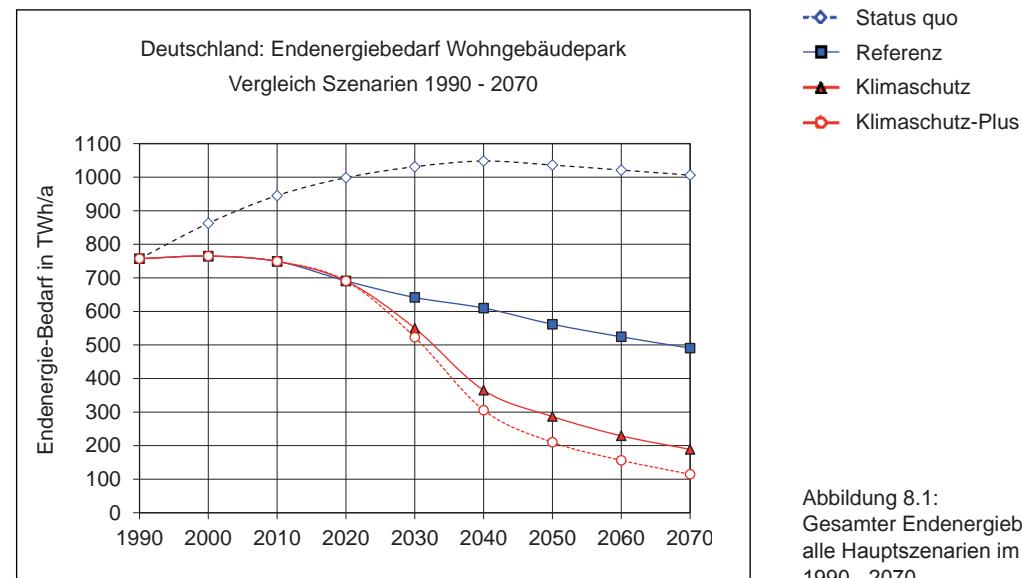


Abbildung 8.1:
Gesamter Endenergiebedarf für alle Hauptszenarien im Zeitraum 1990 - 2070

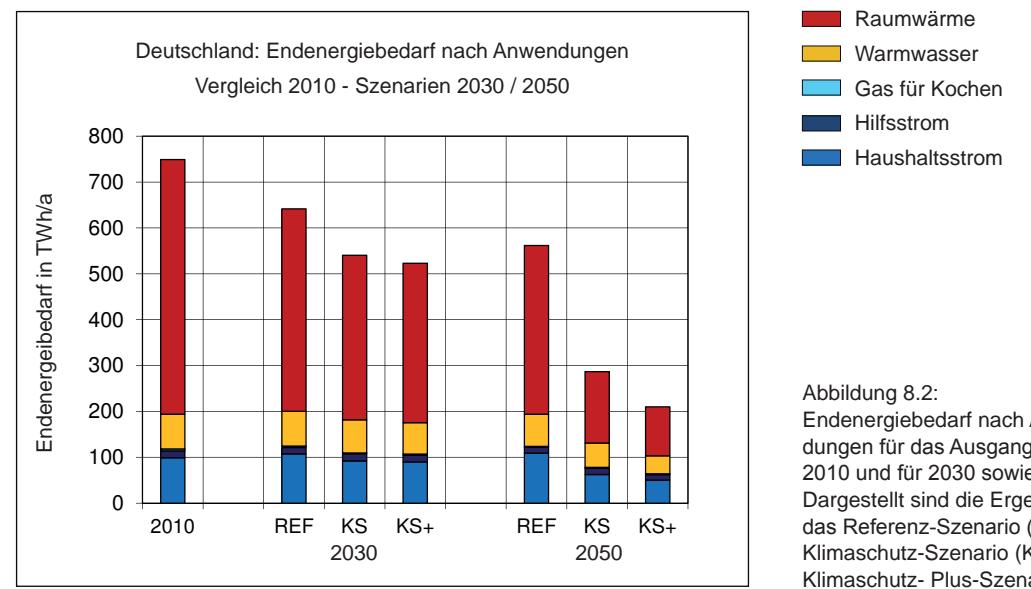
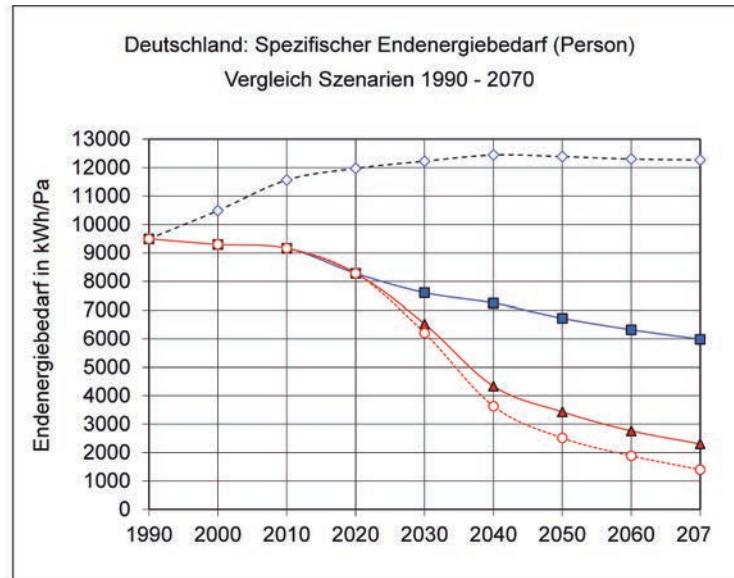


Abbildung 8.2:
Endenergiebedarf nach Anwendungen für das Ausgangsjahr 2010 und für 2030 sowie 2050. Dargestellt sind die Ergebnisse für das Referenz-Szenario (REF), das Klimaschutz-Szenario (KS) und das Klimaschutz-Plus-Szenario (KS+).

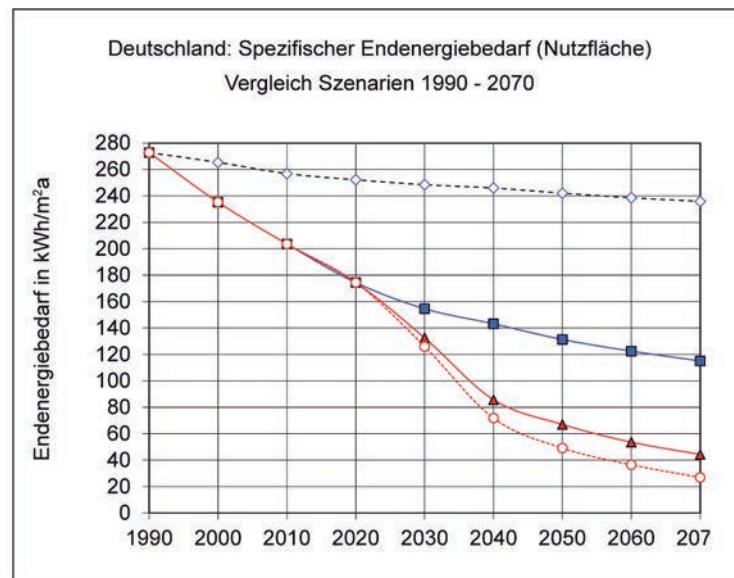
- Status quo
- Referenz
- ▲— Klimaschutz
- Klimaschutz-Plus

Abbildung 8.3:
Spezifischer Endenergiebedarf pro Person für die Hauptszenarien in kWh/Pa im Zeitraum 1990 - 2070.



- Status quo
- Referenz
- ▲— Klimaschutz
- Klimaschutz-Plus

Abbildung 8.4:
Spezifischer Endenergiebedarf pro Quadratmeter Nutzfläche (= Energiebezugsfläche) für die Hauptszenarien in kWh/m²a im Zeitraum 1990 - 2070.



Klimaschutz-Plus-Szenario der Fall ist, sinken die Strombedarfswerte nochmals weniger an. Sie betragen dann etwa 90 TWh/a im Jahr 2030 und 50 TWh/a im Jahr 2050.

In Abbildung 8.3 ist die Entwicklung des spezifischen Endenergiebedarfs pro Person und in Abbildung 8.4 je Quadratmeter Energiebezugsfläche für die vier Hauptszenarien dargestellt. Durch diesen Vergleich wird sichtbar, dass durch die Steigerung der spezifischen Wohnfläche Effizienzerfolge zu einem bestimmten Teil wieder rückgängig gemacht werden. Daher ist es unverzichtbar, zusätzlich zur Nutzfläche als Bezugsgröße die Person zu verwenden.

Bei Betrachtung der Endenergie getrennt nach Energieträgern (Abb. 8.5 a-d) wird deutlich, wie wichtig der Wandel der Strom- und Wärmeerzeugungsstruktur für den Erfolg der Effizienzstrategien insgesamt ist. Bei den Wärmeanwendungen weisen alle brennstoffgestützten Systeme (Heizöl-, Erdgas- und Biomasseheizungen) hohe Umwandlungs-, Speicher- und Verteilverluste auf. Der allmähliche Ausstieg aus den fossil gestützten Systemen führt daher neben dem entscheidenden Aspekt der Reduktion der Treibhausgase auch zu einem Absinken des relativen Endenergieeinsatzes je bereitgestellter Wärmeeinheit. Die Szenarien unterscheiden sich hier deutlich im Hinblick auf den möglichen Zeitpunkt eines Ausstiegs aus den fossilen Heizsystemen (zunächst Heizöl, später dann auch Erdgas). Während im Referenzszenario im Jahr 2050 mit 48 % immer noch fast die Hälfte der Endenergie in fossilen Heizsystemen verbraucht wird, sind dies im Klimaschutz-Szenario 24 % und im Klimaschutz-Plus-Szenario nur noch 13 %. Der Ausstieg aus den fossilen Heizsystemen gelingt im Betrachtungszeitraum nur in den Klimaschutz-Szenarien. Das ebenfalls wichtige Thema der Stromeffizienz führt nur bei konsequenter Verfolgung, wie in den Klimaschutzszenarien, am Ende auch zu geringeren Endenergiebedarfswerten. Auch hier spielt das Wechselspiel aus technologischen Verbesserungen, neuen Anwendungen und Änderungen im Konsumverhalten die wesentliche Rolle.

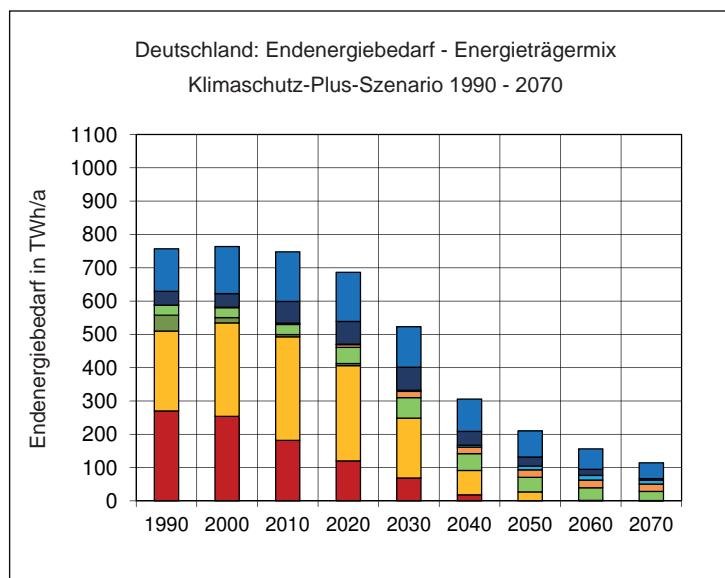
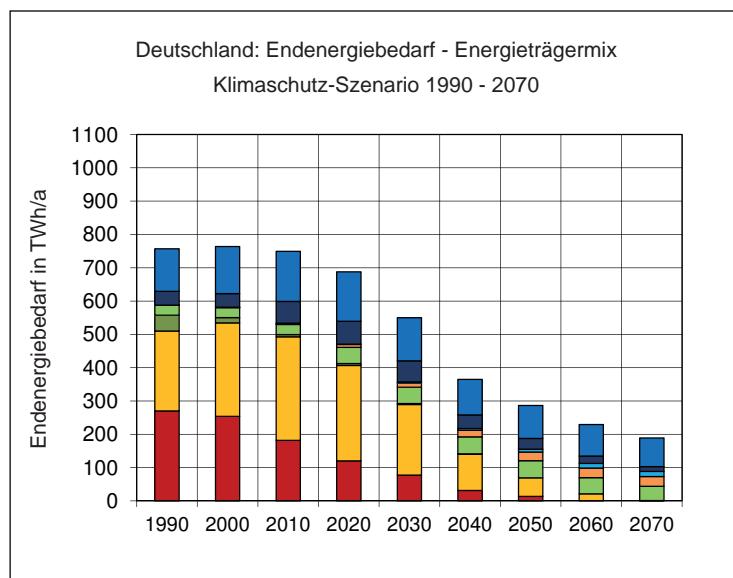
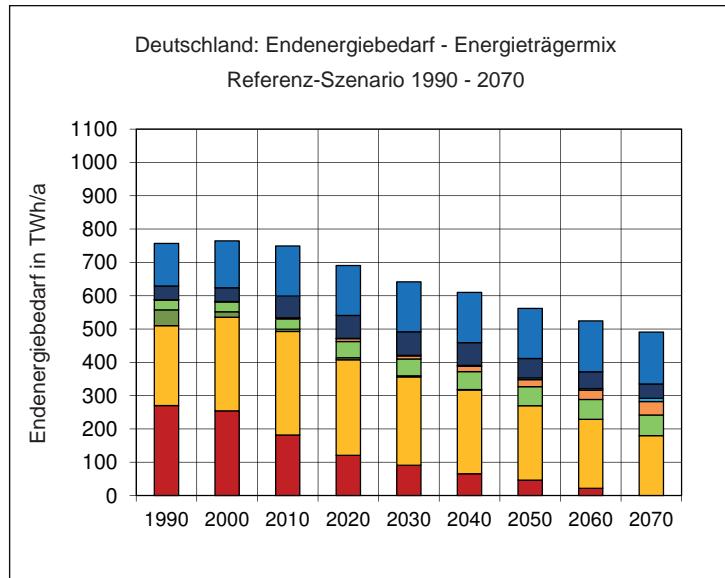
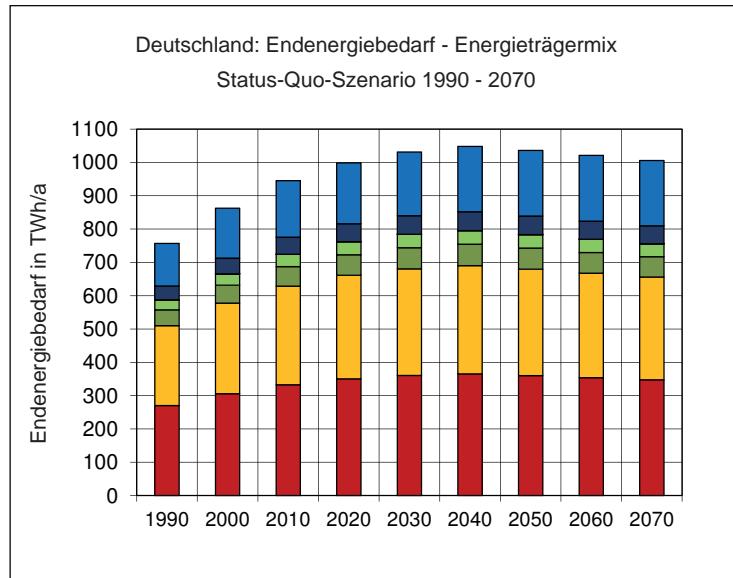


Abbildung 8.5 a-d:
Endenergiebedarf nach Energieträgern im Zeitraum 1990 - 2070.
Dargestellt sind die Ergebnisse für:
a) das Status-Quo-Szenario
b) das Referenz-Szenario
c) das Klimaschutz-Szenario
d) das Klimaschutz-Plus-Szenario

9 Entwicklung Primärenergiebedarf 1990 - 2070

Im Primärenergiebedarf werden die gesamten Energieaufwendungen der privaten Haushalte inklusive der vor- und nachgelagerten Energieketten (z.B. Exploration, Förderung, Transporte, Aufbereitung, Herstellung Kraftwerkspark bzw. Heizzentralen und Entsorgung) zusammengeführt. Dadurch ergibt sich ein zuverlässiger Maßstab für den energetischen Aufwand und seine Verbesserungen im Gesamtprozess hinsichtlich der Energieeffizienz sowie der Reduzierung der Umweltbelastungen, die allerdings je Energieträger separat zu bewerten sind.

In Abbildung 9.1 ist die gesamte Primärenergie (fossiler, nuklearer und erneuerbarer Anteil) zusammengeführt und für die vier Hauptszenerien im Zeitverlauf dargestellt. Im fiktiven Status-quo-Szenario findet eine starke Steigerung des Primärenergiebedarfs statt. Die Werte steigen in den Jahren 1990 bis 2040 von 1134 auf 1613 TWh/a um etwa 42 % an. Dass sie nicht noch weiter ansteigen liegt an den indirekten Effizienzverbesserungen durch Abgang und Ersatz durch deutlich effizientere Neubauten; ähnliches findet im Bereich der Warmwasser und Stromanwendungen statt.

Im Referenzszenario ist ein mittelmäßiger Effizienzerfolg feststellbar. Im Zeitraum 1990 - 2010 bleibt der gesamte Primärenergieverbrauch in etwa konstant. Die Werte sinken bis 2050 auf etwa 696 TWh/a ab, was einer Reduktion von gerade einmal 37 % gegenüber dem Stand 2010 entspricht. Nach 2050 sinkt der gesamte Primärenergiebedarf nur noch wenig.

Im Klimaschutz-Szenario wird bereits eine deutlich größere Minderung erzielt. Diese liegt 2030 mit 686 TWh/a bereits 38 % unter dem Wert von 2010. Auch danach sinken die Werte weiter ab. Die Reduktion beträgt 2050 mit 389 TWh/a dann 65 % und 2070 mit 266 TWh/a sogar 76 % niedriger. Nochmals

deutlicher fällt die Primärenergiereduktion im Klimaschutz-Plus-Szenario aus. Hier liegen die Werte mit 646 TWh/a im Jahr 2030 (-41 %) und 263 TWh/a im Jahr 2050 (-76%) sowie 150 TWh/a im Jahr 2070 (-86%) nochmals niedriger. Nur in den Klimaschutzszenarien findet somit eine substanzielle Verringerung des Primärenergieeinsatzes statt. Damit werden dort neben der Ressourceneffizienz auch die Voraussetzungen für einen hohen Anteil erneuerbarer Energieträger geschaffen.

Im Vergleich Primärenergie- zu Endenergieaufwand kann in erster Näherung der Aufwand für vorgelagerte Energieaufwendungen (z.B. Exploration, Förderung, Transport, Verarbeitung, Umwandlungs- und Leitungsverluste, Erstellung Kraftwerke und Verteilnetz) abgeschätzt werden. Weil bei der gesamten Primärenergie auch die erneuerbaren Anteile der Primärenergie mitbetrachtet werden, wird hierbei der Ressourcenaufwand zutreffend abgebildet. Im Jahr 2010 ist die gesamte Primärenergie um einen Faktor 1,47 höher als die Endenergie. Durch Effizienzverbesserungen und den verstärkten Einsatz erneuerbarer Energieträger reduziert sich dieser Wert im Referenz- und Klimaschutz-Szenario bis 2050 auf ca. 1,25 und im Klimaschutz-Plus-Szenario sogar auf 1,1.

In Abbildung 9.2 ist der Bedarf für die gesamte Primärenergie nach Anwendungen im Jahr 2010 denjenigen im Jahr 2030 und 2050 gegenübergestellt. Die Verteilung auf die verschiedenen Nutzungsarten ist ähnlich wie bei der Endenergie, auch hier dominiert im Jahr 2010 mit 661 TWh/a die Raumwärme (60,0 %) jedoch fällt der Anteil der Stromanwendungen (Haushalts- und Hilfsstrom) mit 325 TWh/a (29,6%) im Vergleich zur Endenergie deutlich höher aus, weil die Stromerzeugung mit höheren Umwandlungsverlusten je Energieeinheit erfolgt als bei der Wärmeerzeugung.

Im Referenzszenario ist im Jahr 2050 der Anteil der Raumwärme mit 434 TWh/a mit 62,4 % sogar höher als im Jahr 2010, während dieser im Klimaschutz-Szenario mit 185 TWh/a auf 49 % und im Klimaschutz-Plus-Szenario mit 121 TWh/a auf 46,5 % etwas gesunken ist. Der Anteil der Warmwasseranwendungen steigt hingegen in allen Szenarien von 9,7 % im Jahr auf 12,0 - 16,9 % im Jahr 2050. Bei den Stromanwendungen zeigt sich ein differenziertes Bild. Im Referenzszenario liegt der Anteil mit 175 TWh/a bei 25,2 %, während dieser im Klimaschutz-Szenario mit 126 TWh/a als Absolutbetrag geringer jedoch mit 33,5 % anteilig höher liegt als im Jahr 2010. Im Klimaschutz-Plus-Szenario verstärkt sich diese Tendenz mit 92 TWh/a und einem Anteil von 35,5 % noch etwas.

In Abbildung 9.3 sind die Pro-Kopf-Werte für die gesamte Primärenergie im Zeitraum 1990 - 2070 für die vier Hauptszenarien aufgetragen. Interessant ist in diesem Zusammenhang der Bezug zu den Zielen der 2000-Watt-Gesellschaft, einem gut etablierten Effizienzkonzept aus der Schweiz. Bei diesem wird ebenfalls die Person als Bezugsgröße verwendet. Dabei werden 2000 Watt als weltweiter Durchschnitt zum Maßstab für einen verträglichen Energieeinsatz definiert. Dahinter steht ein Gleichheitsgrundsatz, d.h. den Industrieländern steht kein höheres Energiebudget zu als Schwellen- oder Entwicklungsländern. Aus Klimaschutzgründen ist jedoch gleichzeitig darauf zu achten, dass der Anteil fossiler Energie gegenüber dem heutigen Stand stark reduziert werden muss. Ordnet man aus Gründen der Vereinfachung den privaten Haushalten ein Viertel, d.h. 500 Watt als weltweit verträgliche Dauerleistung pro Person zu, ergibt sich ein Zielwert von 4380 kWh/(Pa). Dieser ist als rote Linie in Abbildung 10.3 eingetragen. Er wird im Klimaschutz-Szenario ca. im Jahr 2055 und im Klimaschutz-Plus-Szenario im Jahr 2040 unterschritten. Im Referenzszenario liegt dieses Ziel, wenn es überhaupt jemals erreicht werden kann, in zeitlich weiter Ferne. Hier wird im Jahr 2050 mit 8330 kWh/(Pa) der Grenzwert um einen Faktor 1,9 überschritten und sinkt in den folgenden zwei Jahrzehnten kaum noch ab.

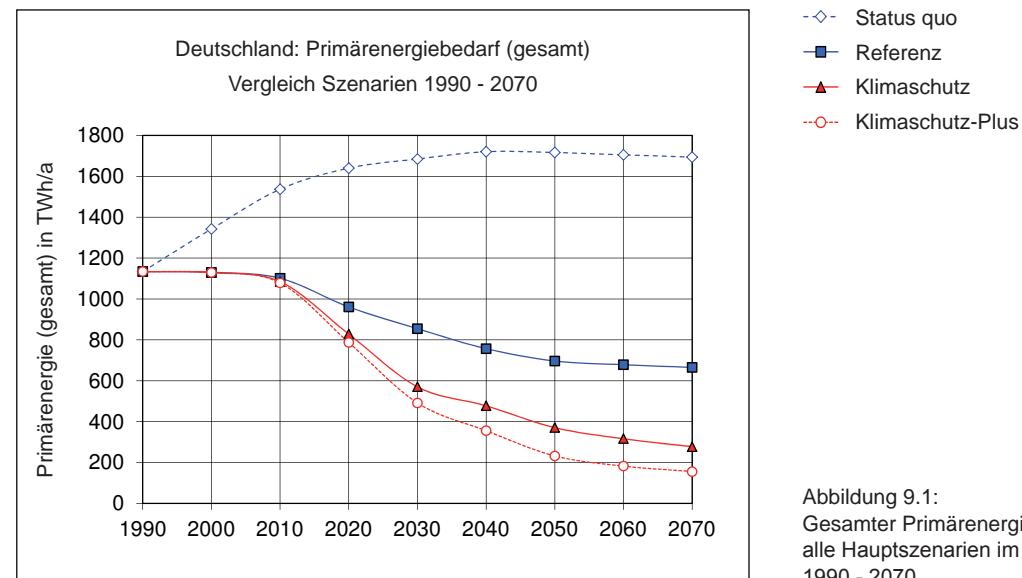


Abbildung 9.1:
Gesamter Primärenergiebedarf für
alle Hauptszenarien im Zeitraum
1990 - 2070

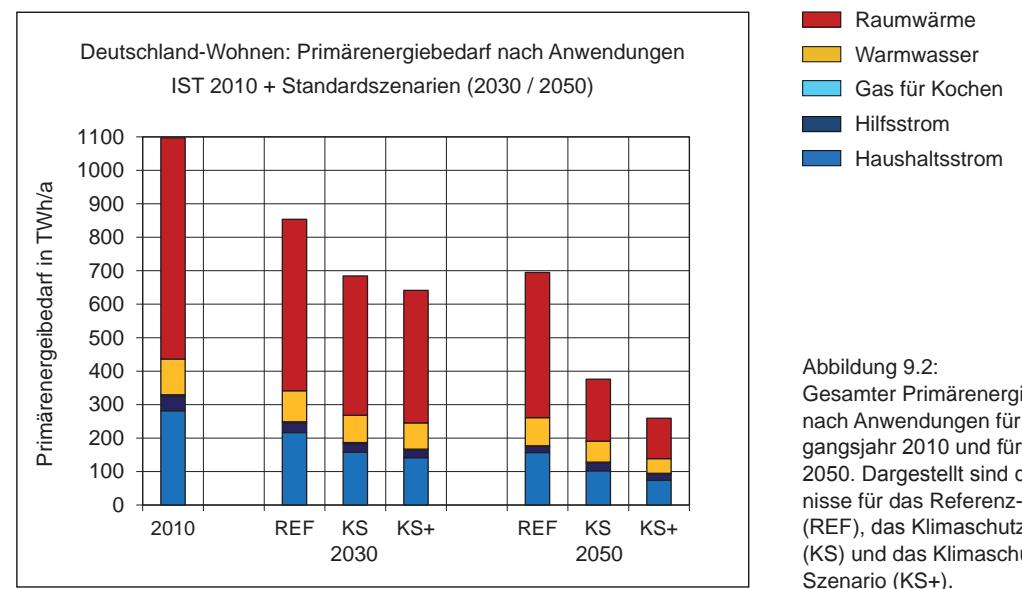
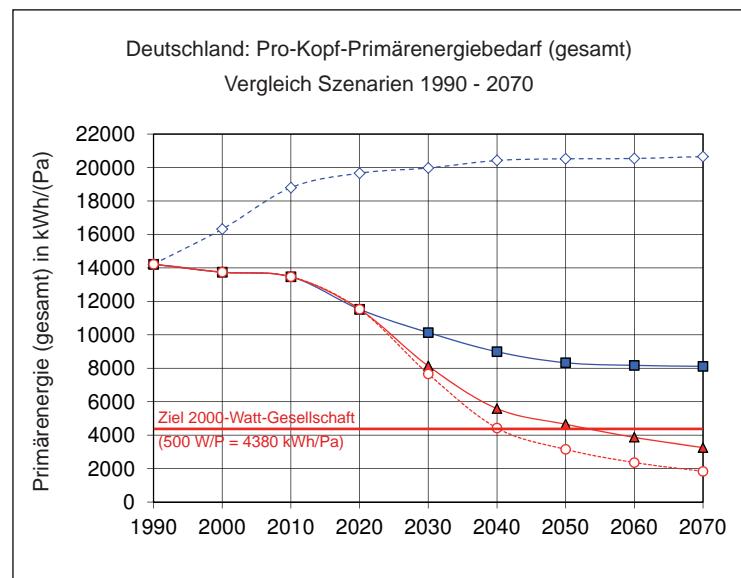


Abbildung 9.2:
Gesamter Primärenergiebedarf
nach Anwendungen für das Aus-
gangsjahr 2010 und für 2030 sowie
2050. Dargestellt sind die Ergeb-
nisse für das Referenz-Szenario
(REF), das Klimaschutz-Szenario
(KS) und das Klimaschutz-
Plus-Szenario (KS+).

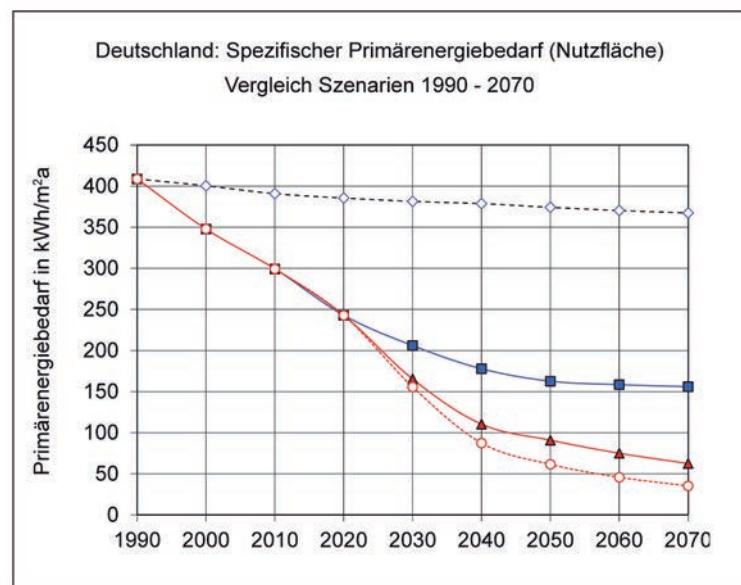
- ◊- Status quo
- ■- Referenz
- ▲- Klimaschutz
- ○- Klimaschutz-Plus

Abbildung 9.3:
Spezifischer Primärenergiebedarf
pro Person für die Hauptszenarien
in kWh/Pa im Zeitraum 1990 -



- ◊- Status quo
- ■- Referenz
- ▲- Klimaschutz
- ○- Klimaschutz-Plus

Abbildung 9.4:
Spezifischer Primärenergiebedarf
pro Quadratmeter Nutzfläche
(= Energiebezugsfläche) für die
Hauptszenarien in kWh/m²a im
Zeitraum 1990 - 2070.



In Abbildung 9.4 ist schließlich der Primärenergiebedarf auf die Nutzfläche (= Energiebezugsfläche) der Wohngebäude bezogen. Dieser sinkt im Zeitraum 1990 - 2010 nahezu linear von 409 auf 299 TWh/m²a ab. Unter den Bedingungen des Referenzszenarios liegt der flächenspezifische Primärenergiebedarf im Jahr 2050 dann bei 163 kWh/m²a, sinkt danach jedoch kaum noch weiter ab. Im Klimaschutz-Szenario sinkt dieser Kennwert auf 91 kWh/m²a und im Klimaschutz-Plus-Szenario auf 61,5 kWh/m²a. In beiden Klimaschutzszenarien sinken die Werte auch danach weiter ab, jedoch in reduziertem Tempo.

Schließlich wird in Abbildung 9.5 (a-d) der gesamte Primärenergiebedarf aufgeschlüsselt nach Energieträgern für die vier Hauptszenarien dargestellt. Im Vergleich zur analogen Auswertung der Endenergiebilanz (siehe Abb. 8.5 a-d) sind die Verläufe und Verteilungen ähnlich, jedoch ist der Primärenergieeinsatz insbesondere für die Stromerzeugung höher. Indirekt wird daran sichtbar, dass Wärme und Strom unterschiedliche energetische Wertigkeiten aufweisen. Dieser Effekt wird jedoch im Betrachtungszeitraum immer geringer, weil der Anteil der nicht brennstoffgestützten erneuerbaren Energieträger, wie Wasserkraft und Windkraft oder Photovoltaik immer mehr zunimmt. Weil diese gemäß der 100%-Methode ohne Wirkungsgradverluste gerechnet werden, sinkt entsprechend der Primärenergiebedarf auch wegen dieser definitorischen Festlegung ab. In den Klimaschutzszenarien nähern sich Brennstoff- und Stromeinsatz immer stärker an. Eine erneuerbare Energieversorgung ist viel weniger auf Brennstoffe gestützt, als die heutige. Das gilt sowohl für die Wärme- als auch die Stromerzeugung.

Die gesamte Primärenergie ist nicht zuletzt der aussagekräftigste Einzelindikator für den energetischen Ressourcenaufwand und die Effizienzverbesserungen: Im Referenzszenario kann im Zeitraum 2010 - 2050 der Primärenergieeinsatz für das Wohnen um einen Faktor 1,6 gesenkt werden, im Klimaschutz-Szenario beträgt dieser bereits 2,8 und im Klimaschutz-Plus-Szenario 4,2.

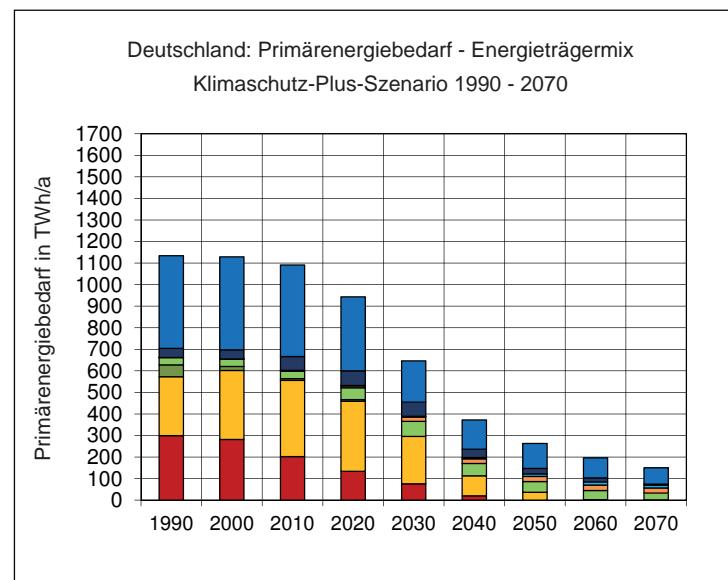
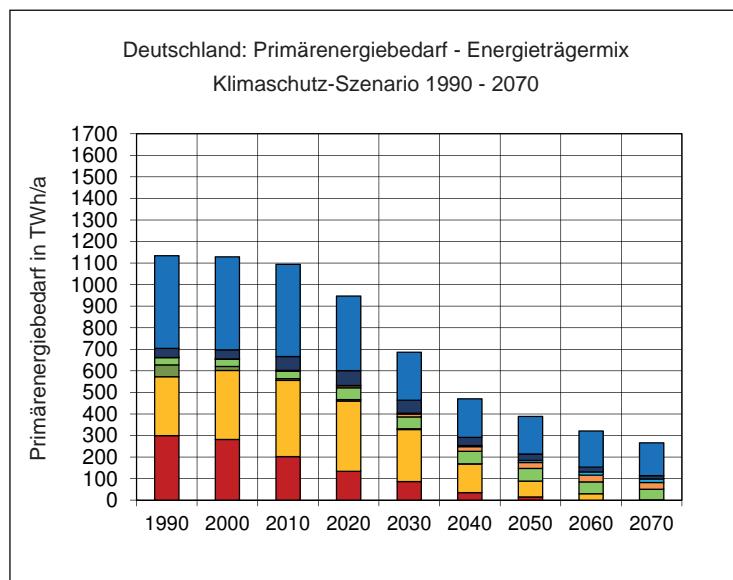
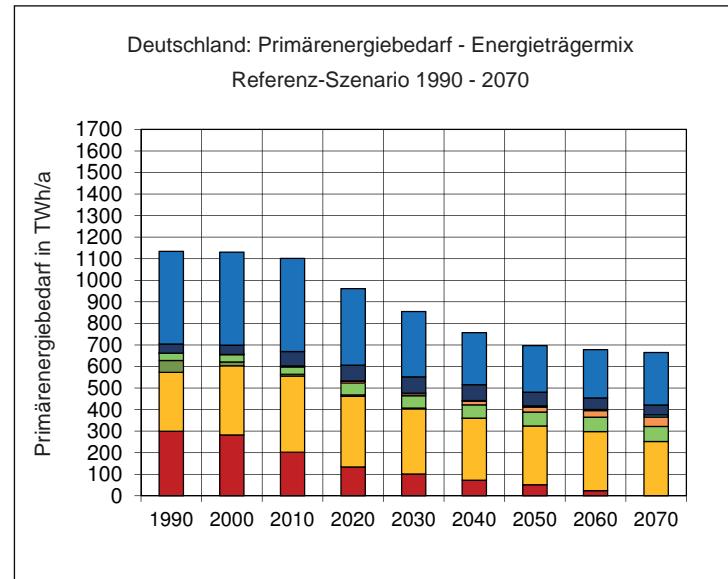
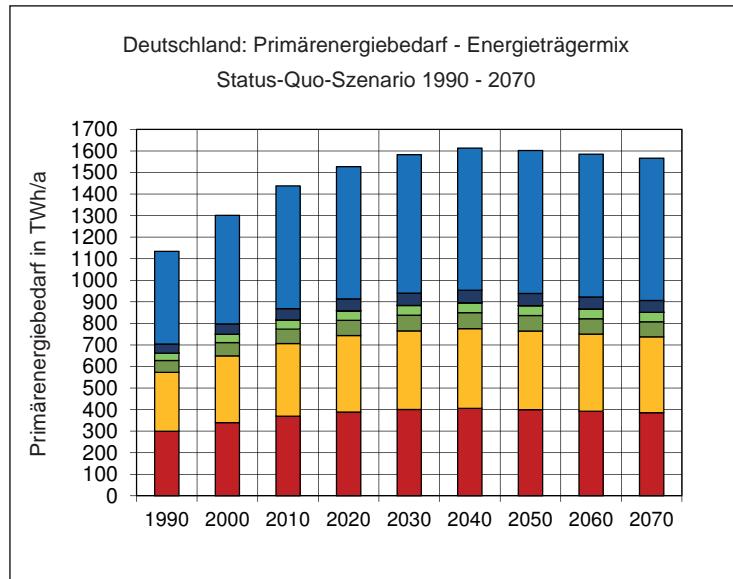
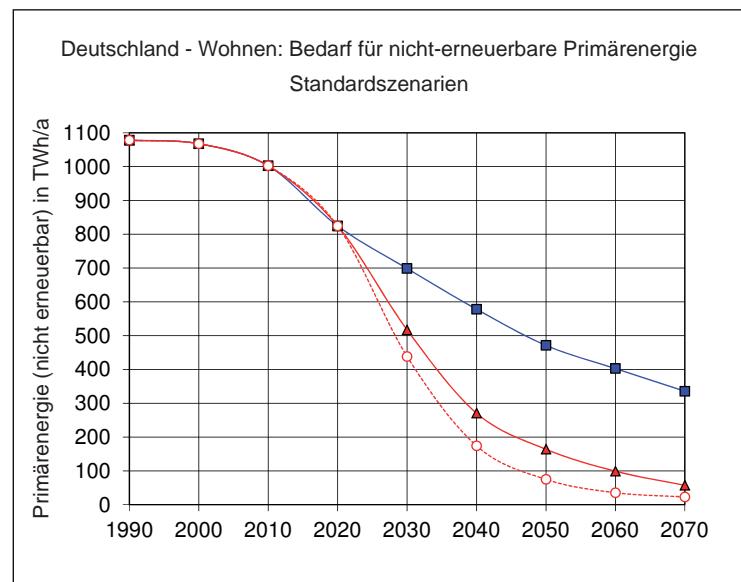


Abbildung 9.5 a-d:
Gesamter Primärenergiebedarf
nach Energieträgern im Zeitraum
1990 - 2070. Dargestellt sind die
Ergebnisse für:
a) das Status-Quo-Szenario
b) das Referenz-Szenario
c) das Klimaschutz-Szenario
d) das Klimaschutz- Plus-Szenario

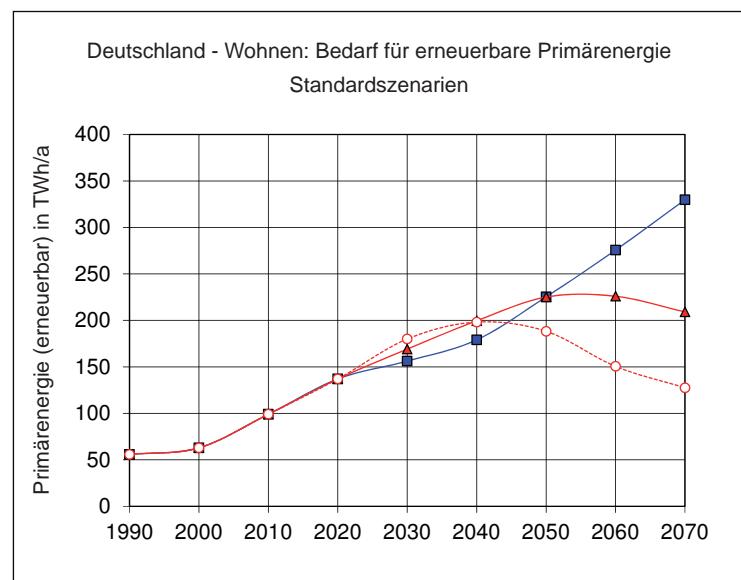
- Referenz-Switch
- ▲ Klimaschutz-Switch
- Klimaschutz-Plus-Switch

Abbildung 9.6:
Entwicklung des Bedarfs an nicht-
erneuerbarer Primärenergie für alle
Hauptszenarien im Zeitraum 1990
- 2070



- Referenz-Switch
- ▲ Klimaschutz-Switch
- Klimaschutz-Plus-Switch

Abbildung 9.7:
Entwicklung des Bedarfs an erneuerbarer Primärenergie für alle
Hauptszenarien im Zeitraum 1990
- 2070



In den üblichen Bilanzen wird statt der gesamten Primärenergie nur der nicht-erneuerbare Anteil der Primärenergie bewertet. Dies hat einen starken Bezug zu der Treibhausgasemissionen (vgl. Vallentin 2011, S. IV-108). Als alleiniger Indikator für den Aufwand an Energieressourcen wird dieser jedoch immer weniger aussagekräftig, weil die erneuerbaren Anteile immer größer werden und bei einer solchen Betrachtung unberücksichtigt bleiben. Im Vergleich zur gesamten Primärenergie (vgl. Abb. 9.1) sinken in allen Szenarien die nicht-erneuerbaren Primärenergiebedarfe (Abb. 9.6) noch viel stärker ab. Ausgehend vom Ausgangswert im Jahr 1990 von 1078 TWh/a (100 %) sinkt dieser im Jahr 2050 im Referenzszenario auf 471 TWh/a (ca. 44%), im Klimaschutz-Szenario auf 164 TWh/a (ca. 15%) und im Klimaschutz-Plus-Szenario sogar auf 75 TWh/a (ca. 7%) ab. Diese Entwicklung setzt sich in allen Szenarien weiter fort, jedoch in den Klimaschutzszenarien wegen der viel geringeren Werte dann nur noch in abgeschwächter Art und Weise.

Ein gänzlich anderes Bild zeigt sich bei dem Bedarf für erneuerbare Primärenergie (Abb. 9.7). Hier steigen die Werte im Zeitraum 2000 - 2040 in allen Szenarien deutlich an. Erst danach entwickeln sie sich in den Szenarien auseinander. Beginnend mit einem niedrigen Startwert im Jahr 1990 von 55 TWh/a (100%) liegt der erneuerbare Primärenergiebedarf im Jahr 2050 im Referenz- und im Klimaschutz-Szenario bei 225 TWh/a (ca. 410%). Im Klimaschutz-Plus-Szenario wird der höchste Wert bereits im Jahr 2040 mit 198 TWh/a erreicht und sinkt danach kontinuierlich ab, um dann im Jahr 2070 bei 128 TWh/a (ca. 230 %) zu liegen. Im Referenzszenario steigt der erneuerbare Bedarf an Primärenergie immer weiter an und beträgt 2070 dann 330 TWh/a (600%). Im Klimaschutzszenario stabilisieren wird das Maximum im Jahr 2055 mit einem Wert von 258 TWh/a (ca. 470%) erreicht. Der Wert im Jahr 2070 beträgt dort 209 TWh/a (ca. 380%) und sinkt auch danach weiter ab. Gut erkennbar ist, dass in den Klimaschutzszenarien effizienzbedingt auch der Energieaufwand für erneuerbare nach

2040 - 2050 stetig reduziert werden kann, was von erheblichen Vorteil für den Ausbau des erneuerbaren Energiesystems, das vor allem stromgestützt sein wird. Hier kommt es entscheidend darauf an, dass das künftige Stromsystem nicht zu groß dimensioniert werden muss, weil im Zuge der Dekarbonisierung des Energiesystems vor allem der Strombedarf für Verkehr, Industrie und Gewerbe deutlich ansteigen wird. Hinzu kommt das Problem der Regelenergie und saisonalen Speicherung. Insbesondere für die künftige Wasserstoffwirtschaft, u.U. ergänzt durch die Erzeugung erneuerbaren Methans, werden zusätzliche Stromkapazitäten benötigt. Ohne eine konsequente Effizienzstrategie in allen Anwendungsbereichen wird am Ende der Strombedarf nicht nur um einen Faktor 2 sondern um einen Faktor 3 - 5 zu vergrößern sein. Das dürfte nicht nur sehr hohe Kosten verursachen, sondern führt auch zu Akzeptanzproblemen hinsichtlich der Integration der Stromerzeugungs- und verteilungsanlagen in den Kulturlandschaften.

Als letztes soll hier ein genauerer Blick auf den Sonderfall der Biomassenutzungen geworfen werden (Abb. 9.8). Zunächst fällt auf, dass im Zeitraum 2010 - 2020 ein enormer Anstieg zu verzeichnen ist. Dieser hat seine Ursache in Förderprogrammen für Holzheizungen und der Privilegierung in den Energie-Nachweisverfahren für Gebäude hinsichtlich Primärenergiebedarf. Die so versorgten weisen daher im Mittel eine schlechtere Dämmqualität der Gebäudehülle auf. In Verbindung mit den schlechteren Jahresnutzungsgraden der Holzheizungen, selbst, insbesondere wenn hierbei Scheitholz eingesetzt wird, ist der spezifische Primärenergieeinsatz je Nutzenergieeinheit viel größer als bei fossilen Heizsystemen. Insgesamt sind daher wertvolle Energieträgerressourcen in ineffizienten Heizsystemen gebunden. Für die künftige Entwicklung spielt nun die Energieeffizienz der Gebäude die entscheidende Rolle. Während im Referenzszenario ein weiterer Anstieg der Biomassenutzungen stattfindet, kann dieser in den Klimaschutzszenarien bis 2050 - 2070 wieder auf das Niveau im Jahr 2010 zurückgeführt werden.

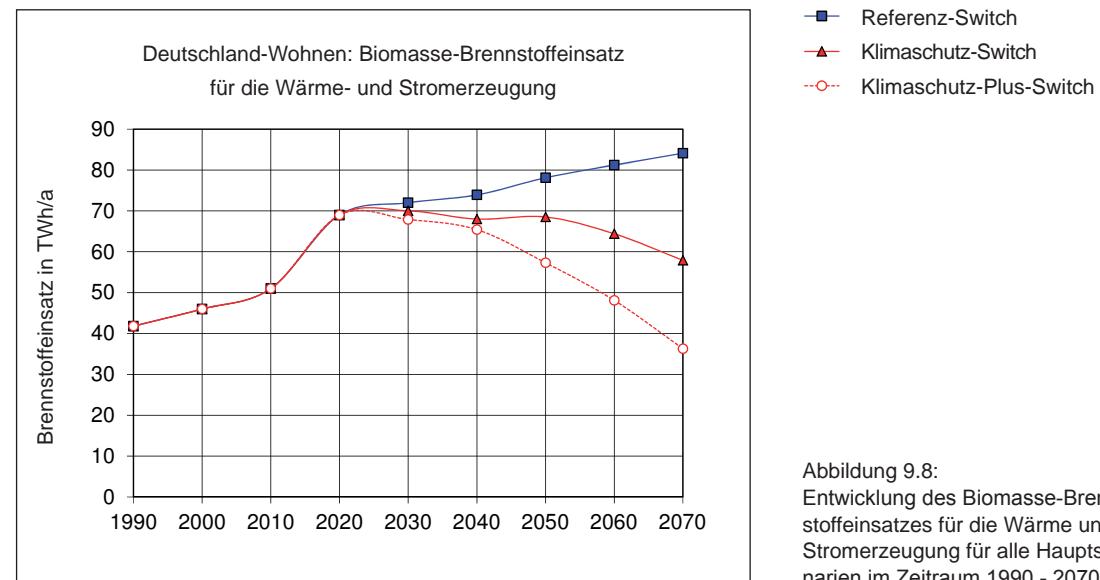


Abbildung 9.8:
Entwicklung des Biomasse-Brennstoffeinsatzes für die Wärme und Stromerzeugung für alle Hauptzuszenarien im Zeitraum 1990 - 2070

10 Entwicklung Treibhausgasemissionen 1990 - 2070

Der Klimaschutz stellt im Hinblick auf die Energiesysteme derzeit das gravierendste und drängendste Nachhaltigkeitsproblem dar und nicht die Ressourcenfrage. Von daher stellt die Reduzierung der Treibhausgasemissionen die Schlüsselfrage der Energiepolitik Deutschlands dar. Hierbei sind die Zielsetzungen der Pariser Klimakonferenz (Einhaltung des 2-Grad Ziels, besser des 1,5-Grad Ziels) ausschlaggebend. Anstelle des in hohem Grade unbestimmten Begriffs „Klimaneutralität“ wird hier der Begriff „Paris-Kompatibilität“ bevorzugt. In dieser Untersuchung wird zur Zieldefinition einerseits das CO₂-Globalbudgets für Gebäude (siehe Abschnitt 2) und andererseits das Konzept von Klimaschutz-Korridor und -Zielfeld verwendet (vgl. Kern 2016).

In Abbildung 10.1 sind zunächst die gesamten CO₂-Äquivalent-Emissionen der privaten Haushalte über den Zeitraum 1990-2070 aufgetragen. Die Verläufe ähneln qualitativ denen für die gesamte Primärenergie. Im Status-quo-Szenario steigen die Treibhausgasemissionen ausgehend von 281 Mio t/a im Jahr 1990 stetig an und sind im Jahr 2050 mit ca. 424 Mio t/a um ca. 51 % höher als 1990. Im Referenzszenario sinken die Emissionen bis 2030 auf 176 Mio t/a ab, was einer Reduktion um ca. 37 % gegenüber dem Stand von 1990 bzw. um 28 % gegenüber dem Stand von 2010 entspricht. Im Jahr 2050 liegt dieser Wert bei 109 Mio t/a und weist damit eine Reduktion um 61 % bzw. 55 % auf.

Im Klimaschutz-Szenario sinken die Treibhausgasemissionen viel deutlicher ab. Im Jahr 2030 betragen sie 107 Mio t/a (Reduktion um 62 % bzw. 56 %) und im Jahr 2050 ca. 37 Mio t/a (Reduktion um 87 % bzw. 85 %). Im Klimaschutz-Plus-Szenario wird schließlich ein durchgreifendes Klimaschutzkonzept verwirklicht. Bereits im Jahr 2030 betragen die CO₂-Äquiva-

lent-Emissionen nur noch ca. 84 Mio t/a (Reduktion um 70 % bzw. 66 %) und sinken danach bis 2050 noch weiter auf etwa 21 Mio t/a (Reduktion um 93 % bzw. 91,5 %). Mit Ausnahme des Status-quo-Szenarios sinken die Treibhausgasemissionen in allen Szenarien auch nach 2050 weiter ab.

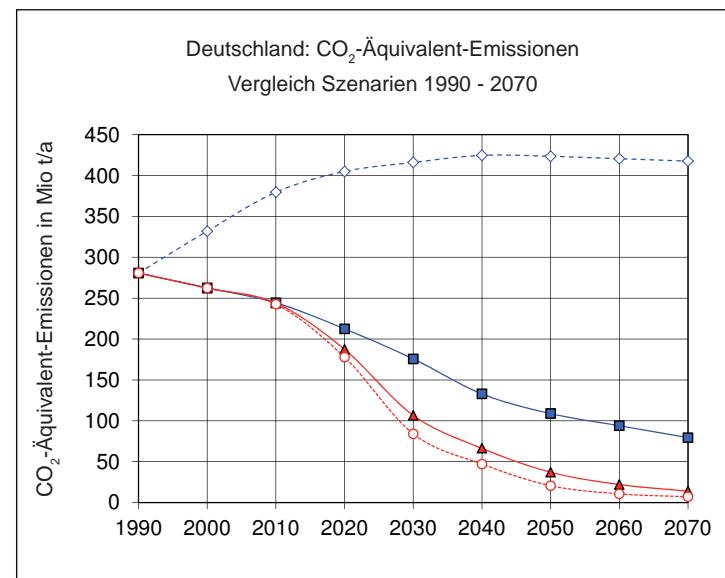
In Abbildung 10.2 ist das Global-Warming-Potential nach Anwendungen im Jahr 2010 denjenigen im Jahr 2030 und 2050 gegenübergestellt. Die Verteilung auf die verschiedenen Nutzungsarten ist ähnlich wie bei der End- und Primärenergie, auch hier dominiert im Jahr 2010 mit 146,6 Mio t/a die Raumwärme (60,4 %). Die Warmwasseranwendungen verursachen mit 23,8 Mio t/a 9,8 % des Global-Warming-Potentials. Der Anteil der Stromanwendungen (Haushalts- und Hilfsstrom) beträgt 29,4% mit Emissionen von 71,6 Mio t/a. Im Referenzszenario ist im Jahr 2050 der Anteil der Raumwärme mit 72,1 Mio t/a mit 66,2 % sogar höher als im Jahr 2010. Im Klimaschutz-Szenario ist der Anteil mit 23,2 Mio t/a und damit 60,3 % fast identisch und ist im Klimaschutz-Plus-Szenario mit 12,6 Mio t/a auf 55,5 % etwas gesunken. Der Anteil der Warmwasseranwendungen steigt hingegen in allen Szenarien von 9,8 % im Jahr auf 11,7 - 18,4 % im Jahr 2050. Bei den Stromanwendungen zeigt sich ein differenziertes Bild. Im Referenzszenario liegt der Anteil mit 23,6 Mio t/a bei 21,6 %, während dieser im Klimaschutz-Szenario mit 7,4 Mio t/a und 19,2 % sowohl als Absolutbetrag und anteilig deutlich geringer liegt als im Jahr 2010. Im Klimaschutz-Plus-Szenario jedoch sind die Emissionen mit 5,7 Mio t/a nochmals niedriger. Der Anteil an den Gesamtemissionen liegt mit 25 % auf dem Niveau des Jahres 2010.

Zur Beurteilung der Entwicklung Pro-Kopf-Treibhausgas-Emissionen (siehe Abb.10.3) ist eine kombinierte Darstellungsform mit Klimaschutzkorridor und Zielfeld (vgl. Kern 2016) hilfreich.

Grundlage bildet das Globalbudget von Treibhausgasemissionen im Zeitraum bis 2050, das mit dem 2-Grad-Ziel noch vereinbar ist. Das Zielfeld für die privaten Haushalte beträgt in allen mitteleuropäischen Staaten 100 - 500 kg/(Pa) CO₂-Äquivalente, und muss im Zeitraum 2045 - 2055 erreicht werden. Die Güte eines Klimaschutzkonzeptes bestimmt sich daran, ob bzw. in welchem Bereich der Emissionspfad in das Zielfeld „eintaucht“ und ob er inner- oder außerhalb des Klimaschutzkorridors verläuft. Damit können unterschiedliche Konzepte und Maßnahmenbündel auf einfache und zugleich nachvollziehbare Art auf ihre Zielerfüllung hin beurteilt werden.

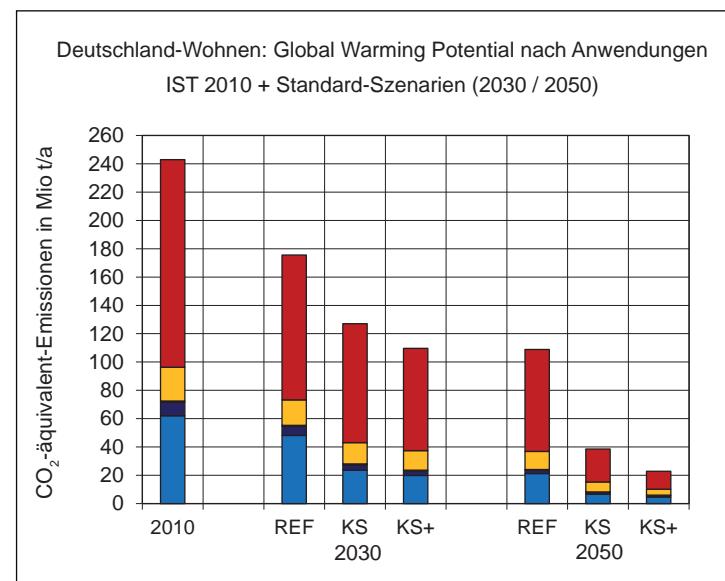
Als Bezugsjahr dient das Jahr 1990, in dem die Rio-Konferenz stattgefunden hat, auch, weil sich die globalen und nationalen Klimaschutzpfade bzw. Minderungsziele in der Regel darauf beziehen. Klar zu erkennen ist, dass das Status-quo-Szenario noch vor 2000 und die anderen Szenarien ab etwa 2010 aus dem grau markierten Klimaschutzkorridor austreten. Während die Pro-Kopf-Emissionen im Referenzszenario sich auch danach außerhalb des Klimaschutzkorridors bewegen, können sie in den beiden Klimaschutz-Szenarien ab 2025 wieder dorthin zurückkehren und landen schließlich doch im Klimaschutz-Zielfeld. Im Klimaschutz-Szenario findet dies jedoch nur im oberen Bereich statt, was auf eine grenzwertige Zielerfüllung hinweist. Nur im Klimaschutz-Plus-Szenario verläuft der Emissionspfad durch die Mitte des Zielfelds. Von daher kann es als vollwertiges Klimaschutzszenario eingestuft werden.

Im Status-Quo-Szenario findet ein starker Anstieg der Treibhausgas-Emissionen von 3520 im Jahr 1990 auf 5060 kg/(Pa) im Jahr 2050 statt. Im Vergleich zur Entwicklung der anderen Szenarien wird daran der grundsätzliche Wandel der Energiesysteme Richtung Effizienz und Dekarbonisierung messbar. Die Pro-Kopf-GWP-Emissionen des Referenz-Szenarios verfehlten das Zielfeld dennoch erheblich. Mit 1300 kg/(Pa) sind sie um etwa einen Faktor 5 über dem Wert des Klimaschutz-Plus-Szenarios, der mit 270 kg/(Pa) ausgewiesen ist.



- ◇- Status quo
- Referenz
- ▲- Klimaschutz
- Klimaschutz-Plus

Abbildung 10.1:
Entwicklung der Treibhausgasemissionen (CO₂-Äquivalente in Mio t/a) für alle Hauptszenarien im Zeitraum 1990 - 2070

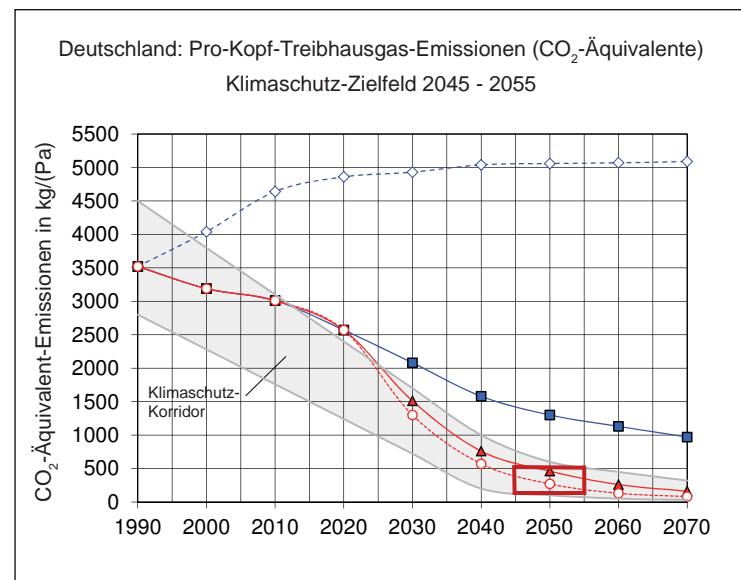


- Raumwärme
- Warmwasser
- Gas für Kochen
- Hilfsstrom
- Haushaltsstrom

Abbildung 10.2:
Global-Warming-Potential (CO₂-Äquivalente) nach Anwendungen für das Ausgangsjahr 2010 und für 2030 sowie 2050. Dargestellt sind die Ergebnisse für das Referenz-Szenario (REF), das Klimaschutz-Szenario (KS) und das Klimaschutz-Plus-Szenario (KS+).

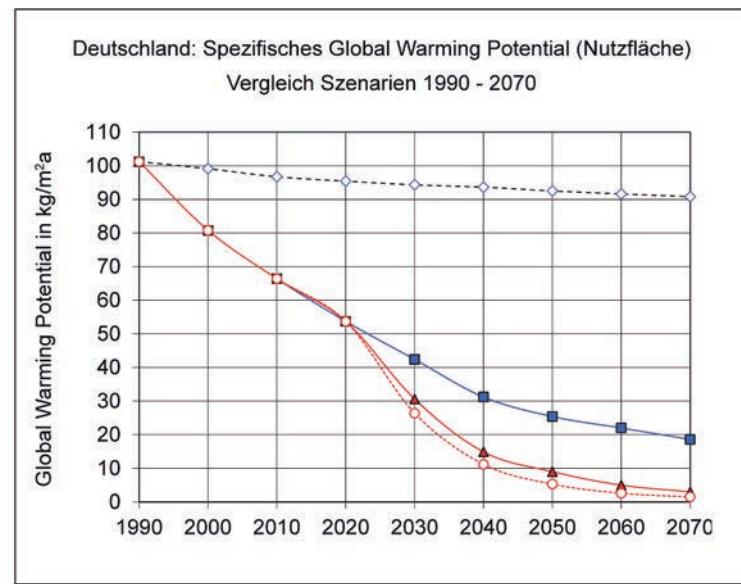
- ◇- Status quo-Szenario
- Referenz-Szenario
- ▲- Klimaschutz-Szenario
- Klimaschutz-Plus-Szenario
- Klimaschutz-Korridor
- Klimaschutz-Zieldfeld

Abbildung 11.3:
Entwicklung der Pro-Kopf-Treibhausgasemissionen für die Haupt-szenarien. Angabe in CO₂-Äquivalenten je Person und Jahr in kg/Pa im Zeitraum 1990 - 2070. Zur besseren Orientierung sind Klimaschutz-Korridor und -Zieldfeld (rotes Rechteck) mit dargestellt.



- ◇- Status quo
- Referenz
- ▲- Klimaschutz
- Klimaschutz-Plus

Abbildung 11.4:
Spezifisches Global-Warming-Potential (CO₂-Äquivalente) pro Quadratmeter Nutzfläche (= Energiebezugsfläche) für die Haupt-szenarien in kWh/m²a im Zeitraum 1990 - 2070.



Im Vergleich zur Darstellung mit Bezug auf die Nutzfläche (siehe Abb.10.4) wird vor allem im Status-quo-Szenario unmittelbar nachvollziehbar, welch bedeutenden Einfluss der Anstieg der spezifischen Wohnfläche aber auch neue Komfortansprüche und neue Elektronutzungen auf die Gesamtentwicklung haben. Während die Pro-Kof-Emissionen zwischen 1990 und 2050 um 44 % angestiegen sind, gehen sie nutzflächenbezogen um 9 % zurück. Zusammengenommen kann diesem konsumbezogenen Effekt ein Anstieg von etwa 50 % zugeordnet werden, der nur durch zusätzliche Effizienz oder durch Suffizienzstrategien ausgeglichen werden kann. Damit erklären sich auch die prozentual deutlich stärkeren Minderungserfolge in den anderen drei Szenarien bei Heranziehung der Nutzfläche als Vergleichsgröße. Auch hier wird wieder deutlich, wie wichtig der Pro-Kopf-Bezug ist, um Klimaschutzstrategien zutreffend beurteilen zu können.

In Abbildung 10.4.a-d werden für alle vier Szenarien die Treibhausgasemissionen getrennt für die Energieträger ausgewiesen. Die fehlenden Effizienzerfolge führen im Referenzszenario dazu, dass dort Erdgas als fossiler Energieträger zur Wärmeversorgung im System verbleibt. Zugleich hat die fehlende Stromeffizienz in den Haushalten und die auch nach 2030 weiterhin noch fossile Stromerzeugung zur Folge, dass mittel- und langfristig ein substanzielles Absinken der Treibhausgasemissionen verhindert wird.

Im Gegensatz dazu ist es aufschlussreich zu sehen, wie sich in den beiden Klimaschutzszenarien, die Effizienzstrategie und der daran gekoppelten Ausbau der erneuerbaren Energiesysteme gegenseitig stützen und erst in Kombination zu einer deutlichen Reduktion der energiebedingten Klimagasemissionen führen. Hier spielen auch die Stromeffizienz und eine weitgehend erneuerbare Stromerzeugung eine entscheidende Rolle. Im Klimaschutz-Plus-Szenario können damit bis 2070 die Treibhausgasemissionen bis auf einen geringen Restbetrag fast gänzlich zurückgefahren werden.

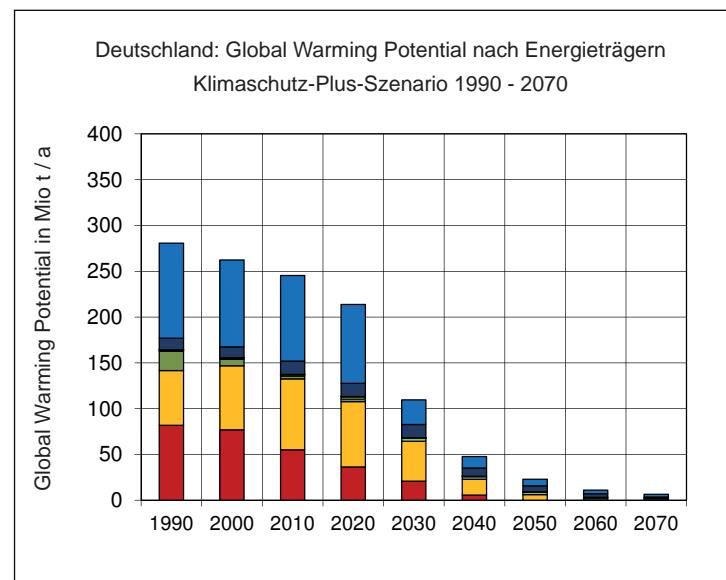
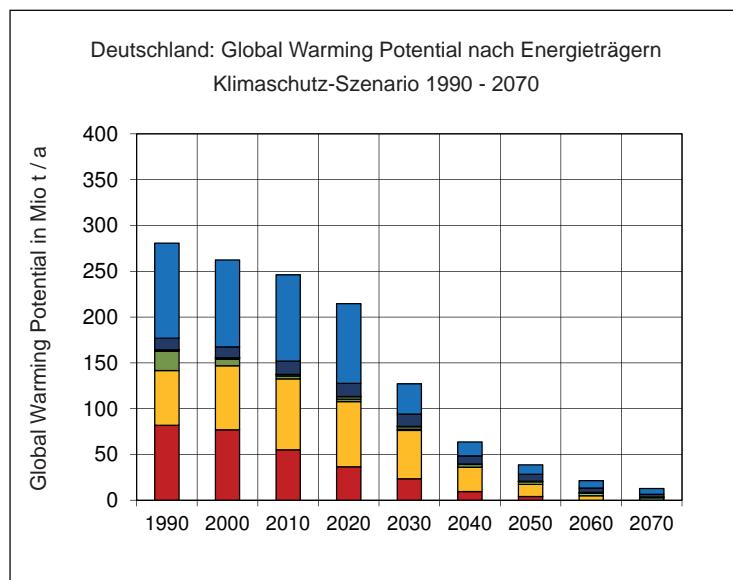
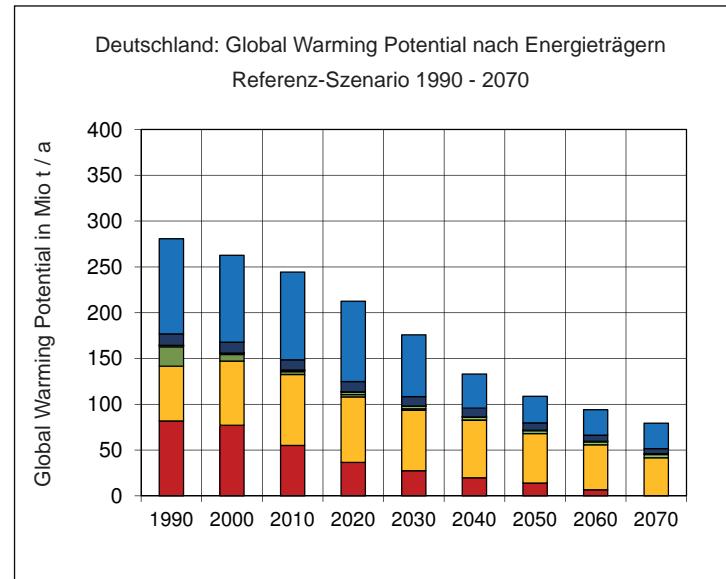
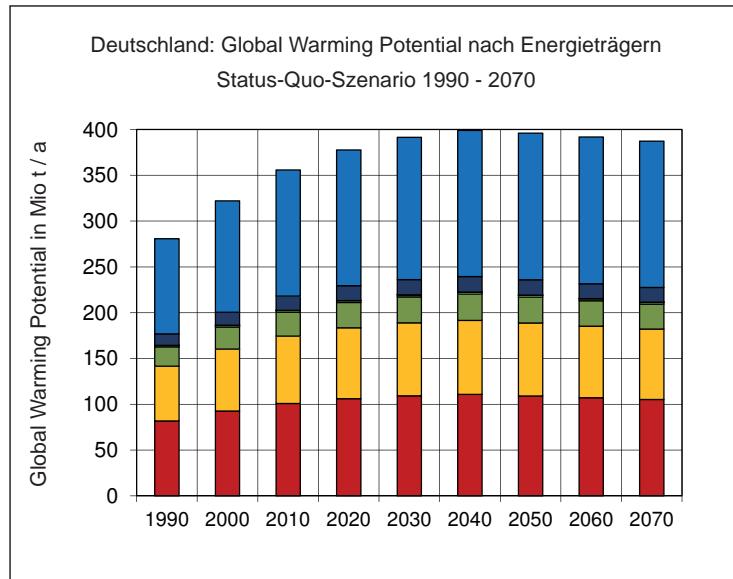


Abbildung 11.5 a-d:
Global Warming-Potential (CO_2 -Äquivalente) nach Energieträgern im Zeitraum 1990 - 2070. Dargestellt sind die Ergebnisse für:
a) das Status-Quo-Szenario
b) das Referenz-Szenario
c) das Klimaschutz-Szenario
d) das Klimaschutz-Plus-Szenario

11 Neue Szenarienfamilien und deren Analyse

Ursprünglich war geplant im Rahmen einer Aktualisierung lediglich die Entwicklung seit 2005 bis heute abzubilden und in die künftige Modellbildung der Szenarien zu integrieren. Die Analyse der Energie- und Emissionsbilanzen der Jahre 2005 - 2020 und deren Ursachen hat jedoch einige unerwartete Fragen und Probleme aufgeworfen, die in der Folge eine grundlegende Korrektur des Arbeitsumfangs und der Methodik notwendig machten:

1 In der Dissertation wurden die Klimaschutzziele der Bundesregierung zugrunde gelegt. Diese sehen vor, die Treibhausgasemissionen bis 2050 um 80 % gegenüber dem Stand von 1990 zu reduzieren. Dieses Reduktionsziel ist nach derzeitigem Stand der Wissenschaft nicht mehr als kompatibel mit dem 2-Grad Ziel anzusehen. Stattdessen sind die CO₂-Äquivalent-Emissionen bis 2050 wenigstens auf 90 - 95% gegenüber dem Stand von 1990 zu reduzieren. Die Entwicklung und Anwendung des CO₂-Global-Budgets auf Gebäude führt zudem eine andere Betrachtungsweise ein. Sie wurde meines Wissens bisher noch nicht auf Grundgesamtheiten von Gebäuden angewendet und ist daher ungewohnt. Sie stellt jedoch eine sinnvolle Erweiterung der Analyse dar und bietet am Ende eine bessere Anschaulichkeit. Beispielsweise lassen sich dadurch Szenarien als Ganzes über ein „Ampelsystem“ bewerten und damit sehr einfach untereinander vergleichen.

2 Der Modellierung der Sanierungsschritte in der Dissertation liegt eine konsequente Anwendung des Kopplungsprinzips zugrunde. Energetische Verbesserungen und der Ersatz fossiler durch erneuerbare Versorgungssysteme findet gemäß diesem Prinzip im Zuge sowieso anstehender Instandsetzungen und Modernisierungen statt. Dies entspricht in etwa einer Sanierungsrate von 2 %. Dies entspräche zwar der wirtschaftlichen

Logik, um den Werterhalt im Bestand sicherzustellen. Faktisch zögern Eigentümer jedoch die Erhaltungsmaßnahmen systematisch heraus, so dass in den letzten Jahrzehnten nur eine Sanierungsrate von etwa einem Prozent erzielt werden konnte (sog. Sanierungsstau).

3 Durch intensive Lobbyarbeit der Wohnbauwirtschaft, Architekten und weiterer Akteure wurde die EU-Vorgabe von „Nearly-Zero-Energy-Buildings“ in der deutschen Gesetzgebung systematisch unterlaufen. Dies ist an den für einen wirksamen Klimaschutz unzureichenden energetischen Anforderungen an Gebäude im Gebäude-Energien-Gesetz (GEG) erkennbar (1).

4 Die Pro-Kopf-Energie- und Emissionskennwerte sind in den letzten 10 - 15 Jahren kaum zurückgegangen (siehe Kapitel 3). Dies steht in deutlichem Widerspruch zur Eigenwahrnehmung des Klimaschutzthemas auf fachlicher, politischer und gesellschaftlicher Ebene. Die Entwicklung ist sogar noch ungünstiger verlaufen, als im Referenzszenario der Dissertation abgebildet. In der Konsequenz hat sich der Gebäudesektor von einem vergleichsweise einfach umsetzbaren zu einem besonders kritischen Sektor für den Klimaschutz gewandelt.

Natürlich hätte man es bei dieser Analyse belassen können. Szenarien stellen jedoch nach meinem Verständnis keinen Selbstzweck dar, sondern verfolgen eine handlungsbezogene Funktion. Sie sollten daher gerade in diesem speziellen Fall konstruktiv gangbare Wege aufzeigen, die aus dieser verfahrenen Situation herausführen können.

Der folgerichtige Schritt an dieser Stelle bestand nun darin, anstelle einzelner neuer Szenarien das Untersuchungsprogramm systematisch zu erweitern, indem mehrere neue Szenarienfa-

milien modelliert wurden. In jeder dieser Familien wird das Referenz-, Klimaschutz- und Klimaschutz-Plus-Szenario unter den jeweils einheitlich geänderten Bedingungen modelliert und ausgewertet.

Um hierbei ein größeres Spektrum abzubilden, wurden dabei sowohl optimistische als auch pessimistische Zukunftsentwicklungen in den Blick genommen. Dies einerseits, um die Folgen einer weiteren Verzögerung und unzureichenden Umsetzung im Sinne einer „Weiter-So“-Entwicklung aufzuzeigen.

Andererseits sollen aber auch neue Konzeptansätze ausgelotet werden, um die Klimaschutzziele der Pariser Klimakonferenz trotz deutlich verschlechterter Ausgangslage doch noch (irgendwie) zu erreichen. Dabei werden nun auch Strategien einbezogen, die eine unklare Umsetzungsperspektive, fragliche Akzeptanz und/oder höhere Risiken beinhalten.

Mit der Modellierung und Analyse der 6 Szenarienfamilien und ihren 18 Einzelszenarien soll folgendes erreicht werden:

- Darstellung der Bandbreite von möglichen Handlungsoptionen, die von einem „Weiter so“-Handeln bis hin zu sehr weit gehenden Klimaschutzstrategien reichen, deren grundsätzliche Umsetzungsperspektiven aus heutiger Sicht nicht unbedingt als gesichert anzusehen sind.
- Prüfung der Robustheit der beiden Grundstrategien (Effizienz + Erneuerbare) in den Standardsszenarien mit dem Ziel einer Dekarbonisierung des Wohngebäudeparks.
- Eruierung, in welchem Ausmaß je nach Szenario ab etwa 2030-2040 die Schaffung von Klimasenken notwendig werden, um das 1,5, 1,7- oder 2,0-Grad Ziel doch noch erreichen zu können.

Zugleich dient dieses Vorgehen auch einer Prüfung der Annahmen in den Standardszenarien. Diese werden durch ihre Erprobung in einem großen Spektrum möglicher Zukunftsentwicklungen einem „kritischen Test“ unterzogen.

11.1 Kurzvorstellung der neuen Szenarienfamilien

Im Folgenden werden die neuen Szenarienfamilien vorgestellt. Sie weisen an strategisch wichtigen Stellen abweichende Annahmen und Randbedingungen gegenüber den Standardszenarien auf, die konkret benannt und in nachvollziehbarer Form dargestellt werden.

Standard

Diese Szenarien entsprechen im Aufbau und Annahmen denen der Dissertation. Jedoch wurde die Entwicklung zwischen 2005 und 2020 hinsichtlich, Bevölkerung, Wohnflächen, Heiz- und Stromerzeugungsstruktur berücksichtigt und in die Modellierung der künftigen Entwicklungen mit eingearbeitet. Die wichtigsten Annahmen und Eckpunkte der Standardszenarien sind:

- Konsequente Anwendung des Kopplungsprinzips (siehe Erläuterung oben). Dies entspricht in etwa einer Sanierungsrate von 2 %.
- Die Klimaschutzstrategien in den Klimaschutzszenarien beginnen 2020 und werden ab 2030 konsequent umgesetzt.
- Im Gebäudebestand wird zwischen voll und bedingt sanierten Gebäuden unterschieden. Damit wird die unterschiedliche Eingriffsempfindlichkeit (z.B. Denkmalschutz, baukulturelle Restriktionen, Probleme bei der baupraktischen Umsetzung) berücksichtigt.
- Über den Betrachtungszeitraum findet in allen Szenarien ein technologischer Fortschritt statt, der sich in künftig immer besseren energetischen Qualitäten der eingesetzten Bau- und Technikkomponenten widerspiegelt. Diese Entwicklung verlief in der Vergangenheit in Teilbereichen schneller und durchgreifender, als in der Dissertation angenommen (z.B. bei Fenstern und Verglasungen, Lüftungsanlagen und Haushaltsgeräten). In den Standard-Klimaschutz-Szenarien wurden daher in allen Szenarien mo-

- derate Anpassungen gegenüber den ursprünglichen Annahmen der Dissertation vorgenommen.
- Suffizienzstrategien kommen in den Standardszenarien nicht zum Einsatz, weil sich deren breite Umsetzung in der Vergangenheit als sehr schwierig erwiesen hat. Dies gilt zwar ganz sicher nicht für Einzelfälle. Für die Szenarien ist jedoch nur die Gesamtentwicklung von Bedeutung. Am augenfälligsten zeigt sich dies bei dem spezifischen Anstieg der Wohnflächen pro Person und bei der Elektroausstattung der Haushalte.
- In den Klimaschutzszenarien wurden in der Modellierung keine vorab festgelegten Dekarbonisierungsziele (z.B. Klimaneutralität 2050) zugrunde gelegt; vielmehr wurden die heute verfügbaren Handlungsoptionen so eingesetzt, dass die sich bietenden Gelegenheiten konsequent genutzt werden, um die Transformation in Richtung hoher energetischer Qualitäten im Gebäudepark in Verbindung mit einer erneuerbaren Strom- und Wärmeversorgung zu erreichen. Das dahinterstehende Kopplungsprinzip ist vor allem für die wirtschaftliche Umsetzung dieses Umbaupfades entscheidend. Die Klimaschutzziele bilden den Bezugsrahmen für die Auswertung der Handlungspfade (sog. freie Modellierung). Fehlenden Emissionsminderungen werden hier am Ende durch effektive CO₂-Senken ausgeglichen.

Sanierungsrate 1 %

In dieser Szenarienfamilie wird durchgängig eine Sanierungsrate von 1 % angenommen. Die Sanierungsrate bezieht sich definitorisch auf eine vollständige energetische Verbesserung gemäß den im jeweiligen Szenario festgelegten energetischen Qualitäten bei Gebäudehülle und Lüftungssystem, d.h., nur die Hälfte der sich bietenden Gelegenheiten wird für eine energetische Verbesserung der entsprechenden Bauteile oder Technikkomponente in Richtung Dekarbonisierung genutzt. Die Sanierungsrate entspricht dem Wert in der Vergangenheit und setzt diesen auch in Zukunft fort. Dieses Szenario entspricht in diesem wesentlichen Kriterium also einem „Weiter-so“.

Die Dynamik des Wandels der Wärme- und Stromerzeugung bleibt in dieser Szenarienfamilie gegenüber den Standardszenarien jedoch unverändert.

Beginn Klimaschutz 2030

Hier wird davon ausgegangen, dass die wirksamen Klimaschutzstrategien im Gebäudebereich erst im Jahr 2030 beginnen. Auch diese Variante entspricht somit einer Strategie des „Business as usual“, bei der wesentliche Akteure der Wohnungswirtschaft – wie in der Vergangenheit – alles daran setzen, die notwendigen Veränderungen hinsichtlich einer Steigerungen der energetischen Qualitäten im Neubau und bei den energetischen Modernisierungen um weitere 10 Jahre zu verzögern. Politisch-gesetzlicher Ausdruck dieser Verschleppungsstrategie ist das jüngst in Kraft getretene Gebäude-Energie-Gesetz (GEG) und seine angekündigte Novellierung (2).

Kombination: Sanierungsrate 1 % plus Beginn Klimaschutz 2030

Diese Szenarien spielen den nicht einmal unwahrscheinlichen Fall der Kombination der beiden zuvor erläuterten Szenarienfamilien durch. Er entspricht der Strategie eines „Weiter-so“ sowohl im Hinblick auf die Sanierungstiefe als auch auf den Beginn wirksamer Klimaschutzmaßnahmen im Handlungsfeld Wohnen.

Suffizienz

In den Suffizienzzenarien wird angenommen, dass sich das Konsum- und Nutzerverhalten durch individuelle Einsicht oder bewusste finanzielle oder sonstige Anreize konsequent ändert, um über diese sofort wirksamen Maßnahmen einen Beitrag zum Klimaschutz zu leisten. Ferne wird unterstellt, dass sich dafür eine Mehrheit findet, die dies ab sofort in ihrem individuellen Verhalten zu einer Handlungsmaxime macht. Momentan finden sich für einen derartigen „Gesinnungswandel“ jedoch keine konkreten Hinweise (3). Aus den Sozialwissenschaften ist bekannt, dass Verhaltensänderungen unter normalen Umstän-

den lange Zeit (i.d.R. ein bis zwei Generationen) benötigen. Das derzeitig hohe Bewusstsein der Bevölkerung für die Risiken des Klimawandels und der fehlenden Energiesouveränität könnte hier allerdings einen Wandel bewirken. Es geht in diesem Szenario daher vor allem darum Möglichkeiten auf der Ebene individuellen Handels aufzuzeigen, die außerhalb des üblichen Verantwortungsbereichs der Planenden und der Bau- sowie Wohnungswirtschaft liegen.

Konkret werden in den Suffizienzszenarien folgende Annahmen gegenüber dem Standardszenarien verändert:

- Reduzierung des Wohnflächenanstiegs bis 2050 um 10 %,
- Absenken der mittleren Raumtemperaturen um 2 Kelvin gegenüber den bislang üblichen Niveau als Mitteltemperatur der gesamten Wohnung. Dieses beträgt abhängig vom Energiestandard der Gebäude 18°C (unsaniertes Bestand) bis $22/23^{\circ}\text{C}$ (Neubau als Passivhaus),
- Reduzierung der Elektroausstattungen in den Wohnungen (Einfrieren der Ausstattungstiefe in den Haushalten auf dem Stand von 2020),
- Der spezifische Warmwasserverbrauch wird gegenüber den Annahmen in den Standardszenarien um 20 % reduziert.

Push

In den Push-Szenarien werden in Anlehnung an das „Top-Runner“-Prinzip ab sofort die heute und künftig verfügbaren energetisch besten baulichen technischen Komponenten im Neubau und bei der Bestandsmodernisierung eingesetzt. Diese sind in Tab. 11.1 zusammengefasst. Ausgangspunkt ist das Klimaschutz-Plus-Szenario, das im Hinblick auf die Durchsetzung neuer energetischer Qualitäten so weiterentwickelt wurde, dass die jeweils marktbesten Produkte sehr schnell in der Breite aller Bauaufgaben Anwendung finden. Die Umsetzung erfordert eine konsequente Änderung im Ordnungsrecht weg von den bisher vorgeschriebenen mittleren energetischen Qualitäten hin zu sehr hohen Qualitäten. Dies hat dann auch erhebli-

Push-Szenario: energetische Qualitäten Sanierungsmaßnahmen im Bestand (Werte in Klammern: bedingt sanierbarer Bestand)					
Komponente / Jahr	1990 - 2009	2010 - 2019	2020 - 2029	2030 - 2039	2040 - 2060
Außenwände (U-Wert)	0,60 (-)	0,50 (0,85)	0,25 (0,80)	0,18 (0,75)	0,12 (0,75)
Dach (U-Wert)	0,30 (0,80)	0,30 (0,70)	0,25 (0,60)	0,15 (0,55)	0,08 (0,50)
Kellerdecke (U-Wert)	0,50 (0,80)	0,45 (0,70)	0,40 (0,65)	0,25 (0,60)	0,18 (0,60)
Fenster (U-Wert)	1,80 (2,00)	1,60 (1,80)	1,30 (1,60)	1,00 (1,30)	0,70 (1,00)
Fenster (g-Wert)	0,63 (0,60)	0,63 (0,625)	0,63 (0,55)	0,55 (0,55)	0,55 (0,55)
Lüftung (n_L - Wert)	0,45 (0,45)	0,45 (0,45)	0,10 (0,45)	0,09 (0,40)	0,08 (0,20)

Push-Szenario: energetische Qualitäten Neubauten (Werte in Klammern: Mehrfamilienhäuser > 2 WE)					
Komponente / Jahr	1990 - 2009	2010 - 2019	2020 - 2029	2030 - 2039	2040 - 2060
Außenwände (U-Wert)	0,35 (0,35)	0,35 (0,30)	0,18 (0,15)	0,15 (0,10)	0,12 (0,08)
Dach (U-Wert)	0,30 (0,22)	0,25 (0,22)	0,15 (0,12)	0,12 (0,09)	0,08 (0,07)
Kellerdecke (U-Wert)	0,40 (0,34)	0,40 (0,32)	0,20 (0,15)	0,18 (0,12)	0,15 (0,10)
Fenster (U-Wert)	1,60 (1,60)	1,30 (1,30)	0,85 (1,00)	0,85 (0,70)	0,60 (0,60)
Fenster (g-Wert)	0,63 (0,63)	0,63 (0,63)	0,55 (0,55)	0,55 (0,55)	0,55 (0,55)
Lüftung (n_L - Wert)	0,45 (0,45)	0,45 (0,40)	0,15 (0,25)	0,08 (0,09)	0,07 (0,09)

Tabelle 11.1

Angaben zur energetischen Qualität der baulich-technischen Komponenten der Wohngebäude im Push-Szenario. Im oberen Teil der Tabelle sind die Kennwerte für die Sanierungsmaßnahmen im Bestand zusammengestellt. Hierbei ist zu beachten, dass diese jeweils nur für anstehende Erneuerungsmaßnahmen gelten. Gemäß dem Kopplungsprinzip bleibt nämlich die energetische Qualität von baulich-technischen Komponenten im Modell solange unverändert erhalten, bis nach Ablauf der Nutzungsdauer eine Erneuerung ansteht. Erst dann kommt eine bessere Qualität zum Zuge. Im unteren Teil der Tabelle sind die Kennwerte für künftige Neubauten genannt.

Die Angaben zu den U-Werten von Außenwänden, Dächern, Kellerdecken erfolgen in $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$. Die Angabe des U-Wertes der Fenster bezieht sich auf den Gesamt-U_w-Wert des Fensters in $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ im eingebauten Zustand. Die energetische Güte des Lüftungs- und Luftdichtigkeitskonzeptes wird über den Kennwert des effektiven energetisch wirksamen Luftwechsels n_L in 1/h charakterisiert. Dieser entspricht dem Mittelwert aller Gebäude mit und ohne Wärmerückgewinnung.

che Konsequenzen für die Planungsprozesse und die Bauwirtschaft. Die heute üblichen Planungskonzepte und Bau- sowie Technikprodukte kommen nach einer kurzen Übergangsphase von maximal 5 Jahren weder im Neubau noch bei energetischen Modernisierungen zum Einsatz. Eine Umsetzungsperspektive hätte dieses Szenario nur mit einer umfassenden Förderung dieses Übergangs in allen Bereichen der Bauwirtschaft und in den dafür notwendigen Entwicklungs- und Planungsprozessen.

Push-Suffizienz

In diesem Szenario werden die Annahmen des Pushszenarios mit denen des Suffizienzszenarios kombiniert. Dieses Szenario bildet von daher einen sehr optimistischen Ausblick auf eine optimale Verbindung von Klimaschutzmaßnahmen, bei denen alle Akteure mit besten Willen und Einsatz zusammenarbeiten und an einem Strang ziehen.

Klimaneutral 2050

Hier handelt es sich um ein Szenario ohne konkrete Modellierung. Grundlage bilden die beiden oben beschriebenen Push-Szenarien. Zusätzlich wird angenommen, dass die Strom- und Wärmeerzeugung ab 2050 vollständig erneuerbar erfolgt. Dies erscheint aus heutiger Sicht leichter auf der Stromebene erreichbar zu sein. Der vollständige Ausstieg aus den fossilen Heizsystemen ist im Gegensatz dazu viel herausfordernder, weil diese Systeme in hohem Maße räumlich dispers verteilt sind und durch die komplexe Eigentümerstruktur der Wohngebäude sehr schwierig vollständig umsetzbar ist. In einigen Fällen ist der Umstieg von fossilen auf erneuerbare Heizsysteme auch objektiv schwierig umsetzbar (4).

Nach derzeitigem Stand erscheint das Ziel Klimaneutralität 2045 bzw. 2050 ohne die Schaffung von CO₂-Senken kaum noch erreichbar zu sein. Daher wäre die wahrscheinlichste Umsetzung dieses Szenarios eine Umsetzung eines der Push-Szenarien in Verbindung mit einer Kompensation der ab 2030

bzw. 2040 verbleibenden GWP-Emissionen über die Investition in effektive CO₂-Senken zu sein. Dies wird an späterer Stelle noch genauer diskutiert.

11.2 Darstellung der Ergebnisse der neuen Szenarienfamilien und deren Bewertung mit einer „Ampel“

Die Modellierung der Szenarienfamilien erfolgt mit denselben Methodik wie bei den Standardszenarien. Insofern sind die Ergebnisse direkt vergleichbar und liegen in gleicher Detaillierungstiefe vor. Um die Darstellung jedoch nicht zu umfangreich zu machen und eine einfach lesbare Auswertung zu ermöglichen, werden die Ergebnisse im folgenden Abschnitt in der Form eines Kurzsteckbriefs zusammengefasst. Dieser enthält folgende Komponenten:

- Zwei Grafiken zum Endenergiebedarf (Anwendungen/Energieträger) mit Darstellung IST-Zustand (2010) und den Werten in den Jahren 2030 und 2050 für das jeweilige Referenz-, Klimaschutz- und Klimaschutz-Plus-Szenario. Damit kann der Wandel der Energienutzungen und der Energieträgerstruktur vereinfacht abgebildet werden.
- Grafik zum gesamten Pro-Kopf-Primärenergiebedarf im Zeitraum 1990 - 2070 für die drei Unterszenarien (REF, KS und KS+). Damit wird die spezifische Energieintensität als Ausdruck des energetischen Ressourceneinsatzes pro Person zum Ausdruck gebracht.
- Grafik zum Pro-Kopf-Global-Warming-Potential im Zeitraum 1990 - 2070 für die drei Unterszenarien (REF, KS und KS+). In Verbindung mit dem Klimaschutz-Korridor und -Zielfeld ergibt sich eine anschauliche Darstellung der Treibhausgas-Minderungspfade in Bezug zum 2-Grad-Ziel.
- Tabelle mit Auflistung der End- und Primärenergie- sowie der Global-Warming-Potential-Kennwerte in den Jahren 2010, 2030, 2050 und 2070. Im unteren Teil sind die kumulierten Pro-Kopf-Treibhausgasemissionen seit 2020 aufgeführt und über ein „Ampelsystem“ bewertet.

Dieses Bewertungssystem mit Hilfe einer „Ampel“ soll nun etwas ausführlicher vorgestellt werden. Es basiert auf einer Kombination der CO₂-Budgetmethode mit einem begrenzten Einsatz von CO₂-Senken, wie sie nach derzeitigem Stand wohl unvermeidbar zum Erreichen des Pariser 2-Grad-Ziels mit hinreichender Eintrittswahrscheinlichkeit (67%) sind.

In Kapitel 2 wurden vier Pfade konstruiert, die in direkter Beziehung zum CO₂-Globalbudget stehen und dieses auf den Wohngebäudepark Deutschlands als nationalen Teilsektor beziehen (siehe Tab. 11.2). Die genaue Herleitung der vier Pfade findet sich in Kapitel 2. Die vier Pfade haben in dieser Arbeit vor allem die Funktion den quantitativen Bezug der verschiedenen Szenarienentwicklungen zum Pariser Klimaschutzziel (Begrenzung des Anstiegs der globalen Mitteltemperatur um maximal 2-Grad, möglichst in Richtung 1,5 Grad) herzustellen.

In der ersten Auswertung der 18 Szenarien im Hinblick auf die Kompatibilität mit dem Pariser Klimaschutzziel wurde bereits deutlich, dass keines der Szenarien aus eigener Kraft das 1,5- oder 1,7-Grad-Ziel (entsprechend der Pfade C und D) erreichen kann. Insofern konzentriert sich die Betrachtung im Folgenden vor allem auf die Kompatibilität mit dem 2-Grad-Ziel, um wenigstens Handlungspfade zur Erfüllung der Minimalanforderungen des Pariser Klimaabkommens nachweisen zu können.

Selbst für dieses unvollkommene Klimaschutzziel ist in vielen der Szenarien ein begrenzter Einsatz von CO₂-Senken notwendig. Um hierbei die Anwendung von Risikotechnologien des sog. „Geoengineering“ (GE) zu vermeiden oder einzuschränken, findet eine Orientierung der Senkenpotentiale an den Möglichkeiten der natürlichen Senken, der sog. „Natural Climate Solutions“ (NCS) statt.

Es wird von daher ein zweistufiges Bewertungssystem eingeführt, das als primäres Kriterium eine Begrenzung der kumu-

Pfad	Klimaschutzziel / Wahrscheinlichkeit	GWP-Budget nach 2020
A	2,0 Grad / 50 %	45,1 t/P
B	2,0 Grad / 67 %	38,5 t/P
C	1,75 Grad / 67 %	23,3 t/P
D	1,5 Grad / > 67 %	13,3 t/P

Tabelle 11.2:
Auflistung der Pro-Kopf-GWP-Budgets nach 2020 für vier Klimaschutzziele, die als Pfade A-D dem Klimaschutz-Korridor mit Zielfeld zugrundeliegen. Herleitung und nähere Informationen finden sich in Kapitel 2 und Tabelle 2.4.

lierten GWP-Emissionen verwendet (Tabelle 11.3). Als sekundäres Kriterium kommt eine Begrenzung des eventuell notwendigen Einsatzes von CO₂-Senken zum Einsatz, um trotz Überschreitung des ersten Kriteriums doch noch eine Kompatibilität mit dem 2-Grad-Ziel nachweisen zu können (Tabelle 11.4). Unter der optimistischen Annahme, dass die NCS-Potentiale in etwa eine Tonne CO₂-Äquivalente pro Person und Jahr betragen, wird ein Zeitraum von 30 Jahren (2070 - 2100) als uneingeschränkt machbar eingeschätzt (entspricht einer erforderlichen CO₂-Senke von kleiner als 7,5 t/P). Grenzwertig wird ein Umfang von 30 - 100 Jahren angesehen (entspricht einer erforderlichen CO₂-Senke von 7,5 - 25 t/P).

Kumulierte Pro-Kopf-GWP-Emissionen in t/P		
"Ampel"-Bewertung	Kriterium	
Rot	größer gleich 45,1	
Gelb	zwischen 38,5 und 45,1	
Grün	kleiner gleich 38,5	

Tabelle 11.3:
Primäre „Ampel“-Bewertung der Szenarien im Hinblick auf die 2-Grad-Erfüllung mit dem Kriterium der kumulierten GWP-Emissionen seit 2020.

Erforderliche CO ₂ -Senken in t/P		
"Ampel"-Bewertung	Kriterium	
Rot	größer gleich -25,0	
Gelb	zwischen -7,5 und -25,0	
Grün	kleiner gleich -7,5	

Tabelle 11.4:
Sekundäre „Ampel“-Bewertung der Szenarien im Hinblick auf die Einhaltung der Klimaziele mit Hilfe von zusätzlichen CO₂-Senken.



Abbildung 11.1:
Endenergiebedarf nach Energieträgern im Jahr 2010 und für die Standardszenarien im Jahr 2030 und 2050.

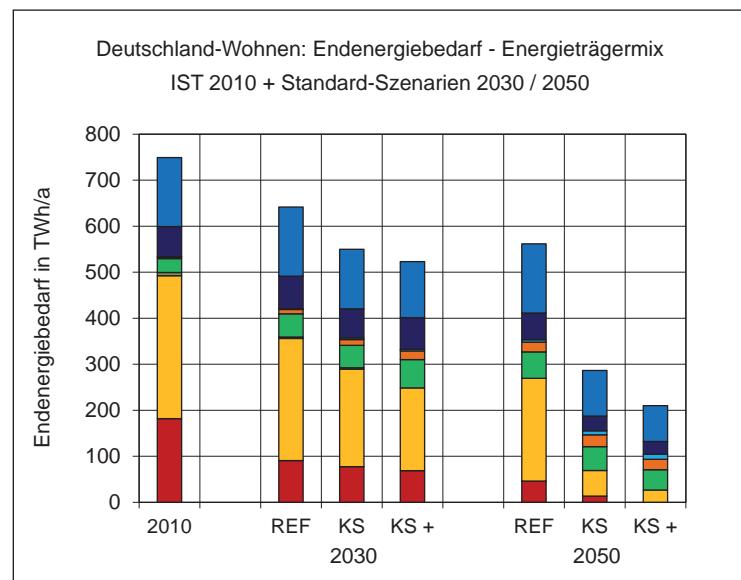
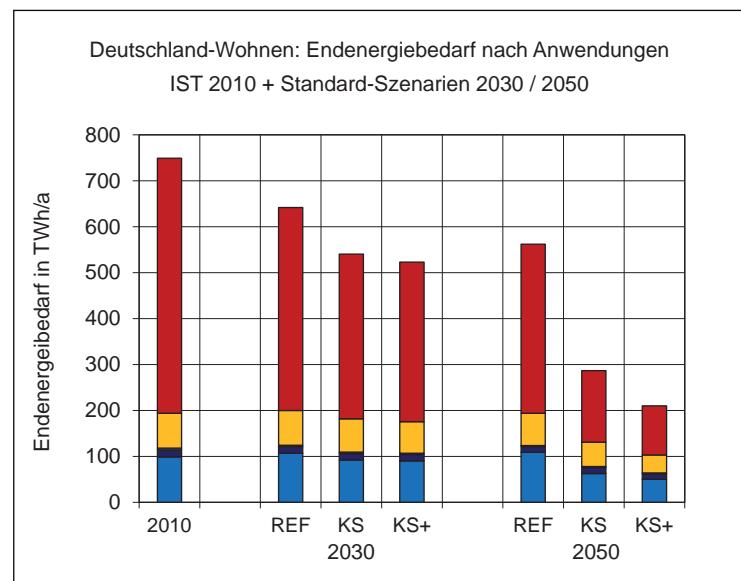


Abbildung 11.2:
Endenergiebedarf nach Anwendungen im Jahr 2010 und für die Standardszenarien im Jahr 2030 und 2050.



Standard

Die Ergebnisse der Standardszenarien werden hier nochmals zusammengefasst und bilden die Basis für den Vergleich mit den anderen Szenarienfamilien. Die Annahmen sind hier unverändert gegenüber der Dissertation übernommen (vgl. Vallentin 2011, S. IV-1 - IV-21), jedoch hinsichtlich der Mengenkomponenten, Heiz- und Stromerzeugungsstruktur an die Entwicklungen der letzten 15 Jahre angepasst worden. Neu ist ferner die Bewertung des Klimaschutzzielsetzung mittels Klimaschutz-Korridor und -Zielfeld sowie über die Angabe des Global-Warming-Potentails in Form kumulierter Pro-Kopf-Mengen.

In den Standardszenarien werden folgende Grundannahmen getroffen:

- Erneuerungs- und Instandsetzungszyklen erfolgen nach Ablauf der typischen Nutzungsdauern von Bauteilen und Technikkomponenten. Die entspräche einer Sanierungsrate von ca. 2 %.
- Die Klimaschutzmaßnahmen beginnen 2020 und werden ab 2030 vollumfänglich umgesetzt.
- Suffizienzstrategien kommen nicht zum Einsatz
- Ein konsequenter technologischer Fortschritt wird nur im Klimaschutz-Plus-Szenario realisiert.

Unter den Bedingungen des Referenzszenarios kann eine Paris-Kompatibilität auf keinen Fall nachgewiesen werden. Das zugeordnete 2-Grad-Budget wird um einen Faktor von ca. 2,5 überschritten. Dies ließe sich selbst mit umfangreichen CO₂-Senken nicht ausgleichen. Im Klimaschutzszenario wird das Zielfeld nur knapp erreicht, die kumulierten Pro-Kopf-GWP-Emissionen liegen um etwa 20 % höher als das zulässige 2-Grad-Budget, was mit CO₂-Senken noch kompensiert werden könnte. Alleine das Klimaschutz-Plus-Szenario erlaubt eine vollumfängliche Einhaltung des gebäudebezogenen 2-Grad-Budgets ohne Einsatz von CO₂-Senken.

Standard		REF	KS	KS +
Endenergie (TWh/a)	2010	749,2	749,2	749,2
	2030	641,6	549,9	523,0
	2050	561,8	286,7	210,0
	2070	490,6	188,8	114,6
Primärenergie, gesamt (TWh/a)	2010	1101,4	1101,4	1101,4
	2030	854,8	686,1	646,0
	2050	696,4	388,9	263,2
	2070	655,1	266,3	150,4
Global Warming Potential (Mio t/a)	2010	244,4	244,4	244,4
	2030	175,8	127,1	109,7
	2050	108,8	38,6	22,9
	2070	79,4	12,9	6,4
GWP pro Kopf (kg/Pa)	2010	3002	3002	3002
	2030	2084	1507	1300
	2050	1301	462	273
	2070	969	157	78
Kumuliertes GWP pro Kopf seit 2020 (t/P)	bis 2030	23,2	20,3	19,3
	bis 2050	55,9	37,7	32,8
	bis 2070	78,6	43,4	35,9
	gesamt	93,1	45,0	36,3
Über-/Unterschreitung 2-Grad-Globalbudget (%)		+ 142 %	+ 17%	- 6 %
Erforderliche GWP-Senke zur Erreichung Klimaschutzziel (t/P)		2,0 °C	-54,6	-6,5
		1,7 °C	-69,8	-21,7
				-13,0

Tabelle 11.5:

Hauptdaten der Standardszenarien zu End- und Primärenergie (gesamt) sowie zum Global-Warming-Potential. Unten erfolgt eine einfache Bewertung der Szenarien über ein „Ampelsystem“ (siehe Erläuterung S. 24 ff.).

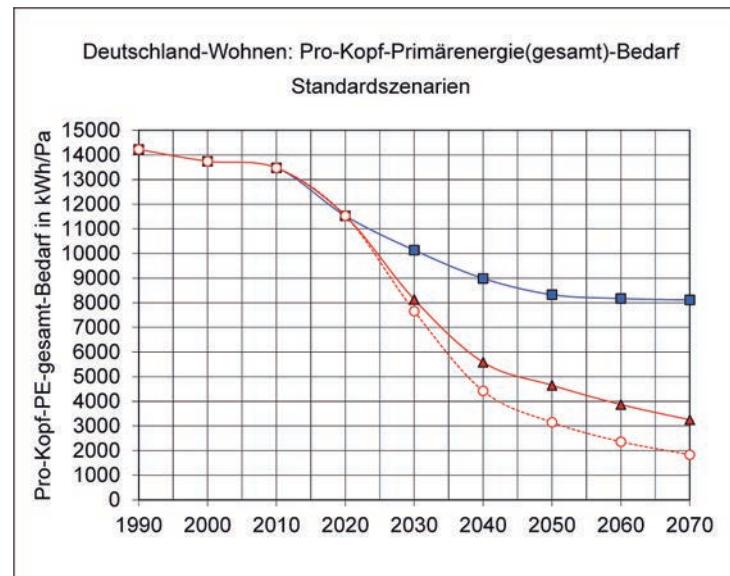


Abbildung 11.3:
Pro-Kopf-Primärenergiebedarf in den Standardszenarien im Zeitraum 1990 bis 2070.

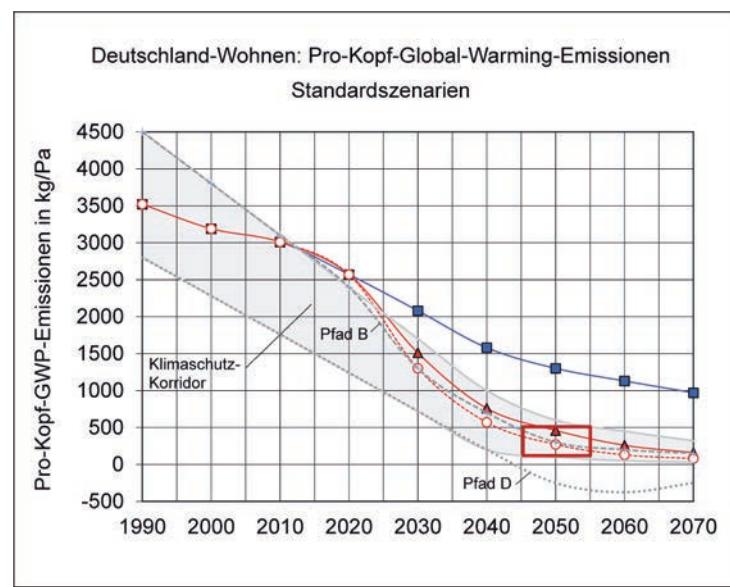


Abbildung 11.4:
Pro-Kopf-Global-Warming-Emissionen (CO₂-Äquivalente) in den Standardszenarien im Zeitraum 1990 bis 2070. Zur besseren Orientierung ist der Klimaschutz-Korridor und das Zielfeld mit dargestellt.



Abbildung 11.5:
Endenergiebedarf nach Energieträgern im Jahr 2010 und für die Szenarien mit 1% Sanierungsrate im Jahr 2030 und 2050.

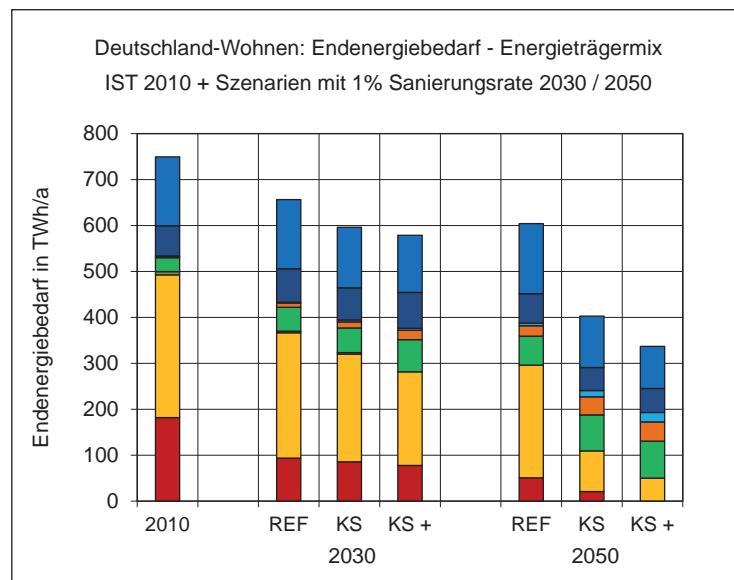
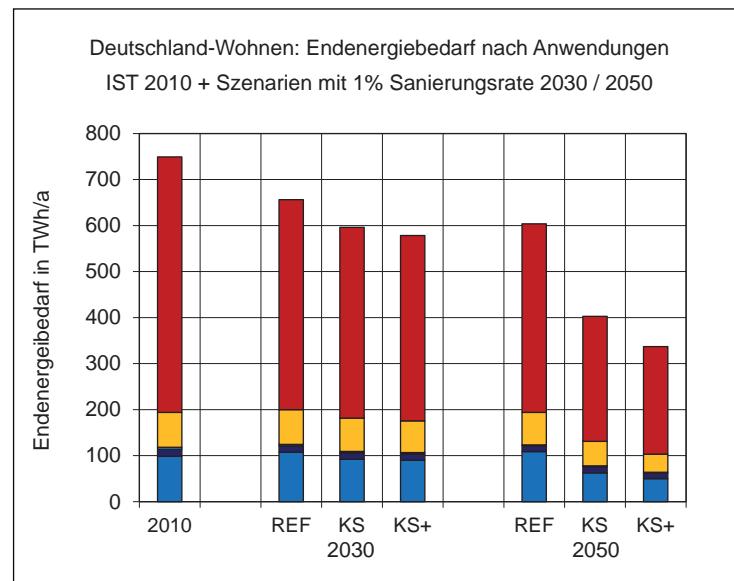


Abbildung 11.6:
Endenergiebedarf nach Anwendungen im Jahr 2010 und für die Szenarien mit 1% Sanierungsrate im Jahr 2030 und 2050.



1 % Sanierungsrate

In diesen Szenarien bleibt - anders als in der Standardmodellierung angenommen - die bisherige Sanierungsrate von 1 % auch in Zukunft weiter bestehen. Dies hat einerseits einen verzögernden Effekt, weil die notwendigen Instandsetzungs- und Erneuerungszyklen von ca. 50 auf etwa 100 Jahre verlängert sind. Energetische Verbesserungen können sich im Bestand kaum durchsetzen. Die Verbrauchsminderungen im Bestand werden durch die zusätzlichen Energieverbräuche der Neubauten in etwa ausgeglichen. Andererseits wird dadurch verhindert, dass im Sinne eines fehlgeleiteten Aktionismus zwar viel energetisch saniert wird, jedoch im ungünstigen Fall nur mit mittleren Qualitäten (z.B. Niedrigenergiekomponenten, Abluftanlagen, Anforderungsniveau des aktuellen GEG).

Im Vergleich zum Standardszenario sind die Unterschiede im Referenzszenario noch am geringsten. Der Grund dafür ist einfach zu verstehen, denn dies entspricht in vollem Umfang der bisherigen Entwicklung. Hier wird besonders eindrücklich deutlich, warum der Einsatz „mittlerer Qualitäten“ die Hauptursache für das Ausbleiben eines wirksamen Klimaschutzes in der Vergangenheit war und auch künftig bleiben wird, solange hier keine grundlegende Neuorientierung erfolgt. Die kumulierten Pro-Kopf-GWP-Emissionen sind nochmals 3,5 % höher als im Standardszenario.

Im Klimaschutzszenario sind die Auswirkungen bei weitem größer. Das Klimaschutz-Zielfeld wird knapp verfehlt und die kumulierten Pro-Kopf-GWP-Emissionen liegen mit 54,6 t/P etwa 21 % über denen des Standardszenarios und damit außerhalb des 2-Grad-Limits. Dies ließe sich nur mit sehr umfangreichen CO₂-Senken von 16,4 t/P ausgleichen. Im Klimaschutz-Plussszenario wird das Zielfeld nur knapp erreicht, die kumulierten Pro-Kopf-GWP-Emissionen liegen mit 45,3 t/P immer noch höher als das zulässige 2-Grad-Budget und könnten nur mit einer CO₂-Senke in Höhe von 7,5 t/P kompensiert werden.

Sanierungsrate 1 %		REF	KS	KS +
Endenergie (TWh/a)	2010	749,2	749,2	749,2
	2030	656,3	596,1	578,5
	2050	603,9	402,6	336,9
	2070	547,6	316,3	254,8
Primärenergie, gesamt (TWh/a)	2010	1101,4	1101,4	1101,4
	2030	871,9	738,4	709,9
	2050	746,2	529,3	410,1
	2070	738,4	421,0	314,1
Global Warming Potential (Mio t/a)	2010	244,4	244,4	244,4
	2030	179,2	137,6	121,2
	2050	117,1	55,9	37,8
	2070	88,4	21,0	13,4
GWP pro Kopf (kg/Pa)	2010	3002	3002	3002
	2030	2125	1632	1437
	2050	1400	669	452
	2070	1078	256	163
Kumuliertes GWP pro Kopf seit 2020 (t/P)	bis 2030	23,4	21,0	20,0
	bis 2050	57,5	43,0	38,1
	bis 2070	82,4	51,7	43,7
	gesamt	96,4	54,6	45,3
Über-/Unterschreitung 2-Grad-Globalbudget (%)		+ 150 %	+ 42 %	+ 17 %
Erforderliche GWP-Senke zur Erreichung Klimaschutzziel (t/P)	2,0 °C	-57,9	-16,4	-6,8
	1,7 °C	-73,1	-31,3	-22,0

Tabelle 11.6:

Hauptdaten der Szenarien mit 1 % Sanierungsrate zu End- und Primärenergie (gesamt) sowie zum Global-Warming-Potential. Unten erfolgt eine einfache Bewertung der Szenarien über ein „Ampelsystem“. (siehe S. 24 ff.)

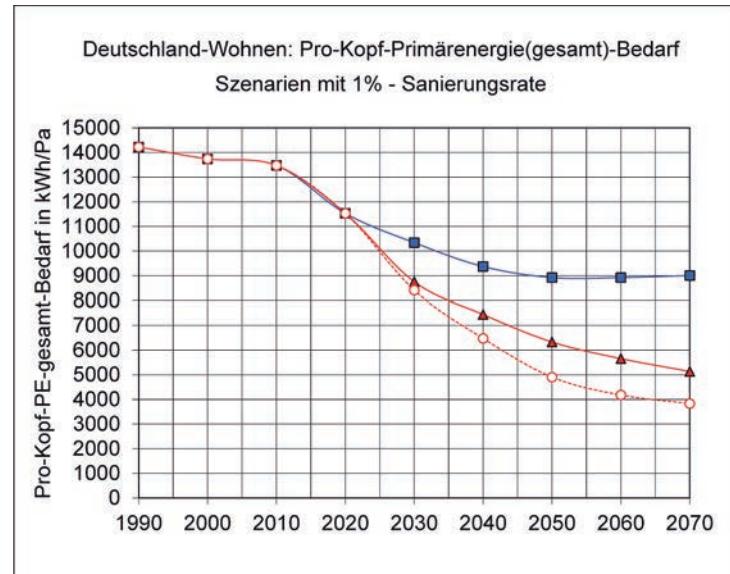


Abbildung 11.7:
Pro-Kopf-Primärenergiebedarf in
den Szenarien mit 1% Sanierungs-
rate im Zeitraum 1990 bis 2070.

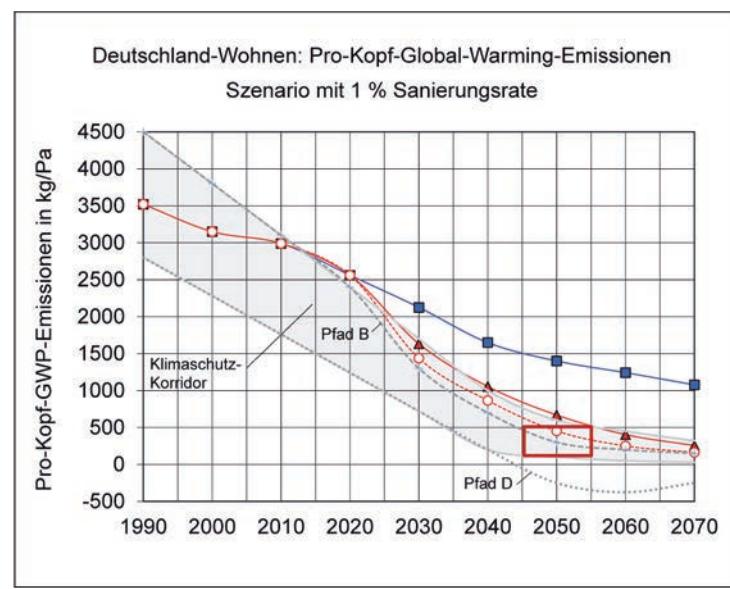


Abbildung 11.8:
Pro-Kopf-Global-Warming-Emis-
sionen (CO₂-Äquivalente) in den
Szenarien mit 1 % Sanierungs-
rate im Zeitraum 1990 bis 2070. Zur
besseren Orientierung sind der
Klimaschutz-Korridor und das Ziel-
feld mit dargestellt.



Abbildung 11.9:
Endenergiebedarf nach Energieträgern im Jahr 2010 und für die Szenarien mit Beginn Klimaschutz 2030 im Jahr 2030 und 2050.

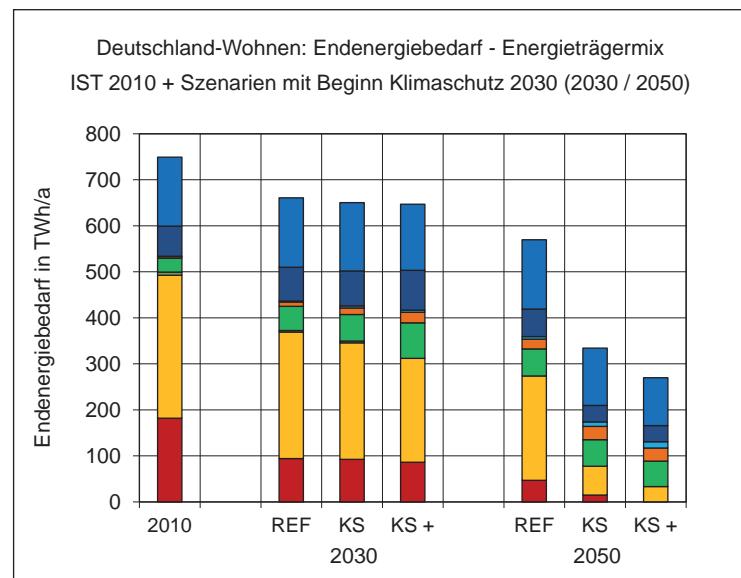
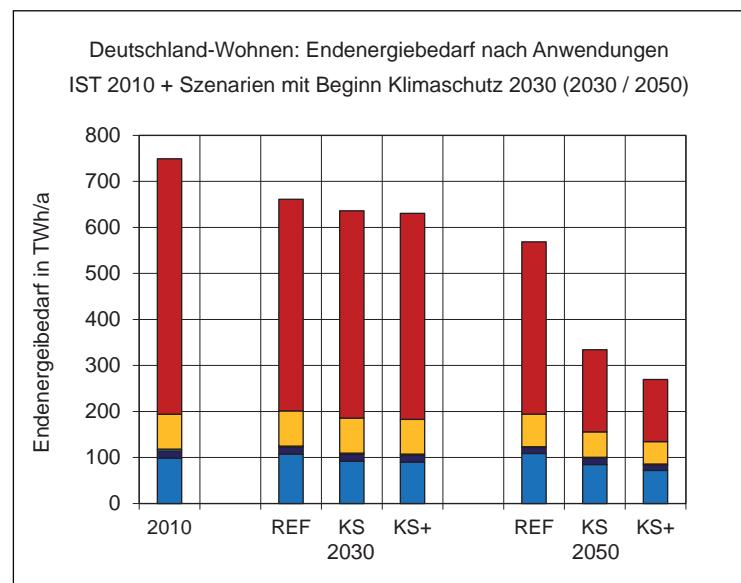


Abbildung 11.10:
Endenergiebedarf nach Anwendungen im Jahr 2010 und für die Szenarien mit Beginn Klimaschutz 2030 im Jahr 2030 und 2050.



Beginn Klimaschutz 2030

Bei diesen Szenarien beginnen die gebäudebezogenen Klimaschutzmaßnahmen erst im Jahr 2030. Der verzögerte Effekt bezieht sich hier ausschließlich auf den Beginn wirksamer Klimaschutzmaßnahmen, die dann allerdings - wie in den Standardszenarien - mit einer Sanierungsrate von 2 % einsetzen.

Im Vergleich zum Standardszenario sind die Unterschiede im Referenzszenario relativ gering - sogar geringer als das Referenzszenario mit 1%-Sanierungsrate. Die kumulierten Pro-Kopf-GWP-Emissionen sind nur 2 % höher als im Standardszenario.

Im Klimaschutzszenario sind die Auswirkungen jedoch spürbar größer. Das Klimaschutz-Zielfeld wird zwar knapp erreicht, die kumulierten Pro-Kopf-GWP-Emissionen liegen mit 58,6 t/P etwa 30 % über denen des Standardszenarios und damit außerhalb des 2-Grad-Limits. Die ließe sich nur mit sehr umfangreichen CO₂-Senken in Höhe von 20,8 t/P ausgleichen.

Das Klimaschutz-Plussszenario erreicht zwar das Zielfeld, jedoch sind die kumulierten Pro-Kopf-GWP-Emissionen mit 52,4 t/P höher als das zulässige 2-Grad-Budget und könnten nur mit CO₂-Senke in Höhe von 14,6 t/P kompensiert werden.

Das Hauptproblem eines verzögerten Beginns der Klimaschutzmaßnahmen besteht vor allem darin, dass die derzeit viel zu hohen Pro-Kopf-Emissionen sich über zehn weitere Jahre aufzaddieren und damit den Klimawandel substanzell vorantreiben. Dies lässt sich auch durch die dann verspätet einsetzenden Minderungen nicht mehr rückgängig machen. Daraan wird erkennbar, dass die Trägheit des Wohngebäudeparks besondere Beachtung erfordert und der Gebäudesektor trotz seiner theoretisch durchaus wirksamen Klimaschutzstrategien zugleich in das Potenzial besitzt, das gesamte 2-Grad-Budget für Deutschland insgesamt zu überschreiten.

Beginn Klimaschutz 2030		REF	KS	KS +
Endenergie (TWh/a)	2010	749,2	749,2	749,2
	2030	660,5	650,8	646,8
	2050	568,9	334,2	269,6
	2070	503,6	223,7	152,5
Primärenergie, gesamt (TWh/a)	2010	1101,4	1101,4	1101,4
	2030	876,9	809,2	795,6
	2050	704,8	458,8	339,3
	2070	681,9	312,4	197,7
Global Warming Potential (Mio t/a)	2010	244,4	244,4	244,4
	2030	180,2	179,2	168,2
	2050	110,2	49,4	33,3
	2070	81,5	16,3	8,4
GWP pro Kopf (kg/Pa)	2010	3002	3002	3002
	2030	2136	2124	1995
	2050	1318	590	398
	2070	993	199	102
Kumuliertes GWP pro Kopf seit 2020 (t/P)	bis 2030	23,5	23,4	23,4
	bis 2050	56,9	49,4	46,7
	bis 2070	79,9	56,6	51,4
	gesamt	95,0	58,6	52,4
Über-/Unterschreitung 2-Grad-Globalbudget (%)		+ 147 %	+ 52 %	+ 36 %
Erforderliche GWP-Senke zur Erreichung Klimaschutzziel (t/P)	2,0 °C	-56,5	-20,1	-13,9
	1,7 °C	-71,7	-35,3	-29,1

Tabelle 11.7:
Hauptdaten der Szenarien mit Beginn Klimaschutz 2030 zu End- und Primärenergie (gesamt) sowie zum Global-Warming-Potential. Unten erfolgt eine einfache Bewertung der Szenarien über ein „Ampelsystem“ (siehe S. 24 ff.).

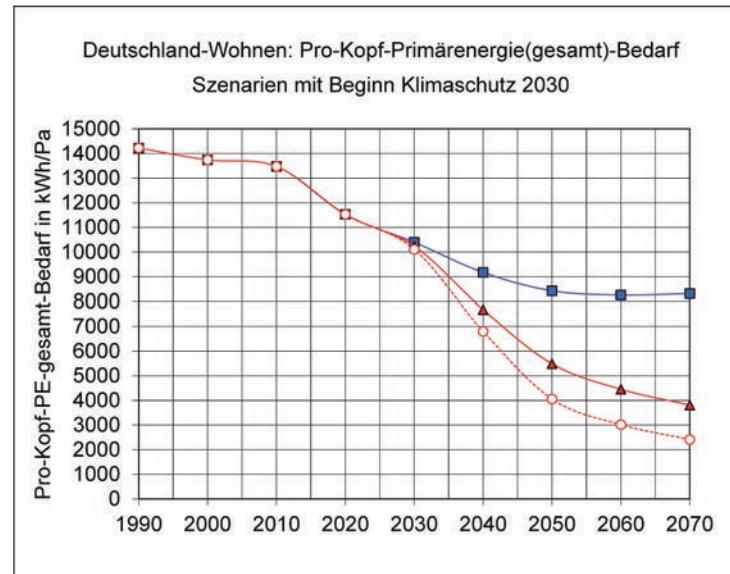


Abbildung 11.11:
Pro-Kopf-Primärenergiebedarf in den Szenarien mit Beginn Klimaschutz 2030 im Zeitraum 1990 bis 2070.

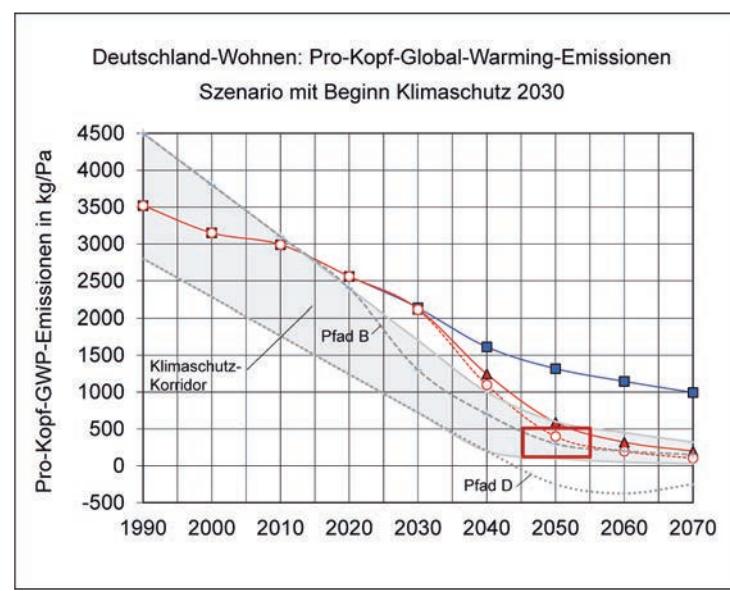


Abbildung 11.12:
Pro-Kopf-Global-Warming-Emissionen (CO_2 -Äquivalente) in den Szenarien mit Beginn Klimaschutz 2030 im Zeitraum 1990 bis 2070. Zur besseren Orientierung sind der Klimaschutz-Korridor und das Zielfeld mit dargestellt.



Abbildung 11.13:
Endenergiebedarf nach Energieträgern im Jahr 2010 und für die Kombinationsszenarien mit 1 % Sanierungsrate und Beginn Klimaschutz 2030 im Jahr 2030 und 2050.

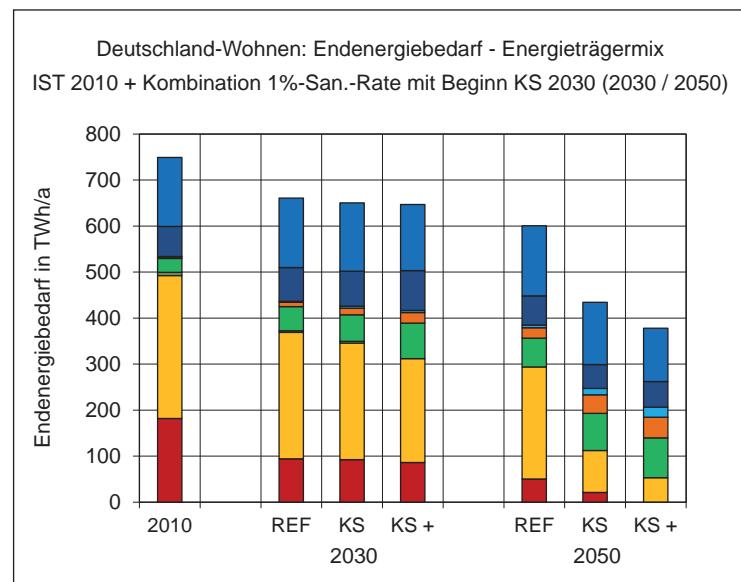
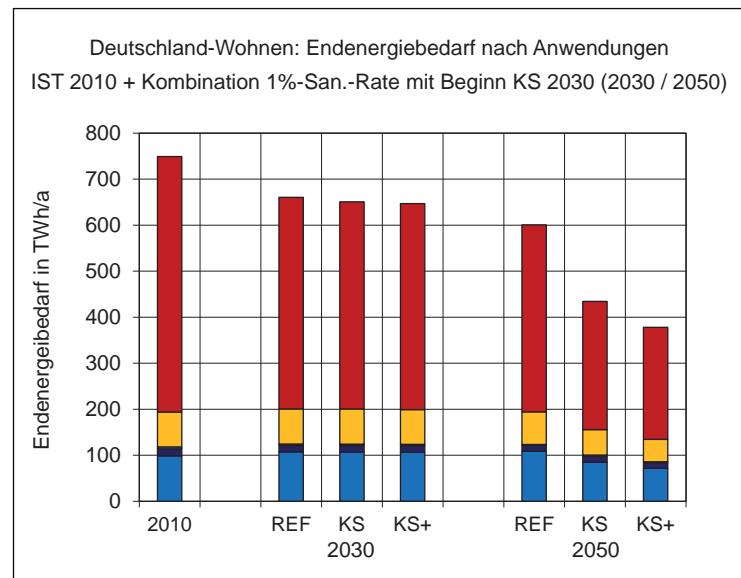


Abbildung 11.14:
Endenergiebedarf nach Anwendungen im Jahr 2010 und für die Kombinationsszenarien mit 1 % Sanierungsrate und Beginn Klimaschutz 2030 im Jahr 2030 und 2050.



Kombination 1 % Sanierungsrate mit Beginn Klimaschutz 2030

In dieser Szenarienfamilie werden zwei ungünstige Randbedingungen kombiniert (Sanierungsrate 1 % + Beginn Klimaschutz im Gebäudebereich erst ab 2030). Ein derartiges Szenario hat eine hohe Eintrittswahrscheinlichkeit, vor allem wenn die entscheidenden Akteure im Wohnungsbau ihre bisherige Strategie der Abschwächung und Verzögerung wirksamer Klimaschutzmaßnahmen weitere 10 Jahre fortsetzen. Die Auswirkungen betreffen - wie zu erwarten - in besonderem Maße die Klimaschutzszenarien:

- Im Referenzszenario sind die Auswirkungen vergleichsweise gering, weil das Hinauszögern wirksamer Klimaschutzmaßnahmen ein Hauptmerkmal der Entwicklung der letzten 10 - 15 Jahre darstellt (z.B. Anforderungsniveau des aktuellen Gebäude-Energien-Gesetzes). Eine geringe Sanierungsrate stellt unter diesen Bedingungen u.U. sogar einen Vorteil dar, damit nicht noch mehr Gebäudebestände in mittlerer energetischer Qualität saniert werden.
- Viel bedeutender sind Auswirkungen in den Klimaschutzszenarien. Bis 2030 liegen Energie- und Emissions-Kennwerte nahezu gleichauf mit denen des Referenzszenarios und bleiben damit außerhalb des Klimaschutzkorridors. Erst danach entwickeln sie sich zögerlich in Richtung eines wirksamen Klimaschutzes. Es gelingt nicht einmal im Klimaschutz-Plus-Szenario diesen Rückstand bis 2050 aufzuholen, um in das Klimaschutzfenster zu gelangen.
- Die Pro-Kopf-GWP-Emissionen verfehlten im Klimaschutzszenario das Zielfenster gänzlich. Der Kombinationseffekt ist von daher insgesamt als sehr kritisch zu bewerten.
- Zwar bewegen sich die entsprechenden Kennwerte im Klimaschutz-Plus-Szenario auf spürbar niedrigerem Niveau. Das Zielfeld wird erst nach 2050 ganz knapp erreicht.

Alle drei Szenarien überschreiten das 2-Grad-GWP-Pro-Kopf-Budget erheblich. Ein gerade noch vertretbarer Ausgleich über CO₂-Senken ist nur im Klimaschutz-Plus-Szenario gegeben.

Kombination (1% SR / Beginn 2030)		REF	KS	KS +	
Endenergie (TWh/a)	2010	749,2	749,2	749,2	
	2030	660,5	650,8	646,8	
	2050	600,7	434,4	378,2	
	2070	545,5	332,6	271,8	
Primärenergie, gesamt (TWh/a)	2010	1101,4	1101,4	1101,4	
	2030	876,9	809,2	795,6	
	2050	742,5	580,3	464,9	
	2070	735,7	444,4	337,0	
Global Warming Potential (Mio t/a)	2010	244,4	244,4	244,4	
	2030	180,2	179,1	168,2	
	2050	116,4	64,8	46,5	
	2070	88,0	23,5	14,3	
GWP pro Kopf (kg/Pa)	2010	3002	3002	3002	
	2030	2136	2124	1995	
	2050	1392	774	556	
	2070	1074	286	175	
Kumuliertes GWP pro Kopf seit 2020 (t/P)	bis 2030	23,5	23,4	23,4	
	bis 2050	57,6	51,4	47,9	
	bis 2070	82,2	61,3	54,6	
	gesamt	98,4	64,1	56,4	
Über-/Unterschreitung 2-Grad-Globalbudget (%)		+ 156 %	+ 66 %	+ 47 %	
Erforderliche GWP-Senke zur Erreichung Klimaschutzziel (t/P)		2,0 °C	-59,9	-25,6	-17,9
		1,7 °C	-75,1	-40,8	-33,1

Tabelle 11.8:
Hauptdaten der Kombinationsszenarien zu End- und Primärenergie (gesamt) sowie zum Global-Warming-Potential. Unten erfolgt eine einfache Bewertung der Szenarien über ein „Ampelsystem“ (siehe Erläuterung S. 24 ff.).

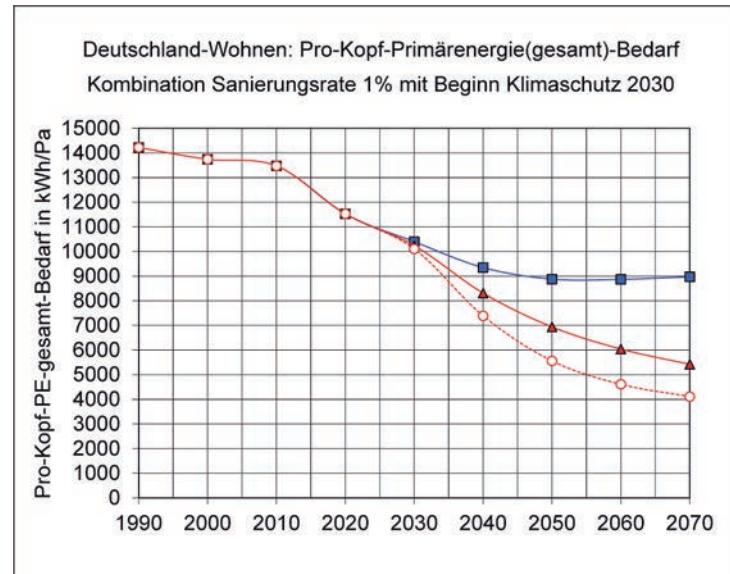


Abbildung 11.15:
Pro-Kopf-Primärenergiebedarf in den Kombinationsszenarien mit 1 % Sanierungsrate und Beginn Klimaschutz 2030 im Zeitraum 1990 bis 2070.

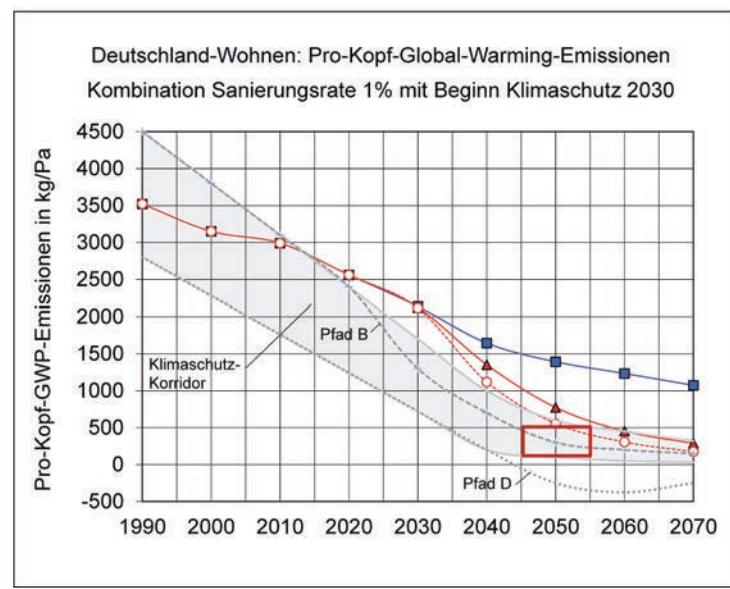


Abbildung 11.16:
Pro-Kopf-Global-Warming-Emissionen (CO_2 -Äquivalente) in den Kombinationsszenarien mit 1 % Sanierungsrate und Beginn Klimaschutz 2030 im Zeitraum 1990 bis 2070. Zur besseren Orientierung sind der Klimaschutz-Korridor und das Zielfeld mit dargestellt.



Abbildung 11.17:
Endenergiebedarf nach Energieträgern im Jahr 2010 und für die Suffizienzszenarien im Jahr 2030 und 2050.

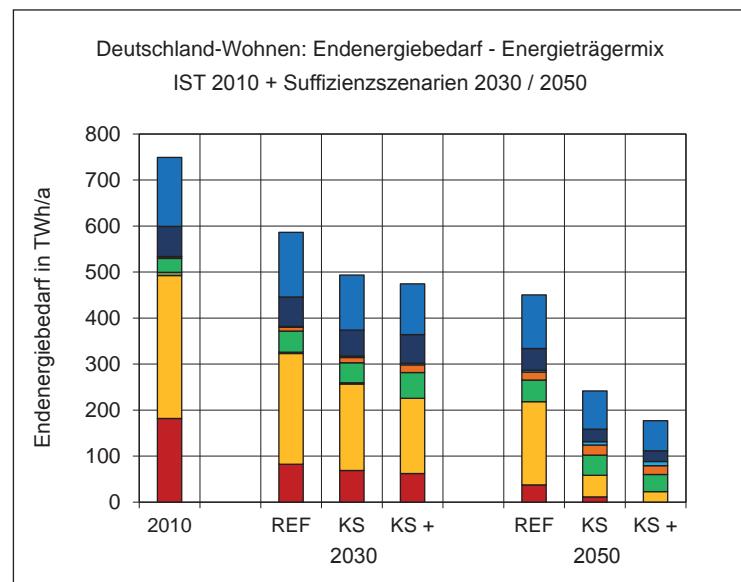
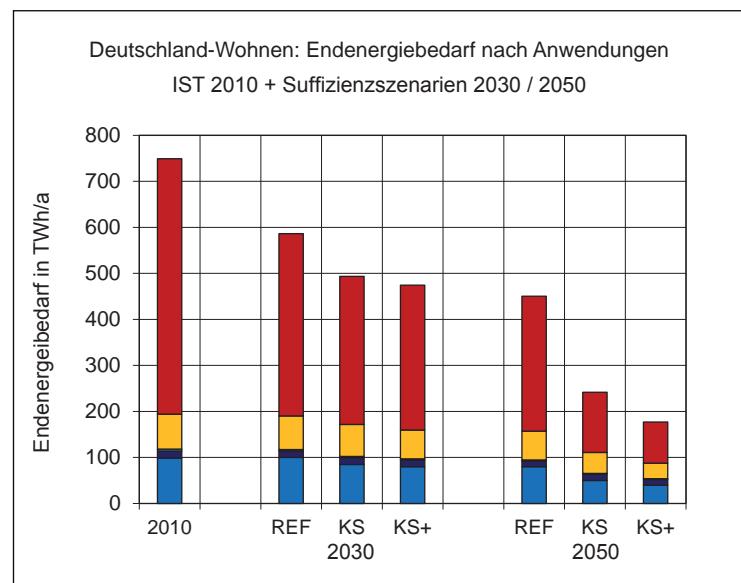


Abbildung 11.18:
Endenergiebedarf nach Anwendungen im Jahr 2010 und für die Suffizienzszenarien im Jahr 2030 und 2050.



Suffizienz

Die Suffizienz-Szenarien zeigen auf, welche Potenziale durch ein klimabewusstes Nutzerverhalten und einen geringeren Konsum von Wohnflächen erschlossen werden können. Diese Maßnahmen können gleichermaßen in allen drei Unterszenarien umgesetzt werden:

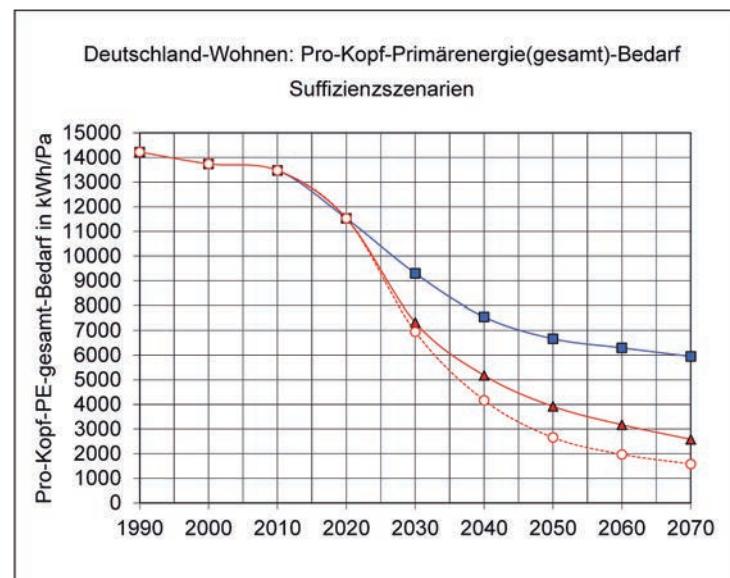
- Im Referenzszenario sind die positiven Auswirkungen auf allen Betrachtungsebenen (End- und Primärenergie sowie GWP-Emissionen) am größten. Grund sind die geringen Fortschritte im Bereich Effizienz und Erneuerbare unter den Standardbedingungen. Dadurch wirken sich ein geringerer Wohnflächen- und Energiekonsum anteilig viel höher aus. Hintergrund ist, dass Suffizienz- und Effizienzstrategien oftmals analog wirken. Der Unterschied liegt eher in der Motivation und Deutung.
- Im Klimaschutzszenario sind die prozentualen Minderungsbeiträge im Vergleich zum Referenzszenario ähnlich hoch, jedoch wegen dem geringeren Bedarfniveau als Absolutbeträge deutlich geringer.
- Nochmals weniger spürbar sind die Auswirkungen im Szenario Klimaschutz-Plus.

Dies könnte zu dem Schluss verleiten, dass die Suffizienzstrategien strategisch von geringer Bedeutung sind, weil sie einerseits nicht in der Lage sind im Referenzszenario eine entscheidende Wende zu bewirken und andererseits in den Klimaschutzszenarios nur geringe absolute Minderungsbeiträge auslösen. Dies ist in dieser Verkürzung nicht zutreffend. Die Bedeutung der Suffizienzstrategien ist vor allem in der Anfangszeit bis 2030/40 groß und damit geeignet, in dieser Übergangszeit mit ihren typischen Verzögerungen wichtige Minderungsbeiträge zu erzielen. Nur im Klimaschutz-Plus-Szenario ist die vollständige Kompatibilität mit dem 2-Grad-Ziel gegeben. Das Klimaschutzszenario verfehlt dieses nur knapp. Im Referenzszenario liegen die kumulierten GWP-Emissionen immer noch um einen Faktor 2 höher als das zulässige 2-Grad-Globalbudget.

Suffizienz		REF	KS	KS +
Endenergie (TWh/a)	2010	749,2	749,2	749,2
	2030	586,5	493,4	474,4
	2050	450,4	241,8	177,2
	2070	361,1	152,2	98,0
Primärenergie, gesamt (TWh/a)	2010	1101,4	1101,4	1101,4
	2030	784,5	617,8	585,8
	2050	557,3	327,7	222,0
	2070	487,7	211,6	129,8
Global Warming Potential (Mio t/a)	2010	244,4	244,4	244,4
	2030	161,4	114,1	99,5
	2050	87,2	32,8	19,3
	2070	58,3	10,4	5,6
GWP pro Kopf (kg/Pa)	2010	3002	3002	3002
	2030	1914	1352	1179
	2050	1043	390	231
	2070	711	127	68
Kumuliertes GWP pro Kopf seit 2020 (t/P)	bis 2030	22,4	19,6	18,7
	bis 2050	50,4	35,3	31,2
	bis 2070	67,9	40,0	33,8
	gesamt	78,6	41,2	34,1
Über-/Unterschreitung 2-Grad-Globalbudget (%)		+ 104 %	+ 7 %	- 11%
Erforderliche GWP-Senke zur Erreichung Klimaschutzziel (t/P)	2,0 °C	-40,1	-2,7	0,0
	1,7 °C	-55,3	-17,9	-10,8

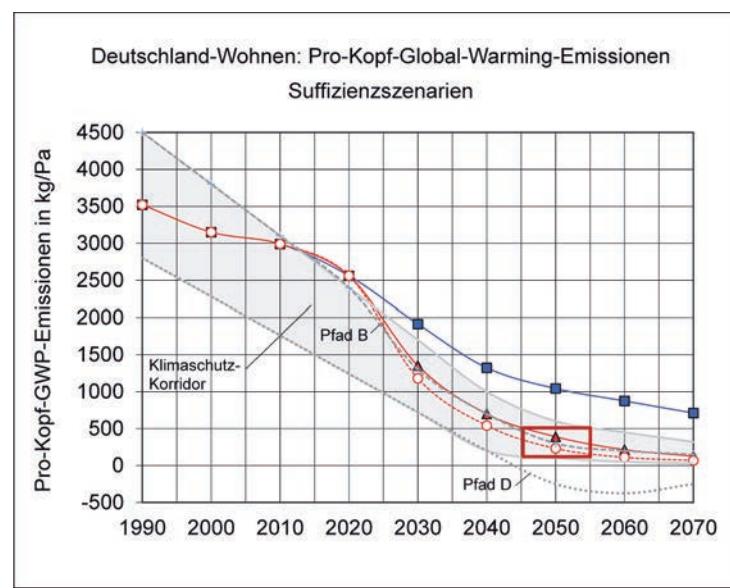
Tabelle 11.9:

Hauptdaten der Suffizienzszenarien zu End- und Primärenergie (gesamt) sowie zum Global-Warming-Potential. Unten erfolgt eine einfache Bewertung der Szenarien über ein „Ampelsystem“ (siehe Erläuterung S. 24 ff.).



■ Referenz
▲ Klimaschutz
○ Klimaschutz-Plus

Abbildung 11.19:
Pro-Kopf-Primärenergiebedarf in den Suffizienzszenarien im Zeitraum 1990 bis 2070.



■ Referenz
▲ Klimaschutz
○ Klimaschutz-Plus
■ Klimaschutz-Korridor
■ Klimaschutz-Zielfeld

Abbildung 11.20:
Pro-Kopf-Global-Warming-Emissionen (CO₂-Äquivalente) in den Suffizienzszenarien im Zeitraum 1990 bis 2070. Zur besseren Orientierung sind der Klimaschutz-Korridor und das Zielfeld mit dargestellt.



Abbildung 11.21:
Endenergiebedarf nach Energieträgern im Jahr 2010 und für die Pushszenarien und für das Szenario Klimaneutral 2050 im Jahr 2030 und 2050.

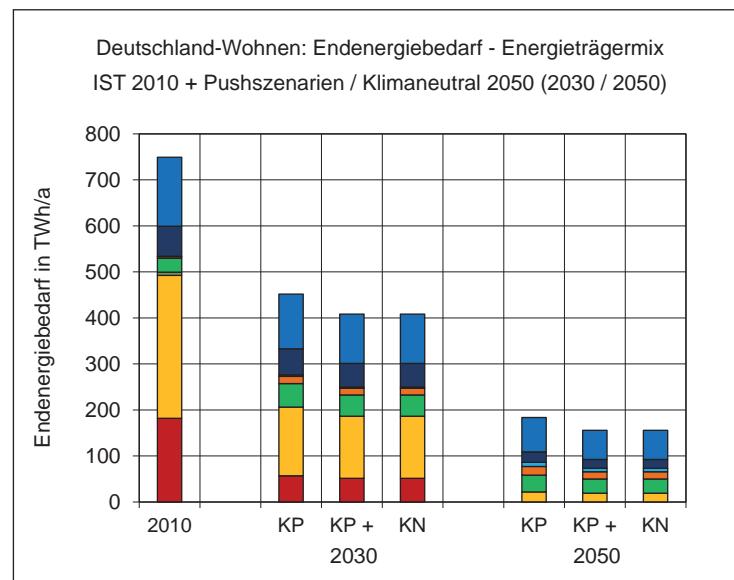
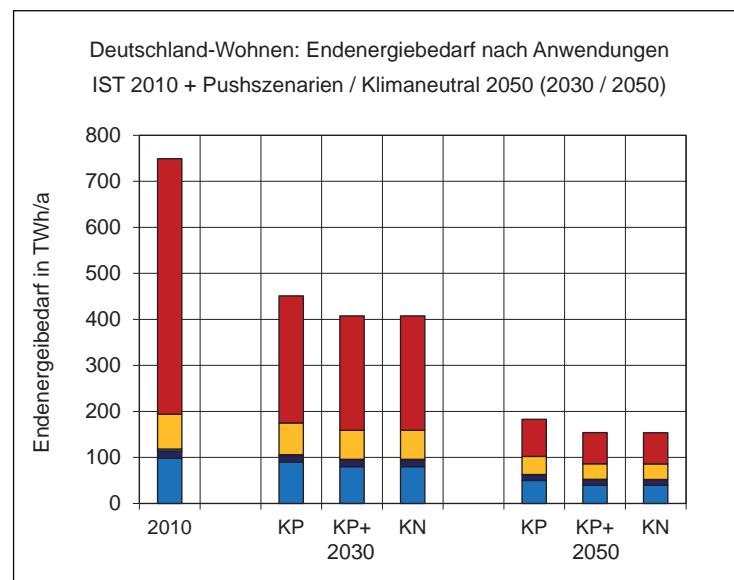


Abbildung 11.22:
Endenergiebedarf nach Anwendungen im Jahr 2010 und für die Pushszenarien und für das Szenario Klimaneutral 2050 im Jahr 2030 und 2050.



Push / Push-Suffizienz / Klimaneutral 2050

In den Push-Szenarien wird ein optimistischer Zukunftsentwurf im Hinblick auf den Klimaschutz beschrieben. Eine schnelle und durchgreifende Transformation der Gebäude und der Energieversorgungssysteme wird ohne „Wenn-und-Aber“ realisiert; daher kann es hier auch keine „Referenz-Entwicklung“ mit wie auch immer gearteten Komponenten eines „Weiter-So“ geben:

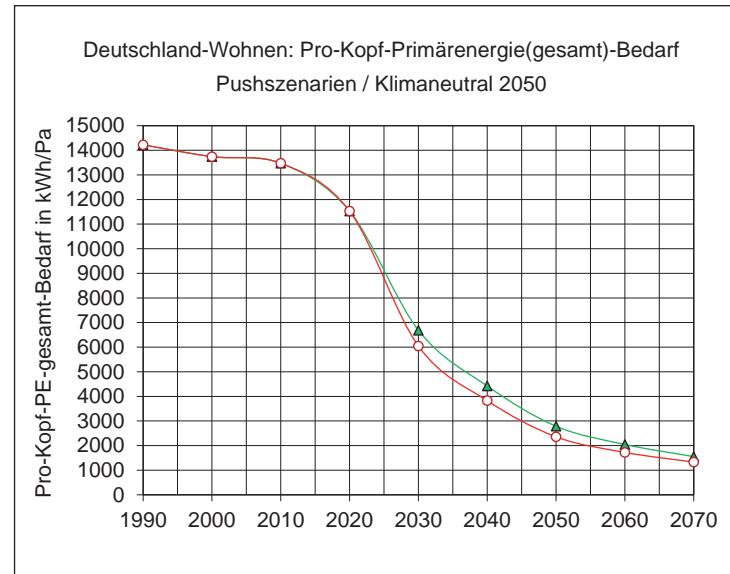
- Das Push-Szenario stellt eine Fortentwicklung des Klimaschutz-Plus-Szenarios dar, indem der technologische Fortschritt bei Gebäudehülle und Gebäudetechnik durch Forschung und Entwicklung sowie Förderprogramme forciert wird und sehr schnell breite Anwendung findet.
- Im Push-Plus-Szenario wird dies zusätzlich mit den Maßnahmen des Suffizienzszenarios kombiniert.
- Im Szenario Klimaneutral 2050 können durch zusätzliche Investitionen in negative Emissionen (Senken) ab dem Jahr 2030 bilanziell Netto-Null-Emissionen im Jahr 2050 erreicht werden.

Der Endenergiebedarf dieser drei Szenarien liegt nochmals deutlich niedriger als in den Suffizienzszenarien. Darin drücken sich vor allem die Effizienzfortschritte aus, die noch zusätzlich erschließbar sind. Der Unterschied zu den Standardszenarien besteht vor allem darin, dass hier bereits in den frühen Phasen nach einer sehr kurzen Übergangsphase keine mittleren Qualitäten mehr zum Einsatz kommen dürfen. Dies ermöglicht zudem, dass auch der Ausbau der erneuerbaren Energieversorgung schneller und durchgreifender gelingen kann.

Bei allen drei Szenarien ist die vollständige Kompatibilität mit dem 2-Grad-Ziel gegeben. Eine Entwicklung, wie im Szenario Klimaneutral-2050 dargestellt, ermöglicht darüber hinaus eine Zielerfüllung des 1,7-Grad-Ziels, jedoch unter der Bedingung, dass auch nach 2050/70 weiter in die Bildung effektiver Senken im dafür notwendigen Ausmaß investiert wird.

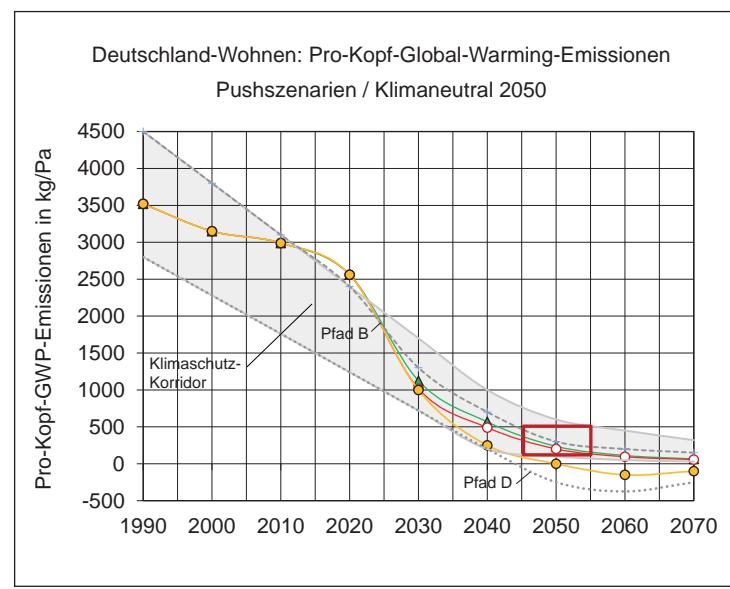
Push / Klimaneutral 2050		Push	Push +	KN 2050
Endenergie (TWh/a)	2010	749,2	749,2	749,2
	2030	451,7	408,4	408,4
	2050	183,9	155,6	155,6
	2070	94,7	80,2	80,2
Primärenergie, gesamt (TWh/a)	2010	1101,4	1101,4	1101,4
	2030	563,8	509,8	509,8
	2050	233,0	197,1	197,1
	2070	127,1	108,9	108,9
Global Warming Potential (Mio t/a)	2010	244,4	244,4	244,4
	2030	94,8	85,8	84,4
	2050	19,8	16,8	0,0
	2070	5,4	4,7	-6,5
GWP pro Kopf (kg/Pa)	2010	3002	3002	3002
	2030	1124	1017	1000
	2050	237	201	0
	2070	66	57	-100
Kumuliertes GWP pro Kopf seit 2020 (t/P)	bis 2030	18,4	17,9	17,8
	bis 2050	30,9	28,9	25,3
	bis 2070	33,5	31,1	23,3
	gesamt	33,9	31,4	19,5
Über-/Unterschreitung 2-Grad-Globalbudget (%)		- 12 %	- 18 %	- 49 %
Erforderliche GWP-Senke zur Erreichung Klimaschutzziel (t/P)		2,0 °C	0,0	0,0
		1,7 °C	-10,6	-8,1
				0,0

Tabelle 11.10:
Hauptdaten der Pushszenarien zu End- und Primärenergie (gesamt) sowie zum Global-Warming-Potential. Unten erfolgt eine einfache Bewertung der Szenarien über ein „Ampelsystem“ (siehe Erläuterung S. 24 ff.).



▲ Klimaschutz-Push
○ Klimaschutz-Suffizienz-Push
Klimaneutral 2050

Abbildung 11.23:
Pro-Kopf-Primärenergiebedarf in den Pushszenarien und für das Szenario Klimaneutral 2050 mit 1% Sanierungsrate im Zeitraum 1990 bis 2070.



▲ Klimaschutz-Push
○ Klimaschutz-Suffizienz-Push
● Klimaneutral 2050
■ Klimaschutz-Korridor
■ Klimaschutz-Zielfeld

Abbildung 11.24:
Pro-Kopf-Global-Warming-Emissionen (CO_2 -Äquivalente) in den Pushszenarien und für das Szenario Klimaneutral 2050 im Zeitraum 1990 bis 2070. Zur besseren Orientierung sind der Klimaschutz-Korridor und das Zielfeld mit dargestellt.

11.3 Entwicklung der Pro-Kopf-GWP-Emissionen aller Szenarien in Verbindung mit Klimaschutzkorridor und Klimaschutz-Zielfeld

Die Darstellung in Form der Entwicklung der jährlichen Pro-Kopf-THG-Emissionen zeigt die Folgen der Szenarien als Minderungspfade mit unterschiedlichen Verläufen und Bezug zu bestimmten Reduktionszielen. In der Zusammenschau aller 18 Szenarien ist es zunächst nicht einfach, vergleichende Schlüsse zu ziehen. Man spricht hier auch leicht spöttisch von einem „Szenarienzoo“ (5). Der grau hinterlegte Klimaschutz-Korridor und das rot markierte Klimaschutz-Zielfeld erleichtern jedoch die Interpretation:

- Die bisherige Entwicklung bis 2020 ist seit 2005 durch eine Seitwärtsbewegung gekennzeichnet, die ab etwa 2015 aus dem Klimaschutzkorridor herausführt.
- In keinem der blau markierten Referenzszenarien gelingt es, wieder in den Klimaschutzkorridor zurückzukehren. Das Zielfeld wird daher von keinem der Referenzszenarien auch nur annähernd erreicht. Mit Pro-Kopf-Emissionen von 1,0 - 1,4 t/Pa im Jahr 2050 wird die Mitte des Zielfeldes (ca. 0,3 t/Pa im Jhr 2050) um einen Faktor 3 - 5 verfehlt. Sie sind damit weit entfernt von einem Paris-kompatiblen Bauen.
- Bei den grün dargestellten Klimaschutzszenarien verfehlten zwei Szenarien das Zielfeld (1 % Sanierungsrate und Kombination 1 % SR / Beginn 2030). alle anderen erreichen das Zielfeld, davon jedoch einige nur im oberen Bereich, der für einen grenzwertigen Klimaschutz steht. Nur das Klimaschutz-Push-Szenario bewegt sich überwiegend innerhalb des Klimaschutz-Korridors und landet im unteren Bereich des Zielfeldes.
- Alle Klimaschutz-Plus-Szenarien landen im Zielfeld. Diejenigen mit verzögerten Beginn der gebäudebezogenen Maßnahmen 2030 verlaufen jedoch 20 - 25 Jahre außerhalb des Klimaschutz-Korridors. Drei Szenarien (1 % Sanie-

rungsrate, Beginn 2030, Kombination 1 % SR-Rate + Beginn 2030) erreichen das Zielfeld nur im oberen Bereich. Immerhin können drei der Klimaschutz-Plus-Szenarien als vollwertig eingestuft werden, weil sie mit gewissen Abweichungen nach oben bzw. unten dem 2-Grad-Pfad folgen.

- Das Szenario Klimaneutral 2050 verläuft über weite Strecken unterhalb des 2-Grad-Pfades des Klimaschutz-Korridors und unterbietet das Zielfenster. Ab spätestens 2030 sind hierfür Investitionen in CO₂-Senken erforderlich, ab 2050 führt dies sogar zu insgesamt negativen Pro-Kopf-THG-Emissionen des Wohngebäudeparks insgesamt.

Es lassen sich somit drei Gruppen von Szenarien in Abhängigkeit ihrer Einordnung hinsichtlich eines wirksamen Klimaschutzes im Hinblick auf die Pro-Kopf-Emissionen im Jahr 2050 unterscheiden:

- A** Szenarien, die nach heutigen Erkenntnissen in Übereinstimmung mit den Klimaschutzanforderungen stehen. Dazu dürfen auf jeden Fall das Klimaneutral 2050-Szenario und die beiden Push-Szenarien gezählt werden. Auch zwei Klimaschutz-Plus-Szenarien (Standard und Sufizienz) gehören in diese Gruppe.
- B** Szenarien, die aus Sicht des Klimaschutzes bereits grenzwertig sind und zusätzliche Klimaausgleiche (z.B. Schaffung von CO₂-Senken) benötigen. Hierzu gehören die meisten Klimaschutzszenarien und einige der Klimaschutz-Plus-Szenarien (1 % Sanierungsrate, Beginn 2030 und Kombination 1 % SR + Beginn 2030)
- C** Szenarien, die definitiv keinen Klimaschutz gemäß Pariser Klimaschutzabkommen bieten. Hierzu zählen sämtliche Varianten der Referenzszenarien aber auch einige Varianten der Klimaschutzszenarien mit ungünstigen Randbedingungen (1 % Sanierungsrate, Beginn 2030 und die Kombination von 1 % Sanierungsrate mit Beginn 2030)

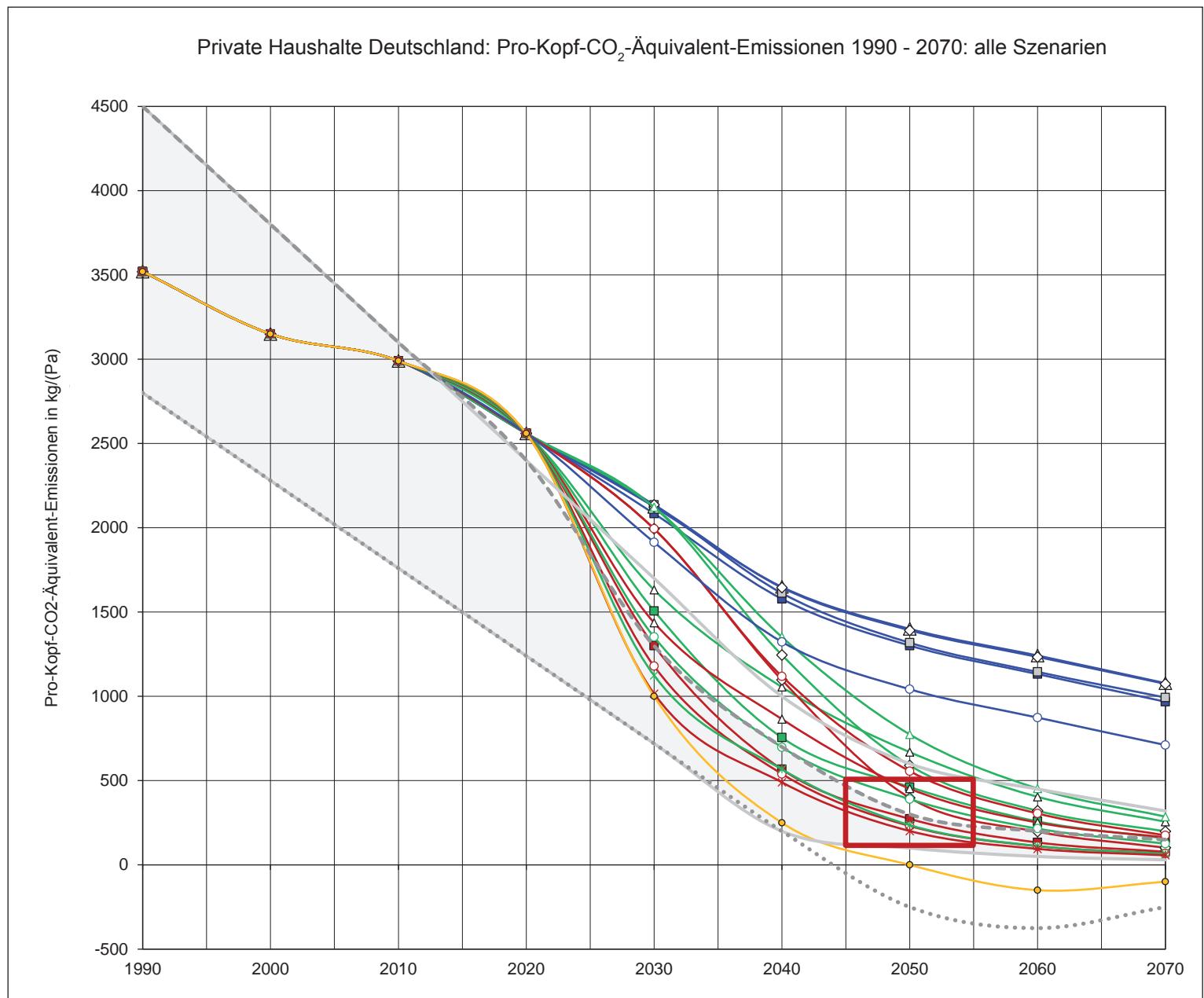


Abbildung 12.1
Pro-Kopf-Treibhausgasemissionen
der privaten Haushalte im Zeitraum
1990 - 2070 in allen untersuchten
Szenarien.

- Referenz
- Klimaschutz
- Klimaschutz-Plus
- △ REF 1%-San.Rate
- △ KS 1%-San.Rate
- △ KS-PLUS 1%-San.Rate
- REF Beginn 2030
- ◇ KS Beginn 2030
- ◇ KS-PLUS Beginn 2030
- ◇ REF Kombi (1%-2030)
- △ KS Kombi (1%-2030)
- KS-PLUS Kombi (1%-2030)

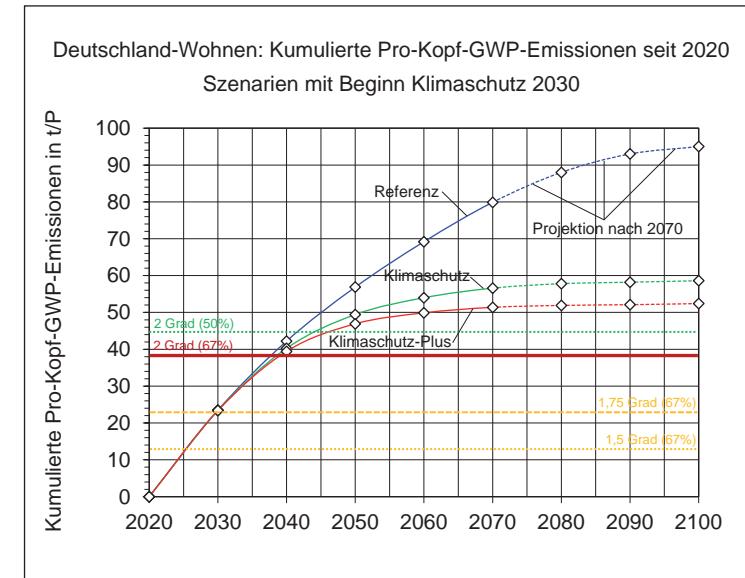
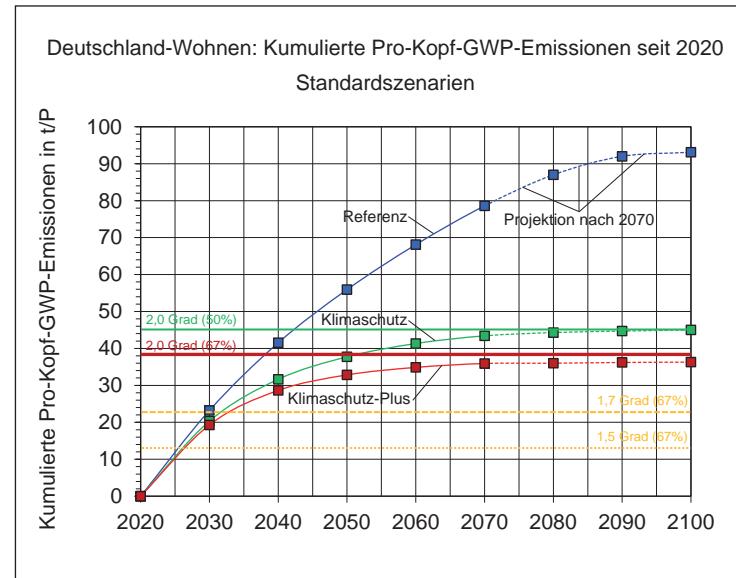
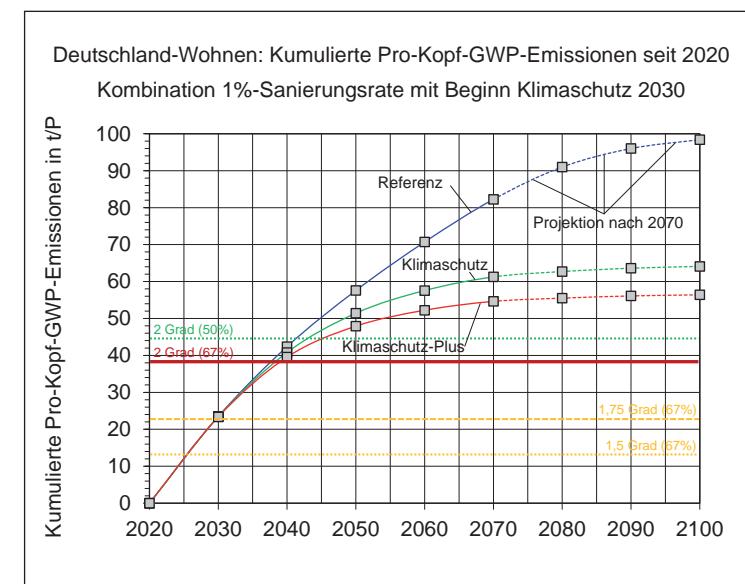
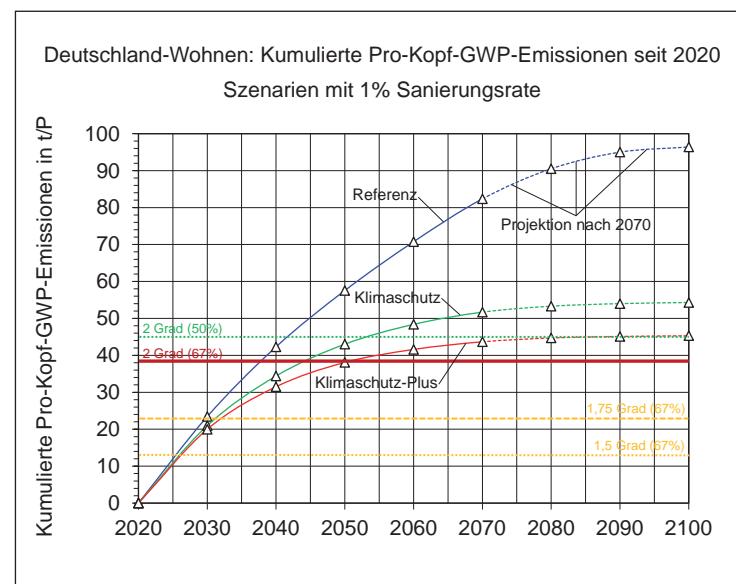


Abbildung 11.26:
Kumulierte Pro-Kopf-Treibhausgasemissionen seit 2020 für die 18 Szenarien in den 6 Szenarienfamilien. Zur besseren Orientierung sind die zulässigen Budgets für das 2,0-, das 1,7- und das 1,5-Grad-Ziel als farbige horizontale Linien aufgetragen. Ihre Überschreitung nach oben bedeutet, dass das anteilige Klimaziel für Wohngebäude verfehlt wird.

- Standardszenarien
- Szenarien mit 1 % Sanierungsrate
- Szenarien mit Beginn Klimaschutz 2030
- Kombination 1 % Sanierungsrate mit Beginn Klimaschutz 2030
- Suffizienzszenarien
- Push-Szenarien und Szenario Klimaneutral 2050



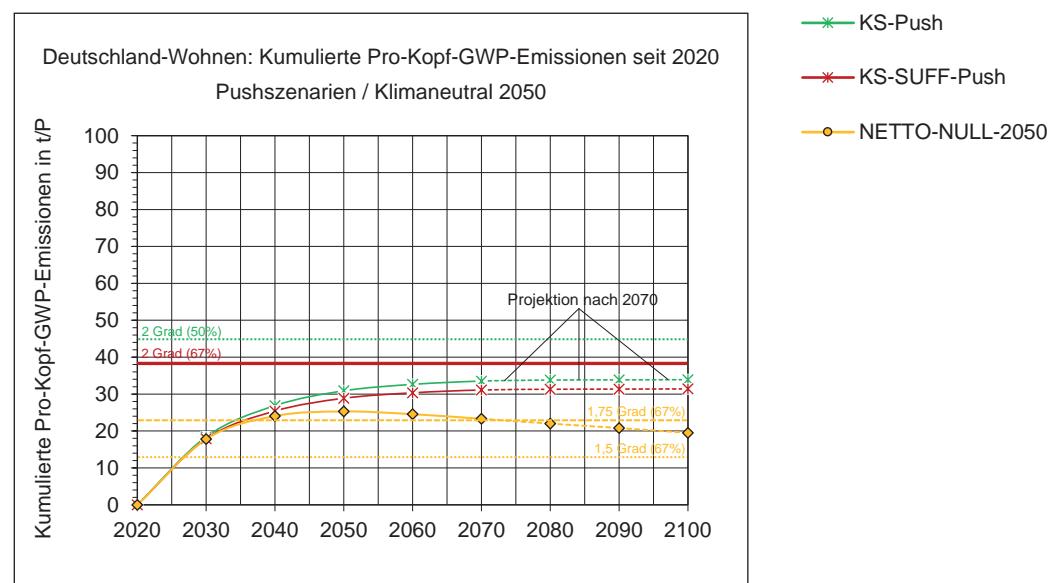
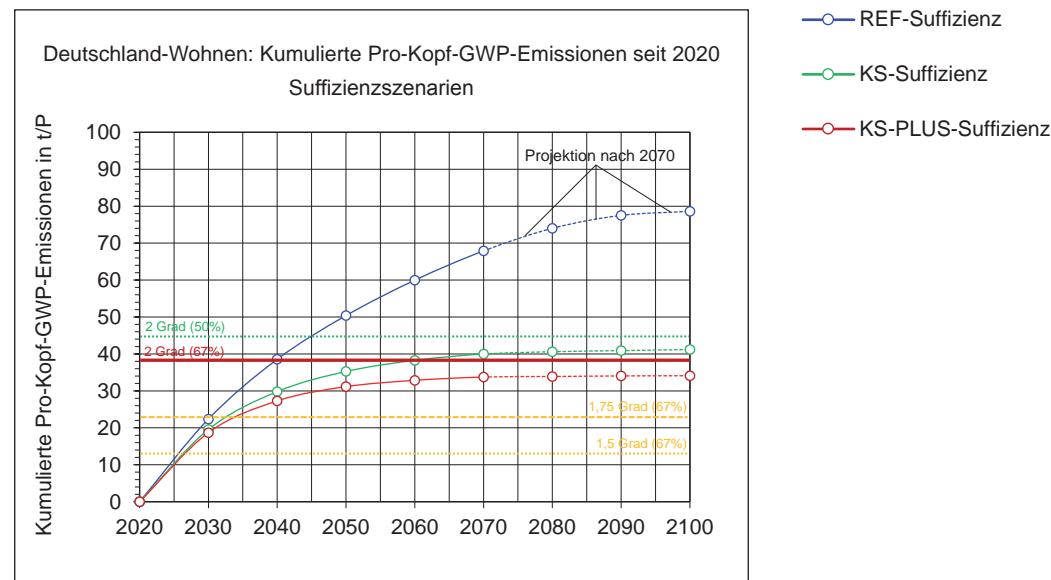
11.4 Entwicklung der kumulierten Pro-Kopf-GWP-Emissionen im Vergleich zu den Gebäude-Emissionsbudgets

In der alternativen Darstellung werden die Pro-Kopf-THG-Emissionen nach 2020 Jahr für Jahr aufaddiert und in Bezug zu den gebäudebezogenen THG-Budgets gesetzt, die als horizontale Linien dargestellt sind. Ein Paris-kompatibles Bauen erfordert, dass die kumulierten Pro-Kopf-THG-Emissionen wenigstens unterhalb der rot markierten Linie bleiben, die sich auf das 2-Grad-Ziel mit einer Eintrittswahrscheinlichkeit von 67 % bezieht. Eine gute Übereinstimmung mit dem Pariser-Klimaziel ist mit der gelb-gestrichelten Linie markiert, die den Anteil des deutschen Globalbudgets für Wohngebäude, der für das 1,7-Grad-Ziel noch emittiert werden darf, kennzeichnet. Weitere Linien bezeichnen das 1,5 Grad-Ziel (gelb-gepunktet) und das 2-Grad-Ziel mit 50 % Eintrittswahrscheinlichkeit (grün-gepunktet). Damit ist dann der Bereich zwischen einem vollständigen und einem grenzwertigem Klimaschutz für den Wohngebäudepark insgesamt abgesteckt.

Das Global-Warming-Potential wurde in den Szenarien bis 2070 kalkuliert und im Zeitraum 2070 bis 2100 im Sinne einer Projektion abgeschätzt. Dafür wurde in allen Szenarien die Annahme getroffen, dass bis spätestens 2100 der Wohngebäudepark klimaneutral ist (mit Netto-Null-Emissionen). Diese Projektionen sind in den Grafiken mit gestrichelten Linien dargestellt.

In den Abbildungen 11.26 a - f sind die Ergebnisse für die jeweiligen Szenarienfamilien aufgetragen. Für die Standardszenarien sollen sie etwas genauer analysiert werden (siehe Abb. 1.19):

- Das gebäudebezogene Globalbudget für das 1,5-Grad-Ziel wird sowohl im Referenz- als auch in den beiden Klimaschutzszenarien bereits nach 3 - 4 Jahren überschritten.
- Für das 1,75-Grad-Ziel passiert dies nach 7 - 8 Jahren.
- Erst danach entwickeln sich die kumulierten Pro-Kopf-THG-Emissionen zwischen den Szenarien sichtbar auseinander.



Szenarienfamilie / Kurzbeschreibung	Szenario	Kumulierte Pro-Kopf-GWP-Emissionen (t/P)				Notwendiger Ausgleich mit CO ₂ -Senken (t/P)	
Standard Konsequente Anwendung des Kopplungsprinzips (Sanierungsrate 2 %) Klimaschutzstrategien beginnen 2020 / ab 2030 vollumfängliche Umsetzung Unterscheidung der Anforderungen im Bestand (voll-/ bedingt sanierbar) In allen Szenarien werden die Qualitäten im Betrachtungszeitraum stetig verbessert Suffizienzstrategien kommen nicht zum Einsatz		bis 2030	bis 2050	bis 2070	gesamt	2-Grad	1,7 Grad
	Referenz	23,3	55,9	78,6	93,1	-54,6	-69,8
	Klimaschutz	20,3	37,7	43,4	45,0	-6,5	-21,7
	Klimaschutz-Plus	19,3	32,8	35,9	36,3	0,0	-13,0
1 % Sanierungsrate wie Standard, jedoch durchgängig nur 1 % Sanierungsrate bei energetischen Modernisierungen	Referenz	23,4	57,5	82,4	96,4	-60,0	-73,1
	Klimaschutz	21,0	43,0	51,7	54,6	-15,7	-31,3
	Klimaschutz-Plus	20,0	38,1	43,7	45,3	-6,8	-22,0
Beginn Klimaschutz 2030 wie Standard, jedoch Beginn gebäudebezogener Klimaschutzmaßnahmen erst ab 2030	Referenz	23,5	56,9	79,9	95,0	-56,3	-71,7
	Klimaschutz	23,4	49,4	56,6	58,6	-20,1	-35,3
	Klimaschutz-Plus	23,4	46,7	51,4	52,4	-13,9	-29,1
Kombination (1% Sanierungsrate / Beginn Klimaschutz 2030) wie Standard, jedoch Sanierungsrate 1 % und Beginn Klimaschutzmaßnahmen erst ab 2030	Referenz	23,5	57,6	82,2	98,4	-59,9	-75,1
	Klimaschutz	23,4	51,4	61,3	64,1	-25,6	-40,8
	Klimaschutz-Plus	23,4	47,9	54,6	56,4	-17,9	-33,1
Suffizienz wie Standard, jedoch konsequente Verfolgung von Suffizienzansätzen hinsichtlich Wohnfläche / Person, Raumtemperatur, WW-Anwendungen und Stromanwendungen	Referenz	22,2	50,4	67,9	78,6	-40,1	-55,3
	Klimaschutz	19,6	35,3	40,0	41,2	-2,7	-20,9
	Klimaschutz-Plus	18,7	31,2	33,8	34,1	0,0	-10,8
Push / Klimaneutral 2050 wie Standard, jedoch konsequenter Einsatz der marktbesten Komponenten Beim Szenario KN 2050 werden ab 2030/40 zusätzlich CO ₂ -Senken eingesetzt	Push	18,4	30,9	33,5	33,9	0,0	-10,6
	Push-Plus	17,9	28,9	31,1	31,4	0,0	-8,1
	KN 2050	17,8	25,3	23,3	19,5	0,0	0,0

Tabelle 11.11: Kurzbeschreibung der Szenarienfamilien mit Angabe der kumulierten Pro-Kopf-GWP-Emissionen seit 2020 und der notwendigen CO₂-Senken zum Erreichen des 2,0- und 1,7-Grad-Ziels

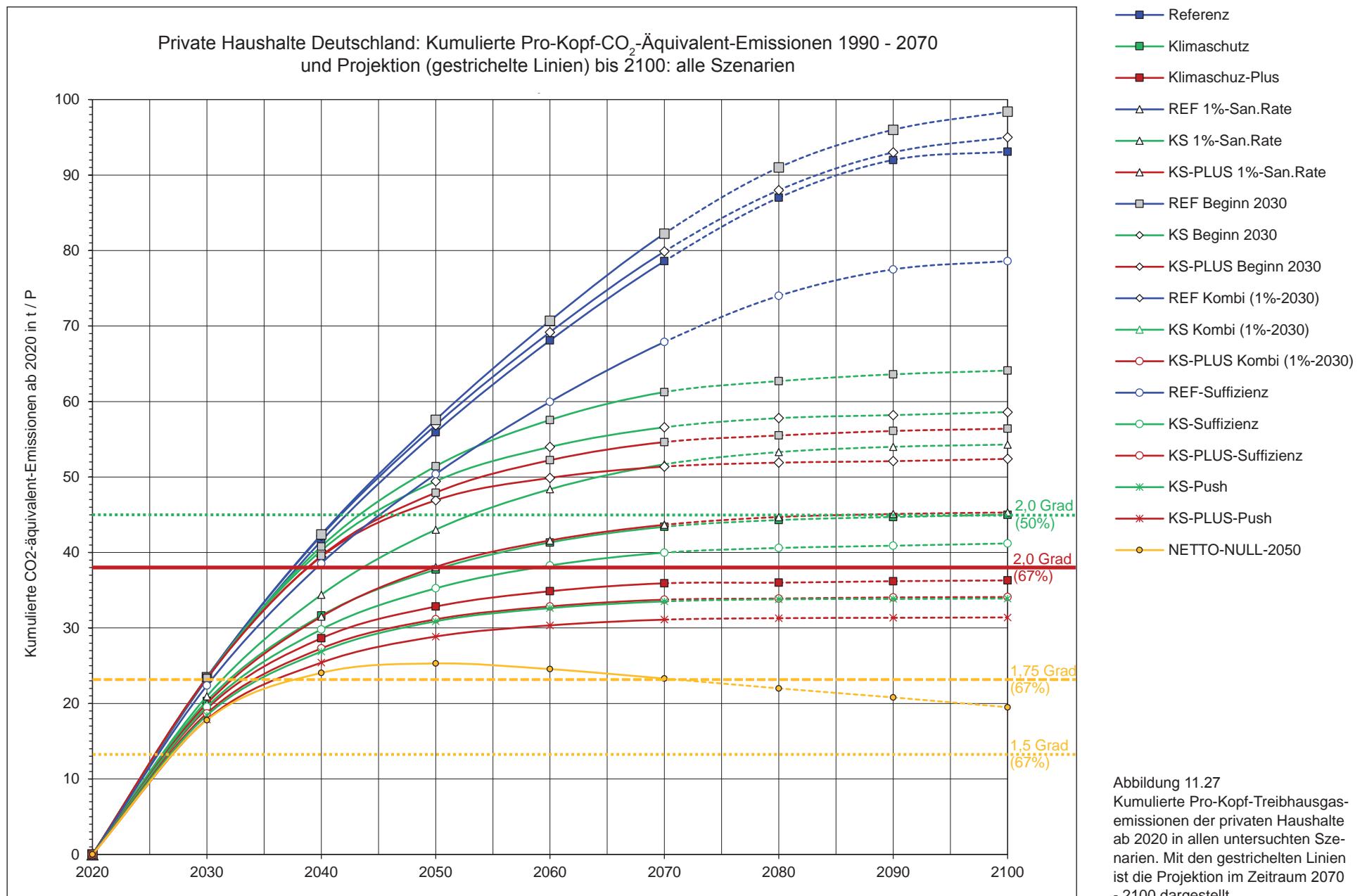


Abbildung 11.27
Kumulierte Pro-Kopf-Treibhausgasemissionen der privaten Haushalte ab 2020 in allen untersuchten Szenarien. Mit den gestrichelten Linien ist die Projektion im Zeitraum 2070 - 2100 dargestellt.

- Im Standard-Referenzszenario steigen die Pro-Kopf-Emissionen immer weiter an und überschreiten etwa im Jahr 2036 das 2-Grad-Budget mit 67 % Eintrittswahrscheinlichkeit und im Jahr 2047 auch dasjenige mit 50 %. Bis 2070 erreichen die kumulierten Pro-Kopf-THG-Emissionen einen Wert von 78,6 t/P. In der Projektion bauen sich die THG-Emissionen weiter auf, um erst im Jahr 2100 mit 93,1 t/P zum Stillstand zu kommen.
- Im Standard-Klimaschutzszenario flacht der Anstieg nach 2030 gegenüber der Referenzentwicklung ab. Das 2-Grad-Budget wird dort mit 37,7 t/P ziemlich genau im Jahr 2050 erreicht und steigt danach bis 2070 auf 43,4 t/P um in der Projektion bis 2100 noch auf 45,0 t/P anzusteigen.
- Im Standard-Klimaschutz-Plus-Szenario steigen die kumulierten Pro-Kopf-GWP-Emissionen spürbar langsamer an als im Klimaschutzszenario und bleiben insgesamt unter dem 2-Grad-Budget mit 67% Eintrittswahrscheinlichkeit. Im Jahr 2050 erreichen sie 32,8 t/P, im Jahr 2070 35,9 t/P und in der Projektion bis 2100 36,3 t/P.

Auswertung der anderen Szenarienfamilien im Vergleich

Die weitere Auswertung der Ergebnisse erfolgt nun im nächsten Schritt für jede Szenarienfamilie separat. Dabei treten dann die Auswirkungen der Einzelaspekte, die in jeder Szenarienfamilie gegenüber den Standardszenarien verändert sind, besonders hervor. Als Indikator dient hierbei der Einfluss auf die kumulierten Pro-Kopf-THG-Emissionen ab 2020.

1 % Sanierungsrate

Im Referenzszenario wirkt sich die Beibehaltung der bisherigen Sanierungsrate von nur 1 % kaum auf die kumulierten Pro-Kopf-THG-Emissionen aus. Diese steigen insgesamt von 93,1 auf 96,4 t/P und damit um 3,5 % an. Im Klimaschutzszenario ist dieser Einfluss mit 21,3 % von 45,0 auf 54,6 t/P deutlich größer und liegt im Klimaschutz-Plus-Szenario mit 24,8 % (von 36,3 auf 45,3 t/P) nochmals darüber.

Beginn Klimaschutz 2030

In dieser Szenarienfamilie wird der Beginn gebäudebezogener Klimaschutzmaßnahmen um 10 Jahre auf 2030 verschoben. Während dies im Referenzszenario mit einem Anstieg um 2,0 % kaum Auswirkungen zeigt, ist der Einfluss beim Klimaschutzszenario sogar höher als im Fall der 1%-Sanierungsrate-Szenarienfamilie. Die kumulierten-Pro-Kopf-THG-Emissionen steigen unter dieser Randbedingung von 45 auf 58,6 t/P und damit um 30,2 %. Nochmals größer ist der prozentuale Anstieg im Klimaschutz-Plus-Szenario, der dort 44,4 % beträgt.

Kombination 1% Sanierungsrate mit Beginn Klimaschutz 2030

Das Kombinationsszenario koppelt die beiden für den Klimaschutz ungünstigen Randbedingungen aneinander. Im Referenzszenario steigen die kumulierten Pro-Kopf-THG-Emissionen auf 98,4 t/P bzw. um 5,7 % an. Im Klimaschutzszenario findet eine deutliche Erhöhung von 45,0 auf 64,1 t/P und damit um 42,4 % statt. Nochmals größer sind die Auswirkungen im Klimaschutz-Plus-Szenario. Die Pro-Kopf-THG-Emissionen vergrößern sich von 36,3 auf 56,4 t/P und damit um 55,4 %.

Suffizienz

Die konsequente Anwendung von Suffizienzmaßnahmen wirkt sich im Referenzszenario als Reduktion der Pro-Kopf-THG-Emissionen von 93,1 auf 78,6 t/P aus. Das entspricht einem Rückgang von 15,6 %. Im Klimaschutzszenario lässt sich hingegen nur eine Verringerung des Absolutwertes von 45,0 auf 41,2 t/P und damit um 8,4 % erzielen. Nochmals geringer fällt diese Minderung im Klimaschutz-Plus-Szenario mit 6,1 % von 36,3 auf 34,1 t/P aus.

Push / Klimaneutral 2050

In den Push-Szenarien wird ein besonderes Gewicht auf eine schnelle und durchgreifende Anwendung von Klimaschutztechnologien im Gebäudebereich gelegt. Dies macht nur bei den Klimaschutzszenarien Sinn, denn die Referenzentwicklung ist per Definition mit der Anwendung mittlerer energetischer Qua-

litäten verbunden. Im Klimaschutzszenario ergibt sich bei dieser Strategie ein spürbarer Rückgang bei den kumulierten Pro-Kopf-THG-Emissionen von 45,0 auf 33,9 t/P und damit um 24,7 %. Im Klimaschutz-Plus-Szenario sind die Auswirkungen geringer, weil hier die Berücksichtigung eines technologischen Fortschritts bereits mit enthalten ist und sich nur deren Einsatz beschleunigt. Die kumulierten Pro-Kopf-THG-Emissionen verringern sich dadurch um 13,5 % von 36,3 auf 31,4 t/P.

Das Szenario Klimaneutral 2050 strebt Netto-Null-Emissionen des gesamten Wohngebäudeparks bis 2050 an. Dies ist nur über die Bildung von CO₂-Senken ab 2030 erreichbar. Dies führt gegenüber dem Klimaschutz-Plus-Szenario zu einer deutlichen Reduktion der kumulierten Pro-Kopf-THG-Emissionen von 36,3 auf nur noch 19,5 t/P und damit um 53,7 %.

Gesamtauswertung Primärenergie(gesamt)-Bedarf

Die Gesamtauswertung der 18 Szenarien startet mit dem gesamten Primärenergiebedarf pro Kopf. Der gemeinsame Ausgangswert für das Jahr 2020 beträgt 11524 kWh/Pa. In Tabelle 11.13 sind die Folgewerte für die Jahre 2030, 2040, 2050, 2060 und 2070 aufgelistet. In den Referenzszenarien bleiben diese auf einem hohen Niveau und sinken nur allmählich ab. In den beiden Klimaschutzszenarien kommt es zu einer deutlichen Reduktion, die beeindruckend aufzeigt, dass das Energiesystem zur Versorgung der Wohngebäude gegenüber heute bis 2050 um einen Faktor 1,7 - 4,9 und bis 2070 um einen Faktor 2,1 - 8,7 verkleinert werden kann. Unter den schwierigen Bedingungen der Szenarien mit 1 % Sanierungsrate bzw. dem Beginn Klimaschutz erst 2030 oder deren Kombination gelingt dies in deutlich geringerem Maße als in den Standardszenarien. In den Suffizienz- und Push-Szenarien wird hingegen erreicht, dass ein effizientes und damit kleines Energiesystem für die Versorgung mit Strom und Wärme ausreicht.

Betrachtet man den kumulierten Primärenergiebedarf pro Person für den Zeitraum 2020 - 2070 (siehe Abbildung 11.28 und

Tab. 11.13, rechte, grau hinterlegte Spalte), so zeigt sich in allen Szenarienfamilien dieselbe Reihenfolge. Immer weist das Referenzszenario die höchsten Werte auf, während im Klimaschutz-Plus-Szenario die niedrigsten Werte ausgewiesen werden. Dazwischen liegt das Klimaschutzszenario. Verantwortlich dafür ist die unterschiedliche Energieeffizienz der Wohngebäude. Unter ungünstigen Randbedingungen nähern sich die Werte zwischen den drei Szenarien an, weil sowohl eine geringe Sanierungsrate als auch ein hinausgezögerter Beginn der Klimaschutzmaßnahmen zu höheren Energiebedarfswerten führt, was vor allem für die Klimaschutzszenarien negative Auswirkungen hat. Der kumulierte Primärenergiebedarf des Referenzszenarios liegt je nach den sonstigen Randbedingungen um 21 - 54 % höher als im Klimaschutz- und um 37 - 122 % höher als in den Klimaschutz-Plus- bzw. den Push-Szenarien.

Gesamtauswertung kumulierte Treibhausgasemissionen

In Abbildung 11.29 findet sich eine einfache Form der Gesamtauswertung ohne Darstellung der zeitlichen Dynamik. Die kumulierten Pro-Kopf-GWP-Emissionen ab 2020 besitzen den Vorteil, dass mit einer Größe ein direkter Vergleich mit den zulässigen gebäudebezogenen THG-Budgets ermöglicht wird. Die Referenzszenarien sind blau, die Klimaschutzszenarien grün und die Klimaschutz-Plus-Szenarien rot sowie das Klimaneutral 2050-Szenario gelb markiert. Die Projektion der zusätzlichen Emissionen 2070 – 2100 wird jeweils mit leichten Farbtönen dargestellt. Diese spielen vor allem bei den Referenzszenarien quantitativ eine größere Rolle.

Die Ergebnisse in den unterschiedlichen Szenarienfamilien sind nebeneinander angeordnet, wodurch ein leichter Vergleich mit den Standardszenarien und untereinander möglich ist. Die Ergebnisse können folgendermaßen zusammengefasst werden (Tab. 11.11 und Abb. 11.27 sowie Abb. 11.29):

- Die Referenzszenarien liegen sämtlich um einen Faktor 2,0 - 2,6 über dem zulässigen wohngebäudebezogenen Globalbudget von maximal 38,5 t/P.

Pro-Kopf-GWP (in kg/Pa) und kumulierte GWP 2020 - 2100 (in t/P)						
Standard	2030	2040	2050	2060	2070	k _{GWP}
Referenz	2081	1579	1302	1134	968	93,1
Klimaschutz	1506	754	460	258	158	45,0
Klimaschutz-Plus	1272	567	274	133	79	36,3

1 % Sanierungsrate	2030	2040	2050	2060	2070	k _{GWP}
Referenz	2125	1647	1399	1242	1078	96,4
Klimaschutz	1632	1055	669	404	256	54,6
Klimaschutz-Plus	1437	865	452	251	163	45,3

Beginn Klimaschutz 2030	2030	2040	2050	2060	2070	k _{GWP}
Referenz	2136	1612	1318	1145	993	95,0
Klimaschutz	2124	1245	590	321	199	58,6
Klimaschutz-Plus	2118	1097	398	197	102	52,4

Kombi (1% SR/ Beginn 2030)	2030	2040	2050	2060	2070	k _{GWP}
Referenz	2136	1645	1392	1234	1074	98,4
Klimaschutz	2124	1352	774	454	286	64,1
Klimaschutz-Plus	2118	119	556	305	175	56,4

Suffizienz	2030	2040	2050	2060	2070	k _{GWP}
Referenz	1914	1323	1042	874	711	78,6
Klimaschutz	1352	698	390	215	126	41,2
Klimaschutz-Plus	1179	540	231	111	68	34,1

Push/Klimaschutz 2050	2030	2040	2050	2060	2070	k _{GWP}
Push	1124	567	236	112	66	33,9
Push-Plus	1017	489	201	95	57	31,4
Klimaneutral 2050	1017	327	0	-150	-100	19,5

Tabelle 11.12:
Zusammenstellung der Pro-Kopf-Treibhausgasemissionen in den Jahren 2030, 2040, 2050, 2060 und 2070 in kg/Pa für die 18 Szenarien der sechs Szenarienfamilien. In der grau hinterlegten rechten Spalte sind zudem die kumulierten Pro-Kopf-Treibhausgasemissionen im Zeitraum 2020 - 2100 in t/P angegeben

Pro-Kopf-PEB (in kWh/Pa) und kumulierter PEB 2020-2070 (in MWh/P)						
Standard	2030	2040	2050	2060	2070	k _{PEB}
Referenz	10121	8951	8309	8165	8066	453,4
Klimaschutz	8114	5561	4597	3816	3195	294,5
Klimaschutz-Plus	7615	4380	3099	2300	1779	240,5

1 % Sanierungsrate	2030	2040	2050	2060	2070	k _{PEB}
Referenz	10337	9370	8922	8922	9005	478,2
Klimaschutz	8754	7443	6329	5655	5134	365,1
Klimaschutz-Plus	8416	6473	4903	4178	3830	316,5

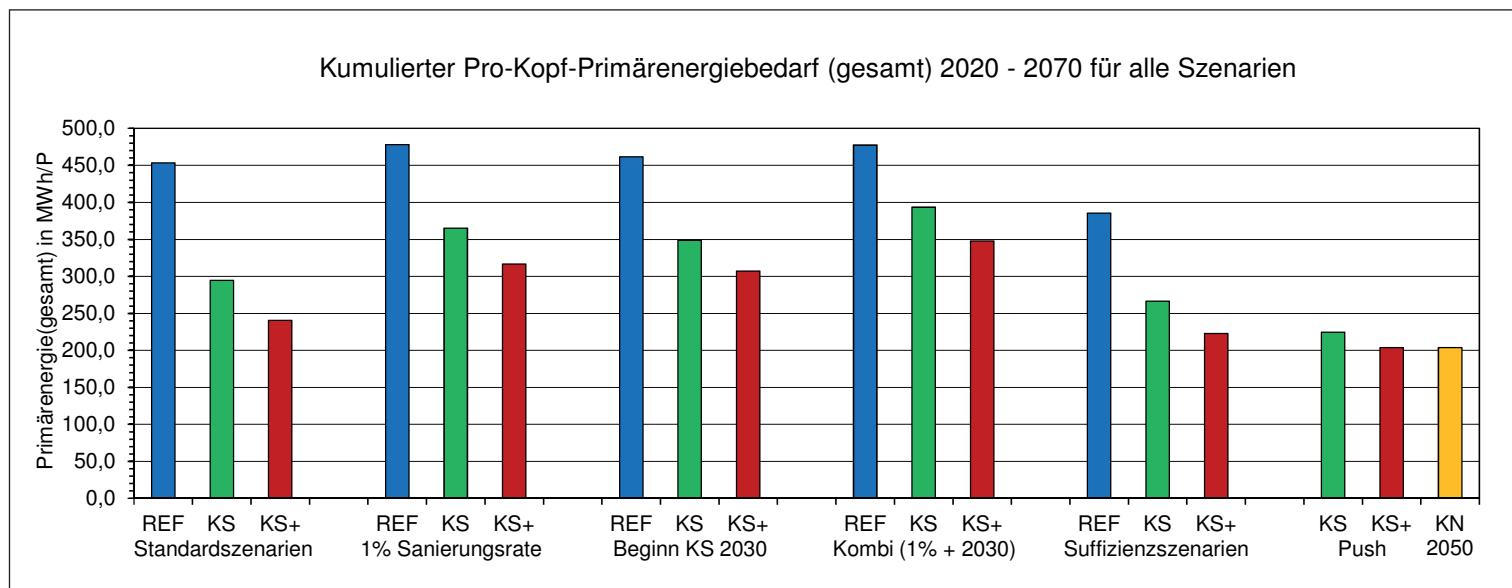
Beginn Klimaschutz 2030	2030	2040	2050	2060	2070	k _{PEB}
Referenz	10395	9172	8427	8259	8315	461,7
Klimaschutz	9594	7677	5486	4452	3809	348,8
Klimaschutz-Plus	9433	7236	4056	3016	2410	307,1

Kombi (1% SR/ Beginn 2030)	2030	2040	2050	2060	2070	k _{PEB}
Referenz	10395	9348	8878	8869	8972	477,4
Klimaschutz	9594	8309	6938	6039	5420	393,5
Klimaschutz-Plus	9433	7387	5558	4607	4110	348,0

Suffizienz	2030	2040	2050	2060	2070	k _{PEB}
Referenz	9300	7547	6663	6294	5947	385,4
Klimaschutz	7325	5175	3918	3173	2580	266,4
Klimaschutz-Plus	6945	4168	2655	1970	1581	222,9

Push/Klimaschutz 2050	2030	2040	2050	2060	2070	k _{PEB}
Push	6684	4420	2786	2045	1550	224,7
Push-Plus	6044	3825	2356	1723	1328	203,7
Klimaneutral 2050	6044	3825	2356	1723	1328	203,7

Tabelle 11.13:
Zusammenstellung des Pro-Kopf-Primärenergiebedarfs in den Jahren 2030, 2040, 2050, 2060 und 2070 in kWh/Pa für die 18 Szenarien der sechs Szenarienfamilien. In der grau hinterlegten rechten Spalte sind zudem die kumulierten Pro-Kopf-Treibhausgasemissionen im Zeitraum 2020 - 2070 in MWh/P angegeben.



█ Referenzszenarien
█ Klimaschutzszenarien
█ Klimaschutz-Plus-Szenarien
█ Szenario Klimaneutral 2050

Abbildung 11.28:
Kumulierter Pro-Kopf-Primärenergiebedarf im Zeitraum 2020 - 2070 für alle 18 Szenarien aus den sechs Szenarienfamilien. Die angegebenen Werte betreffen den gesamten Primärenergiebedarf. Angabe der Werte in MWh/P.

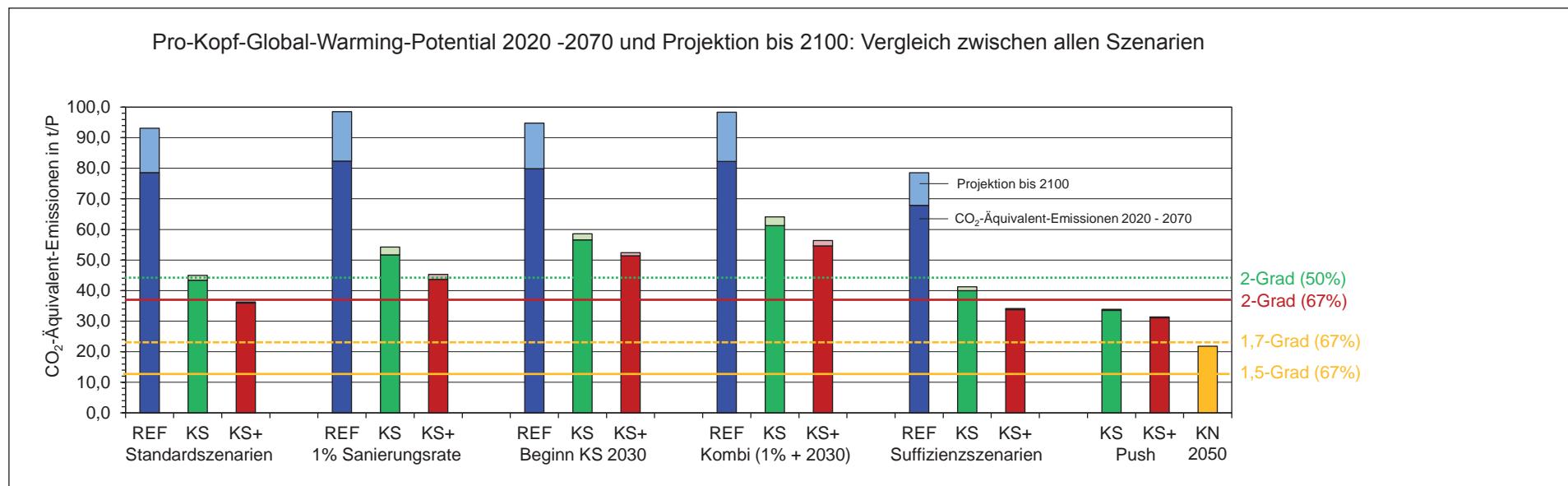
- Die Klimaschutzszenarien variieren zwischen 33,9 und 64,1 t/P. Nur das entsprechende Push-Szenario liegt unterhalb des Globalbudgets für Wohngebäude, das Suffizienzszenario mit 41,2 t/P landet um 7 % und das Standardszenario mit 45,0 t/P bereits 17 % darüber. Die anderen drei Klimaschutzszenarien können nicht einmal den grenzwertigen Klimaschutz (Pfad A für das 2-Grad-Kriterium mit 50 % Eintrittswahrscheinlichkeit) einhalten.
- Die Klimaschutz-Plus-Szenarien befinden sich mit Ausnahme des Kombinationszenarios (1% Sanierungsrate + Beginn 2030), das leicht über der Schwelle liegt, unterhalb des Pfades A. Nur drei Varianten (Standard, Suffizienz und Push) liegen unterhalb des THG-Budgets für Wohngebäude für das 2-Grad-Ziel mit 67 % Eintrittswahrscheinlichkeit.
- Nur das Szenario Klimaneutral 2050 erfüllt die Kriterien eines vollwertigen Paris-kompatiblen CO₂-Budgets, das hier mit dem Pfad C (1,7 Grad-Ziel mit 67 % Eintrittswahrscheinlichkeit) definiert ist.

Klimaausgleich über CO₂-Senken

Dieses Ergebnis ist wirklich beunruhigend und im Grunde auch verstörend. Nach dieser Auswertung kann nur das Klimaschutz-Plus-Szenario mit seinen besonders günstigen Randbedingungen und das Klimaneutral-2050-Szenario als Paris-kompatibel eingestuft werden. Zugleich gibt es derzeit in Deutschland keine Hinweise dafür, dass im Gebäudebereich eine Umsetzung mit den dafür notwendigen Maßnahmen in die Wege geleitet wäre (6). Dazu zählen die Umsetzung besonders ambitionierter Energiestandards, der zügige Ausstieg aus den fossilen Heizsystemen sowie eine Umlenkung der Bauaktivitäten weg vom Neubau mit mittleren Qualitäten hin zu energetischen Modernisierungen mit hoher Qualität.

Um die Spielräume zu erweitern, werden in einem Zusatzschritt nun CO₂-Senken ins Spiel gebracht, um eine weitere Handlungsoption in Händen zu halten, die unabhängig von den „klassischen“ Klimaschutzstrategien Effizienz und Erneuerba-

Pro-Kopf-Global-Warming-Potential 2020 -2070 und Projektion bis 2100: Vergleich zwischen allen Szenarien



- Referenzszenarien
- Klimaschutzszenarien
- Klimaschutz-Plus-Szenarien
- Szenario Klimaneutral 2050

Abbildung 11.29:
Gegenüberstellung der kumulierten Pro-Kopf-GWP-Emissionen seit 2020 für alle 18 Szenarien aus den sechs Szenarienfamilien. Die Referenzszenarien sind blau, die Klimaschutzszenarien grün und die Klimaschutz-Plus-Szenarien rot markiert. Die Schwellenwerte der gebäudebezogenen Emissionsbudgets sind als horizontale Linien eingetragen. Die Einhaltung eines bestimmten Klimaziels ist gegeben, wenn die kumulierten Emissionen eines Szenarios unterhalb der entsprechenden Linie zu liegen kommen.

re eingesetzt werden kann. Dafür kommen vor allem natürliche Senken (NCS) in Frage, weil viele der technischen Senken unerprobт, risikobehaftet oder besonders energieintensiv und damit teuer sind und zudem keinen Zusatznutzen stiften können

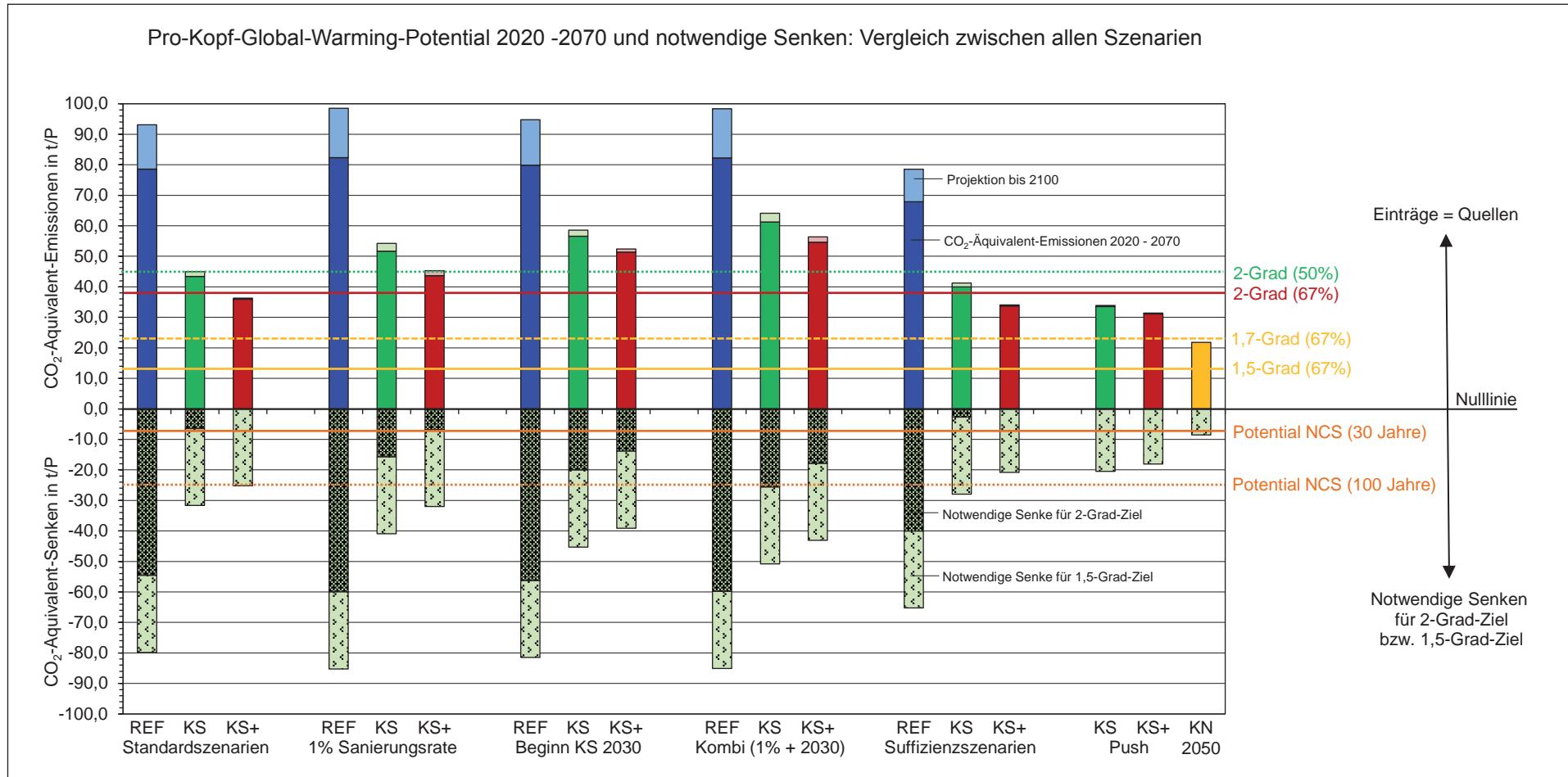
(7). Dafür kommen beispielsweise in Frage:

- Einsatz von Holzbauweisen und sonstigen nachwachsenden Rohstoffen in Verbindung mit einer nachhaltigen Neuauforstung bzw. Einstieg in Kaskadennutzung anstelle des Einsatzes von Biomasse als Brennstoff
- Wiedervernässung ehemalige Moore
- Herstellung von Biokohle (z.B. in speziellen Heizkraftwerken) und Einbringen in Böden als Humusaufbau
- Senkenintensive Landwirtschaft (z.B. Agroforste)

In Abbildung 11.30 sind nun unterhalb der Nulllinie die für jedes Szenario erforderlichen CO₂-Senken für das 2-Grad-Ziel dunkel schraffiert und die zusätzlich für das 1,5-Grad-Ziel erforderlichen Senken hellgrün schaffiert angegeben und in Bezug

zu den oben hergeleiteten Potenzialgrenzen gesetzt. Das Potenzial natürlicher Senken ist begrenzt und beträgt in Deutschland ca. 1 t/Pa. Wenn man auch hier etwa ein Viertel dem Sektor der privaten Haushalte zuordnet, ergibt sich über 30 Jahre gerechnet ein Gesamtpotenzial von 7,5 t/P (untere Potenzialgrenze, durchgezogene orange Linie) und über 100 Jahre gerechnet von 30 t/P (obere Potenzialgrenze, gepunktete orange Linie). Es ist nun gut erkennbar, welche neuen Spielräume sich durch den Einsatz natürlicher Senken in Deutschland ergeben könnten:

- Unabhängig von den sonstigen Randbedingungen liegen bei allen Referenzentwicklungen die notwendigen Senken bereits bei einem Klimaausgleich für das 2-Grad Ziel weit über den maximalen Potenzialgrenzen. Die Referenzszenarien sind damit als nicht-nachhaltig einzustufen.
- Bei den grün markierten Klimaschutzszenarien hängt die Höhe der Klimaausgleiche über CO₂-Senken erheblich von den sonstigen Randbedingungen ab. Im Standardszenario



beträgt die erforderliche Senke für das 2-Grad-Ziel -7,2 t/P, im Kombinationsszenario (1% SR + Beginn 2030) dann jedoch -26,3 t/P. Beim Suffizienzszenario beträgt der CO₂-Ausgleich nur noch -3,4 t/P und das Push-Szenario erfordert schließlich keine Senken als Klimaausgleich mehr.

- In den rot dargestellten Klimaschutz-Plus-Szenarien wird nur bei ungünstigen Randbedingungen ein Klimaausgleich über CO₂-Senken benötigt. Unter günstigen Randbeding-

ungen (Suffizienz, Push) hat sogar das 1,5-Grad-Ziel eine Umsetzungsperspektive innerhalb der Potenzialgrenzen.

- Das Klimaneutral 2050-Szenario erfordert bereits ab ca. 2030/2040 den Beginn eines Senkenregimes. Die erforderlichen CO₂-Senken betragen ca. -10 t/P. Bei der Schaffung zusätzlicher Senken nach 2070 in Höhe von ca. -12 t/P wäre perspektivisch auch noch die Einhaltung des 1,5-Grad-Ziels möglich.

Abbildung 11.30:
Gegenüberstellung der kumulierten Pro-Kopf-GWP-Emissionen seit 2020 für alle 18 Szenarien aus den sechs Szenarienfamilien. Die Referenzszenarien sind blau, die Klimaschutzszenarien grün und die Klimaschutz-Plus-Szenarien rot markiert. Zusätzlich sind die notwendigen CO₂-Senken zum Erreichen des 2,0 und 1,5-Grad-Ziels angegeben.

11.5 CO₂-Senken und ihr möglicher Beitrag zum Klimaschutz im deutschen Wohnbau

Die vorausgegangene Untersuchung zu den Szenarienfamilien hat ein klares Ergebnis:

- Sämtliche Varianten der Referenzentwicklung weisen so hohe kumulierte Treibhausgasemissionen auf, dass es unmöglich erscheint, diese mit künftigen CO₂-Senken auszugleichen.
- Ohne eine konsequente Verfolgung der Kernstrategien Effizienz und Erneuerbare, wie dies im Klimaschutz-Plus-Szenario umgesetzt wird, ist ein deutscher Wohnbau, der wenigstens mit dem 2-Grad-Ziel kompatibel ist, nicht erreichbar.
- Unter den Bedingungen im Klimaschutzszenario oder bei schwierigen Umsetzungsbedingungen des Klimaschutz-Plus-Szenarios sind bereits zusätzliche CO₂-Senken als Ausgleich für die Einhaltung des 2-Grad-Ziels notwendig.
- Ein Paris-kompatibler Wohnbau, der das 1,7-Grad-Ziel einhält, erfordert einen Pfad, der dem Klimaschutz-Plus-Szenario entspricht und zusätzlich zu den Emissionsminderungen des Klimaschutz-Plus-Szenarios die Bildung von CO₂-Senken in Höhe von etwa einer Gigatonne CO₂ beinhaltet. Dieser Betrag kann durch eine konsequente Verfolgung von weiteren Effizienz- sowie Suffizienzstrategien um etwa ein Drittel reduziert werden.

Damit ist absehbar, dass zu den beiden oben genannten Kernstrategien Effizienz und Erneuerbare die Bildung von CO₂-Senken als dritte Strategie hinzutreten muss. Die langfristige Realisierung, Bilanzierung und Anrechenbarkeit von CO₂-Senken haben von daher ein großes Gewicht bei allen künftigen Klimaschutzstrategien. Dieses Feld steht noch am Beginn der wissenschaftlichen Forschung und einer darauf aufbauenden künftigen Praxis von Klimaschutzstandards im Wohnbau. Dabei stellen sich zunächst folgende Fragen:

- Wie kann vermieden werden, dass missbräuchlich auf CO₂-Senken als „Wette auf die Zukunft“ gesetzt wird, um klassische Klimaschutzmaßnahmen hinauszuzögern oder zu umgehen (vgl. Schellnhuber 2015, S. 584 ff.)?
- Unter welchen Kriterien und Randbedingungen dürfen Maßnahmen als effektive Senken bezeichnet und dienen nicht nur der Emissionsminderung (8).
- In welcher Höhe dürfen diese dann als negative Emissionen angerechnet werden?
- Wie hoch ist das Potenzial der wirtschaftlichen natürlichen und technischen CO₂-Senken für einen Klimaausgleich?
- Wie kann vermieden werden, dass eine Doppelzählung der CO₂-Senken erfolgt, z.B. einmal projektbezogen und das zweite Mal in der nationalen Emissionsbilanz, wie dies z.B. derzeit bei einer Anrechnung in Form von Gutschriften regelmäßig der Fall ist?
- Wie lassen sich die Wohnnutzungen oder bauliche Maßnahmen an Wohnbauten in Verbindung mit CO₂-Senken bringen, so dass diese bilanziell in Beziehung gesetzt und entsprechend organisiert und mitfinanziert werden?
- Wie kann darauf aufbauend eine transparente Nachweisführung erfolgen, die dem Wohnprojekt eine negative Emission zuordnet?
- In welcher Form kann eine Evaluierung organisiert werden, die die ökologische und soziale Verträglichkeit sowie die Dauerhaftigkeit der Senken sicherstellt?
- Welche Projekte sind besonders zur Senkenbildung geeignet, indem diese beispielsweise einen ökologischen und/oder sozialen Zusatznutzen stiften können?

Diese Fragen sind durchaus komplex und einem derzeit laufenden Klärungsprozess unterworfen. Im Rahmen dieser Arbeit werden sie nicht weiter behandelt. Die separate Studie „Wie kann der Holzbau zum Klimaschutz beitragen?“ (Vallentin 2024) setzt an diesem Punkt an und versucht, eine Klimaschutzstrategie herzuleiten, in der der mögliche Beitrag des Holzbau aber auch seine Grenzen herausgearbeitet werden.

11.6 Versuchsweise Zusammenführung der Klimaschutzbeitäge bei Betriebsenergie, Materialbereitstellung und durch effektive CO₂-Senken

Aufbauend auf den Ergebnissen dieses Kapitels können nun versuchsweise die Emissionen durch die Materialbereitstellung und Bauprozesse und der mögliche Beitrag negativer Emissionen durch effektive Senken abgeschätzt werden. Die folgende Betrachtung basiert auf der Annahme, dass das CO₂-Globalbudget für Wohngebäude um einen Zusatzbeitrag von 25 % für die Materialbereitstellung und Bauprozesse ergänzt wird (siehe hierzu Tab. 1.1 und Abb. 1.2). Ferner ist zu berücksichtigen, dass auch bei der Herstellung, Wartung, Instandsetzung und Entsorgung von Baumaterialien und Technikkomponenten eine Dekarbonisierung der Prozesse stattfinden wird (vgl. Alig et al. 2020 und Vallentin 2024, S. 22 ff.). Die Abschätzung der Potenziale für negative Emissionen mit Hilfe von effektiven CO₂-Senken betrifft den Einsatz von Holzbauweisen und den Einsatz von schnellwachsenden biogenen Baustoffen, z.B. in hoch wärmegedämmten Hüllkonstruktionen. Die Verbesserung der Energieeffizienz kann dabei mit besonders geringen materialbedingten Emissionen und der Bildung von CO₂-Senken verbunden werden. Diese Konstruktionen sind zudem universell anwendbar: im Neubau und im Bestand sowie im Holz- als auch Massivbau (vgl. Pittau et al. 2018 und Vallentin 2024, S. 48 ff.)

Mit Hilfe der Abb. 11.31 kann nun eine Gesamtstrategie für das Paris-kompatibles Wohnen formuliert werden:

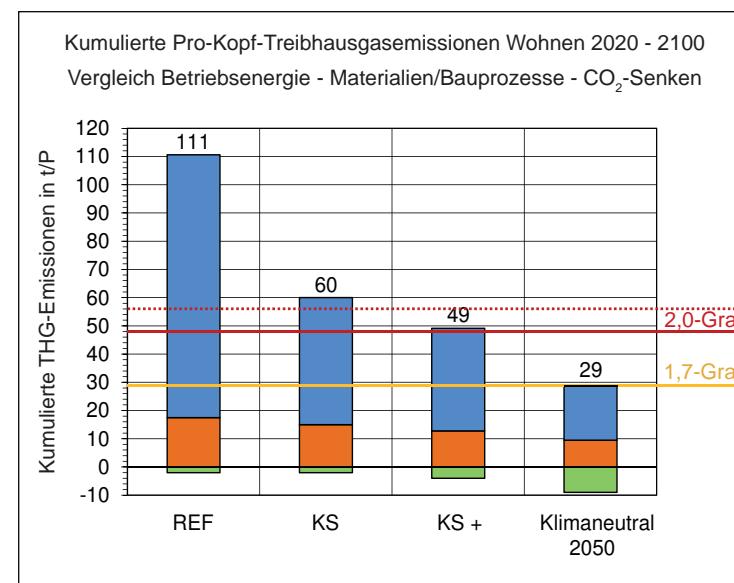
- Im Referenzszenario werden die bisher beobachtbaren Trends im Sinne eines „Weiter-so“ fortgeführt. Das 2-Grad-Limit wird hier um einen Faktor 2,3 überschritten.
- Im Klimaschutzszenario können vor allem die energiebedingten Emissionen deutlich reduziert werden. Die kumulierten Treibhausgasemissionen liegen mit 60 t/P etwas über dem 2-Grad-Limit mit 50 % Eintrittswahrscheinlichkeit.
- Im Klimaschutz-Plus-Szenario gelingt es nochmals konsequenter, die energiebedingten Emissionen im Betrieb zu re-

duzieren. Über die Dekarbonisierung der Baumaterialien und die Bildung von CO₂-Senken in den Baukonstruktionen können die materialbedingten Emissionen soweit abgesenkt werden, dass das 2-Grad-Limit eingehalten wird.

- Erst im Szenario „Klimaneutral 2050“ wird mit der Einhaltung des 1,7-Grad-Limits ein Paris-kompatibles Wohnen nachgewiesen. Dies wird durch zusätzliche Effizienzsteigerungen, die Verfolgung von Suffizienzstrategien in Verbindung mit einer konsequenten Dekarbonisierung der Materialbereitstellung und einem starken Ausbau der CO₂-Senken in Baukonstruktionen erreicht.

Daraus folgt eine klare Prioritätenbildung:

- 1 Reduzierung der energiebedingten Emissionen im Betrieb durch einen Neubau und energetische Modernisierungen mit hohen energetischen Qualitäten
- 2 Dekarbonisierung der Materialbereitstellung
- 3 Biogenes Bauen mit Schwerpunkt CO₂-Senkenbildung
- 4 Zusatzstrategien (Suffizienz, Zirkuläres Bauen)



11.7 Klimaschutzstandards für den künftigen deutschen Wohnbau auf Basis des CO₂-Global-Budgets für Gebäude

In der Dissertation wurden in Abschnitt 5 Klimaschutzstandards im Wohnbau definiert (vgl. Vallentin 2011, S. V - 19 ff.). Diese wurden in Form von zu unterschreitenden Kennwerten für den Heizwärme- und Primärenergiebedarf sowie die Treibhausgasemissionen bestimmt. Es wurde dabei zwischen Neubau, voll und bedingt sanierbaren Gebäudebestand unterschieden; bei letzteren zusätzlich die Fälle mit und ohne Innendämmung. Zudem wurden Kennwerte mit der Bezugsgrößen Nutzfläche und Person angegeben.

Für die Anwendung bei energetischen Modernisierung sind dort in Anlehnung an den EnerPhit-Standard (vgl. PHI 2012) zusätzlich die Anforderungen in Form eines Bauteilverfahrens angegeben, das auch für eine Anwendung bei einer schrittweisen Ausführung der energetischen Sanierungsmaßnahmen geeignet ist.

Insgesamt stellt sich die Frage, wie die Dynamik der bereits laufenden und der kommenden Dekarbonisierung der Energiesysteme angemessen berücksichtigt werden kann.

In den statischen Ökobilanzen werden die heutigen Emissionskennwerte einfach mit der Nutzungsdauer multipliziert. Das führt zu offenkundigen Fehleinschätzungen, z.B. bei einer stromgestützten Wärmepumpenversorgung. Dadurch, dass der Netzstrom in der Vergangenheit und in der Zukunft immer stärker mit erneuerbaren Energieträgern erzeugt wird, sinken die spezifischen Emissionskennwerte entsprechend ab. Berücksichtigt man diese Effekte nicht, werden Wärmepumpen systematisch „schlechtgerechnet“. Ähnlich wird bei den Ersatz- und Erneuerungsmaßnahmen der Bau- und Technikkomponenten verfahren. Bildlich gesprochen wird in den statischen Ökobilanzen ein Fenster, das in 30 Jahren zu ersetzen wäre, bereits heute mitgefertigt und in einer Halle zwischengelagert. Dies entspricht einer Strategie des „Weiter-so-wie bisher“ und kann als „Szenario

ohne Klimaschutz charakterisiert werden. Es ist offenkundig, dass auf dieser Basis keine Klimaschutzstrategien bilanziert werden können, weil ein solches Vorgehen noch nicht einmal richtungssicher sein kann (vgl. Vallentin 2024, S. 37 f.).

Einen Ausweg können hier szenariengestützte Bewertungen bieten, wofür dann wenigstens zwei Extrem- und ein oder mehrere Mittelszenarien zu modellieren sind, um die Bandbreite der möglichen Zukunftsentwicklungen abilden zu können. Auf dieser Basis lassen sich dann Mittelwerte für die nächsten 20, 30 oder 50 Jahre abschätzen. Idealerweise rechnet man auch hier mit mehreren Werten, die von den Szenarien abgeleitet sind, um den Einfluss der unterschiedlichen Annahmen abilden zu können.

Sofern man darüber hinaus die kumulierten Treibhausgasemissionen bis zum Zeitpunkt einer klimaneutralen Wirtschaftsweise abschätzen möchte, sind u.U. noch größere Zeiträume (z.B. bis 2100) zu erfassen, was zwangsläufig ein hohes spekulatives Moment beinhaltet.

Generell gilt: Zur Bestimmung von Klimaschutzstandards für Gebäude ist der Wandel der Energiesysteme hin zu einer insgesamt erneuerbaren Wärme- und Stromversorgung angemessen zu berücksichtigen. Dies erfolgt hier auf der Basis der Szenarien dieser Studie, in der der Wandel der Energieversorgung ohnehin berücksichtigt und modelliert wurde.

Ein andererer Ansatz besteht darin, wie bei den meisten Bewertungsverfahren nur den Ausgangszustand zu bilanzieren. Dann ist es jedoch notwendig die Grenz- und Zielwerte differenziert je nach der vorgesehenen Versorgungslösung anzugeben (vgl. Ploss et al. 2023). Auch hier ist es geboten, Szenarien heranzuziehen, um die für den Klimaschutz notwendigen Ausgangswerte im Kontext der zu erwartenden Dynamik der Energiesysteme zu überprüfen. In der Konsequenz sind unabhängig von der gewählten Methodik die Grenz- und Zielwerte wenigstens alle 5 Jahre an die Entwicklung der Dekarbonisierung anzupassen.

Im Folgenden werden nun Grenzwerte für einzelne Gebäude Wohnanlagen, Gebäudegruppen oder Siedlungsvorhaben angegeben, die in der Zeitperiode 2025 - 2030 realisiert werden. Als Klimaschutzstandards stehen sie in engem Bezug zu den CO₂-Global-Budgets für Gebäude (siehe Tab. 1.1) und den Ergebnissen dieser Studie als Ganzes.

In Tab. 11.12 sind nun Grenzwerte im Hinblick auf die nicht-erneuerbare Primärenergie und die Treibhausgasemissionen für alle Energienutzungen in den Gebäuden (Raumwärme, Lüftung, Warmwasser und sämtliche Stromanwendungen) angegeben. Das Global-Warming-Potential wird hierbei als aufaddierter Wert der nächsten 30 Jahre kalkuliert. Die für deren Kalkulation notwendigen Mittelwerte der Primär- und Treibhausgasemissionsfaktoren sind in der nachfolgenden Tabelle 11.14 aufgeführt. Als Bezugsgröße können sowohl die Energiebezugsfläche (= beheizte Wohnfläche) und die Person verwendet werden.

Die Werte werden differenziert für den Neubau und den Bestand ausgewiesen. Bei den energetischen Modernisierungen wird zwischen voll und bedingt sanierbaren Bestand und bei letzteren zusätzlich zwischen den Fällen unterschieden, bei denen eine Innendämmung möglich ist oder nicht. Die dort genannten Werte im Bestand gelten nur unter der Bedingung, dass alle energetisch relevanten Komponenten (Gebäudehülle, Lüftung, Heizsystem, Stromausstattung) erneuert werden.

Ein alternativer Ansatz mit direktem Bezug zum CO₂-Global-Budget für Gebäude geht den Weg über eine Langzeitbetrachtung der nächsten 75 Jahre bis 2100. Spätestens dann, so die Annahme, sollte Klimaneutralität erreicht sein. In Tabelle 11.13 sind die kumulierten Pro-Kopf-Emissionen in t/P aufgeführt, die maximal noch zulässig sind, um das 2,0- bzw. das 1,7-Grad-Limit für Wohnen in Deutschland mit einer Eintrittswahrscheinlichkeit von 67 % einhalten zu können. Die zugehörigen Mittelwerte für die Treibhausgasemissions-Faktoren sind in Tabelle 11.14 zusammengestellt.

Klimaschutzstandards: zu unterschreitende Grenzwerte für die Zeitperiode 2025 - 2030				
Bezugsgröße: Energiebezugsfläche (m ²)	Neubau	Bestand		
		voll sanierbar	bedingt sanierbar	
			mit Innendämmung	ohne Innendämmung
Primärenergie-Kennwert (nicht erneuerbar) in kWh/m ² a	40	60	80	100
Global-Warming-Potential (30 Jahre) (CO ₂ -äqv.-Emissionen) in kg/m ² (30a)	300	450	600	750
Bezugsgröße: Person (P)				
Primärenergie-Kennwert (nicht erneuerbar) in kWh/P a	1.600	2.400	3.200	4.000
Global-Warming-Potential (30 Jahre) (CO ₂ -äqv.-Emissionen) in kg/P (30a)	12.000	18.000	24.000	30.000

Tab. 11.12

Zu unterschreitende Grenzwerte für die Klimaschutzstandards im Wohnungsbau in der Zeitperiode 2025 - 2030. Oben sind die Grenzwerte je Energiebezugsfläche (m²), unten die Grenzwerte je Person aufgelistet. Für die nicht-erneuerbare Primärenergie wurden die Mittelwerte im Zeitraum 2025 - 2055 gewählt, während für das Global-Warming-Potential die aufaddierten Werte der nächsten 30 Jahre ausschlaggebend sind, um die Dynamik der Dekarbonisierung in den nächsten Jahrzehnten berücksichtigen zu können. Nähere Erläuterungen: siehe Text.

Klimaschutzstandards: Langzeitbetrachtung mit Hilfe der kumulierten Pro-Kopf-Emissionen 2025 - 2100		
	Mindestklimaschutz (Einhaltung des 2,0°-Limits)	Paris-kompatibles Bauen (Einhaltung des 1,7°-Limits)
Neubau	≤ 15,0 t/P	≤ 10,0 t/P
Voll sanierbarer Bestand	≤ 22,5 t/P	≤ 14,5 t/P
Bedingt sanierbarer Bestand mit Innendämmungen	≤ 30,0 t/P	≤ 19,5 t/P
Bedingt sanierbarer Bestand ohne Innendämmungen	≤ 37,5 t/P	≤ 24,5 t/P

Tab. 11.13

Alternativer Ansatz zur Bestimmung von Klimaschutzstandards anhand einer Langzeitbetrachtung der nächsten 75 Jahre (2025 - 2100). Dahinter steht die Annahme, dass spätestens 2100 Klimaneutralität erreicht sein sollte. Hierfür sind die Grenzwerte für das 2,0 und das 1,7-Grad-Limit in t/P_(2025 - 2100) angegeben. Nähere Erläuterungen: siehe Text.

Primärenergiefaktoren (in kWh _{EE} /kWh _{PE}) und Treibhausgasemissions-Faktoren (in kg/kWh _{EE})					
	Primärenergie (nicht erneuerbar)		Global-Warming-Potential (CO ₂ -Äquivalente)		
	Ausgangswert 2025	Mittelwert (30a) 2025 - 2055	Ausgangswert 2025	Mittelwert (30a) 2025 - 2055	Mittelwert (75a) 2025 - 2100
Stommix (Netzstrom)	1,40	0,90	0,40	0,25	0,125
PV-Strom (eigengenutzt)	0,20	0,15	0,08	0,05	0,025
Solarthermie	0,10	0,06	0,035	0,02	0,01
Tiefen-Geothermie	0,055	0,03	0,035	0,02	0,01
Scheitholz	0,01 / 1,01*	0,01 / 1,01*	0,38**	0,32**	0,30**
Holzhackschnitzel	0,03 / 1,03*	0,03 / 1,03*	0,38**	0,32**	0,30**
Holzpellets	0,06 / 1,06*	0,06 / 1,06*	0,11**	0,08**	0,06**
Restholzverbrennung	0,01 / 1,01*	0,01 / 1,01*	0,05**	0,03**	0,02**
Heizöl	1,15	1,15	0,31	0,31	0,31
Erdgas (Netzgas)	1,11	0,9	0,25	0,20	0,15
Steinkohle	1,06	1,06	0,44	0,44	0,44
Braunkohle	1,19	1,19	0,45	0,45	0,45

Tab. 11.14
Zusammenstellung von Primärenergie- und Treibhausgasemissionsfaktoren zur Bestimmung der Klimaschutzstandards. Diese wurden über Szenarien hergeleitet und als Ausgangswert 2025 und Mittelwert der nächsten 30 Jahre (2025 - 2055) bzw. 75 Jahre (2025 - 2100) ausgewiesen.

* Anwendung der Biomasse-Budgetmethode. Bis zu einem Bedarf von 30 kWh/m²_{EBF}a wird der niedrige Wert und darüber der hohe Wert bilanziert.

** Die Werte für die Holzverbrennung wurde mit Hilfe des GWP(bio)-Index bestimmt.

Primärenergie- und GWP-Emissionsfaktoren

Statt mit jährlichen oder in 5-Jahres-Schritten variierenden Primär- bzw. Treibhausgas-Emissionsfaktoren zu kalkulieren, wird hier der einfacher zu implementierende Weg mit Hilfe von Mittelwerten über bestimmte Zeiträume beschritten (Tab. 11.14). Diese wurden über die Energieszenarien ermittelt, die Bestandteil der Klimaschutzszenarien sind. Besonders stark ist die Dynamik der Stromerzeugung. Seit 1990 hat sich der erneuerbare Anteil von wenigen Prozent, die vor allem durch die bestehenden Wasserkraftwerke bereitgestellt wurden, auf heute über 50 % entwickelt, mit auch künftig steigender Tendenz. Dadurch sinken der primärenergetische Aufwand und die resultierenden klimawirksamen Emissionen je Stromeinheit immer stärker ab.

Auch bei den anderen Energieträgern ist teilweise eine gewisse Dynamik erkennbar, jedoch in deutlich geringerem Ausmaß. Bei den Wärmeversorgungen ist in der Gesamtentwicklung vor allem der Wechsel von fossilen hin zu erneuerbaren bzw. stromgestützten Energieträgern und Versorgungssystemen für die Dekarbonisierung verantwortlich.

Bei der Bewertung von holzgestützten Wärmeversorgungen wird deutlich von der bisher üblichen Bewertung als klimaneutraler und unbegrenzt verfügbaren erneuerbaren Energieträger abgewichen (vgl. Vallentin 2024):

- Für die primärenergetische Bewertung wird der sog. Biomasse-Budgetansatz vorgeschlagen (vgl. Diefenbach 2012). Bis zu einem Bedarfswert von 30 kWh/m²_{EBF}a wird nur der fossile Primärenergieaufwand bilanziert, darüber hinaus jedoch der gesamte Primärenergieaufwand inklusive dem erneuerbaren Anteil. Damit wird berücksichtigt, dass Holz und sonstige Biomasse eine begrenzte Verfügbarkeit aufweisen, die durch den jährlichen Zuwachs definiert ist.
- Hinsichtlich der Treibhausgasemissionen wird eine Bewertung über den sog. GWP(bio)-Index vorgenommen (vgl. Guest et al. 2012 und Vallentin 2024, S. 26 ff.). Die biogenen Emissionen werden dort abhängig von der Rotationsperiode und Speicherdauer bestimmt. Vor allem für die Verbrennung von frisch geschlagenen Waldholz, z.B. Scheitholz oder Holzhackschnitzel, werden dort hohe Emissionen ausgewiesen, die z.T. sogar über denen fossiler Heizsystemen liegen. Bei Rest- bzw. Altholz liegen die Werte jedoch deutlich niedriger. Das gilt auch für Holzpellets, sofern sie überwiegend aus Restholz oder aus Stroh hergestellt werden.
- Aus Klimaschutzgründen sind somit Holzheizungen nur noch ausnahmsweise als Lösungsansatz vertretbar. Diese Fälle betreffen z.B. die Spitzenlastdeckung in Nah- oder Fernwärmesystemen in Verbindung mit Kraft-Wärme-Kopplung oder Spezialfälle im bedingt sanierbaren Bestand, bei denen eine Wärmepumpe nicht in Frage kommt.

Die Werte für die Primärenergie- und GWP-Faktoren in Tabelle 11.14 sind jeweils für den Ausgangswert im Jahr 2025 und als Mittelwert der nächsten 30 Jahre (2025 - 2055) ausgewiesen. Für die Emissionskennwerte wird zusätzlich versuchsweise eine Langzeitabschätzung für die nächsten 75 Jahre (2025 - 2100) vorgenommen, die davon ausgeht, dass spätestens 2100 eine klimaneutrale Energieversorgung hergestellt ist (grün hinterlegte Spalte).

Bauteil- und Komponentenverfahren

Die Anwendung des Kopplungsprinzips führt in vielen Fällen dazu, dass bei energetischen Modernisierungen nur einzelne Komponenten ausgetauscht werden oder Teilsanierungen vorgenommen werden. Hier ist es schwierig pauschale Anforderungsniveaus auf der Ebene von generellen Energie- bzw. Emissionskennwerten anzugeben. In diesen Fällen macht es Sinn statt dessen direkt die energetischen Qualitäten der zu erneuernden bzw. instand zusetzenden Bau- und Technikkomponenten anzugeben. Sie dienen darüber hinaus auch als Orientierungswerte für die Maßnahmen in voll sanierbaren Bestand und im Neubau. Sie sind angelehnt an die hohen energetischen Qualitäten, wie sie in Abschnitt 1.11 (speziell Tabelle 1.9 und Abbildung 1.21) hergeleitet und zusammengestellt sind.

Die energetischen Hüllkonstruktionen liegen unter Berücksichtigung der Lebenszykluskosten im Bereich des wirtschaftlichen Optimums (vgl. Ploss 2017 und EIV 2018). Bei Durchführung aller Maßnahmen wird i.d.R. die Einhaltung der Klimaschutzstandards gemäß Tab. 11.12 erreicht. Dabei ist bereits berücksichtigt, dass bei energetischen Modernisierungen die Vermeidung bzw. Reduzierungen von Wärmebrücken nicht im selben Umfang wie im Neubau gelingt.

Merkmale von Paris-kompatiblen Gebäuden

Abschließend sollen hier die grundsätzlichen Eigenschaften und Merkmale von Gebäuden, die in Übereinstimmung mit den Pariser Klimazielen stehen, zusammengestellt werden:

Klimaschutzstandards: Anforderungen gemäß Bauteil-/Komponentenverfahren (speziell für Teilsanierungen)			
Bauteil / Technikkomponente	Voll sanierbarer Bestand	Bedingt sanierbarer Bestand mit Innendämmung ohne	
U-Wert Außenwand	$\leq 0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$	$\leq 0,30 \text{ W/m}^2\text{K}$	k.A.
U-Wert Dach / oberste Geschossdecke	$\leq 0,12 \text{ W/m}^2\text{K}$	$\leq 0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$	$\leq 0,30 \text{ W/m}^2\text{K}$
U-Wert Kellerdecke	$\leq 0,30 \text{ W/m}^2\text{K}$	$\leq 0,30 \text{ W/m}^2\text{K}$	$\leq 0,30 \text{ W/m}^2\text{K}$
U-Wert Fenster (eingebaut)	$\leq 0,85 \text{ W/m}^2\text{K}$	$\leq 0,85 \text{ W/m}^2\text{K}$	$\leq 0,85 \text{ W/m}^2\text{K}$
Wärmebereitstellungsgrad Lüftungsanlage*	$\geq 0,75$	$\geq 0,75$	$\geq 0,75$
Heizsystem (Raumwärme / Warmwasser)	Einsatz erneuerbarer Energien (z.B. Wärmepumpe, Nah- oder Fernwärme; ausnahmsweise Biomasse)**	wie links	wie links
Strombedarf (Hilfs- und Allgemeinstrom)	$\leq 8 \text{ kWh/m}^2\text{a}$	$\leq 8 \text{ kWh/m}^2\text{a}$	$\leq 8 \text{ kWh/m}^2\text{a}$
Strombedarf in den Haushalten	$\leq 15 \text{ kWh/m}^2\text{a}$	$\leq 15 \text{ kWh/m}^2\text{a}$	$\leq 15 \text{ kWh/m}^2\text{a}$
Eigenerzeugung Photovoltaik (Zielwert für jährlichen Stromertrag)	$\geq 60 \text{ kWh/m}^2\text{ÜFLA}^{***}$ sofern verfügbare Dachflächen vorhanden	wie links	wie links

- Sie weisen einen sehr guten Wärmeschutz auf, wie er typisch für Passivhäuser- und Effizienzhaus-40-Gebäude ist.
- In den meisten Fällen sind sie mit einer Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung ausgestattet.
- Die Ausstattung mit Haushaltsgeräten, Leuchtmitteln und sonstigen Stromkomponenten erfolgt mit besonders stromsparenden Produkten. Das gilt auch für die Allgemeinbereiche (z.B. Aufzüge, Tiefgaragen- und Kellerbeleuchtung).
- Die Energieversorgung dieser Gebäude erfolgt weitgehend ohne fossile Energieträger.
- Es wird besonderer Wert darauf gelegt, am Gebäude oder seiner Nähe erneuerbare Energien zu erzeugen.
- Sie sind durch ihren sehr guten Wärmeschutz und Speichermöglichkeiten sowie intelligente Regelungen zugleich netzdienlich.
- Beim Neubau und Modernisierungsmaßnahmen kommen Holz und nachwachsende Rohstoffe zum Einsatz.

Tab. 11.15
Anforderungen an die Klimaschutzstandards bei Anwendung eines Bauteil-/Komponentenverfahrens in Anlehnung an den Enerphit-Standard (vgl. PHI 2012).

* Falls keine Wärmerückgewinnung der Lüftung vorgesehen ist, ist dies z.B. durch eine Stromerzeugung einer PV-Anlage auszugleichen

** Es sind auch andere, hier nicht genannte Wärmeversorgungen möglich, wenn diese dominant erneuerbar erfolgen (mit EE-Anteil > 65 %)

*** Der genannte Stromertrag der PV-Anlage bezieht sich auf die überbaute Fläche der bilanzierten Gebäude.

12 Kritische Prüfung der Annahmen und Randbedingungen

Die Ergebnisse der Szenarien werden im Folgenden einer kritischen Prüfung hinsichtlich der darin getroffenen Annahmen und Randbedingungen unterzogen, um den Einfluss von davon abweichenden Entwicklungen aufzuzeigen. Im Quervergleich können daraus Rückschlüsse auf die Robustheit oder Empfindlichkeit der Hauptaussagen gezogen werden.

In der Dissertation finden sich hierzu im Abschnitt 4.15 Untersuchungen zum Einfluss der Bevölkerungs- und Wohnflächenentwicklung, der Abgangsrate im Bestand, des Wirtschaftlichkeits-Vorbehaltes für energetische Sanierungen im Bestand und der KWK-Bewertung bei der kombinierten Strom- und Fern-/Nahwärmeversorgung (vgl. Vallentin 2011, S. IV - 113 ff.). In weiteren Unterszenarien wurden dort ferner der Vergleich zwischen der künftigen CO₂-Bewertung Fernwärmeversorgung versus Wärmepumpensysteme, des Kernenergieausstiegs und der Kohlendioxidabscheidung von Großkraftwerken (CCS) und nicht zuletzt eines klimagerechten Nutzerverhaltens quantitativ abgeschätzt (vgl. Vallentin 2011, S. 128 ff.). Die Ergebnisse können folgendermaßen zusammengefasst werden:

- Der Einfluss der Wohnflächen- und Bevölkerungsentwicklung ist nicht unbedeutend, weil beide als direkt wirksame Mengenkomponenten sowohl den Heizwärme-, den Warmwasser- und Strombedarf mitbestimmen. Im Anschluss wird daher eine neue Untersuchung mit aktueller Datenbasis hierzu durchgeführt.
- Als ökonomisch-psychologisch wichtige Randbedingung hat sich der Wirtschaftlichkeitsvorbehalt erwiesen. Damit ist gemeint, dass ab einer bestimmten energetischen Qualität (z.B. U-Wert vorhandener Außenwand kleiner 0,30 W/m²K) eine weitere Verbesserung unter den momentanen Bedingungen als unwirtschaftlich erweist. Als Folge unterbleiben

die somit als unwirtschaftlich angesehenen Energieeffizienzmaßnahmen. Dadurch erhöht sich der Heizwärmebedarf vor allem in den Klimaschutzszenarien spürbar.

- Das „Dilemma der mittleren Qualität“ beschreibt das sich abzeichnende ökonomische Problem mittlerer Qualitäten, wie sie bis heute sowohl im Neubau als auch bei energetischen Sanierungen zum Einsatz kommen (z.B. Anforderungen an Hüllflächen und Lüftungskonzepte im derzeit geltenden GEG). Das führt dazu, dass spätere Verbesserungen, die aus Klimaschutzgründen notwendig sein werden, mit hoher Wahrscheinlichkeit unwirtschaftlich sein werden. Es ist gesamt- und einzelökonomisch immer besser, bei allen sich bietenden Gelegenheiten (Neubau, Modernisierungen) hohe anstelle mittlerer Qualitäten umzusetzen.
- Der Vergleich zwischen Fernwärme und Wärmepumpenversorgungen hat ergeben, dass es sich um zwei konkurrierende Wärmeversorgungen handelt, die stark von den äußeren Randbedingungen sind (z.B. Wärmedichte, Struktur der Stromerzeugung, Wärmebedarf der Gebäude). Beide Versorgungslösungen erlauben eine deutliche Reduzierung der Treibhausgasemissionen, wobei perspektivisch die Wärmepumpen umso besser abschneiden, je weiter die erneuerbare Stromerzeugung ausgebaut wird.
- Der Austieg aus der Kernenergienutzung hat zwar einen vorübergehenden Anstieg der fossilen Stromerzeugung zur Folge, erleichtert aber bereits mittelfristig den Ausbau der erneuerbaren Stromversorgung, weil diese grundsätzlich ebenfalls grundlastfähig ist.
- Eine Kohlendioxidabscheidung und -speicherung (CCS) aus Kohlekraftwerken erweist sich als besonders energieintensiv und insgesamt mit hohen Kosten verbunden. Nur in der Referenzentwicklung ergibt sich ein bedeutender klimaentlastender Effekt. Gleichzeitig würde dadurch der

- Ausbau der erneuerbaren Stromversorgung behindert.
- Der Einfluss eines klimagerechten Nutzerverhaltens zeigt ein Auseinanderfallen zwischen theoretischen Potenzialen und tatsächlich umsetzbaren Energieeinsparungen. Es scheint daher nicht gerechtfertigt, eine Klimaschutzstrategie von Verhaltensänderungen abhängig zu machen. Andererseits liegen hier hohe ungenutzte Potenziale, die durch gezielte Anreize und eine Änderung der Motivationslage erschließbar wären. Daher wurde in der Aktualisierung eine eigene Szenarienfamilie zum Thema Suffizienz gebildet und in die Hauptuntersuchung integriert.

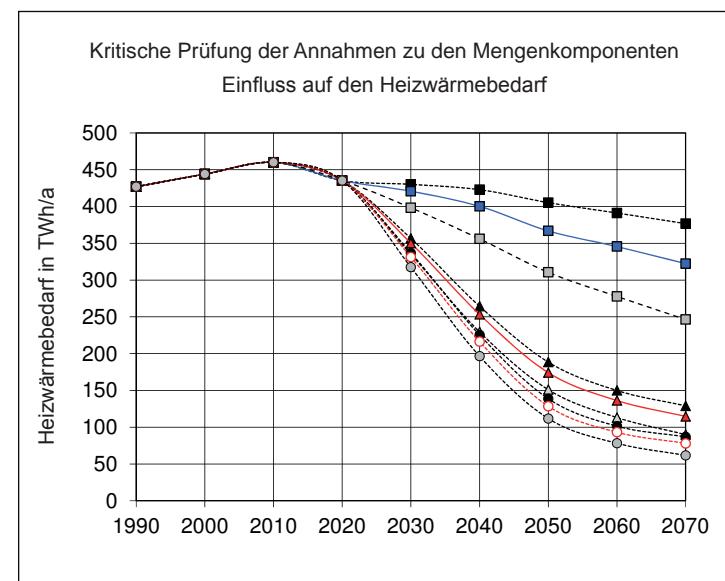
Insgesamt wird durch die kritische Betrachtung der getroffenen Randbedingungen und Annahmen in den Szenarien, die Hauptaussagen und die Richtungssicherheit der Ergebnisse nicht in Frage gestellt. Dies betrifft vor allem die resultierenden Treibhausgasemissionen aber auch den gesamten End- und Primärenergiebedarf. Für den Klimaschutz ist vor allem die Steigerung der Energieeffizienz und der Ausstieg aus der fossilen Energieversorgung entscheidend. Alle anderen Aspekte können jedoch als ergänzende Strategien durchaus die Umsetzung erleichtern oder eben erschweren. Im Folgenden werden nun die Ergebnisse der kritischen Prüfung der Annahmen und Randbedingungen vorgestellt, die sich explizit auf die Szenarien der Aktualisierung beziehen.

12.1 Einfluss der Annahmen zu den Basis- und Eckdaten (Bevölkerung, Wohnflächenentwicklung)

Als wesentliche Mengenkomponenten in den Szenarien spielen die Bevölkerungs-, Haushalts- und Wohnflächenentwicklung eine wesentliche Rolle. Die Entwicklungen der vergangenen 15 Jahre haben Anpassungen der entsprechenden Prognosen notwendig gemacht, die in Tabelle 3.1 zusammengefasst sind und eine mittlere Abschätzung der künftigen Veränderungen repräsentieren.

obere Abschätzung	2020	2030	2040	2050	2060	2070
Bevölkerung (Mio)	83,41	84,42	84,64	84,73	84,49	84,3
spez. Wohnfläche (m ² /P)	47,5	50,4	53,4	56,3	58,0	60,0
Wohnfläche (Mio m ²)	3960	4250	4520	4770	4900	5060
mittlere Abschätzung	2020	2030	2040	2050	2060	2070
Bevölkerung (Mio)	83,41	84,35	84,24	83,64	83,01	82
spez. Wohnfläche (m ² /P)	47,5	49,2	50,6	51,2	51,5	52,0
Wohnfläche (Mio m ²)	3960	4150	4260	4280	4280	4260
untere Abschätzung	2020	2030	2040	2050	2060	2070
Bevölkerung (Mio)	83,41	83,09	80,72	77,58	74,39	71,2
spez. Wohnfläche (m ² /P)	47,5	47,1	46,6	46,1	45,6	45,1
Wohnfläche (Mio m ²)	3960	3910	3760	3580	3390	3210

Tabelle 12.1:
Unterschiedliche Abschätzungen zur Bevölkerungs- und Wohnflächenentwicklung für den deutschen Wohngebäudepark im Zeitraum 2020 - 2070. Weitere Hinweise und Quellen siehe nebenstehender Text und Diskussion in Kapitel 3.



- Referenzszenario:
 -■- obere Abschätzung
 -□- mittlere Abschätzung
 -□- untere Abschätzung
- Klimaschutzszenario:
 -▲- obere Abschätzung
 -△- mittlere Abschätzung
 -△- untere Abschätzung
- Klimaschutz-Plus-Szenario:
 -●- obere Abschätzung
 -○- mittlere Abschätzung
 -○- untere Abschätzung

Abbildung 12.1:
Einfluss unterschiedlicher Annahmen zur Bevölkerungs- und Wohnflächenentwicklungen auf die Jahresheizwärmebedarfs des deutschen Wohngebäudeparks.

Tabelle 12.2:
Einfluss unterschiedlicher Annahmen zur Bevölkerungs- und Wohnflächenentwicklungen auf die Pro-Kopf-Treibhausgasemissionen (in kg/Pa) in den Jahren 2030 - 2070 und die kumulierten Pro-Kopf-Treibhausgasemissionen im Zeitraum 2020 - 2100 (in t/P, grau hinterlegte Werte) des deutschen Wohngebäudeparks.

Pro-Kopf-GWP (in kg/Pa) und kumulierte GWP 2020 - 2100 (in t/P)						
obere Abschätzung	2030	2040	2050	2060	2070	k_{GWP}
Referenz	2126	1663	1424	1267	1108	99,8
Klimaschutz	1535	788	500	285	178	46,6
Klimaschutz-Plus	1296	592	296	146	89	37,0
mittlere Abschätzung	2030	2040	2050	2060	2070	k_{GWP}
Referenz	2081	1579	1302	1134	968	93,1
Klimaschutz	1506	754	460	258	158	45,0
Klimaschutz-Plus	1272	567	274	133	79	36,3
untere Abschätzung	2030	2040	2050	2060	2070	k_{GWP}
Referenz	2034	1505	1226	1059	899	89,0
Klimaschutz	1467	721	436	244	150	43,3
Klimaschutz-Plus	1240	543	260	127	75	35,3

Tabelle 12.3:
Einfluss unterschiedlicher Annahmen zur Bevölkerungs- und Wohnflächenentwicklungen auf den Pro-Kopf-Primärenergie(gesamt)-Bedarf (in kWh/Pa) in den Jahren 2030 - 2070 und den kumulierten Primärenergie(gesamt)-Bedarf im Zeitraum 2020 - 2070 (in MWh/P, grau hinterlegte Werte) des deutschen Wohngebäudeparks.

Pro-Kopf-PEB (in kWh/Pa) und kumulierter PEB 2020-2070 (in MWh/P)						
obere Abschätzung	2030	2040	2050	2060	2070	k_{PEB}
Referenz	10343	9439	9091	9121	9256	483,8
Klimaschutz	8272	5823	5007	4221	3622	309,0
Klimaschutz-Plus	7758	4583	3358	2534	2009	250,0
mittlere Abschätzung	2030	2040	2050	2060	2070	k_{PEB}
Referenz	10121	8951	8309	8165	8066	453,4
Klimaschutz	8114	5561	4597	3816	3195	294,5
Klimaschutz-Plus	7615	4380	3099	2300	1779	240,5
untere Abschätzung	2030	2040	2050	2060	2070	k_{PEB}
Referenz	9886	8554	7854	7651	7517	434,7
Klimaschutz	7923	5355	4403	3648	3056	286,2
Klimaschutz-Plus	7433	4221	2973	2199	1702	234,4

Anhand einer Sensitivitätsstudie sollen hier nun drei Varianten von Bevölkerungs- und Wohnflächenentwicklung mit ihren Konsequenzen auf das Global-Warming-Potential und den Primärenergiebedarf gegenübergestellt werden:

- Als obere Abschätzung für die Bevölkerungsentwicklung wurde die Variante 5 der 14. Bevölkerungsvorausberechnung (Destatis 2019) ausgewählt. Zusätzlich findet ein starker und stetiger Anstieg der spezifischen Wohnfläche von 47,5 m²/P im Jahr 2020 auf 60 m²/P im Jahr 2070 statt. Die gesamte Wohnfläche steigt dadurch auf 4770 Mio m² im Jahr 2050 und auf 5060 Mio m² im Jahr 2070 an.
- Die mittlere Abschätzung entspricht den Annahmen in den Hauptzonen. Sie folgt der Variante 3 der 14. Bevölkerungsvorausberechnung (Destatis 2019). Der Anstieg der spezifischen Wohnfläche verlangsamt sich im Betrachtungszeitraum allmählich, so dass die gesamte Wohnfläche ab 2040 auf einem Niveau von 4260 - 4280 Mio m² stagniert.
- Für die untere Abschätzung wurde die Variante 1 der 14. Bevölkerungsvorausberechnung (Destatis 2019) ausgewählt. Die Bevölkerung sinkt stetig von 83,3 im Jahr 2020 auf 71,2 Mio im Jahr 2070. Zugleich sinkt in dieser Variante die spezifische Wohnfläche stetig von 47,5 im Jahr 2020 auf 45,1 m²/P im Jahr 2070. Dadurch verringert sich auch die gesamte Wohnfläche deutlich und beträgt im Jahr 2070 nur noch 3210 Mio m².

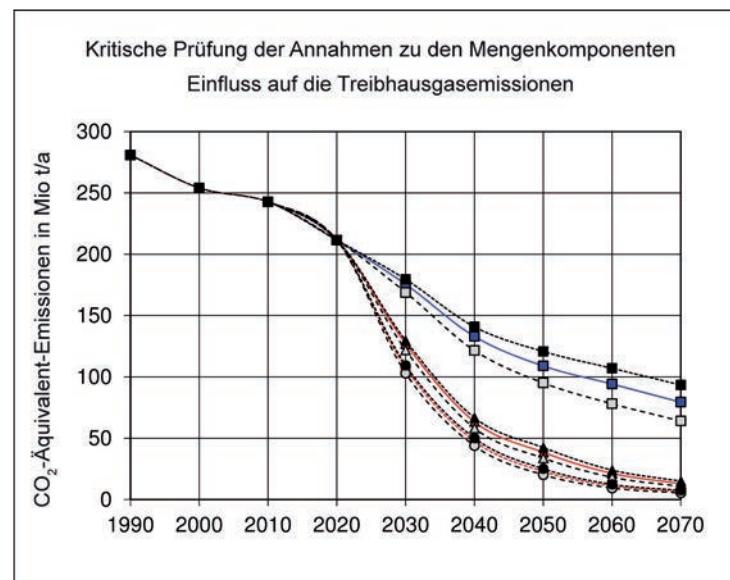
Im Grunde werden hier zwei Aspekte kombiniert, die unabhängig voneinander wirksam sind. Der erste Aspekt ist ein Menschenphänomen, das vor allem von Zu- und Abwanderung abhängig ist. Diese sind stark von wirtschaftlichen oder politischen Faktoren (Fachkräftemangel, Wirtschaftskrisen, Kriege, Flüchtlingsbewegungen) abhängig und nur teilweise vorhersehbar. Der zweite Aspekt hängt vor allem von der Wohlstandsentwicklung ab und könnte künftig auch Bestandteil von Suffizienzstrategien sein, ist aber faktisch wohl am stärksten von wirtschaftlichen Faktoren (Baulandbereitstellung, Baukosten-

und Zinsentwicklung sowie der Nachfrage und Fördermodellen) abhängig. Die Kombination der beiden Aspekte hat vor allem methodische Gründe, um die denkbare Bandbreite der Mengenkomponenten und deren Einfluss auf die Ergebnisse zum Heizwärme-, Primärenergiebedarf sowie den resultierenden Treibhausgasemissionen abschätzen zu können.

In Abb. 12.1 wird deutlich, wie sich der Heizwärmebedarf in den drei Standardszenarien gemäß der oberen, mittleren und unteren Abschätzung gemäß Tab. 12.1 entwickeln würde:

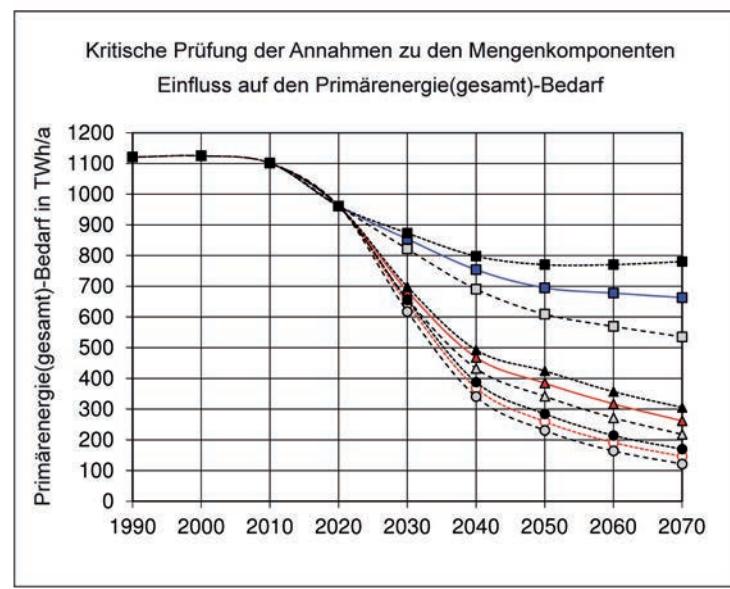
- Im Referenzszenario sind die absoluten Unterschiede mit Abstand am größten. Sie belaufen sich im Jahr 2050 auf +38 bzw. -56 und im Jahr 2070 auf +56 bzw. -76 TWh/a.
- In den Klimaschutzszenarien fallen die Unterschiede deutlich geringer aus (2050: +14 / +10 bzw. -23 / -10 TWh/a und 2070: +14 / +9 bzw. -25 / -16 TWh/a).
- In allen Szenarien werden die relativen Unterschiede immer größer und wachsen in der oberen Abschätzung bis 2050 auf +8-10 % und bis 2070 auf +11-17 % an und in der unteren Abschätzung bis 2050 von -13-15 % auf -22-23 % im Jahr 2070 an, wobei die Unterschiede je im Referenzszenario am höchsten ausfallen.
- Die Relationen zwischen den Szenarien bleiben in etwa konstant. Das heißt, dass die Klimaschutzstrategien unabhängig von den Mengenkomponenten wirksam sind.

Verantwortlich dafür ist vor allem die zugrunde gelegte spezifische Wohnfläche je Person. Eine Reduzierung der Wohnflächen ist in allen Szenarien wirksam und kann als Suffizienzstrategie einen die anderen Maßnahmen ergänzenden Minde rungsbeitrag leisten. Umgekehrt verhält es sich mit steigenden der Wohnflächenansprüche. Sofern man die Auswirkungen einer Reduzierung oder Vergrößerung der Wohnflächen pro Person quantifizieren möchte, ist dies einfach anhand der ausgewiesenen Werte in Tabelle 12.1 möglich. Die dort angenommene Spanne ist mit 60,0 - 45,1 m²/P bzw. -13 % bis +15 % bis zum Jahr 2070 bereits recht groß gewählt.



Referenzszenario:
 -■- obere Abschätzung
 -■- mittlere Abschätzung
 -■- untere Abschätzung
 Klimaschutzszenario:
 -▲- obere Abschätzung
 -▲- mittlere Abschätzung
 -▲- untere Abschätzung
 Klimaschutz-Plus-Szenario:
 -●- obere Abschätzung
 -○- mittlere Abschätzung
 -○- untere Abschätzung

Abbildung 12.2:
 Einfluss unterschiedlicher Annahmen zur Bevölkerungs- und Wohnflächenentwicklungen auf die Treibhausgasemissionen des deutschen Wohngebäudeparks.

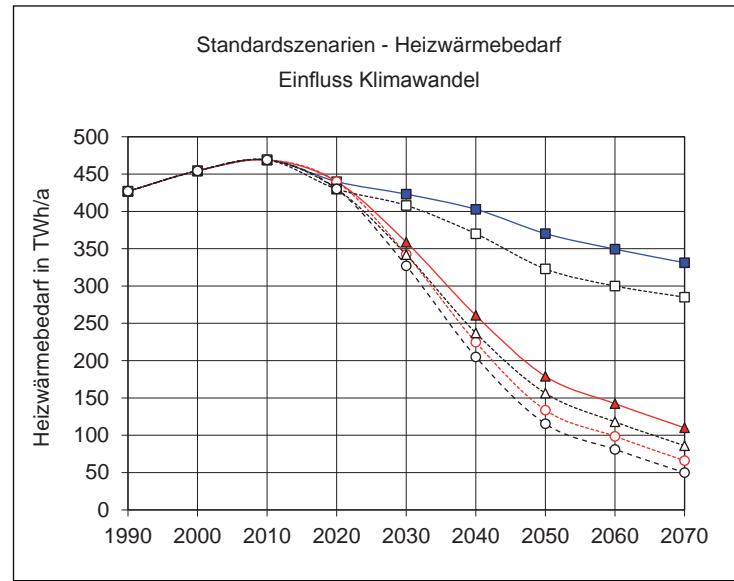


Referenzszenario:
 -■- obere Abschätzung
 -■- mittlere Abschätzung
 -■- untere Abschätzung
 Klimaschutzszenario:
 -▲- obere Abschätzung
 -▲- mittlere Abschätzung
 -▲- untere Abschätzung
 Klimaschutz-Plus-Szenario:
 -●- obere Abschätzung
 -○- mittlere Abschätzung
 -○- untere Abschätzung

Abbildung 12.3:
 Einfluss unterschiedlicher Annahmen zur Bevölkerungs- und Wohnflächenentwicklungen auf den gesamten Primärenergiebedarf des deutschen Wohngebäudeparks.

- Referenz
- Referenz-Klimawandel
- ▲ Klimaschutz
- △ Klimaschutz-Klimawandel
- Klimaschutz-Plus
- Klimaschutz-Plus-Klimawandel

Abbildung 12.4:
Einfluss des Klimawandels bei
einem linearen Trend der Erwärmung
wie in der jüngsten Vergangenheit
auf den Heizwärmebedarf
des Wohngebäudeparks. Vergleich
der Standardszenarien mit/ohne
Klimawandel.



In Tab. 12.2 und Abb. 12.2 ist der Einfluss auf die resultierenden Treibhausgasemissionen dargestellt. Hier spielen nun zusätzlich der Warmwasser- und Strombedarf eine Rolle, die beide eine Abhängigkeit von der Personenanzahl und Haushaltgröße aufweisen. Erwartungsgemäß werden auch hier die Unterschiede im Betrachtungszeitraum immer größer:

- Im Referenzszenario sind die absoluten Unterschiede mit Abstand am größten. Sie belaufen sich im Jahr 2050 auf +11,8 bzw. -13,8 TWh/a und im Jahr 2070 auf + 14,0 bzw. -15,4 Mio t/a.
- In den Klimaschutzszenarien fallen die Unterschiede deutlich geringer aus (2050: +3,9 / +2,2 bzw. -4,7 / -2,7 Mio t/a und 2070: +2,1 / +1,0 bzw. -2,2 / -1,1 Mio t/a).
- In allen Szenarien werden die relativen Unterschiede immer größer und wachsen in der oberen Abschätzung bis 2050 auf + 6 % und bis 2070 auf + 14 % an und sinken in der unteren Abschätzung bis 2050 von - 9 % auf - 17- 20 %, auch hier im Referenzszenario mit den je höheren Werten.

Betrachtet man die kumulierten Pro-Kopf-Treibhausgasemissionen, wie sie in Tab. 12.2 in der rechten, grau hinterlegten Spalte aufgeführt sind, summieren bzw. reduzieren sich die Differenzbeträge im Zeitraum 2020 - 2070 folgendermaßen auf:

- Im Referenzszenario auf + 6,7 bzw. - 4,1 t/P oder prozentual ausgedrückt auf + 7,2 % bzw. - 4,4 %.
- Im Klimaschutzszenario auf + 1,6 bzw. - 1,7 t/P oder prozentual ausgedrückt auf + 3,6 % bzw. - 3,8 %.
- Im Klimaschutz-Plus-Szenario auf + 0,7 bzw. - 1,0 t/P oder prozentual ausgedrückt auf + 1,9 % bzw. - 2,8 %.

Im Hinblick auf den gesamten Primärenergiebedarf zeigt sich ein ähnliches Bild, wie bei den Treibhausgasemissionen (siehe Abb. 12.3 und Tab. 12.3). Der Einfluss der Bevölkerungsentwicklung und der spezifischen Wohnflächen fällt im Referenzszenario auch hier deutlich größer aus, als in den Klimaschutzszenarien und führt dort bei der oberen Mengenabschätzung sogar zu einem Anstieg der Bedarfswerte nach 2050.

Insgesamt lässt sich feststellen, dass die Aussagefähigkeit und Richtungssicherheit der Szenarien bezüglich der Ergebnisse zum Heizwärme- und Primärenergiebedarf sowie zu den resultierenden Treibhausgasemissionen durch unterschiedliche Annahme zur Bevölkerungs- und Wohnflächenentwicklung nicht in Frage gestellt wird. Der relative Einfluss der Hauptstrategien Energieeffizienz und Erneuerbare, wie sie in den Szenarien modelliert sind, bleibt in jedem Fall erhalten (siehe Tab. 12.2 und 12.3).

Für den Klimaschutz sind die kumulierten Treibhausgasemissionen die aussagekräftigste Größe. Hier liegt die Bandbreite der Unterschiede im Referenzszenario zwischen mittlerer und oberer Entwicklung bei maximal plus 7 % bzw. zwischen mittlerer und unterer Entwicklung bei minus 4 %. In den Klimaschutzszenarien fallen diese Unterschiede viel geringer aus. Das spricht insgesamt für die Robustheit der Klimaschutzstrategien.

12.2 Einfluss des künftigen Klimawandels

In Abschnitt 4.1 wurde bereits der künftige Klimawandel als Randbedingung diskutiert. Aufgrund der unklaren künftigen Entwicklung speziell in Mitteleuropa (z.B. nicht vorhersehbare Abschwächung des Golfstroms) wurde dieser Einfluss in den Szenarien vorerst nicht berücksichtigt. An dieser Stelle soll nun betrachtet werden, wie sich der bislang zu beobachtende Erwärmungstrend in Deutschland bei einer weiteren Fortsetzung in Zukunft auswirken würde. Hierfür werden prospektive Klimadatensätze für 2050, die anhand von IPCC-Szenarien modelliert wurden, herangezogen. In diesen wird ein linearer Trend der Klimaveränderungen zugrundegelegt. Der Temperaturanstieg gegenüber der Periode 2000 - 2019 beträgt im Jahresdurchschnitt für den Standort Potsdam ca. + 1,3 Kelvin und für den Standort Würzburg ca. + 1,4 Kelvin. Die Unterschiede bei der Globalstrahlung sind hingegen relativ gering, speziell in der Heizperiode. Gleichwohl sind die Auswirkungen für die Heizzeitbilanz des Wohngebäudeparks komplex, denn die bei weiterer Erwärmung verkürzt sich z.B. die Länge der Heizperiode und damit auch das solare Strahlungsangebot, das als solarer Heizbeitrag wirksam werden kann. Je nach energetischem Standard (z.B. unsaniertes Bestand, Bestandssanierungen mit mittlerer oder hoher Qualität sowie Neubau mit mittlerer oder hoher Qualität) sind die Auswirkungen wiederum unterschiedlich stark ausgeprägt.

Am größten ist der Einfluss des Klimawandels auf die thermische Behaglichkeit im Sommer. Dies wurde im Rahmen dieser Untersuchung jedoch nicht betrachtet, weil es eine grundsätzlich andere Methodik der Rechenmodelle erfordern würde und hier eine Mittelwertbildung mit größeren Schwierigkeiten verbunden ist. Beispielsweise spielen dabei Orientierung, Fensterflächengrößen und die Geschosslage der einzelnen Wohnung eine große Rolle, die auf der Ebene eines Modells des gesamten Wohngebäudeparks nicht vernünftig abgebildet werden können.

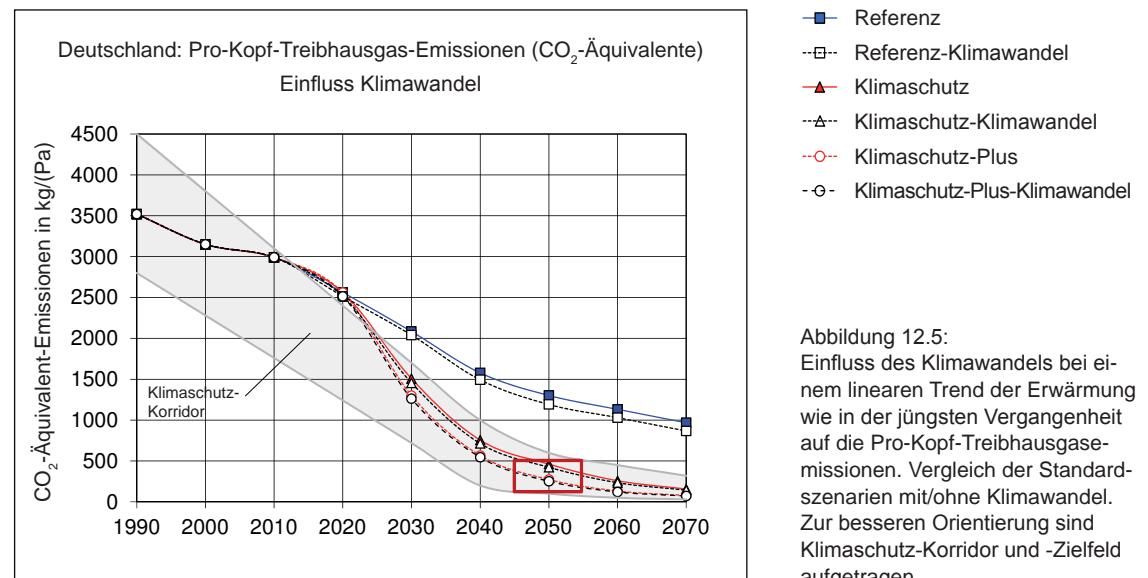


Abbildung 12.5:
Einfluss des Klimawandels bei einem linearen Trend der Erwärmung wie in der jüngsten Vergangenheit auf die Pro-Kopf-Treibhausgasemissionen. Vergleich der Standardszenarien mit/ohne Klimawandel. Zur besseren Orientierung sind Klimaschutz-Korridor und -Zielfeld aufgetragen.

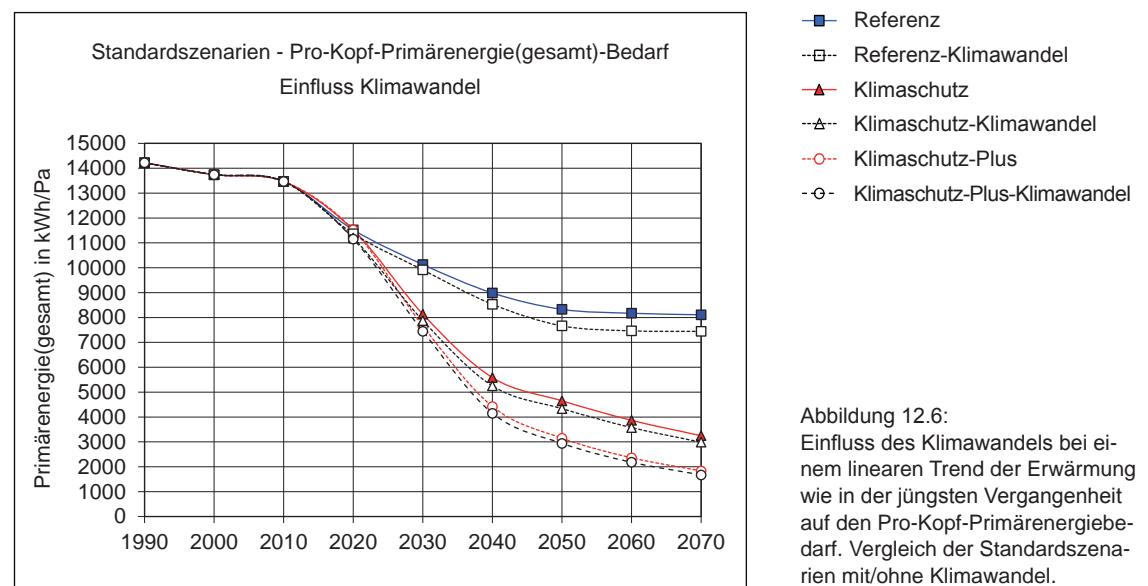


Abbildung 12.6:
Einfluss des Klimawandels bei einem linearen Trend der Erwärmung wie in der jüngsten Vergangenheit auf den Pro-Kopf-Primärenergiebedarf. Vergleich der Standardszenarien mit/ohne Klimawandel.

Tabelle 12.4 oben + unten:
 Einfluss des Klimawandels auf die Pro-Kopf-Treibhausgasemissionen (oben) und den Pro-Kopf-Primärenergie(gesamt)-Bedarf (in kWh/Pa) (unten) in den Jahren 2030 - 2070. In der rechten, grau hinterlegten Spalte sind zudem die kumulierten Treibhausgasemissionen pro Kopf im Zeitraum 2020 - 2100 (oben) und der kumulierte Pro-Kopf-Primärenergie(gesamt)-Bedarf im Zeitraum 2020 - 2070 des deutschen Wohngebäudeparks aufgelistet. Zum besseren Vergleich sind die Werte mit/ohne Klimawandel direkt gegenübergestellt.

Pro-Kopf-GWP (in kg/Pa) und kumulierte GWP 2020 - 2100 (in t/P)						
ohne Klimawandel	2030	2040	2050	2060	2070	k_{GWP}
Referenz	2081	1579	1302	1134	968	93,1
Klimaschutz	1506	754	460	258	158	45,0
Klimaschutz-Plus	1272	567	274	133	79	36,3
mit Klimawandel	2030	2040	2050	2060	2070	k_{GWP}
Referenz	2040	1493	1191	1030	887	87,9
Klimaschutz	1455	798	423	234	143	44,1
Klimaschutz-Plus	1261	619	252	121	71	35,9

Pro-Kopf-PEB (in kWh/Pa) und kumulierter PEB 2020-2070 (in MWh/P)						
ohne Klimawandel	2030	2040	2050	2060	2070	k_{PEB}
Referenz	10121	8951	8309	8165	8066	453,4
Klimaschutz	8114	5561	4597	3816	3195	294,5
Klimaschutz-Plus	7615	4380	3099	2300	1779	240,5
mit Klimawandel	2030	2040	2050	2060	2070	k_{PEB}
Referenz	9914	8530	7663	7464	4442	415,5
Klimaschutz	7877	5848	4337	3575	2986	288,9
Klimaschutz-Plus	7446	4779	2940	2181	1672	239,4

Im Rahmen der Szenarienmodelle kann hingegen mittels einer Anpassung der Klimadaten kalkuliert werden, wie groß der Einfluss auf den Heizwärmebedarf ausfallen würde, wenn sich der Klimawandel im bisher beobachtbaren Maß fortsetzt (siehe Abb. 12.4). Insgesamt sinken die Werte in den Szenarien allmählich, ausgehend vom Ausgangsjahr 2010 ab. Im Jahr 2050 liegen sie unter Bezugnahme zum konstant bleibenden Standardklima um ca. 12 % und im Jahr 2070 sogar ca. 14 % niedriger. Bei den Absolutwerten sind die Unterschiede naturgemäß im Referenzszenario am größten und betragen im Jahr ca. 50 TWh/a. Im Klimaschutzszenario ist der Differenzwert mit 25 TWh/a nur halb so hoch und liegt mit ca. 20 TWh/a im Klimaschutz-Plus-Szenario nochmals niedriger.

Im Jahr 2070 vergrößern sich die Minderbeträge hinsichtlich Heizwärmebedarf weiter und liegen im Referenzszenario bei ca. - 10,5 TWh/a (- 13%), im Klimaschutzszenario bei ca. - 4,6 TWh/a (- 14 %) und im Klimaschutz-Plus-Szenario bei ca. - 3,2 TWh/a (- 14%).

Die Auswirkungen des Klimawandels auf die Treibhausgasemissionen pro Person und Jahr (siehe Abb. 12.2 und Tab. 12.4 oben) sind vor allem im Referenzszenario mit - 111 kg/Pa bzw. - 8,5% im Jahr 2050 und - 81 kg/Pa bzw. - 8,4 % deutlich spürbar. Im Klimaschutzszenario fallen diese mit - 37 kg/Pa bzw. - 8,0 % im Jahr 2050 und - 15 kg/Pa bzw. - 9,5 % bei den Absolutwerten viel geringer aus, um im Klimaschutzszenario mit - 22 kg/Pa (- 8,0 %) im Jahr 2050 und - 8 kg/Pa bzw. - 10,1%) nochmals niedrigere Werte anzunehmen.

Im Hinblick auf die kumulierten Pro-Kopf-Treibhausgasemissionen wirkt sich der Klimawandel nur in geringem Maße klimaentlastend aus. Im Referenzszenario verringert sich der Wert von 93,1 auf 87,9 t/P und damit um nur - 5,6 %. Im Klimaschutzszenario von 45,0 auf 44,1 und somit um - 2,0 % und im Klimaschutz-Plus-Szenario von 36,3 auf 35,9 t/P und damit nur noch um - 1,1%.

Ein ähnliches Bild zeigt sich auch im Hinblick auf den gesamten Pro-Kopf-Primärenergiebedarf (siehe Abb. 12.3 und Tab. 12.4 unten). Auch hier ist der Energieeinspareffekt beim Referenzszenario noch am größten und beträgt aufsummiert für den Zeitraum 2020 - 2070 minus 38 MWh/P bzw. - 8,3 % und schwindet dann im Klimaschutzszenario auf minus sechs MWh/P bzw. - 1,9 % und im Klimaschutz-Plus-Szenario auf minus eine MWh/P bzw. - 0,4 %.

Der emissionsmindernde Effekt ist selbst im Referenzszenario so gering, dass daraus, anders als oftmals vermutet wird, kein bedeutender klimaentlastender Effekt im Sinne einer positiven Rückkopplung erwartet werden kann (siehe Abb. 12.2). Nur

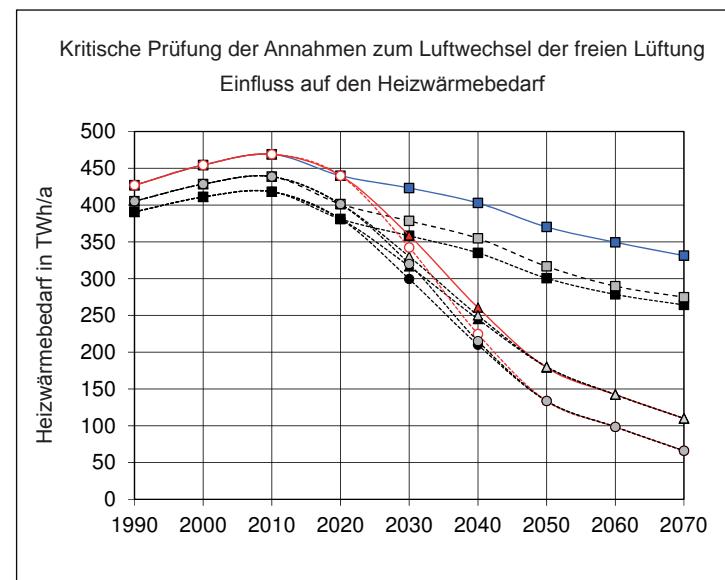
beim Heizwärmebedarf ist ein spürbarer Einfluss nachweisbar. Dies liegt daran, dass dieser direkt von dem Verlauf der Außentemperatur und dem Solarstrahlungsangebot während der Heizperiode abhängig ist. Bei der Betrachtung des übergeordneten Primärenergiebedarfs und der Treibhausgasemissionen tritt fallen die Unterschiede bereits deutlich geringer aus. Die Richtungssicherheit der Szenarien wird durch den leicht emissionsmindernden Einfluss einen fortgesetzten Klimawandels, wie er bereits beobachtbar ist, nicht in Frage gestellt.

12.3 Kritische Prüfung der Annahmen zur freien Lüftung sowie zur Lüftung mit / ohne Wärmerückgewinnung

Die Frage der Lüftungskonzepte und deren Sinnhaftigkeit ist ein Streitthema, das seit dem Wohnungsbau der Weimarer Republik immer wieder aufs Neue diskutiert wird, obwohl hier die grundsätzlichen bauphysikalischen Fragen als geklärt angesehen werden können.

Im Bestand überwiegen immer noch Fensterlüftungskonzepte, oftmals ergänzt durch Abluftanlagen (z.B. bei innenliegenden Bädern). Das gilt auch für den Neubau. Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung haben sich bis heute nicht allgemein durchsetzen können, obwohl diese eine hohe Innenluftqualität mit einem gesicherten Feuchteschutz und einer hohen Energieeinsparung kombinieren. In letzter Zeit ist es gelungen, derartige Lüftungsanlagen stark zu vereinfachen (z.B. erweiterte Kakadenlüftung). Fensterlüftung spielt jedoch auch bei Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung eine große Rolle, vor allem in den Übergangsjahreszeiten und im Sommer. Insofern handelt es sich im Wohnbau immer um Mischkonzepte von kontrollierter und freier Lüftung.

Der Luftwechsel für freie Lüftung, d.h. für Fensterlüftung und die Leckagen in der Gebäudehülle ist eine sensible und nicht einfach bestimmbarer Größe bei der Kalkulation des Heizwär-



- Referenzszenario:
- Standard mit $n_{L(Fe)} = 0,60$
 - $n_{L(Fe)} = 0,45$
 - $n_{L(Fe)} = 0,35$
- Klimaschutzszenario:
- Standard mit $n_{L(Fe)} = 0,60$
 - △-- $n_{L(Fe)} = 0,45$
 - ▲-- $n_{L(Fe)} = 0,35$
- Klimaschutz-Plus-Szenario:
- Standard mit $n_{L(Fe)} = 0,60$
 - $n_{L(Fe)} = 0,45$
 - $n_{L(Fe)} = 0,35$

Abbildung 12.7:
Einfluss der Annahmen zum freien Luftwechsel (Fenster + Leckagen) auf den Heizwärmebedarf in TWh/a.

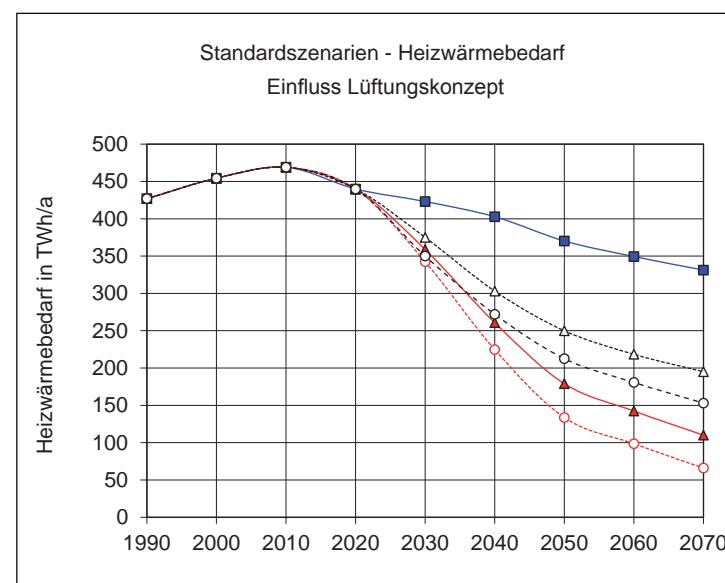


Abbildung 12.8:
Einfluss des Lüftungskonzeptes (mit / ohne Wärmerückgewinnung) auf den Heizwärmebedarf in TWh/a. Weil im Referenzszenario keine Wärmerückgewinnung modelliert wurden (maximal Abluftanlagen) betrifft dies ausschließlich die beiden Klimaschutzszenarien.

Referenzszenario:

—■— Standard mit $n_{L(Fe)} = 0,60$

—□— $n_{L(Fe)} = 0,45$

—■— $n_{L(Fe)} = 0,35$

Klimaschutzszenario:

—▲— Standard mit $n_{L(Fe)} = 0,60$

—△— $n_{L(Fe)} = 0,45$

—▲— $n_{L(Fe)} = 0,35$

Klimaschutz-Plus-Szenario:

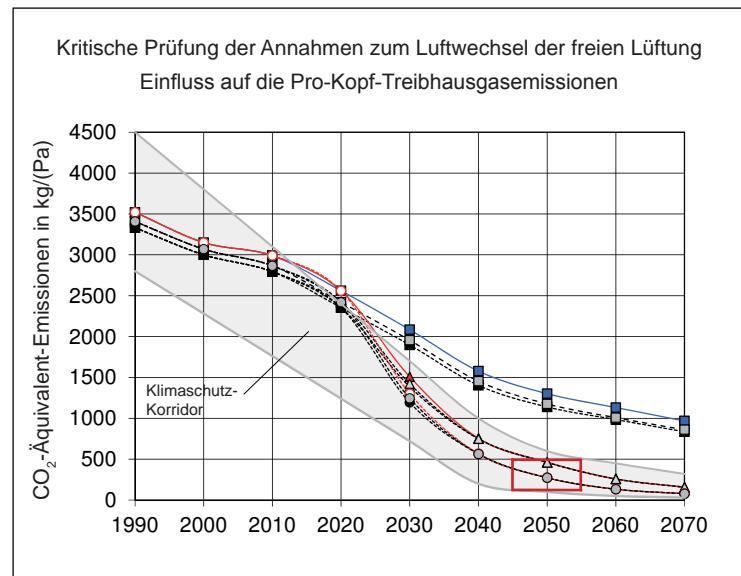
—○— Standard mit $n_{L(Fe)} = 0,60$

—○— $n_{L(Fe)} = 0,45$

—●— $n_{L(Fe)} = 0,35$

Abbildung 12.9:

Einfluss der Annahmen zum freien Luftwechsel (Fenster + Leckagen) auf die Pro-Kopf-Treibhausgasemissionen in kg(Pa).



Referenzszenario:

—■— Standard mit $n_{L(Fe)} = 0,60$

—□— $n_{L(Fe)} = 0,45$

—■— $n_{L(Fe)} = 0,35$

Klimaschutzszenario:

—▲— Standard mit $n_{L(Fe)} = 0,60$

—△— $n_{L(Fe)} = 0,45$

—▲— $n_{L(Fe)} = 0,35$

Klimaschutz-Plus-Szenario:

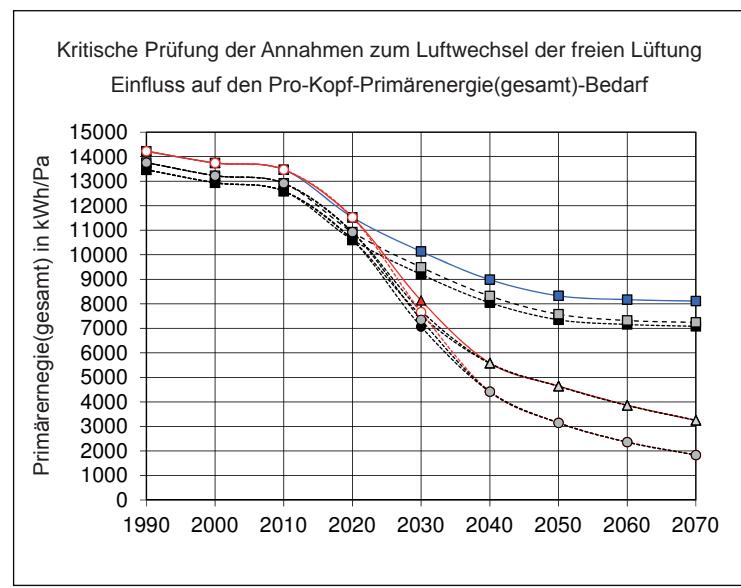
—○— Standard mit $n_{L(Fe)} = 0,60$

—○— $n_{L(Fe)} = 0,45$

—●— $n_{L(Fe)} = 0,35$

Abbildung 12.10:

Einfluss der Annahmen zum freien Luftwechsel (Fenster + Leckagen) auf den Pro-Kopf-Primärenergie(gesamt)-Bedarf in kWh(Pa).



mebedarfs. Je nach Berechnungsverfahren und -methodik variieren die Werte, die hierfür in Ansatz gebracht werden erheblich. Typische Mittelwerte über die gesamte Heizperiode reichen von 0,3 bis 0,8 Luftwechseln pro Stunde. Hintergrund für diese große Bandbreite ist, dass der Fensterluftwechsel stark nutzer- und jahreszeitengeprägt ist und im Einzelfall durch weitere Faktoren bzw. Randbedingungen beeinflusst wird, z.B. der Möglichkeit einer Quer- bzw. geschossübergreifenden Lüftung, der Fenster- und Fensterlaibungsgeometrie, der Temperaturdifferenz innen /außen und vielen weiteren Faktoren. Der hinzukommende Leckageluftwechsel ist vor allem von der Luftdichtigkeit der Gebäudehülle abhängig, wird aber ebenfalls von äußeren Faktoren mitgeprägt, wie der Windexposition.

In einer ersten Untersuchungsreihe werden Fenster- und Leckageluftwechsel zusammengefasst und variiert, um den Einfluss dieser Annahmen auf den Heizwärme- und Primärenergiebedarf sowie auf die Treibhausgasemissionen einzuschätzen zu können. Ausgehend vom Standardwert von 0,60 werden in zwei weiteren Varianten die Mittelwerte auf 0,45 und 0,35 Luftwechsel abgesenkt.

Eine weitere Fragestellung zu den Lüftungskonzepten betrifft die Rolle der Wärmerückgewinnung. Daher wird in einer weiteren Variante geprüft, welche Auswirkungen der Wegfall der Wärmerückgewinnung bei den beiden Klimaschutzszenarien hätte. Im Referenzszenario wurde in Anlehnung an die bisherig überwiegende Praxis im gesamten Betrachtungszeitraum jedoch keine Wärmerückgewinnung modelliert.

Einfluss des Fenster- und Leckageluftwechsels

Wie Abb. 12.7 zeigt, haben unterschiedliche Annahmen zum freien Luftwechsel im Zeitraum 1990 – 2020 eine Niveauverschiebung zur Folge. Die Ausgangswerte im Jahr 2020 der Szenarien liegen für die Standardszenarien bei 440 TWh/a (100%), für einen reduzierten Luftwechsel von $n_{L(Fe)} = 0,45$ bei ca. 400 TWh/a (91%) und für den nochmals geringer angesetz-

ten Luftwechsel $n_{L(Fe)} = 0,35$ bei 380 TWh/a (87 %). Während im Referenzszenario diese Unterschiede weiter bestehen bleiben, findet in den Klimaschutzszenarien bis 2050 eine Angleichung der Werte statt. Dies hat seine Ursache darin, dass bis dahin alle Wohngebäude durch Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung versehen sind und damit die Fensterluftwechsel im Winter sehr gering ausfallen. Zusätzlich führt die luftdichte Bauweise in den Klimaschutzszenarien zu einer starken Reduktion des Leckageluftwechsels.

Die Auswirkungen auf die Pro-Kopf-Treibhausgasemissionen (Abb. 12.9) sind nur im Referenzszenario spürbar und spielen bei den Klimaschutzszenarien nur im Zeitraum bis 2040 eine Rolle. Ein ähnliches Bild zeigt sich im Hinblick auf den Pro-Kopf-Primärenergiebedarf (Abb. 12.10). Betrachtet man abschließend die kumulierten Pro-Kopf-Treibhausgasemissionen (Tab. 12.5), so reduzieren sich diese im Referenzszenario von 93,1 auf 84,9 bzw. 82,8 t/P oder relativ gesehen um 8,8 bzw. um 11,1 %. Im Klimaschutzszenario sinken die Werte von 45,0 auf 44,1 bzw. 43,7 t/P oder relativ gesehen um 2,0 bzw. 2,9 % und im Klimaschutz-Plus-Szenario von 36,3 auf 35,9 bzw. 35,4 t/P oder prozentual ausgedrückt um 1,1 bzw. 2,5 %.

Auch beim kumulierten Primärenergiebedarf pro Person (Tab. 12.6) treten nur im Referenzszenario relevante Unterschiede auf. Die Werte reduzieren sich hier von 453,4 auf 420,0 bzw. 410,8 MWh/P oder relativ gesehen um 7,4 bzw. 9,4 %. Im Klimaschutzszenario sinken die Werte hingegen von 294,5 auf 285,3 bzw. 280,5 MWh/P oder relativ gesehen nur um 3,1 bzw. 3,4 % und im Klimaschutz-Plus-Szenario von 240,5 auf 234,4 bzw. 232,4 MWh/P oder prozentual ausgedrückt nur um 2,5 bzw. 3,4 %.

Die Annahmen zum freien Luftwechsel durch Fenster und Leckagen spielen nur in der Referenzentwicklung eine Rolle, führen aber keinesfalls dazu, dass dadurch eine substanzelle Annäherung an die Klimaschutzentwicklungen stattfindet.

Pro-Kopf-GWP (in kg/Pa) und kumulierte GWP 2020 - 2100 (in t/P)						
Standard	2030	2040	2050	2060	2070	k_{GWP}
Referenz	2081	1579	1302	1134	968	93,1
Klimaschutz	1506	754	460	258	158	45,0
Klimaschutz-Plus	1272	567	274	133	79	36,3
$n_{L(Fe)} = 0,45 \text{ h}^{-1}$	2030	2040	2050	2060	2070	k_{GWP}
Referenz	1955	1454	1176	1008	842	84,9
Klimaschutz	1422	745	453	353	155	44,1
Klimaschutz-Plus	1244	563	270	129	76	35,9
$n_{L(Fe)} = 0,35 \text{ h}^{-1}$	2030	2040	2050	2060	2070	k_{GWP}
Referenz	1897	1403	1139	985	822	82,8
Klimaschutz	1385	754	460	258	158	43,7
Klimaschutz-Plus	1193	556	266	127	74	35,4
Standard, ohne WRG	2030	2040	2050	2060	2070	k_{GWP}
Referenz	2081	1579	1302	1134	968	93,1
Klimaschutz	1546	940	567	330	206	49,5
Klimaschutz-Plus	1320	743	362	188	116	40,3

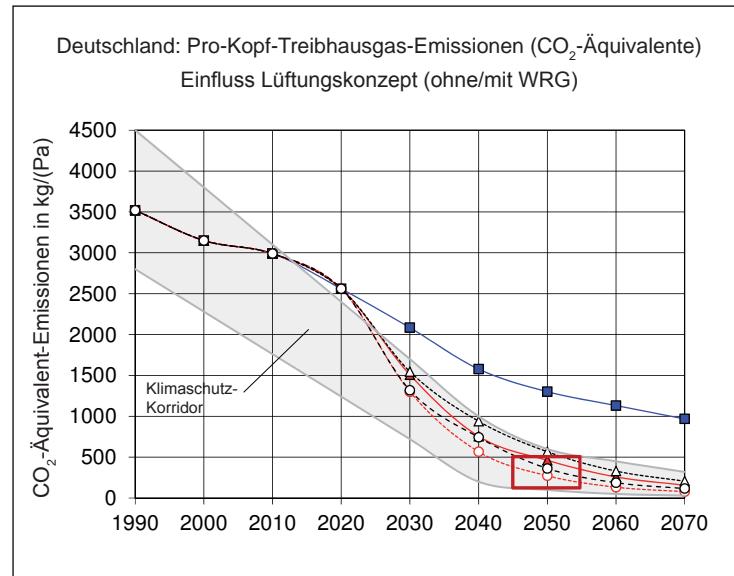
Tabelle 12.5:
Einfluss unterschiedlicher Annahmen zum Luftwechsel der freien Lüftung (Fenster + Leckagen) sowie der Wärmerückgewinnung auf die Pro-Kopf-Treibhausgasemissionen (in kg/Pa) in den Jahren 2030 - 2070 und die kumulierten Pro-Kopf-Treibhausgasemissionen im Zeitraum 2020 - 2100 (in t/P, grau hinterlegte Werte) des deutschen Wohngebäudeparks.

Pro-Kopf-PEB (in kWh/Pa) und kumulierter PEB 2020-2070 (in MWh/P)						
Standard	2030	2040	2050	2060	2070	k_{PEB}
Referenz	10121	8951	8309	8165	8066	453,4
Klimaschutz	8114	5561	4597	3816	3195	294,5
Klimaschutz-Plus	7615	4380	3099	2300	1779	240,5
$n_{L(Fe)} = 0,45 \text{ h}^{-1}$	2030	2040	2050	2060	2070	k_{PEB}
Referenz	9489	8317	7574	7318	7081	420,0
Klimaschutz	7712	5363	4421	3718	3108	285,3
Klimaschutz-Plus	7350	4247	3002	2224	1709	234,4
$n_{L(Fe)} = 0,35 \text{ h}^{-1}$	2030	2040	2050	2060	2070	k_{PEB}
Referenz	9198	8043	7348	7158	7142	410,8
Klimaschutz	7529	5286	4328	3617	3064	280,5
Klimaschutz-Plus	7064	4124	3099	2300	1779	232,4
Standard, ohne WRG	2030	2040	2050	2060	2070	k_{PEB}
Referenz	10121	8951	8309	8165	8066	453,4
Klimaschutz	8330	6727	5506	4742	4173	331,5
Klimaschutz-Plus	7765	5631	4018	3207	2714	277,4

Tabelle 12.6:
Einfluss unterschiedlicher Annahmen zum Luftwechsel der freien Lüftung (Fenster + Leckagen) sowie der Wärmerückgewinnung auf den Pro-Kopf-Primärenergie(gesamt)-Bedarf (in kWh/Pa) in den Jahren 2030 - 2070 und den kumulierten Primärenergie(gesamt)-Bedarf im Zeitraum 2020 - 2070 (in MWh/P, grau hinterlegte Werte) des deutschen Wohngebäudeparks.

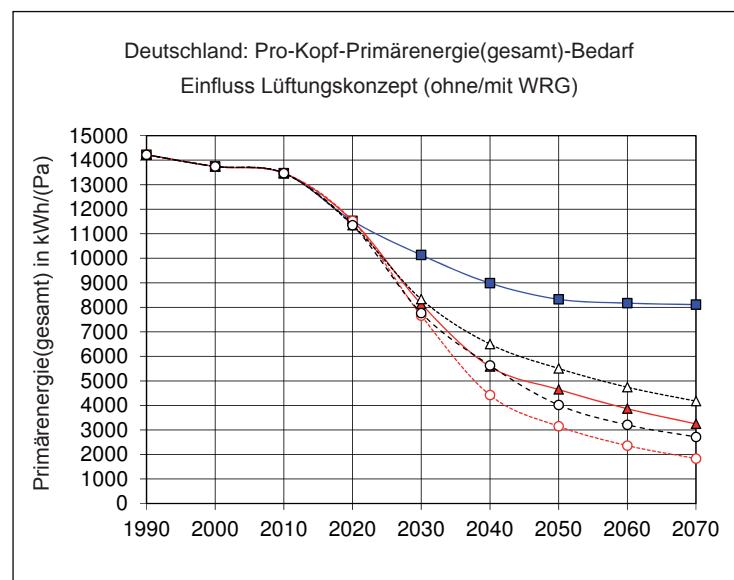
- Referenz
- ▲ Klimaschutz
- △-△- Klimaschutz ohne WRG
- Klimaschutz-Plus
- Klimaschutz-Plus ohne WRG

Abbildung 12.11:
Einfluss des Lüftungskonzeptes (mit / ohne Wärmerückgewinnung) auf die Pro-Kopf-Treibhausgasemissionen in kg/(Pa). Weil im Referenzszenario keine Wärmerückgewinnung modelliert wurden (maximal Abluftanlagen) betrifft dies ausschließlich die beiden Klimaschutzszenarien.



- Referenz
- ▲ Klimaschutz
- △-△- Klimaschutz ohne WRG
- Klimaschutz-Plus
- Klimaschutz-Plus ohne WRG

Abbildung 12.12:
Einfluss des Lüftungskonzeptes (mit / ohne Wärmerückgewinnung) auf den Pro-Kopf-Primärenergie(gesamt)-Bedarf in kWh/(Pa). Weil im Referenzszenario keine Wärmerückgewinnung modelliert wurden (maximal Abluftanlagen) betrifft dies ausschließlich die beiden Klimaschutzszenarien.



Einfluss der Wärmerückgewinnung

Sofern in den Klimaschutzszenarien die Lüftung ohne Wärmerückgewinnung erfolgt, würde der Heizwärmebedarf deutlich zunehmen (Abb. 12.8). Die Bedarfswerte steigen im Klimaschutzszenario im Jahr 2050 von 179 auf 250 TWh/a (+ 40 %) und im Jahr 2070 von 110 auf 195 TWh/a (+ 77%). Im Klimaschutz-Plus-Szenario sind wegen dem besseren Wärmeschutz die Unterschiede nochmals viel größer. Hier erhöhen sich die Bedarfswerte im Jahr 2050 von 134 auf 213 TWh/a (+ 59 %) und im Jahr 2070 von 66 auf 153 TWh/a (+ 132 %). Daraus kann der Schluss gezogen werden, dass ab einem bestimmten Wärmeschutzniveau weitere substantielle Effizienzverbesserungen der Wohngebäude auf die Wärmerückgewinnung der Lüftung angewiesen sind.

Die Auswirkungen eines Wegfalls der Wärmerückgewinnung auf die Pro-Kopf-Treibhausgasemissionen (Abb. 12.11) sind deutlich und führen speziell im Klimaschutzszenario dazu, dass das Zielfeld verfehlt wird. Ein ähnliches Bild zeigt sich im Hinblick auf den Pro-Kopf-Primärenergiebedarf (Abb. 12.12).

Betrachtet man abschließend die kumulierten Pro-Kopf-Treibhausgasemissionen (Tab. 12.5), so steigen diese im Klimaschutzszenario von 45,0 auf 49,5 t/P (+ 10 %) und im Klimaschutz-Pluszenario von 36,3 auf 40,3 t/P (+ 11 %). Beim kumulierten Primärenergiebedarf pro Person (Tab. 12.6) erhöhen sich die Werte von 294,5 auf 331,5 (+ 13%) und im Klimaschutz-Plus-Szenario von 240,5 auf 277,4 MWh/P (+ 15 %).

Die Wärmerückgewinnung der Lüftung erweist sich somit als wesentlicher Baustein der Klimaschutzstrategie und führt zu einer bedeutenden Reduzierung des Energiebedarfs und damit der notwendigen Größe des erneuerbaren Energiesystems insgesamt. In der Gesamtschau wird deutlich, dass das Lüftungskonzept selbst und die Annahmen zu den energetisch wirksamen Luftwechseln in den Modellen der Szenarien einen wichtigen Stellenwert für künftige Klimaschutzkonzepte ha-

12.4 Unterschiedliche Bewertungen der biogenen Emissionen von Biomasseheizungen

In den Standardszenarien werden Biomasseheizungen mit einem niedrigen spezifischen Emissionskennwert von 0,055 kg/kWh bewertet. Das entspricht einer klimaneutralen Bereitstellung der Biomasse, d.h. es werden nur die fossilen Emissionen für Bewirtschaftung, Ernte, Transporte und Aufbereitung bilanziert. Hoch problematisch an dieser Bewertung ist, dass damit kein Unterschied zwischen energetischen bzw. sonstig kurzfristigen und den langfristigen Nutzungen gemacht wird.

In vielen wissenschaftlichen Studien wird inzwischen daher die Annahme einer klimaneutralen Verbrennung von Holz in Zweifel gezogen. Erstens stellt die Entnahme von Holz aus dem Wald eine Quelle dar. Zweitens ist die thermische Nutzung von Holz mit hohen Treibhausgasemissionen verbunden, die zu meist unmittelbar nach der Ernte freigesetzt und somit durch das Nachwachsen der Biomasse im Wald nicht ausgeglichen werden können. Um diese Effekte abzubilden, ist eine dynamische Bilanzierung der Holznutzung notwendig. Ein einfacherer, besser handhabbarer Ansatz wurde mit dem halbstatischen GWP(bio)-Index entwickelt (vgl. Guest et al 2012).

Eine weitere Bilanzierungsvariante behandelt die direkten Emissionen der Verbrennung analog zu fossilen Emissionen. Diese fallen nämlich in eine Zeitperiode, in der sämtliche Treibhausgasemissionen möglichst schnell auf Null zu führen sind, um überhaupt noch einen Paris-kompatiblen Klimaschutz erreichen zu können. Hinzu kommt, dass durch die Verbrennung in Heizsystemen der stofflichen Nutzung (z.B. Holzbau, biogene Dämmungen, biochemische Produkte anstelle fossiler Referenzprodukte) Potenziale entzogen werden, die aufgrund ihrer CO₂-Speicherung und Substitutionswirkung einen nachweisbar klimalentlastenden Effekt haben. Mit einer Vollbewertung der direkten CO₂-Emissionen der Holzheizungen werden diese mit einiger Berechtigung den fossilen Heizsystemen gleichgestellt.

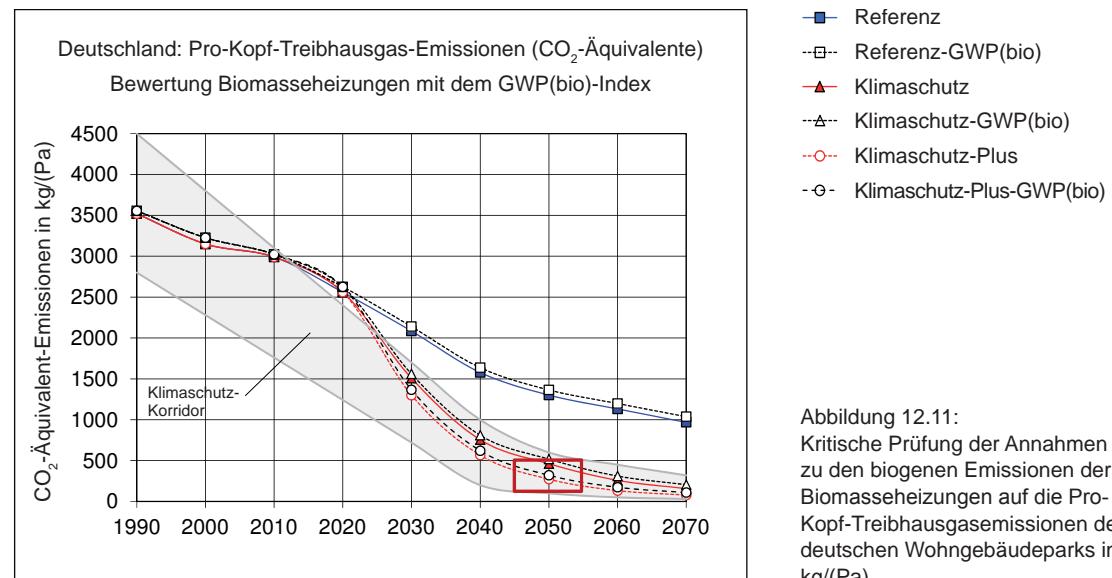


Abbildung 12.11:
Kritische Prüfung der Annahmen zu den biogenen Emissionen der Biomasseheizungen auf die Pro-Kopf-Treibhausgasemissionen des deutschen Wohngebäudeparks in kg/(Pa).

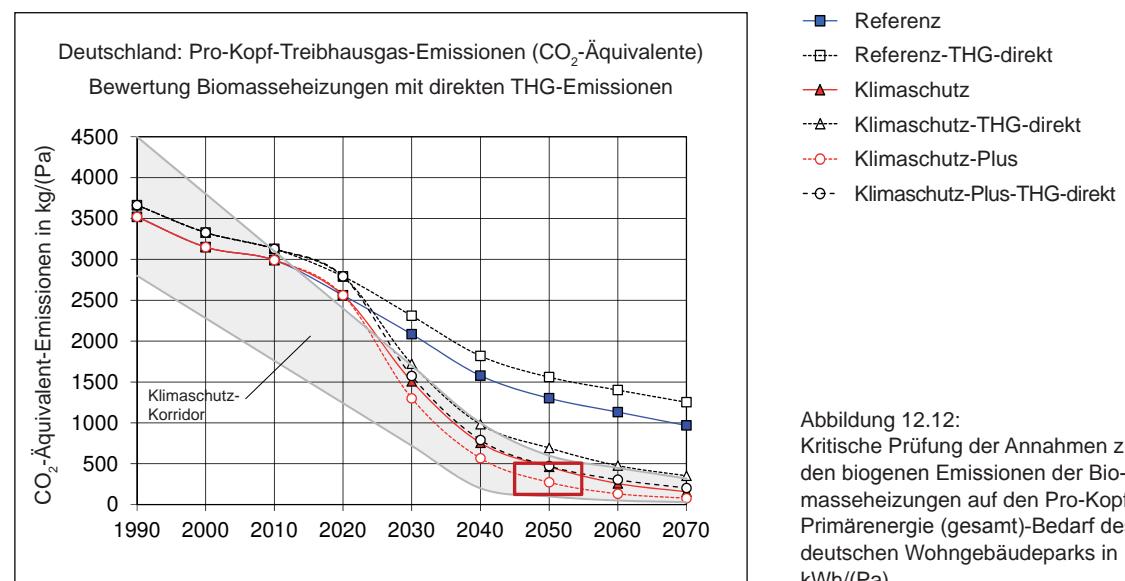


Abbildung 12.12:
Kritische Prüfung der Annahmen zu den biogenen Emissionen der Biomasseheizungen auf den Pro-Kopf-Primärenergie (gesamt)-Bedarf des deutschen Wohngebäudeparks in kWh/(Pa).

Tabelle 12.7:
Einfluss unterschiedlicher Annahmen zur Bewertung der biogenen Emissionen der Biomasseheizungen auf die Pro-Kopf-Treibhausgasemissionen (in kg/Pa) in den Jahren 2030 - 2070 und die kumulierten Pro-Kopf-Treibhausgasemissionen im Zeitraum 2020 - 2100 (in t/P, grau hinterlegte Werte) des deutschen Wohngebäudeparks.

Pro-Kopf-GWP (in kg/Pa) und kumulierte GWP 2020 - 2100 (in t/P)						
Standard	2030	2040	2050	2060	2070	k_{GWP}
Referenz	2081	1579	1302	1134	968	93,1
Klimaschutz	1506	754	460	258	158	45,0
Klimaschutz-Plus	1272	567	274	133	79	36,3
GWP(bio)-Index						
	2030	2040	2050	2060	2070	k_{GWP}
Referenz	2138	1637	1363	1198	1037	97,1
Klimaschutz	1559	810	518	311	205	48,8
Klimaschutz-Plus	1366	621	321	174	109	39,9
Direkte THG-Emissionen						
	2030	2040	2050	2060	2070	k_{GWP}
Referenz	2309	1819	1559	1401	1252	109,8
Klimaschutz	1723	982	693	477	352	58,4
Klimaschutz-Plus	1573	790	471	304	203	48,7

Die kritische Prüfung beinhaltet drei Varianten:

- 1 **Standard:** Klimaneutrale Bereitstellung der Biomasse, wie in allen Szenarien als Standard unterstellt.
- 2 **GWP(bio):** Anwendung des GWP(bio)Index. Hierbei wird angenommen, dass, wie es bislang in den privaten Haushalten der Fall war, ungefähr 70% der holzgestützten Wärmeerzeugung mit Scheitholzheizungen erfolgen (vgl. UBA 2023, S. 60). Zu 70 % wird hierbei Laub- und zu 30 % Nadelholz eingesetzt.. Nur gut ein Viertel der Holzheizungen verwenden Pellets oder Restholz als Energieträger. Gegenüber der klimaneutralen Bereitstellung liegen bei diesem Ansatz die spezifischen Emissionen um einen Faktor 2,65 höher.
- 3 **Direkt:** Ausweisung der direkten Emissionen durch Biomasseheizungen. Diese sind faktisch zusätzlich zu den fossilen Emissionen und damit als direkter Klimaantrieb wirksam, während die klimaentlastende Wirkung des Bio-masseaufbaus in der Vergangenheit dem Wald und nicht dem Holzproduktespeicher zugeordnet werden.

Gemäß dieser Betrachtung liegen die spezifischen Emissionen dann sogar um einen Faktor 7,8 höher als unter der Annahme einer klimaneutralen Bereitstellung.

Die unterschiedliche Bewertung der Biomasseverbrennung wird in der kritischen Prüfung nur auf die Wärmeerzeugung (und nicht auf die Stromerzeugung) der Wohngebäude angewendet. Durch den geringeren Heizbedarf geht dieser in den Klimaschutzszenarien ab 2020 allmählich zurück, während er im Referenzszenario weiter ansteigt. Wie in Abb. 12.11 und 12.12 dargestellt, führen andere Bewertungen der Verbrennung von Biomasse, die die klimaneutrale Bereitstellung mit guten Gründen bezweifeln, zu einer generellen Niveauanhebung der Pro-Kopf-Treibhausgasemissionen:

- Beim GWP(bio)-Index liegt diese im Referenzszenario im Jahr 2050 bei 64 kg/Pa (+5,6%) und im Jahr 2070 bei 69 kg/Pa (+7,1%). In den Klimaschutzszenarien liegt diese im Jahr 2050 bei 58 bzw. 47 kg/Pa (+12,6 bzw. +17,2 %).
- Viel größer fallen erwartungsgemäß die Unterschiede aus, wenn man eine Vollbewertung der direkten biogenen Emissionen vornimmt. Die Mehremissionen betragen im Referenzszenario im Jahr 2050 257 kg/Pa (+ 19,7 %) und im Jahr 2070 284 kg/Pa (+ 29,8 %). In den Klimaschutzszenarien liegen diese im Jahr 2050 bei 233 bzw. 197 kg/Pa (+50,7 % bzw. +71,9 %) und im Jahr 2070 bei 194 bzw. 124 Mio kg/Pa (+122,8% bzw. 157,0%).

Im Hinblick auf die für den Klimaschutz entscheidenden kumulierten Pro-Kopf-THG-Emissionen zeigt sich ein ähnliches Bild im Hinblick auf die Bewertung von Biomasseheizungen jenseits der üblichen Annahme der klimaneutralen Bereitstellung:

- Im Referenzszenario ergibt sich ein spürbarer Anstieg von 93,1 auf 97,1 t/P bzw. +4,3% (GWP(bio)) und 109,8 t/P bzw. +17,9 % (direkte Emissionen).
- Im Klimaschutzszenario erhöhen sich die Werte von 45,0 auf 48,8 t/P bzw. + 8,4 % (GWP(bio)) und auf 58,4 t/P bzw. +29,8% (direkte Emissionen).

- Im Klimaschutz-Plus-Szenario erhöhen sich die Werte von 36,3 auf 39,9 t/P bzw. + 9,9 % (GWP(bio)) und auf 48,7 t/P bzw. +34,2 % (direkte Emissionen).

Als Fazit ergibt sich ein erstaunlich großer Unsicherheitsbereich. Angesichts der gefährdeten Zukunft der Wälder und damit auch der Holzverfügbarkeit ist eine Bewertung gemäß dem GWP(bio)-Index oder der direkten Emissionen für die energetischen Nutzung Biomasse sicherlich eher angemessen. Damit wäre die Verbrennung von Biomasse als mindestens so kritisch einzustufen, wie die Verbrennung fossiler Energieträger. Dies steht in auffälligem Kontrast zur üblichen Argumentation, bei der die energetische Nutzung von Holz als Lösungsansatz für den Klimaschutz propagiert wird. Dies hat zur Folge, dass für einen Paris-kompatiblen Klimaschutz letztlich ein Ausstieg aus sämtlichen brennstoffgestützten Wärmeversorgungen - eben auch den Holzheizungen - anzudenken und als ernsthaft zu verfolgender Ansatz zu umzusetzen ist.

Bereits unter der optimistischen Annahme einer auch künftig gesicherten Produktivität der Biomassebereitstellung aus einer nachhaltigen Waldbewirtschaftung, wie im GWP(bio)-Index unterstellt, ergeben sich bereits deutlich höhere Treibhausgasemissionen als bei der standardmäßigen Annahme einer klimaneutralen Bereitstellung der Biomasse.

Ein ernsthaftes Problem der klimaneutralen Bewertung von Holz ist jedoch, dass damit, wie in der Vergangenheit, indirekt eine ineffiziente Nutzung, z.B. auf Kosten des Wärmeschutzes gefördert wird. Dabei handelt es sich hier einerseits um einen wertvollen Energieträger, der im künftigen Energiesystem wohl für Hochtemperaturprozesse und als Regelenergie bei der Stromerzeugung dringend benötigt wird. Andererseits steht die energetische Nutzung von Holz der Bildung von CO₂-Senken entgegen, die auf langlebigen Holzprodukte und/oder einer dauerhaften Kaskadennutzung angewiesen ist, um einen relevanten klimaentlastenden Effekt erreichen zu können (1).

12.5 Switch-Szenarien

Eine auf den ersten Blick eigenwillige Art und Weise der kritischen Prüfung der Szenarien besteht darin, die Versorgungslösungen zwischen Referenz- und Klimaschutzszenarien zu tauschen („Switch“). Diese Prüfung hat den Charakter eines „konstruierten Tests“, denn hier wird die Frage der konkreten Umsetzbarkeit und der gegenseitigen Abhängigkeiten zwischen den Maßnahmen außen vor gelassen, die ansonsten aus guten Gründen integraler Bestandteil jeder Szenarienmodellierung sind. Die Switch-Szenarien haben daher vor allem eine methodische Funktion:

- Der Einfluss der beiden übergeordneten Strategien Energieeffizienz und Dekarbonisierung der Energieversorgung kann dadurch einzeln quantifiziert werden, um daraus die Bedeutung für die Gesamtstrategie herleiten zu können („strategische Prüfung“).
- Durch diese Prüfung wird ferner deutlich, wie robust oder fragil die Einzelstrategien für sich genommen sind und/oder inwieweit sie aufeinander angewiesen sind und sich gegenseitig stützen („Resilienzprüfung“).
- Es ergeben sich bei diesen konstruierten Szenarien bisweilen auch Kombinationen von Handlungs- und Nicht-handlungsoptionen, die Bestandteil der Diskussionen um das klimagerechte Bauen sind und derzeit gerade von Architekturprofessoren mit Nachdruck propagiert werden (Prüfung von „Entweder-Oder“-Strategien).
- Das Feld der Möglichkeiten wird auf eine methodisch etwas rabiate Art und Weise vergrößert. Dabei wird das gesamte Feld der Klimaschutzstrategien so weit abgesteckt, dass auch disruptive bzw. extrem einseitige Umsetzungen einbezogen werden, auch wenn diese in der hier modellierten „Reinform“ eher unwahrscheinlich sind (Prüfung der Umsetzungsgrenzen der Klimaschutzstrategien“).

Über den Tausch der Versorgungslösungen lassen sich aus den drei Standardszenarien folgende drei Varianten bilden:

REF-Switch (Variante 1):

Grundlage bildet die Bedarfsstruktur des Referenzszenarios, d.h. der Nutz- und Endenergiebedarf für Raumwärme, Lüftung, Warmwasser und sämtliche Stromanwendungen (siehe Abb. 8.19). Die Wärme- und Stromerzeugung erfolgt jedoch nach den Vorgaben des Klimaschutzszenarios (siehe Abb. 4.7 - 4.9). Dieses Szenario entspricht in etwa dem, was aktuell unter dem Slogan „Einfach Bauen“ (Nagler et al. 2020) vorgeschlagen wird: Dort sollen die energetische Qualität von Gebäudehülle und die Lüftungskonzepte auch künftig unverändert auf dem Niveau des geltenden Gebäude-Energien-Gesetzes GEG weitergeführt werden. Der Klimaschutz soll ausschließlich über den Ausbau der erneuerbaren Wärme- und Stromerzeugung sowie über Einsparungen beim Herstellungs-, Wartungs-, und Instandsetzungsaufwand sowie beim späteren Rückbau der Gebäudekonstruktion und Gebäudetechnik erfolgen. In diesem Switch-Szenario bleibt jedoch unbeachtet, dass die Heizstruktur der Klimaschutzszenarien auf den niedrigen Heizwärmebedarf der Gebäude abgestimmt ist (z.B. Quellenerschließung bei Wärmepumpenheizungen bzw. begrenzte Verfügbarkeit von Biomasse). Auch für die Systemdienlichkeit des Gebäudeparks (Begrenzung der Größe des künftigen erneuerbaren Energiesystems, insbesondere im Hinblick auf die Versorgungslage während der sog. „Winterlücke“, Speicherfähigkeit, Lastausgleich) ist ein niedriger Energiebedarf des Gebäudesektors mit entscheidend, um die Funktionsfähigkeit des künftigen erneuerbaren Energiesystems zu stärken. Aus der Umsetzungsperspektive und aus technischer Sicht ist dieses Szenario nicht zielführend, wird jedoch in Universitäten und Hochschulen intensiv diskutiert und propagiert.

KS-Switch (Variante 2):

Dieses Szenario ist das Gegenstück zu Variante 1. Hier bildet der Nutz- und Endenergiebedarf des Klimaschutzszenarios für Raumwärme, Lüftung, Warmwasser und alle Stromanwendungen den Ausgangspunkt (siehe Abb. 8.19), während die Wärme- und Stromversorgung den Vorgaben des Referenzszenari-

os folgt (siehe Abb. 4.7 - 4.9). Dieses Szenario entspricht einer einseitigen Effizienzstrategie, deren Klimawirksamkeit durch einen wenig ambitionierten Ausbau der erneuerbaren Energien konterkariert wird. Im Bereich der Stromerzeugung stellt dies durch die jüngsten politischen Vorgaben inzwischen eine eher unwahrscheinliche Entwicklung dar. Anders könnte dies jedoch bei der Wärmeversorgung gelagert sein (siehe folgende Variante 5), weil der Ausstieg aus den fossilen Heizsystemen gerade im Bestand eine große Herausforderung darstellt.

KS-Plus-Switch (Variante 3):

Dieses Szenario funktioniert analog zur vorhergehenden Variante. Jedoch wird hier der Nutz- und Endenergiebedarf gemäß dem dem Klimaschutz-Plus-Szenario angesetzt. Dieses Switch-Szenario ist extrem unwahrscheinlich, denn durch die hohe Energieeffizienz der Gebäude wird eine erneuerbare Energieversorgung deutlich einfacher realisierbar als bei Gebäuden mit hohen Energiebedarfswerten.

„Fiktive“ Auswertung

In keinem der drei konstruierten Switch-Szenarien können die Bedingungen für ein Paris-kompatibles Bauen erfüllt werden. Das 2-Grad-Globalbudget für Wohnnutzungen in Deutschland wird um 11 - 26 t/P und damit um 30 - 70 % überschritten. Nur im Klimaschutz-Plus-Switch-Szenario ist gerade noch ein grenzwertiger Klimaschutz (2-Grad, 50% Eintrittswahrscheinlichkeit) nachweisbar. Bezieht man hier zusätzlich die begrenzten Senkenpotenziale mit ein, ließe sich mit minus 12 - 20 t/P der notwendige Klimaausgleich nur in den Klimaschutz-Switch-Szenarien gerade noch erbringen, während dies im Referenz-Switch-Szenario nicht mehr gelingt.

Methodische Analyse

Weder eine reine Effizienzstrategie noch der alleinige Ausbau der erneuerbaren Energien in Verbindung mit mittleren Effizienzqualitäten („Einfach Bauen“) führt zum Ziel eines Paris-kompatiblen Bauens. Beide Strategien gehören zusammen

		Variante 1	Variante 2	Variante 3
Switch		REF	KS	KS +
Endenergie	2010	749,2	749,2	749,2
(TWh/a)	2030	641,6	549,9	523,0
	2050	561,8	286,7	210,0
	2070	490,6	188,8	114,6
Primärenergie, gesamt	2010	1101,4	1101,4	1101,4
(TWh/a)	2030	796,8	734,3	700,8
	2050	737,9	358,5	264,2
	2070	651,6	260,6	157,5
Global Warming Potential	2010	244,4	244,4	244,4
(Mio t/a)	2030	148,3	151,0	144,2
	2050	77,1	55,3	40,5
	2070	32,8	30,9	18,7
GWP pro Kopf	2010	3002	3002	3002
(kg/Pa)	2030	1758	1790	1710
	2050	922	661	484
	2070	400	377	228
Kumuliertes GWP pro Kopf	bis 2030	21,6	21,7	21,3
seit 2020 (t/P)	bis 2050	47,8	43,4	40,2
	bis 2070	60,4	53,5	47,2
	gesamt	64,4	57,3	49,5
Über-/Unterschreitung		+ 67 %	+ 49 %	+ 29 %
2-Grad-Globalbudget (%)				
Erforderliche GWP-Senke zur	2,0 °C	-25,9	-18,8	-11,0
Erreichung Klimaschutzziel (t/P)	1,7 °C	-41,1	-34,0	-26,2

Tabelle 12.8:
Hauptdaten der Switchszenarien zu End- und Primärenergie (gesamt) sowie zum Global-Warming-Potential. Unten erfolgt eine einfache Bewertung der Szenarien über ein „Ampelsystem“ (siehe Erläuterung S. 24 ff.).

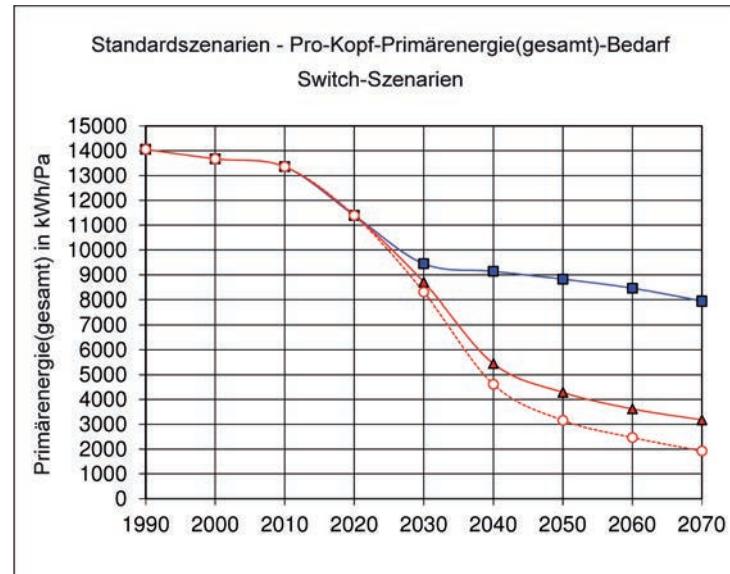


Abbildung 12.14:
Pro-Kopf-Primärenergie-gesamt-Bedarf in den Switch-Szenarien im Zeitraum 1990 bis 2070.

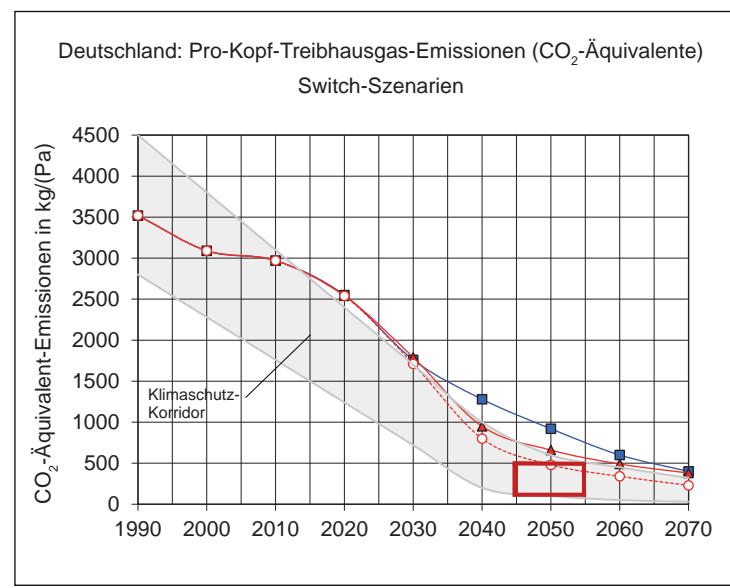


Abbildung 12.15:
Pro-Kopf-Global-Warming-Emissionen (CO₂-Äquivalente) in den Switch-Szenarien im Zeitraum 1990 bis 2070. Zur besseren Orientierung sind der Klimaschutz-Korridor und das Zielfeld mit dargestellt.

und hängen auch voneinander ab. Tendenziell besitzt die Effizienzstrategie jedoch eine größere Bedeutung für den Gesamterfolg. Denn für den Fall, dass im Klimaschutzszenario im Vergleich zur Referenzentwicklung die beiden Strategien Energieeffizienz und Dekarbonisierung der Energieversorgung identische Beiträge leisten, würden die Switch-Szenarien gleich auf zu liegen kommen. Die beiden Klimaschutz-Switch-Szenarien weisen jedoch spürbar geringere GWP-Emissionen als das Referenz-Switch-Szenario. Noch deutlicher sind die Unterschiede beim gesamten Primärenergiebedarf. Durch die Bildung der Switch-Szenarien kann der bedarfsmindende Einfluss der Effizienzstrategie direkt abgelesen werden. Bis zum Jahr 2050 lässt sich dadurch der Energiebedarf gegenüber der Referenzentwicklung um einen Faktor 2 - 3 senken

12.6 Teil-Switch-Szenarien

Zusätzlich zu den Switch-Szenarien wurden weitere realitätsnähere Varianten gebildet, bei denen nur die Strom- oder die Wärmeerzeugung aus einem anderen Szenario übernommen wurde.

REF-Strom-Switch (Variante 4):

Diese Variante basiert auf dem Referenzszenario, abweichend davon wird nur die Stromerzeugung wie im Klimaschutzszenario modelliert. Dies ist ein durchaus realistisches Szenario, weil nach den aktuellen Vorgaben der Bundesregierung bereits mittelfristig ein möglichst hoher Anteil des Stroms aus regenerativen Quellen bereit gestellt werden soll.

KS-Wärme-Switch (Variante 5):

Diese Variante verwendet das Klimaschutz-Szenario als Grundlage, jedoch wird hier die Wärmeversorgung wie im Referenzszenario modelliert. Den Hintergrund für diese pessimistische Einschätzung bilden die immer noch hohen Anteile fossiler Heizsysteme im Neubau, bei energetischen Sanierungen

oder isolierten Kesselaustauschaktivitäten (siehe Abb. 2.1 und 2.2). Der zügige Ausstieg aus den fossilen Heizsystemen stellt daher derzeit ein ungelöstes Problem dar. Dieser Transformationsprozess wird wahrscheinlich viel mehr Zeit in Anspruch nehmen, als dies aus Klimaschutzsicht geboten und wünschenswert wäre. Das von der Bundesregierung erklärte politische Ziel, die Wärmeversorgung bis 2030 zu 50 % auf erneuerbare Energieträger umzustellen scheint somit extrem ambitioniert und angesichts der dispersen Eigentümerstruktur und perspektivisch fehlender Umsetzungsinstrumente unrealistisch zu sein. Dies gilt wahrscheinlich selbst unter den ansonsten für diesen Prozess günstigen Bedingungen des Klimaschutzszenarios (dort beträgt im Jahr 2030 der Anteil erneuerbarer Wärmeversorgungen gerade einmal ca. 25 %, siehe Abb. 4.7).

KS-Plus-Wärme-Switch (Variante 6):

Dieses Teil-Switch-Szenario stützt sich auf das Klimaschutz-Plus-Szenario, jedoch wird hier analog zur vorausgehenden Variante die Wärmeversorgung wie im Referenzszenario modelliert. Dies ist eine ziemlich realitätsferne Annahme, weil es unplausibel wäre einseitig nur die Energieeffizienz der Gebäude zu verbessern ohne dies mit einem Umstieg auf eine erneuerbare Wärmeversorgung zu verbinden. Dies widerspricht beispielsweise den Auswertungen zur Wärmeversorgung von Passivhäusern, die eine viel stärker auf erneuerbare Energieträger gestützte Heizstruktur aufweisen als vergleichbare Gebäude mit schlechteren Energiestandards (vgl. Pfluger 2009).

Auswertung

Das Referenz-Teil-Switch-Szenario hat von allen Teil-Switch-Szenarien die größte Umsetzungswahrscheinlichkeit. Mit kumulierten Pro-Kopf-Emissionen von 82,0 gegenüber 93,1 t/P kann damit zwar eine Reduktion von ca. 12 % erreicht werden. Das ist aber nicht ausreichend, um auch nur in die Nähe eines ausreichenden Klimaschutzes zu gelangen. Eine Klimaschutzstrategie, die vor allem auf den Ausbau der erneuerbaren Stromerzeugung setzt, ist daher zum Scheitern verurteilt.

		Variante 4	REF	Variante 5	Variante 6
Teil-Switch		REF	KS	KS +	
Endenergie (TWh/a)	2010	749,2	749,2	749,2	
	2030	641,6	549,9	523,0	
	2050	561,8	286,7	210,0	
	2070	490,6	188,8	114,6	
Primärenergie, gesamt (TWh/a)	2010	1101,4	1101,4	1101,4	
	2030	817,6	702,7	654,2	
	2050	735,0	383,5	267,0	
	2070	688,3	272,1	158,7	
Global Warming Potential (Mio t/a)	2010	244,4	244,4	244,4	
	2030	152,1	130,4	120,5	
	2050	97,9	48,5	34,1	
	2070	66,5	24,0	14,3	
GWP pro Kopf (kg/Pa)	2010	3002	3002	3002	
	2030	1803	1546	1428	
	2050	1171	580	408	
	2070	811	292	175	
Kumuliertes GWP pro Kopf seit 2020 (t/P)	bis 2030	21,5	20,5	19,9	
	bis 2050	50,7	39,5	36,0	
	bis 2070	70,7	48,0	41,4	
	gesamt	82,9	50,9	43,2	
Über-/Unterschreitung 2-Grad-Globalbudget (%)		+ 115 %	+ 32 %	+ 12 %	
Erforderliche GWP-Senke zur Erreichung Klimaschutzziel (t/P)	2,0 °C	-44,4	-12,4	-5,2	
	1,7 °C	-59,6	-27,6	-19,9	

Tabelle 12.9:
Hauptdaten der Teil-Switchszenarien zu End- und Primärenergie (gesamt) sowie zum Global-Warming-Potential. Unten erfolgt eine einfache Bewertung der Szenarien über ein „Ampelsystem“ (siehe Erläuterung S. 24 ff.).

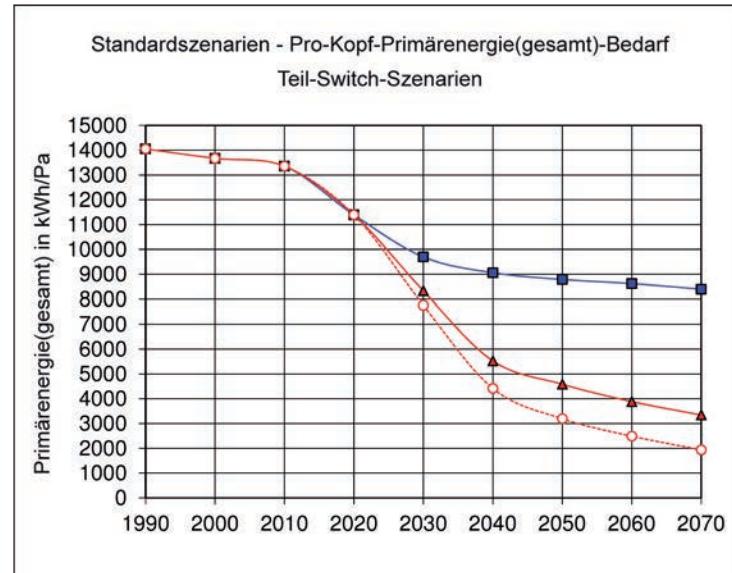


Abbildung 12.17:
Pro-Kopf-Primärenergie-gesamt-Bedarf in den Teil-Switch-Szenarien im Zeitraum 1990 bis 2070.

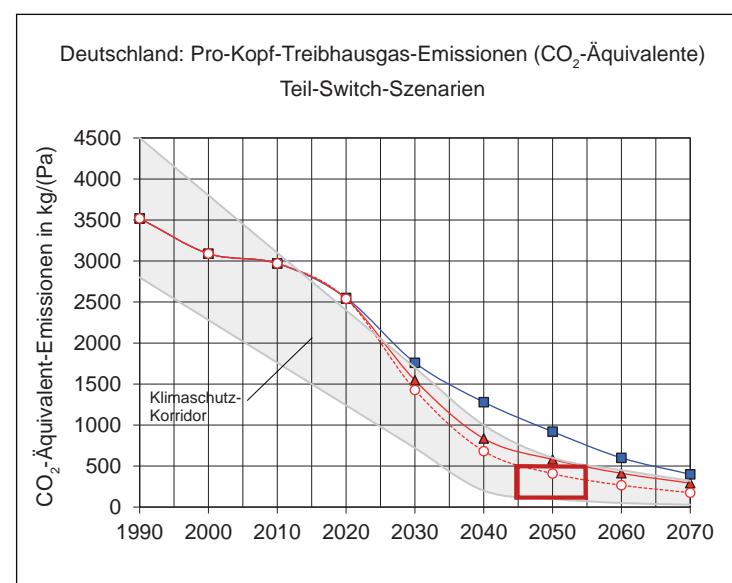


Abbildung 12.18:
Pro-Kopf-Global-Warming-Emissions (CO₂-Äquivalente) in den Switch-Szenarien im Zeitraum 1990 bis 2070. Zur besseren Orientierung sind der Klimaschutz-Korridor und das Zielfeld mit dargestellt.



Abbildung 12.19:
Entwicklung der Heizstruktur des Wohngebäudeparks gemäß den Zielen der Bundesregierung 2021. Der Anteil erneuerbarer Wärmeerzeugung soll bis 2030 auf 50 % ansteigen. Angesichts der Neuinstallationen fossiler Heizsysteme selbst im Neubau erscheint dies jedoch wenig realistisch.

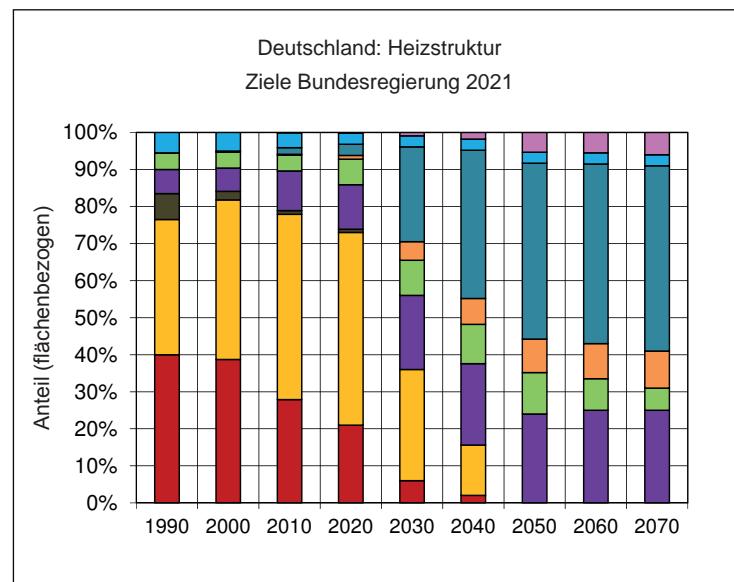


Abbildung 12.?:
Endenergiebedarf nach Energieträgern des Wohngebäudeparks gemäß den Zielen der Bundesregierung 2021. Der Anteil erneuerbarer Wärmeerzeugung soll bis 2030 auf 50 % ansteigen. Angesichts der Neuinstallationen fossiler Heizsysteme selbst im Neubau erscheint dies wenig realistisch.

Im Klimaschutz-Teil-Switch-Szenario steigen hingegen die kumulierten Pro-Kopf-Emissionen von 45,0 auf 50,9 t/P und damit um ca. 13 %. Damit wird dann das bereits grenzwertige 2-Grad-Budget mit 50 % Eintrittswahrscheinlichkeit überschritten. Nur mit recht umfangreichen CO₂-Senken in Höhe von 12,4 t/P wäre das 2-Grad-Limit noch erreichbar.

Beim Klimaschutz-Plus-Switch-Szenario steigen die kumulierten Pro-Kopf-Emissionen von 36,3 auf 43,2 t/P und damit um 19 %. Immerhin würde damit das 2-Grad-Budget mit 50 % Eintrittswahrscheinlichkeit noch eingehalten. Mit Hilfe von allerdings sehr umfangreichen CO₂-Senken in Höhe von 19,9 t/P wäre sogar das 1,7-Grad-Limit gerade noch erreichbar.

Für die Klimaschutzszenarien bedeutet dies, dass die Emissionsminderungen der Wärmeversorgungen substanzielle Bedeutung für einen erfolgreichen Klimaschutz haben. Die Verbesserungen bei der Energieeffizienz haben für den Gesamterfolg jedoch einen bedeutend höheren Stellenwert.

12.7 Ziele der Bundesregierung 2021

Die neue Bundesregierung hat in den Koalitionsvereinbarungen 2021 ehrgeizige Ziele für die Energieversorgung Deutschlands formuliert. Diese sollen im Folgenden diskutiert und versuchsweise auf die Szenarien angewendet werden.

Wärmeerzeugung

Der Anteil der erneuerbaren Energieträger bei der Wärmebereitstellung soll von derzeit 15 - 20 % bis 2030 auf 50 % gesteigert werden. Dies setzt einen konsequenten Ausstieg aus den fossilen Heizsystemen voraus. Im Neubau müsste dafür künftig der Einbau erneuerbarer Heizsysteme vorgeschrieben werden. Auch im im Gebäudbestand müsste ab sofort jede sich bietende Gelegenheit dazu genutzt werden, fossile Heizsysteme durch erneuerbare zu ersetzen.

In Abb. 12.19 wird deutlich, dass dies zu einer durchgreifenden Änderung der Heizstruktur führen würde. Der Rückgang bei den Ölheizungen setzt sich fort, wie in der Vergangenheit schon zu beobachten war. Besonders drastisch wäre der Rückgang bei den Erdgasheizungen bei einem gleichzeitig stattzufindenden besonders starken Ausbau der Wärmepumpen. Diese würden ab 2050 Anteile um die 50 % und mehr besitzen. Ferner wird ein deutlicher Ausbau der FernwärmeverSORGUNGEN auf 20 - 25 % angenommen. Die Ausweitung der Anteile von Solar- und Geothermie erfolgt hingegen auf deutlich geringerem Niveau. Der Anteil von Strom-Direktheizungen bleibt auf einem niedrigen Niveau. Zusätzlich wird hier ein Rückgang der Anteile von Holzheizungen nach 2050 unterstellt.

Dem stehen jedoch folgende Fakten entgegen:

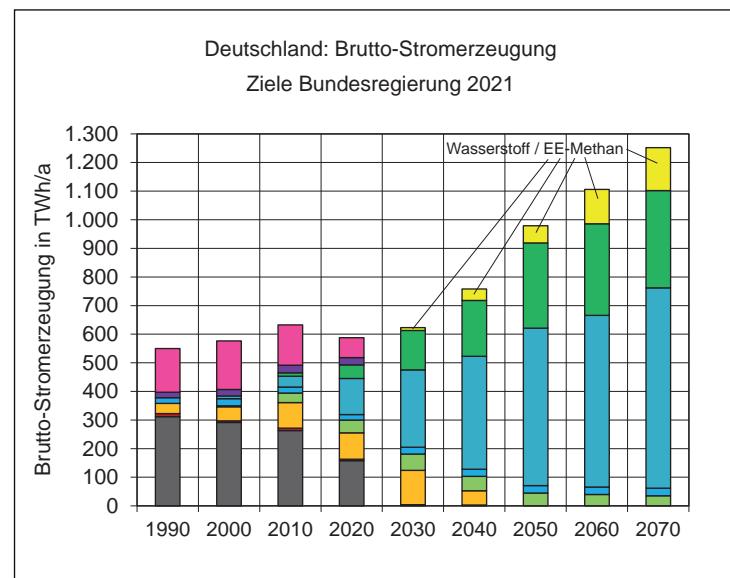
- Sowohl im Altbau als auch im Neubau werden weiterhin neue fossile Heizsysteme installiert. Ein spezielles Problem bilden die Erdgasheizungen, denn bei diesen müsste der Anteil innerhalb von 7 Jahren von heute knapp 55 % auf ca. 30 % reduziert werden.

- Der Anteil von Wärmepumpenheizungen müsste von heute 5 % innerhalb von 6 Jahren auf über 25 % gesteigert werden.
- Die Fernwärme basiert heute dominant auf fossilen Energieträgern. Der Umbau hin zu einer erneuerbaren Fernwärme benötigt sicherlich mehr als 10 Jahre. Bereits mittelfristig wäre dafür die Rückverstromung saisonal gespeicherter Energie (z.B. aus erneuerbarem Strom produzierter Wasserstoff oder Methan) notwendig. Dies erfolgt am besten in Heizkraftwerken mit großen Wärmespeichern und wird damit Bestandteil der neuen Fernwärmestrategie.
- In der gerade verschiedenen GEG-Novelle wird eine zügige und zieltgerechte Umsetzung durch das Moratorium kommunaler Wärmeplanungen als Voraussetzung für den Heizsystemwechsel und viele sonstige kontraproduktive Übergangs- und Ausnahmeregelungen derart stark eingeschränkt, dass eine Zielerreichung des ursprünglich anvisierten 50 %-Anteils der erneuerbaren Wärmeversorgung bis 2030 nicht mehr erreicht werden kann.

Stromerzeugung

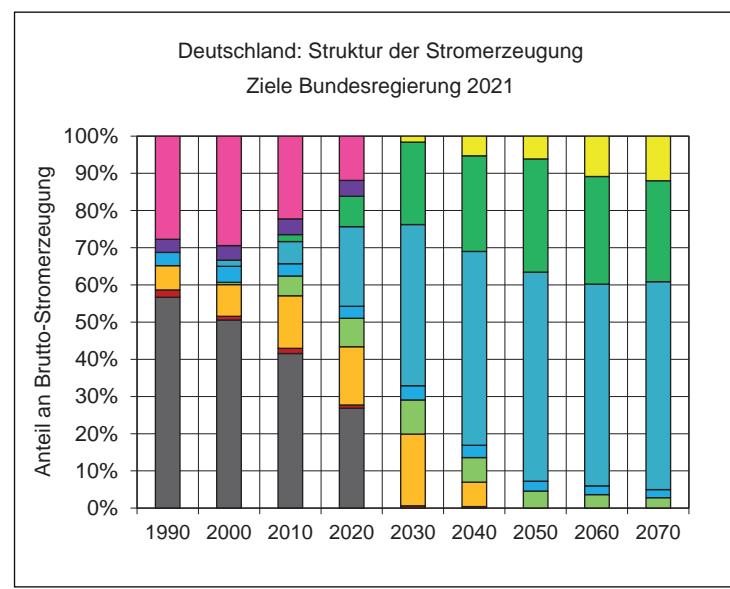
Der Anteil der erneuerbaren Stromerzeugung soll von derzeit 45 - 50 % bis 2030 auf 80 % gesteigert werden. Gleichzeitig wird ein Ausstieg aus der Kohleverstromung möglichst bis 2030 und nicht, wie im Kohleausstiegsgesetz vereinbart, erst bis 2038 angestrebt. Dafür wäre es notwendig, den Ausbau der erneuerbaren Stromversorgung deutlich zu beschleunigen. Dies erfolgt vor allem durch einen besonders starken Zubau bei Windkraft und Photovoltaik (siehe Abb. 12.20 und 12.21).

Zusätzlich werden ab 2040 in relevantem Umfang erneuerbar hergestellter Wasserstoff und Methan als Speicher zur Rückverstromung benötigt. Kurzfristig steigt der Einsatz von Erdgas als Regelenergie stark an, bis erneuerbarer Wasserstoff und Methan diese Aufgabe übernehmen können. Weiter fällt auf, dass die erneuerbare Stromerzeugung gegenüber dem heutigen Niveau stark ansteigt um im Jahr 2070 mit ca. 1250 TWh/a



EE-Wasserstoff / EE-Methan
 Kernenergie
 Sonstige
 Fotovoltaik
 Windkraft
 Wasserkraft
 Biomasse / Müll
 Erdgas
 Mineralöl
 Kohle

Abbildung 12.20:
Entwicklung der Bruttostromerzeugungsstruktur Deutschlands gemäß den Zielen der Bundesregierung 2021. Der Anteil erneuerbarer Stroms soll bis 2030 auf 80 % ansteigen.



EE-Wasserstoff / EE-Methan
 Kernenergie
 Sonstige
 Fotovoltaik
 Windkraft
 Wasserkraft
 Biomasse / Müll
 Erdgas
 Mineralöl
 Kohle

Abbildung 12.21:
Entwicklung der Stromerzeugungsstruktur Deutschlands gemäß den Zielen der Bundesregierung 2021. Der Anteil erneuerbarer Stroms soll bis 2030 auf 80 % ansteigen.

mehr als doppelt so hoch zu liegen wie heute. Dafür sind neben der aufwändigen und stromintensiven saisonalen Speicherung vor allem neue Stromanwendungen in den Bereichen Mobilität, Wärmeanwendungen und Industrieprozesse verantwortlich.

Auch bei der Umsetzung des Ziels der Bundesregierung von 80 % erneuerbaren Stroms bis 2030 sind einerseits objektive Hemmnisse vorhanden, die teilweise auch als Folge des Angriffskriegs Russland auf die Ukraine und die dadurch notwendige Umstellung der Energieversorgung entstanden sind. Andererseits kommt speziell der dafür deutlich zu beschleunigende Ausbau der Windkraft aufgrund immer noch langwieriger Genehmigungsprozesse und Fachkräfte- sowie Materialengpässen nicht wirklich voran. Dennoch ist absehbar, dass die Zielverfehlung stromseitig deutlich geringer ausfallen dürfte als wärmeseitig. Dies auch deshalb, weil aus energiepolitischen Gründen der schnellere Ausbau der erneuerbaren Stromversorgung sowohl aus umwelt- als auch aus wirtschaftspolitischen Gründen weithin als unverzichtbar angesehen wird.

Auswertung

Eine schnelle Umstellung von der heute immer noch dominant fossilen auf eine erneuerbare Energieversorgung würde zu einem schnellen Absinken der Treibhausgasemissionen in Deutschland und damit auch im Handlungsfeld Wohnen führen. Für die Klimaschutzszenarien wäre es damit möglich, mit relativ geringen CO₂-Senkenbeiträgen von -5,0 bis -7,4 t/P einen Paris-kompatiblen Wohnungsbau zu erreichen. Selbst im Referenzszenario könnte damit die Einhaltung des 2-Grad-Limits nachgewiesen werden (siehe Tab. 12.22):

- Im Referenzszenario würde, falls die Ziele der Bundesregierung vollumfänglich umgesetzt würden, die kumulierten Pro-Kopf-Emissionen von 93,1 auf 38,4 t/P verringert werden können. Das entspricht eine Reduktion um 59 %.
- Im Klimaschutzszenario würden unter diesen Randbedingungen die kumulierten Pro-Kopf-Emissionen von 45,1 auf

30,7 t/P und damit um 32 % sinken.

- Im Klimaschutz-Plus-Szenario würden die kumulierten Pro-Kopf-Emissionen von 36,3 auf 28,6 t/P und damit um 21 % verringert werden können.
- Die absoluten und relativen Unterschiede werden naturgemäß immer geringer, je stärker ein Szenario bereits an den Klimaschutzzielen ausgerichtet ist, weil dann am Ende nur das größere Tempo der Umsetzung zu weiteren Reduktionsbeiträgen führen kann.

Die Auswertung der Pro-Kopf-Treibhausgasemissionen in Bezug zum Klimaschutz-Korridor und zum Klimaschutz-2-Grad-Zielfeld bestätigt anhand der hier vorliegenden Variante die Aussagekraft dieser beiden grafischen Hilfsmittel. Das Referenzszenario landet ziemlich genau in der Mitte des Zielfelds, während die beiden Klimaschutzszenarien am unteren Ende des Zielfeldes zu liegen kommen.

Im Hinblick auf den Primärenergiebedarf (Abb. 12.23 und Tab. 12.12) sind die Unterschiede deutlich geringer ausgeprägt.

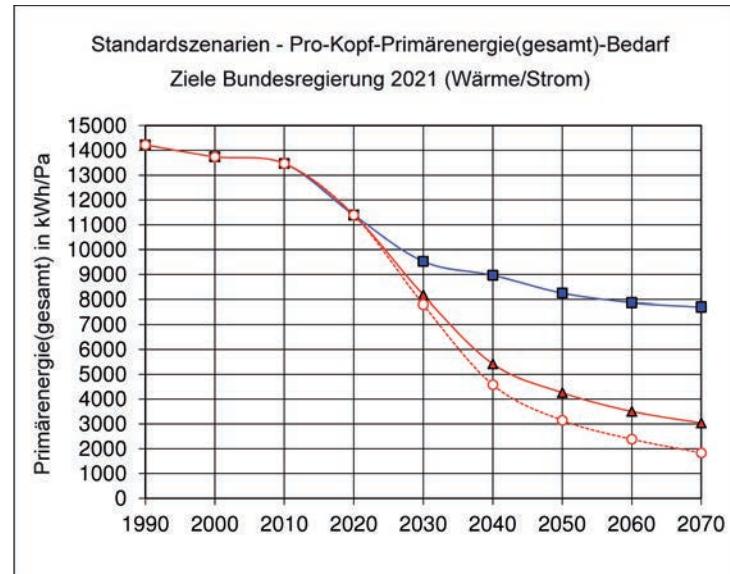
12.8 Ziele der Bundesregierung 2021 - Teilumsetzung nur bei der Stromversorgung

Als letzte Untersuchung soll eine nur teilweise Umsetzung der energiepolitischen Ziele der Bundesregierung betrachtet werden. Im Gegensatz zur vorausgehenden Untersuchung wird hier angenommen, dass nur hinsichtlich der Stromerzeugung das ehrgeizige Ziel, bis 2030 einen erneuerbaren Anteil von 80 % zu erreichen, eingehalten wird, während die Wärmebereitstellung wie in den Standardszenarien modelliert wird. Wie schon erwähnt hat diese Variante eine deutlich bessere Umsetzungsperspektive als die komplette Zielsetzung inklusive Wärmeerzeugung. Verantwortlich hierfür ist vor allem die halbherzige Umsetzung der Novellierung des Gebäude-Energiegesetzes im Jahr 2023.

Variante 7 Variante 8 Variante 9

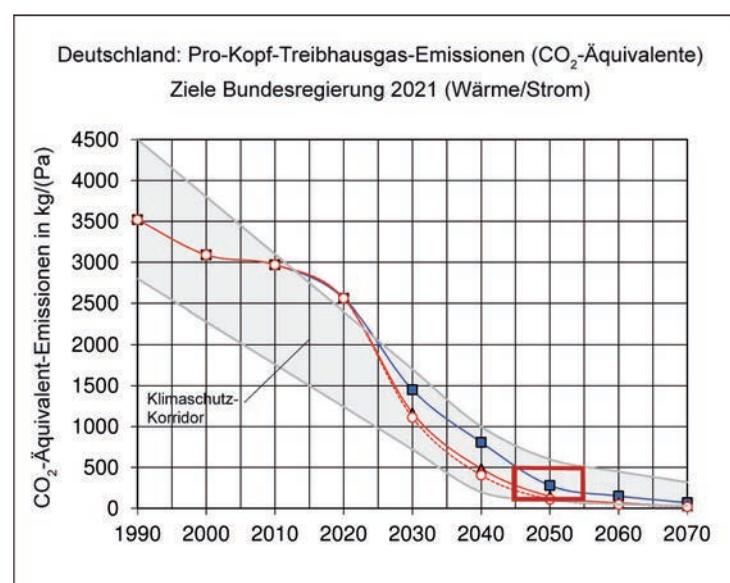
Ziele Bundesregierung 2021	REF	KS	KS +
Endenergie (TWh/a)	2010	749,2	749,2
	2030	641,6	549,9
	2050	561,8	286,7
	2070	490,6	188,8
Primärenergie, gesamt (TWh/a)	2010	1101,4	1101,4
	2030	803,4	689,8
	2050	689,7	356,1
	2070	631,5	249,4
Global Warming Potential (Mio t/a)	2010	244,4	244,4
	2030	115,1	98,6
	2050	23,5	12,6
	2070	5,8	2,4
GWP pro Kopf (kg/Pa)	2010	3002	3002
	2030	1365	1169
	2050	280	150
	2070	70	29
Kumuliertes GWP pro Kopf seit 2020 (t/P)	bis 2030	18,7	17,6
	bis 2050	35,0	29,1
	bis 2070	37,3	39,3
	gesamt	38,4	30,7
Über-/Unterschreitung 2-Grad-Globalbudget (%)		100%	81%
Erforderliche GWP-Senke zur Erreichung Klimaschutzziel (t/P)		2,0 °C	0,0
		1,7 °C	-15,1
			-7,4
			-5,0

Tabelle 12.10:
Hauptdaten der Switchszenarien zu End- und Primärenergie (gesamt) sowie zum Global-Warming-Potential. Unten erfolgt eine einfache Bewertung der Szenarien über ein „Ampelsystem“ (siehe Erläuterung S. 24 ff.).



- Referenz-Ziele BR 2021
- ▲ Klimaschutz-Ziele BR 2021
- Klimaschutz + Ziele BR 2021

Abbildung 12.23:
Entwicklung des Pro-Kopf-Primärenergiebedarfs für den Fall, dass die Ziele der Bundesregierung hinsichtlich Ausbaus der erneuerbaren Strom- und Wärmeversorgung volumänglich realisiert werden.



- Referenz-Ziele BR 2021
- ▲ Klimaschutz-Ziele BR 2021
- Klimaschutz + Ziele BR 2021

Abbildung 12.24:
Entwicklung der Pro-Kopf-Treibhausgasemissionen für den Fall, dass die Ziele der Bundesregierung hinsichtlich Ausbaus der erneuerbaren Strom- und Wärmeversorgung volumänglich realisiert werden. Zur besseren Orientierung sind Klimaschutz-Korridor und -Zielfeld aufgetragen.

Tabelle 12.11:

Untersuchung der potenziellen Auswirkungen der Ziele der Bundesregierung zur Energieversorgung auf die Pro-Kopf-Treibhausgasemissionen (in kg/Pa) in den Jahren 2030 - 2070 und die kumulierten Pro-Kopf-Treibhausgasemissionen im Zeitraum 2020 - 2100 (in t/P, grau hinterlegte Werte) des deutschen Wohngebäudeparks im Vergleich zu den Standardszenarien. Zusätzlich wurde auch eine Variante gerechnet, in der nur die Umsetzung Ziele bei der Stromerzeugung zugrundegelegt wurde.

Pro-Kopf-GWP (in kg/Pa) und kumulierte GWP 2020 - 2100 (in t/P)						
Standard	2030	2040	2050	2060	2070	k_{GWP}
Referenz	2081	1579	1302	1134	968	93,1
Klimaschutz	1506	754	460	258	158	45,0
Klimaschutz-Plus	1272	567	274	133	79	36,3
Ziele BR 2021						
Standard	2030	2040	2050	2060	2070	k_{GWP}
Referenz	1365	808	280	151	70	38,4
Klimaschutz	1169	486	150	67	29	30,7
Klimaschutz-Plus	1111	405	111	47	19	28,6
Ziele BR 2021 (nur Strom)						
Standard	2030	2040	2050	2060	2070	k_{GWP}
Referenz	1649	1353	1074	892	711	69,3
Klimaschutz	1371	700	399	199	104	39,4
Klimaschutz-Plus	1212	528	234	107	54	33,0

Tabelle 12.12:

Untersuchung der potenziellen Auswirkungen der Ziele der Bundesregierung zur Energieversorgung auf den Pro-Kopf Primärenergie(gesamt)-Bedarf (in kWh/Pa) in den Jahren 2030 - 2070 und den kumulierten Primärenergie(gesamt)-Bedarf im Zeitraum 2020 - 2070 (in MWh/P, grau hinterlegte Werte) des deutschen Wohngebäudeparks im Vergleich zu den Standardszenarien.. Zusätzlich wurde auch eine Variante gerechnet, in der nur die Umsetzung Ziele bei der Stromerzeugung zugrundegelegt wurde.

Pro-Kopf-PEB (in kWh/Pa) und kumulierte PEB 2020-2070 (in MWh/P)						
Standard	2030	2040	2050	2060	2070	k_{PEB}
Referenz	10121	8951	8309	8165	8066	453,4
Klimaschutz	8114	5561	4597	3816	3195	294,5
Klimaschutz-Plus	7615	4380	3099	2300	1779	240,5
Ziele BR 2021						
Standard	2030	2040	2050	2060	2070	k_{PEB}
Referenz	9525	8965	8246	7873	7701	442,2
Klimaschutz	8177	5421	4258	3502	3041	286,4
Klimaschutz-Plus	7796	4577	3143	2384	1833	245,8
Ziele BR 2021 (nur Strom)						
Standard	2030	2040	2050	2060	2070	k_{PEB}
Referenz	9678	8880	8385	8166	8081	449,1
Klimaschutz	8110	5422	4347	3564	3030	287,2
Klimaschutz-Plus	7833	4513	3060	2296	1796	243,6

Auswertung

Eine schnelle Verwirklichung des Ausbaus der erneuerbaren Stromversorgung wirkt sich vor allem im Referenzszenario deutlich aus. Die kumulierten Pro-Kopf-Emissionen sinken gegenüber den Standardannahmen um 23,8 t/P und damit um 25,6 %. Gleichwohl wird am Ende mit einem Wert von 69,3 t/P das 2-Grad-Limit von 38,5 t/P immer noch um fast das Doppelte überschritten.

Im Klimaschutzszenario kann unter diesen Randbedingungen hingegen das 2-Grad-Limit mit 39,4 t/P nahezu erreicht werden. Die Überschreitung beträgt gerade einmal 2 %. Gegenüber der Standardentwicklung reduzieren sich die kumulierten Pro-Kopf-Emissionen mit 5,6 t/P um 12,4 %.

Beim Klimaschutz-Plus-Szenario wurde ohnehin ein forciertes Ausbau der erneuerbaren Stromerzeugung modelliert. Daher sind hier die noch erzielbaren Emissionsminderungen naturgemäß geringer. Im Hinblick auf die kumulierten Pro-Kopf-Emissionen kann hier durch einen nochmals zügigeren Ausbau ein Minderbeitrag von 3,3 t/P erreicht werden. Das entspricht einer Reduzierung um 9,1 %. Damit wird ein Wert erreicht, der sogar unter demjenigen des Push-Szenarios liegt. Das 1,7-Grad-Ziel könnte somit mit einer CO₂-Senkenbeitrag von - 9,7 t/P doch noch erreicht werden.

Im Hinblick auf den Primärenergiebedarf (Abb. 12.25 und Tab. 12.12) fallen die erzielbaren Minderungen deutlich geringer aus.

Fazit

Durch den Vergleich zwischen vollständiger und der nur teilweisen Umsetzung bei der Stromversorgung wird deutlich, wie bedeutsam die Wärmewende hin zu einer erneuerbaren Versorgung für den Klimaschutz gewesen wäre. Die Ziele der Bundesregierung 2021 waren sehr ehrgeizig, sind aber im Gesetzgebungsverfahren so stark abgeschwächt worden, dass ihre Umsetzung nun sehr unwahrscheinlich geworden ist.

		Variante 10	Variante 11	Variante 12
Ziele Bundesregierung 2021 (nur Strom)	REF	KS	KS +	
Endenergie	2010	749,2	749,2	749,2
(TWh/a)	2030	641,6	549,9	523,0
	2050	561,8	286,7	210,0
	2070	490,6	188,8	114,6
Primärenergie, gesamt	2010	1101,4	1101,4	1101,4
(TWh/a)	2030	816,3	684,1	660,7
	2050	701,3	363,6	256,0
	2070	662,7	248,5	147,3
Global Warming Potential	2010	244,4	244,4	244,4
(Mio t/a)	2030	139,1	115,6	102,2
	2050	89,8	33,4	19,5
	2070	58,3	8,5	4,4
GWP pro Kopf	2010	3002	3002	3002
(kg/Pa)	2030	1649	1371	1212
	2050	1074	399	234
	2070	711	104	54
Kumuliertes GWP pro Kopf	bis 2030	20,1	18,7	17,9
seit 2020 (t/P)	bis 2050	47,2	34,5	30,4
	bis 2070	58,7	37,8	32,2
	gesamt	69,2	39,4	33,0
Über-/Unterschreitung		190%	102%	86%
2-Grad-Globalbudget (%)				
Erforderliche GWP-Senke zur	2,0 °C	-30,7	-0,9	0,0
Erreichung Klimaschutzziel (t/P)	1,7 °C	-45,9	-16,1	-9,7

Tabelle 12.13:
Hauptdaten der Switchszenarien zu End- und Primärenergie (gesamt) sowie zum Global-Warming-Potential. Unten erfolgt eine einfache Bewertung der Szenarien über ein „Ampelsystem“ (siehe Erläuterung S. 24 ff.).

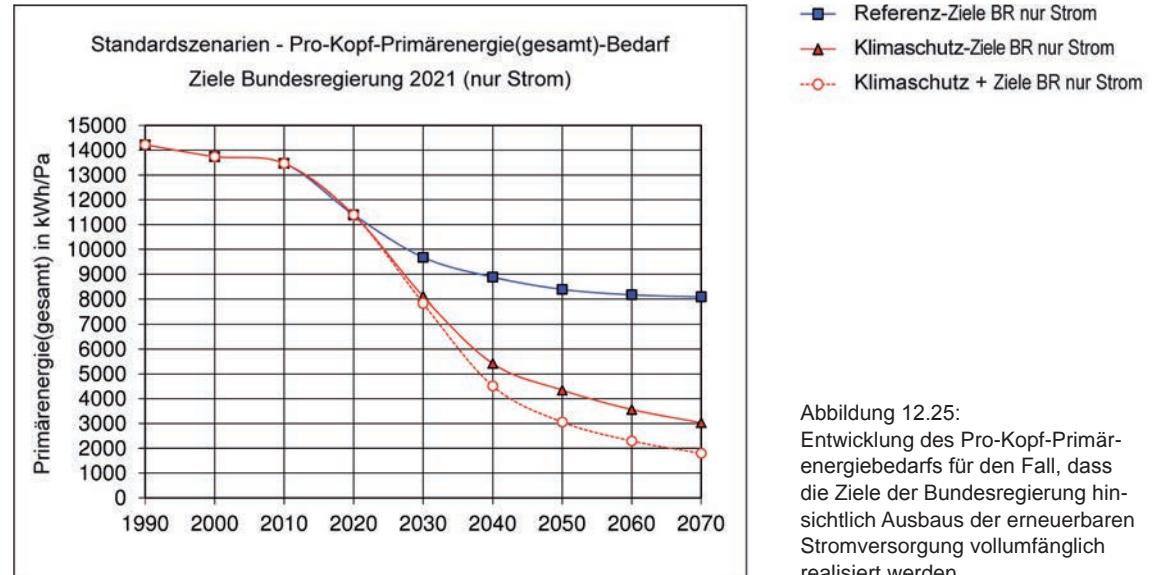


Abbildung 12.25:
Entwicklung des Pro-Kopf-Primärenergiebedarfs für den Fall, dass die Ziele der Bundesregierung hinsichtlich Ausbaus der erneuerbaren Stromversorgung volumfähiglich realisiert werden.

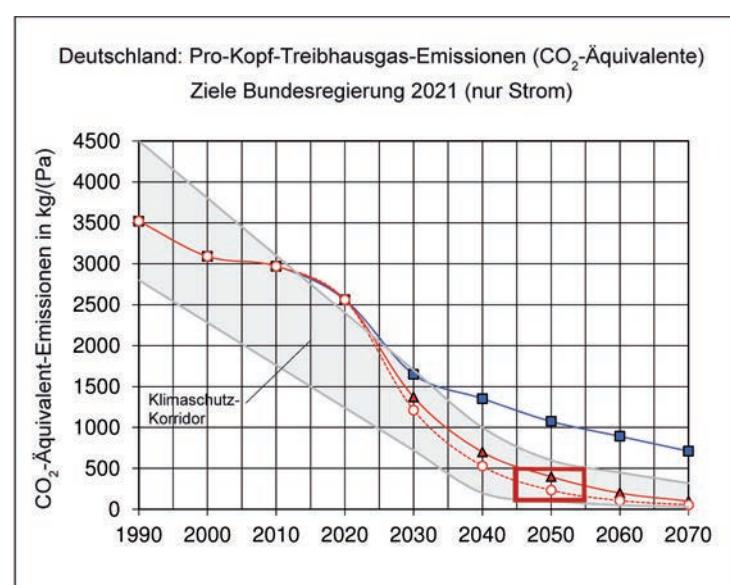


Abbildung 12.26:
Entwicklung der Pro-Kopf-Treibhausgasemissionen für den Fall, dass die Ziele der Bundesregierung hinsichtlich Ausbaus der erneuerbaren Stromversorgung volumfähiglich realisiert werden. Zur besseren Orientierung sind Klimaschutz-Korridor und -Zielfeld aufgetragen.

Anmerkungen

Teil 1: Zusammenfassung

(1) Die Bilanzierung der Materialströme und Bauprozesse im Wohngebäudepark würde den Rahmen dieser Studie sprengen. Der Aufwand besteht weniger in der Aufstellung der Materialbilanzen, denn zumindest für die Hüllkonstruktionen und die Versorgungssysteme werden diese in den Modellen der Szenarien miterfasst. Die offene Frage ist die Bilanzierung des künftigen Energieaufwands und der künftigen Treibhausgasemissionen in 10, 20, 30 oder 50 Jahren. Hierfür wären eigenständige Szenarien notwendig, die die Grundstoff- und Bauwirtschaft sowie alle relevanten Bauprozesse unter den Randbedingungen der Transformation hin zu einer klimaneutralen Gesellschaft abbilden können. Die vorliegenden Ökobilanzen bilden diesen Wandel bislang nicht ab. In Abschnitt 1.11 werden gleichwohl allgemein gehaltene Einschätzungen ohne Quantifizierungen gegeben, um eine erste Einordnung zu ermöglichen. Der Nutzen einer Kreislaufwirtschaft im Gebäudesektor kommt als Klimaschutz wohl viel zu spät zum Tragen. Grund hierfür sind die langen Nutzungsdauern der Baukomponenten von im Mittel ca. 50 - 60 Jahren. Bei den Technikkomponenten liegen die technischen Standzeiten bei 15 - 30 Jahren. Hier ist die Ausgangsposition günstiger zu bewerten.

(2) Dabei wird der Aspekt der historischen Verantwortung ausgebendet. Das ist aus Gründen der Klimagerechtigkeit problematisch und folgt eher pragmatischen Überlegungen.

(3) Genauere Angaben finden sich in den Kapiteln 3 und 4.

(4) Das KfW-Effizienzhaus 55 ist ein Vertreter des Niedrigenergiekonzeptes und der „mittleren Qualität“ (siehe Tabelle 1.9). Angesichts des hohen Fördervolumens sind die damit erreich-

ten Energie- und Emissionseinsparungen gegenüber Gebäuden, die gerade einmal die gesetzlichen Anforderungen erfüllen, gering. Im Nachhinein wird klar: Diese Förderung diente vor allem dem Vermögensaufbau von ohnehin Gutverdienenden und nicht dem Klimaschutz.

(5) Die Kostenoptimalitätsstudien für Vorarlberg und Luxemburg sind anders als die entsprechenden Studien für Deutschland (vgl. Walberg 2015) sehr detailliert erhoben worden. Sie basieren auf komplett durchgeplanten Gebäuden inkl. einer großen Vielfalt an Ausführungsvarianten sowie der Auswertung von Ausschreibungen. Sie sind daher auch empirisch abgesichert und aussagekräftig. In Vorarlberg wurde die kostenoptimale Variante anschließend realisiert und einem Monitoring unterzogen.

(6) Typische Hemmnisse sind unverhältnismäßiger wirtschaftlicher Aufwand, Genehmigungs- und Platzprobleme sowie gestalterische und baukulturelle Gründe. Diese betreffen dann auch Gebäude aus der Nachkriegszeit.

(7) In der Dissertation wurde das damalige Klimaschutzziel der deutschen Bundesregierung zugrunde gelegt. Es entsprach einer Reduzierung der Treibhausgasemissionen bis 2050 um 90 % gegenüber dem Stand des Jahres 1990. Inzwischen wurden vom IPCC in mehreren Berichten CO2-Global-Budgets bestimmt, die selbst für den Fall, nur das 2-Grad-Ziel einzuhalten, eine deutlich stärkere Reduktion um etwa 95 - 98% erforderlich machen. Nach dem Urteil des Bundesverfassungsgerichts wurde als nationales Klimaziel Deutschlands eine Klimaneutralität mit Netto-Null-Emissionen bis 2045 festgelegt (siehe Abbildung 2.6 und 2.8).

(8) vgl. (IPCC 2018); dort wurden meines Wissens zum ersten Mal politisch abgestimmte Werte für CO2-Global-Budgets für verschiedene Temperaturlimits und Eintrittswahrscheinlichkeiten veröffentlicht.

(9) Als technische Senken kommen beispielsweise in Frage:

- Solar Radiation Management (SRM): Maßnahmen zur Reduzierung der auf der Erdoberfläche ankommenden Solarstrahlung.
- Impfen der oberen Atmosphäreschichten mit reflektierenden Aerosolen, z.B. Schwefeldioxid, um die Albedo (Rückstrahlung in den Weltraum) zu erhöhen.
- Carbon Dioxide Removal (CDR): Entfernung von CO₂ aus der Atmosphäre mit Hilfe von physikalischen und chemischen Abscheideverfahren. Diese Verfahren werden auch mit dem Begriff „Direct Air Capture“ umschrieben.
- Impfung der Ozeane mit Eisenoxid. Dadurch wird ein verstärktes Planktonwachstum ausgelöst. Nach dem Absterben der Tierchen sinken diese zum Ozeanboden und werden dort unter Luftabschluss abgelagert.
- Künstlich verstärkte Verwitterung von Gestein.

(10) In den bislang vorliegenden Ökobilanzen werden diese künftigen Möglichkeiten der Dekarbonisierung der Materialbereitstellung nicht erfasst. Zusammen mit der fehlenden Berücksichtigung der Dekarbonisierung der Energiesysteme ist daher die Aussagekraft begrenzt und zumeist nicht einmal Richtungssicherheit gegeben.

(11) Siehe Anmerkung 10. Eine der wenigen Veröffentlichungen zu diesem Thema stammt aus der Schweiz (Alig et al. 2020).

(12) Aus modelltechnischen Gründen wurde das Anforderungsniveau des derzeit gültigen GEG, so wie dies im Referenzszenario der Fall ist, auch auf die energetischen Sanierungen im Bestand übertragen. Jedoch wurde die Wärme- und Strombereitstellung gemäß dem Klimaschutz-Plus-Szenario angenommen („Switch“). Das hat u.a. zur Folge, dass sich der Primärenergiebedarf im Konzeptansatz „Einfach Bauen“ gegenüber dem Klimaschutzszenario mehr als verdoppeln würde (von 358,5 auf 738 TWh/a) und damit sogar um 6 % höher

als der Wert im Referenzszenario (696 TWh/a). Dies betrifft im Zeitverlauf zunehmend erneuerbare Heizsysteme und den erneuerbaren Kraftwerkspark, in dem das Problem der Winterrücke und damit der Bedarf an gespeicherter Energie in einem großen Energiesystem im Laufe der Zeit immer größer wird. Nähere Hinweise und Erläuterungen dazu finden sich in Abschnitt 12.3.

(13) Die Emissionen der Wohngebäude wären dann so hoch, dass das Klimaschutzziel Deutschlands insgesamt in Frage gestellt ist.

(14) Die primärenergetische „Effizienzrücke“ im Konzept „Einfach Bauen“ ist damit so groß, dass damit unter den Bedingungen des Klimaschutz-Plus-Szenarios Deutschland insgesamt versorgt werden könnte. Voraussetzung ist, dass in den anderen Sektoren ähnlich hohe Effizienzerfolge erzielt werden.

(15) Hier kann man den analytischen Schluss ziehen, dass der Beitrag der Energieeffizienz im Klimaschutz- und Klimaschutz-Pluszenario am Ende doch eindeutig gegenüber dem Einfluss des Ausbaus der erneuerbaren Energien dominant ist. Grund: bei einer Kaskadenbetrachtung ist der Einfluss des „ersten Schrittes“ immer überproportional wirksam, weil danach alle weiteren Maßnahmen nur noch im Verhältnis des dadurch bereits reduzierten Niveaus wirksam werden können.

(16) In seiner Analyse der Versorgungsvarianten ausgeführter Passivhäuser hat Rainer Pfluger nachgewiesen, dass diese überproportional mit erneuerbaren Wärmeversorgungen ausgeführt wurden und ebenfalls überproportional aktive Solarsysteme aufweisen (vgl. Pfluger 2009).

(17) Im aktuellen GEG 2024 sind eine Reihe von Ausnahmetatbeständen speziell im Gebäudebestand eingeführt worden, die einen zügigen Ausbau einer erneuerbaren Wärmeversorgung der Gebäude erheblich verzögern bzw. gänzlich verhin-

dern werden. Im GEG 2024 ist für die nächsten Jahre eine Kombination von Effizienzverweigerung und Verhinderung einer erneuerbaren Wärmeversorgung festgeschrieben. Zu erwarten ist daher, dass der Gebäudesektor auch künftig die Klimaschutzziele der Bundesregierung verfehlt wird und am Ende als Sektor das gesamte Klimaschutzziel Deutschlands (z.B. Klimaneutralität bis 2045) in Frage stellt.

Kapitel 2: Neubestimmung der Klimaschutzziele auf der Basis von CO₂-Globalbudgets

(1) In einer jüngeren Veröffentlichung (Lambott et al. 2023) wurden die CO₂-Global-Budgets einer kritischen Betrachtung unterzogen, wobei der Schwerpunkt auf den Nicht-CO₂-Treibhausgase lag. Für die anspruchsvolleren Limits ergibt diese Analyse spürbar kleinere CO₂-Global-Budgets, während für das 2-Grad-Limit die Unterschiede gering ausfallen.

Kapitel 3: Aktualisierung der Basis- und Eckdaten

(1) siehe Anmerkung (4) zu Teil 1, S. 188. Zudem ist zweifelhaft, ob den Selbstauskünften dieser Befragung getraut werden kann. Noch mehr in Frage zu stellen ist, ob diese Gebäude dann auch entsprechend der energetischen Vorgaben der jeweiligen Förderprogramme realisiert worden sind. Die Erfahrungen in unserem Büro und von anderen Architekturbüros und Energieberatern bei der Baubegleitung derartiger Projekte spricht hier eine deutliche Sprache.

Kapitel 5: Ausgangssituation und -zustand der Wohngebäude

(1) Damit sind dann auch die Fälle jüngerer Baualtersklassen mit erfasst, bei denen Umsetzungshemmnisse praktischer (z.B.

Platzprobleme, hohe Kosten) und baukultureller Art (Denkmalschutz und sonstige erhaltenswerte Fassaden und sonstiger Bauteile) existieren. Auch aus strategischen Gründen ist es empfehlenswert, die Fälle eingriffsempfindlicher Gebäude lieber etwas weiter zu fassen, als zu eng (Prinzip der Kalkulation auf der „sichereren Seite“, speziell dort, wo stark vereinfachende Modelle zum Einsatz kommen).

(2) Der Unterschied ist sehr wahrscheinlich in den im Vergleich zur Berechnung geringen Außenluftwechseln über Fensterlüftung begründet.

(3) Die Warmwasserverbrauchswerte wurden in Kubikmetern angegeben. Der genannte Wert bezieht sich auf eine Temperaturdifferenz von 50 Kelvin (z.B. Differenz WW-Vorlauf 63° C und Kaltwassertemperatur von 10 °C).

(4) Selbst wenn diese differenzierte Daten zugänglich wären, würde dadurch der Aufwand für die Modellbildung und die Interpretation der Ergebnisse exponentiell ansteigen. Dies würde dann die Studie erheblich umfangreicher und wenig übersichtlich machen.

Kapitel 6: Szenarien und Modellbildung

(1) Besonders im Gebäudebestand sind oftmals die verfügbaren Dach- und Fassadenflächen viel geringer, als pauschale Annahmen oder die Kennwerte in Solaratlanten (z.B. für Berlin) vermuten lassen.

(2) Siehe hierzu (Pittau et al. 2020) und (Vallentin 2024)

(3) Konkret benannt sei hier das Beispiel von Wohngebäuden in Gründerzeitvierteln mit sehr beengten Verhältnissen, die nicht an die Fernwärme angeschlossen werden (z.B. wegen Kapazitätsproblemen). Ohne substantielle Effizienzverbesserungen

rungen bei Lüftung und Hülle können hier wegen der extrem kleinen Grundstücke und der daraus resultierenden Platzprobleme weder Erdreich-Wärmepumpen noch Biomasseheizungen realisiert werden. Ein Ausweg könnte in der Versorgung mit einem grundwassergestützten „Kaltnetz“ in Verbindung mit Wärmepumpen bestehen.

Kapitel 11: Neue Szarienfamilien und deren Analyse

(1) und **(2)** siehe hierzu Anmerkung (17) zum Kapitel 1, S. 189 f.

(3) Durch den Gasengpass in der Folge des Angriffskrieges Russlands gegen die Ukraine wurden jedoch beachtliche Einsparungen der privaten Haushalte im Winter 2022/2023 berichtet. Das zeigt zumindest auf, dass hier beachtliche Potenziale erschließbar wären. Ob ein derartiges energiesparendes Verhalten längerfristig umsetzbar ist, kann allerdings in Frage gestellt werden.

(4) Konkret benannt sei hier das Beispiel von Wohngebäuden in Gründerzeitvierteln mit sehr beengten Verhältnissen, die nicht an die Fernwärme angeschlossen werden (z.B. wegen Kapazitätsproblemen). Ohne substanzelle Effizienzverbesserungen bei Lüftung und Hülle können hier wegen der extrem kleinen Grundstücke und der daraus resultierenden Platzprobleme weder Erdreich-Wärmepumpen noch Biomasseheizungen realisiert werden. Ein Ausweg könnte in der Versorgung mit einem grundwassergestützten „Kaltnetz“ in Verbindung mit Wärmepumpen bestehen.

(5) Wenn man ganze Szenarienensembles darstellen und auswerten möchte gelangt man in einen Zustand des „Variantendschungels“ mit den zugehörigen Orientierungsschwierigkeiten.

(6) Einzige Ausnahme ist die Strombereitsstellung, bei der die

erneuerbaren Anteile in den letzten Jahren stetig zunehmen. Auffällig ist, dass dies exakt der Bereich ist, auf den Planer und Architekten, mit Ausnahme der Integration von PV-Anlagen, kaum einen Einfluss haben.

(7) Die natürlichen Senken sind i.d.R. deutlich kostengünstiger als die technischen Senken und weisen bei fachgerechter Umsetzung ökologische Vorteile auf, die dazu führen, dass bei einer Monetarisierung dieses Zusatznutzens, die Kosten der natürlichen Senken nochmals geringer ausfallen (z.B. Neuaufforstungen mit perspektivischer Holznutzung oder Wiedervernässung von Mooren mit der Option von Schilfernte für Bauprodukte).

(8) Dieser Unterschied wird in der Literatur zu CO₂-Senken und in vielen Klimaschutzszenarien mit dem Ziel einer Klimaneutralität i.d.R. nicht beachtet. Dies hat dort häufig fragwürdige Bilanzierungen und Fehlschlüsse zur Folge.

Kapitel 12: Kritische Prüfung der Randbedingungen und Annahmen

(1) Hierzu wird in der Studie „Wie kann der Holzbau zum Klimaschutz beitragen“ (Vallentin 2024) näher eingegangen, die das Thema der Holznutzungen in Gebäuden sowie der Verwendung von nachwachsenden Reststoffen aus der Landwirtschaft zum Thema hat.

Literatur

- (AGEB 2019) AG Energiebilanzen e.V.: „Bruttostromerzeugung in Deutschland ab 1990 nach Energieträgern“ Stand: 06.03.2019; Internetveröffentlichung; ULR.: https://ag-energiebilanzen.de/index.php?articleid_29&fileName=20181214brd_stromerzeugung; aufgerufen am 14.05.2010.
- (AGEB 2019a) AG Energiebilanzen e.V.: „Ausgewählte Effizienzindikatoren zur Energiebilanz Deutschland – Daten für die Jahre von 1990 bis 2018“ Stand: September 2019; Internetveröffentlichung; ULR.: <https://www.ag-energiebilanzen.de/>; aufgerufen am 14.05.2020.
- (ARGE 2016) Arbeitsgemeinschaft für zeitgemäßes Bauen (ARGE) e.V. (Hrsg.): Wohngebäude – Fakten 2016. Eine Analyse des Gebäudezustandes in Deutschland. Mitteilungsblatt Nr. 253. April 2016. Kiel, 2016.
- (ARGE 2016a) Arbeitsgemeinschaft für zeitgemäßes Bauen (ARGE) e.V. (Hrsg.): „Bestandsersatz 2.0. Studie zur aktuellen Bewertung des Wohngebäudebestands in Deutschland unter Berücksichtigung von Neubau, Sanierung und Bestandsersatz“. Bauforschungsbericht Nr. 69, Kiel, 2016.
- (Alig et al. 2020) Alig, Martina, u.a.: Alig, Martina (u.a.): „LCA of climate friendly construction materials“, Internetveröffentlichung 2020; ULR: https://freeze.ch/fileadmin/user_upload/downloads/Publications/Case_Studies/Building_and_Construction/670_LCA_constructionMaterials_1.5C_v1.4.pdf, aufgerufen am 14.04.2023.
- (Baer et al. 2009) Baer, Paul; u.a.: „The Greenhouse Development Rights Framework: Drawing Attention to Inequality within Nations in the Global Climate Policy Debate.“, Internetveröffentlichung; ULR: https://www.researchgate.net/publication/233331687_The_Greenhouse_Development_Rights_Framework, aufgerufen am 03.03.2024.
- (Bals et al. 2016) Bals, Christoph; Kreft, Sönke; Welscher, Lutz: „Wendepunkt auf dem Weg in eine neue Epoche der globalen Klima- und Energiepolitik“. Internetveröffentlichung, ULR: <https://germanwatch.org/de/11492>, aufgerufen am 03.03.2024.
- (BBSR 2015) Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR): „Wohnungsmarktprognose 2030“; Internetveröffentlichung; ULR: <https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/veroeffentlichungen/analysen-kompakt/2015/AK072015.html> aufgerufen am 03.03.2024.
- (BBSR 2020) BBSR (Hrsg.): „Umweltfußabdruck von Gebäuden in Deutschland“, Internetveröffentlichung 2020. ULR: https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/veroeffentlichungen/bbsr-online/2020/bbsr-online-17-2020-dl.html?__b=1; aufgerufen am 14.04.2023.
- (BDEW 2019) Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V.: „Beheizungsstruktur des Wohnungsbestandes“, Stand Januar 2019; Internetveröffentlichung; ULR.: https://www.bdew.de/media/documents/Beheizungsstruktur_Wohnungsbestand_Entw_ab_1995_online_o_jaehrlich_Ki_27022020.pdf; aufgerufen am 12.05.2020.
- (BDEW 2019a) Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V.: „Beheizungsstruktur im Wohnungsneubau“, Stand Oktober 2019; Internetveröffentlichung; ULR.: <https://www.bdew.de/service/daten-und-grafiken/entwicklung-beheizungsstruktur-wohnungsneubau/>; aufgerufen am 12.05.2020.
- (BEI/IWU 2016) Bremer Energie Institut/Institut für Wohnen und Umwelt: „Datenbasis Gebäudebestand. Datenerhebung zur energetischen Qualität und zu den Modernisierungstrends im deutschen Wohngebäudebestand“, Eigenverlag, Darmstadt, 2016.
- (BMUB 2016) BMUB – Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau- und Reaktorsicherheit (2015): „Klimaschutzplan 2050. Klimaschutz politische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung“. Eigenverlag, Berlin, 2016.
- (BMWi 2020) Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (Hrsg.): „Gesamtausgabe der Energiedaten“, Stand 31.03.2020; Internetveröffentlichung; ULR: <https://www.bmwj.de/Redaktion/DE/Artikel/Energie/energieliste-gesamtausgabe.html>, aufgerufen am 25.05.2020.
- (Beuth/ifeu 2015) Beuth Hochschule für Technik Berlin und Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg (Hrsg.): „Dämmbarkeit des deutschen Gebäudebestands“; Internetveröffentlichung, 2015; ULR: https://wdvs.enbausa.de/wp-content/uploads/2015/09/Beuth_ifeu_Daemmbarkeit_des_deutschen_Gebaeudebestands_2015.pdf; aufgerufen am 05.08.2021.
- (COP-21 2015) Übereinkommen der Pariser Klimakonferenz vom 12.12.2015; deutsche Fassung, ULR: https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaschutz/paris_abkommen_bf.pdf, aufgerufen am 24.04.2020.
- (dena 2016) Deutsche Energie-Agentur: Der dena-Gebäudereport 2016. Statistiken und Analysen zur Energieeffizienz im Gebäudebestand, Eigenverlag, Berlin, 2016.
- (Den Elzen / Meinshausen 2005) Den Elzen, Michel; Meinshausen, Malte: „Multi-gas emission pathways for stabilizing greenhouse gas concentrations“, In: Schellnhuber, Hans Joachim (Hrsg.): „Avoiding Dangerous Climate Change.“, Cambridge University Press, pp. 299-309.
- (Den Elzen et al. 2007) Den Elzen, Michel; u.a.: „The Tryptich approach

- revisited. A staged sectoral approach for climate mitigation.“ Internetveröffentlichung; ULR: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301421507005289>, aufgerufen am 03.03.2024.
- (Destatis 2017) „Entwicklung der Privathaushalte bis 2035“, Internetveröffentlichung; erschienen am 28.02.2017; ULR: https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Bevoelkerung/Haushalte-Familien/Publikationen/Downloads-Haushalte/entwicklung-privathaushalte-5124001179004.pdf?_blob=publicationFile; aufgerufen am 14.05.2020.
- (Destatis 2019) Statistisches Bundesamt (Hrgs.): 14. Koordinierte Bevölkerungsvorausberechnung, Internetveröffentlichung, ULR: https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Bevoelkerung/Bevoelkerungsvorausberechnung/_inhalt.html#sprg233474, aufgerufen am 02.04.2020.
- (EnEV-online 2019) Melita Tuschinski / Redaktion EnEV-online: „GEG GebäudeEnergieGesetz – aktueller Stand“ vom 22.01.2019; Internetveröffentlichung; ULR: http://www.enev-online.eu/gegnews/190122_bericht_rathert_bmi_vortrag_geg_bau_2019.htm; aufgerufen am 14.05.2020.
- (EIV 2017) Energieinstitut Vorarlberg (Hrgs.): „Modellvorhaben >Klinawo< - Zwischenbericht Jänner 2017“; Internetveröffentlichung; ULR: <https://www.energieinstitut.at/unternehmen/bauen-und-sanieren-fuer-profits/kosten-und-wirtschaftlichkeit/alps-klinawo>; file:///C:/Users/VR/Downloads/Zwischenbericht-KliNaWo-012017.pdf, aufgerufen am 06.05.2024.
- (EIV 2019) Energieinstitut Vorarlberg (Hrgs.): „Modellvorhaben >Klinawo< - Monitoringbericht 2019“; Internetveröffentlichung; ULR: <https://www.energieinstitut.at/unternehmen/bauen-und-sanieren-fuer-profits/kosten-und-wirtschaftlichkeit/alps-klinawo>; file:///C:/Users/VR/Downloads/20190729_KliNaWo_Monitoringbericht-1.pdf, aufgerufen am 06.05.2024.
- (EIV et al. 2021) Energieinstitut Vorarlberg u.a. (Hrgs.): “Low-Cost nZEB - Paris-kompatible Mehrfamilienhäuser”, Eigenverlag. 2022. Auch als Internetveröffentlichung erschienen; ULR: https://www.uibk.ac.at/bauphysik/forschung/projects/low_cost_nzeb/documents/2022-low-cost-buch.pdf, aufgerufen am 14.04.2023.
- (EPBD 2010) Europäisches Parlament und europäischer Rat (Hrgs.): „EU-Richtlinie über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden“, Internetveröffentlichung in deutscher Übersetzung; ULR: https://enev-online.de/epbd/epbd_2010_100618_verkuendung_eu_amtsblatt_deutsch.pdf, aufgerufen am 14.05.2020
- (EWI/prognos 2005) Energiewirtschaftliches Institut an der Universität zu Köln (Hrgs.): „Energierport IV“, Oldenbourg Industrieverlag, München, 2005.
- (ewi/gws/prognos 2014) Schlesinger, Michael et al.: “Entwicklung der Energiemarkte – Energiereferenzprognose”, Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (Hrgs.), Eigenverlag, Basel, Köln, Osnabrück, 2014.
- (Guest et al. 2012) Guest, Geoffrey; Cherubini, Francesco; Stromman, Anders, H.: „Global Warming Potential of Carbon Dioxide Emissions from Biomass Stored in the Anthroposphere and Used for Bioenergy at End of Life“, Journal of Industrial Ecology, Vol. 17, Number 1, 20 - 30 (2012); ULR: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1530-9290.2012.00507.x>, aufgerufen am 17.07.2023.
- (Frondel et al. 2006) Frondel Manuel u.a.: „Erhebung des Energieverbrauchs der privaten Haushalte für das Jahr 2005“, Forschungsprojekt Nr. 15/06 des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie, Eigenverlag, Berlin, 2006.
- (gbe-bund 2020) Gesundheitsberichterstattung der Länder GBE (Hrsg): „Gesamtwohnfläche von Wohn- und Nichtwohngebäuden“, Internetveröffentlichung; ULR: http://www.gbe-bund.de/oowa921-install/servlet/oowa/aw92/dboowasys921.xwdevkit/xwd_init?gbe.isgbetol/xs_start_neu&p_aid=3&p_aid=60312518&nummer=220&p_sprache=D&p_indsp=99999999&p_aid=53925707, aufgerufen am 06.05.2020.
- (gbe-bund 2020a) Gesundheitsberichterstattung der Länder GBE (Hrsg): „Privathaushalte in 1000. Gliederungsmerkmale: Jahre, Region, Haushaltsgröße“, Internetveröffentlichung; ULR: http://www.gbe-bund.de/oowa921-install/servlet/oowa/aw92/dboowasys921.xwdevkit/xwd_init?gbe.isgbetol/xs_start_neu&p_aid=3&p_aid=36410009&nummer=417&p_sprache=D&p_indsp=-&p_aid=41014826, aufgerufen am 06.05.2020.
- (Gonzalo/Vallentin 2013) Gonzalo, Roberto; Vallentin, Rainer: “Passivhäuser Entwerfen“, DETAIL Green Book, München, 2013.
- (Höhne et al. 2006) Höhne, Niklas; Den Elzen, Michel; Weiss, Martin: „Common but differentiated convergence (CDC): a new conceptual approach to long-term climate policy.“ Internetveröffentlichung; ULR: <https://ethreee.com/downloads/Climate%20Change%20Readings/International%20Climate%20Policy/Hohne%20-%20Common%20but%20differentiated%20convergence.pdf>. Zugriff am 18.11.2015.
- (Grimson et al. 2017) Grimsom, Bronson W.; Adam, Justin; Ellis Peter W.; et al: „Natural Climate Solutions“, IN: PNSA, October 31, 2017 114(44) pp. 11645 – 11650. Internetveröffentlichung; ULR: <https://www.pnas.org/content/114/44/11645> aufgerufen am 01.12.2021.
- (IPCC 2018) Intergovernmental Panel on Climate Change (Hrgs.): Special Report 15 “Global Warming of 1,5 °C“, Chapter 2, ULR: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/05/SR15_Chapter2_Low_Res.pdf, aufgerufen am 14.07.2023.

- (IPCC 2021) Intergovernmental Panel on Climate Change (Hrsg.): "Sixth Assessment Report"; Internetveröffentlichung; ULR: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_Full_Report.pdf aufgerufen am 04.09.2021.
- (IWU 2003) Institut Wohnen und Umwelt (Hrsg.): „Deutsche Gebäudetypologie – Systematik und Datensätze“, Eigenverlag, Darmstadt, 2003.
- (IWU 2003a) Institut Wohnen und Umwelt (Hrsg.): „Energieeinsparung durch Verbesserung des Wärmeschutzes und Modernisierung der Heizungsanlage für 31 Musterhäuser der Gebäudetypologie“, Eigenverlag, Darmstadt, 2003.
- (IWU 2007) Institut Wohnen und Umwelt (Hrsg.): „Basisdaten für die Hochrechnung der Deutschen Gebäudetypologie des IWU“, Eigenverlag, Darmstadt, 2007.
- (IWU 2012) Institut Wohnen und Umwelt (Hrsg.): „Standardnutzungsbedingungen für LEG-Jahresverfahren“, Excel-Datei >leg-standardnutzung<, Download unter: www.iwu.de, Stand: 5.10.2012.
- (IWU 2018) Institut Wohnen und Umwelt (Hrsg.) und Cischinskky, Holger; Diefenbach, Nikolaus (Autoren): „Datenerhebung Wohngebäudebestand 2016“, Eigenverlag, Darmstadt, 2018. Auch als pdf-Dokument im Internet abrufbar unter: www.iwu.de.
- (Jochum et al. 2015) Jochum, Patrick; Mellwig, Peter; et al.: „Dämmbarkeit des deutschen Gebäudebestands“, Internetveröffentlichung; ULR: https://wdvs.enausa.de/wp-content/uploads/2015/09/Beuth_ifeu_Daemmbarkeit_des_deutschen_Gebaeudebestands_2015.pdf aufgerufen am 02.12.2021.
- (Kah et al. 2005) Kah, Oliver; Pfluger, Rainer; Feist, Wolfgang: „Luftwechselraten in bewohnten, sehr luftdichten Gebäuden mit kontrollierter Wohnungslüftung“, IEA SHC TASK 38 / ECBCS ANNEX 38, 2005 (Download unter: www.passiv.de)
- (Kleemann et al. 2000) Kleemann, Martin; u.a.: „Die Entwicklung des Energiebedarfs zur Wärmebereitstellung in Gebäuden“, (Hrsg.) Bremer Energieinstitut, Eigenverlag, Bremen, 2000.
- (Kern 2016) Kern, Michaela: „Die Konsequenzen des Zwei-Grad-Ziels auf die energetischen Anforderungen an Wohngebäude“; Masterarbeit, TU München, 2016.
- (Lambott et al. 2023) Lambott, Robin D.; u.a.: „Assessing the size and uncertainty of remaining carbon budgets“, Nature Climate Change; Internetveröffentlichung; ULR: <https://doi.org/10.1038/s41558-023-01848-5>, aufgerufen am 14.03.2024.
- (LEG Energiepass Heizung-Warmwasser) Loga, Tobias; Imkeller-Benjes, Ulrich: „LEG - Energiepass Heizung-Warmwasser“, Eigenverlag, Darmstadt, 1997, Download unter: www.iwu.de, Stand: 5.10.2012.
- (Lenton et al. 2008) Lenton, Timothe; Held, Hermann; Kriegler, Elmar; Hall, Jim; Lucht, Wolfgang; Rahmstorf, Stefan; Schellnhuber, Hans Joachim: „Tipping elements in the Earth's climate system“; In: PNAS, vol. 105, No. 6, S 1786-1793.
- (MdE 2014) Ministère de l'Économie, Luxemburg (Hrsg.): „Dritter Nationaler Energieeffizienz-Aktionsplan Luxemburg“, Eigenverlag, Luxemburg, 2014.
- (Meinshausen et al. 2009) Meinshausen, Malte; u.a.: „Greenhouse-gas emission targets for limiting global warming to 2°C“, Nature, Vol. 458, 30.April 2009, doi:10.1038/nature 08017.
- (Meyer 2000) Meyer, Aubrey: „Contraction & Convergence: The Global Solution to Climate Change.“ Greenbooks for the Schumacher Society, Bristol, 2000.
- (Miara 2011) Miara, M. et al.: „Wärme pumpen Effizienz – Messtechnische Untersuchung von Wärme pumpenanlagen zur Analyse und Bewertung der Effizienz im realen Betrieb“, Hrsg.: Fraunhofer Institut für solare Energiesysteme, Eigenverlag, Freiburg, 2011.
- (Nagler et al. 2020) Nagler, Florian; u.a.: „Einfach Bauen“. Internetveröffentlichung 2020; ULR: <https://www.einfach-bauen.net/wp-content/uploads/2019/04/einfach-bauen-schlussbericht.pdf>, aufgerufen am 14.04.2023.
- (Nitsch et al. 2007) Nitsch, Joachim u.a.: „Leitstudie 2007 - Ausbaustrategie erneuerbare Energien“, Hrsg.: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Eigenverlag, Berlin 2010.
- (Nitsch et al. 2010) Nitsch, Joachim u.a.: „Leitstudie 2010“, Hrsg.: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Eigenverlag, Berlin 2010. (Hinweis: auch als Internet-Veröffentlichung unter www.bmu.de veröffentlicht).
- (Nitsch et al. 2012) Nitsch, Joachim, u.a.: „Langfristzenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global“, Eigenverlag, 2012. Internetveröffentlichung; ULR: https://www.dlr.de/dlr/portaldata/1/resources/bilder/portal/portal_2012_1/leitstudie2011_bf.pdf, aufgerufen am 10.03.2024.
- (Nitsch 2013) Nitsch, Joachim: „Szenario 2013 – Eine Weiterentwicklung des Leitszenarios 2001“, Arbeitspapier 2013;
- (PHI 2012) Autorenteam des Passivhausinstituts: „EnerPhit-Planerhandbuch“, Eigenverlag, Darmstadt, 2012.
- (PHPP) Autorenteam des Passivhausinstituts: „Passivhaus-Projektierungspaket“, Version 7 (2012), Eigenverlag, Darmstadt, 2012; Bezug über: www.passiv.de
- (Pfluger 2009) Pfluger, Rainer: „Statistische Auswertung von Versorgungsvarianten im Passivhaus“, AKKPH Nr. 38: „Heizsysteme im Passiv-

- haus – Statistische Auswertung und Systemvergleich“, Eigenverlag, Darmstadt, 2009.
- (Ploss 2017) Ploss, Martin: „Kosten und Wirtschaftlichkeit von Sanierungen auf Passivhausniveau“, in: IBO (Österreichisches Institut für Bauen und Ökologie (Hrsg.): Passivhaus Bauteilkatalog Sanierung, Birkhäuser Verlag, 2017
- (Pittau et al. 2018) Pittau, F.; Krause, F.; Lumia, G.; Habert, G.: „Fast-Growing Bio-Based as an Opportunity for Storing Carbon in Exterior Walls“. Building and Environment 2018, 129 (August 2017), 117-129. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.12.006>.
- (Reiß/Erhorn/Ohl 2001) Reiß, J.; Erhorn, H.; OHL, J.: „Klassifizierung des Nutzerverhaltens bei der Fensterlüftung“. HLH 52 (2001), Heft 8, S. 22-26.
- (Schnieders 2018) Schnieders, Jürgen: „Warum im Altbau nicht so viel geheizt wird wie gedacht - ein Erklärungsversuch“. Tagungsband der 22. Passivhaus-Tagung, München 2018. Darmstadt, Passivhaus Institut, 2018.
- (Schröder et al. 2012) Schröder, Franz; u.a.: „Spezifischer Heizenergieverbrauch und Temperaturverteilungen in Mehrfamilienhäusern - Rückwirkung des Sanierungsstandes auf das Nutzerverhalten“; HLH Bd. 61 (2010), Nr. 11, S. 22 - 25.
- (Sterner et al. 2011) Sterner, Michael, Jentsch, Mareike; Holzhammer, Uwe: „Energiewirtschaftliche und ökologische Bewertung eines Windgas-Angebotes“, Hrsg.: Fraunhofer Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik (IWES), Internet-Publikation, ULR: http://www.greenpeace-energy.de/fileadmin/docs/sonstiges/Greenpeace_Energy_Gutachten_Windgas_Fraunhofer_Sterner.pdf, aufgerufen am 10.12.2012.
- (Peper/Feist 2008) Peper, Soren; Feist, Wolfgang: „Gebäudesanierung >Passivhaus im Bestand< in Ludwigshafen-Mundenheim“, Hrsg.: Passivhaus-Institut, Eigenverlag, Darmstadt, 2008.
- (Peper et al. 2009) Peper, Soren et al: „Sanierung mit Passivhauskomponenten – Messtechnische Untersuchung und Auswertung Tevesstrasse Frankfurt am Main“; Hrsg.: Passivhaus-Institut, Eigenverlag, Darmstadt, 2008. 2009.
- (Quaschning 2024) Quaschning, Volker: „Energiebedingte CO2-Emissionen und CO2-Konzentration in der Atmosphäre seit 1860“ auf Basis von diversen Quellen (IEA, NOAA, PIK); Internetveröffentlichung, ULR: <https://www.volker-quaschning.de/datserv/CO2/index.php>, aufgerufen am 10.03.2024.
- (UBA 2014) Umweltbundesamt (Hrsg.): „Der Weg zum klimaneutralen Gebäudebestand“; Dessau-Roßlach, 2014; Internetveröffentlichung; ULR: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/0411/publikationen/378/publikationen/hgp_gebaeudesanierung_final_04.11.2014.pdf, aufgerufen am 07.05.2020.
- (UBA 2018) Umweltbundesamt: „Kohlendioxid-Emissionen im Bedarfsfeld >Wohnen<“, Internetveröffentlichung; ULR: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/private-haushalte-konsum/wohnen/kohlendioxid-emissionen-im-bedarfsfeld-wohnen>; aufgerufen am 07.05.2020.
- (UBA 2018a) Umweltbundesamt: „Energieverbrauch privater Haushalte“, Internetveröffentlichung; ULR: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/private-haushalte-konsum/wohnen/energieverbrauch-privater-haushalte#endener-gieverbrauch-der-privaten-haushalte>; aufgerufen am 07.05.2020.
- (UBA 2019) Umweltbundesamt (Hrsg.): „Möglichkeiten der Instrumentierung von Energieverbrauchsreduktion durch Verhaltensänderung“; Dessau-Roßlau, 2019; Internetveröffentlichung; ULR: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2020-05-06_texte_56-2020_energieverbrauchsreduktion.pdf; aufgerufen am 07.05.2020.
- (UN 2016) Ratifizierung Klimaabkommen von Paris ULR: (http://unfccc.int/paris_agreement/items/9444.php).
- (Vallentin 2011) Vallentin, Rainer: „Energieeffizienter Städtebau mit Passivhäusern – Herleitung belastbarer Klimaschutzstandards für den deutschen Wohnbau“; Cuvillier-Verlag, Göttingen, 2013.
- (Vallentin 2013) Vallentin, Rainer: „Hansaviertel Berlin – Energieperspektiven 2010 – 2060. Anwendung der Klimaschutzstandards in einem Stadtteil mit hohem Denkmalbestand.“ Internetveröffentlichung. ULR: <https://digital.zlb.de/viewer/metadata/15727767/1/>, aufgerufen am 05.03.2024.
- (Vallentin 2024) Vallentin, Rainer: „Wie kann der Holzbau zum Klimaschutz beitragen? – Entwicklung einer CO2-Senkenstrategie für den deutschen Wohnbau“, Internet-Veröffentlichung, ULR: https://www.vallentin-reichmann.de/wp-content/uploads/2024/02/VallentinReichmann_Wie-kann-der-Holzbau-zum-Klimaschutz-beitragen.pdf, aufgerufen am 10.03.2024.
- (Walberg et al. 2012) Walberg, Dietmar, u.a.: „Gebäudetypologie Schleswig-Holstein“, Arbeitsgemeinschaft für zeitgemäßes Bauen e.V. (Hrgs.); Kiel, 2012.
- (Walberg et al. 2015) Walberg, Dietmar.; u.a.: „Kostentreiber für den Wohnungsbau“, Arbeitsgemeinschaft für zeitgemäßes Bauen e.V. (Hrgs.); Kiel, 2015.
- (WBGU 2009) Wissenschaftlicher Beirat Globale Umweltveränderungen (Hrsg.): „Der WBGU-Budgetansatz“, Internetveröffentlichung; ULR: <https://www.wbgu.de/de/publikationen/publikation/der-wbgu-budgetansatz>, aufgerufen am 03.03.2024.