



Ariadne-Report

Deutschland auf dem Weg zur Klimaneutralität 2045

Szenarien und Pfade im Modellvergleich

KOPERNIKUS
Ariadne **PROJEKTE**
Die Zukunft unserer Energie

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Der vorliegende Ariadne-Report wurde von den oben genannten Autorinnen und Autoren des Ariadne-Konsortiums ausgearbeitet. Er spiegelt nicht zwangsläufig die Meinung des gesamten Ariadne-Konsortiums oder des Fördermittelgebers wider. Die Inhalte der Ariadne-Publikationen werden im Projekt unabhängig vom Bundesministerium für Bildung und Forschung erstellt.

Herausgegeben von

Kopernikus-Projekt Ariadne
Potsdam-Institut für Klimafolgen-
forschung (PIK)
Telegrafenberg A 31
14473 Potsdam

Oktober 2021

DOI: 10.48485/pik.2021.006

Bildnachweise

Titel: Yeshi Kangrangz / Unsplash; Kapitel 1: Andrea Boldizsar / Unsplash; Kapitel 2: funky-data / iStock; Kapitel 3: Julian Hochgesang / Unsplash; Kapitel 4: Robin Sommer / Unsplash; Kapitel 5: hungyifei / iStock; Kapitel 6: audioundwerbung / istock; Kapitel 7: Clint Adair / Unsplash; Kapitel 8: Adam Vradenburg / Unsplash; Kapitel 9: Dan Meyers / Unsplash; Kapitel 10: Micheile Henderson / Unsplash

3. Wärmewende

3.1	Zusammenfassung	88
3.2	Die Wärmewende im Systemkontext	89
3.3	Abbildung der Wärmewende in Energiesystemmodellen	92
3.4	Direkte und indirekte Elektrifizierung	93
3.5	Heizträgerwechsel in Gebäuden	96
3.6.	Sanierung und Energieeffizienz im Gebäudesektor	97
3.7	Prioritäten für den Zeithorizont 2030	102
3.8	Welche Instrumente und Maßnahmen sind für die Zielerreichung besonders wichtig?	103
	Literaturangaben	108

Autorinnen und Autoren

Christoph Kost, Charlotte Senkpiel, Judith Heilig, Jessica Berneiser, Robin Krekeler, Markus Blesl, Alexander Burkhardt



3.1 Zusammenfassung

Die wichtigsten Säulen der Wärmewende zur Erreichung eines klimaneutralen Gebäudebestands sind, wie in Tabelle 3.4 gezeigt, ein konsequenter Energieträgerwechsel und eine Steigerung der Sanierungsrate sowie der Sanierungstiefe. Weiterhin ist auch eine effiziente Nutzung von Wohnraum wichtig.

Säule 1: Reduktion der Endenergienachfrage	Säule 2: Energieträgerwechsel
<ul style="list-style-type: none">• Verbesserung der energetischen Qualität des Gebäudebestands (energetische Gebäudehüllensanierung)• (Teil)-Austausch von Radiatoren für Bereitstellung von Niedertemperaturwärme• Verminderung des Trends der steigenden Pro-Kopf Wohnfläche	<ul style="list-style-type: none">• Umstieg von fossilen Energieträgern auf erneuerbare Energieträger im Gebäude und bei der Fernwärmebereitstellung• Beschleunigung der Austauschraten von Heizsystemen

Tabelle 3.4: Die Säulen der Wärmewende.

Die direkte Elektrifizierung spielt im Wärmesektor eine entscheidende Rolle durch die Nutzung von Wärmepumpen oder Heizstäben im Gebäude und für die Einspeisung durch Großwärmepumpen in Wärmenetzen.

Die indirekte Elektrifizierung über Brennstoffzellen oder Wasserstoffkessel spielt im Gebäudesektor eine relativ kleine Rolle und ist abhängig vom Technologieszenario.

Hauptgründe für die begrenzte Nutzung von wasserstoffbasierten Technologien sind wettbewerbsfähige Alternativen, wie Wärmenetze und Wärmepumpen, sowie die begrenzte Verfügbarkeit und der hohe Preis von grünem Wasserstoff.

Nur in einem ausgeprägten Wasserstoffszenario spielen die Technologien eine Rolle.

Bis zum Jahr 2030 sollte die Sanierungsrate so ambitioniert wie möglich sein (auf mindestens 1,5 %, eher 2,0 % steigen).

Die Sanierungstiefe sollte mindestens KfW-55-Standard entsprechen.

Sie kann eine noch bedeutsamere Rolle spielen, wenn es beispielsweise Verzögerungen bei anderen vergleichbar günstigen Dekarbonisierungslösungen, wie dem Zubau Erneuerbarer Energien, gibt.

Durch das ambitionierte Zielbild des Wärmesektors in Bezug auf die CO₂-Emissionsreduktion bis 2045 bedarf es eines stringenten informatorischen, ordnungspolitischen und förderpolitischen Instrumentenmix zur Realisierung der Zielerreichung.

3.2 Die Wärmewende im Systemkontext

Die Verbrennung von fossilen Energieträgern in Gebäuden verursachte im Jahr 2020 rund 16 % der Treibhausgas-(THG)-Emissionen Deutschlands mit 120 Mio. tCO₂äq. Der Großteil entfällt dabei auf die Haushalte mit rund 76 % der THG-Emissionen und den Sektor Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD) mit rund 24 %. Abbildung zeigt die Entwicklung der Treibhausgasemissionen des Sektors Gebäude nach Definition des Klimaschutzgesetzes (KSG) (Stand 12.12.2019). Seit 1990 sind die THG-Emissionen des Sektors um 43 % gesunken. Bis zum Jahr 2030 müssen sie laut der neuen Fassung des KSG um knapp 68 % gegenüber 1990 sinken, auf 67 Mio. tCO₂äq. Das bedeutet eine Reduktion um 44 % gegenüber den Emissionen des Jahres 2020 (UBA, 2021d).

Abbildung 3.1 veranschaulicht den Einfluss einzelner Treiber auf die Emissionsentwicklung im Sinne einer emissionssteigernden und -mindernden Wirkung. Dabei ist zu beobachten, dass sich die Energieintensität¹¹ (mit Ausnahme der Jahre 1996 und 1997) und Emissionsintensität¹² seit 1995 emissionsmindernd auswirken. Zu den Treibern der Treibhausgasemissionen des Sektors zählen im betrachteten Zeitraum der Anstieg der Wohnfläche, die Wohnungen pro Kopf sowie der Bevölkerungsanstieg. Fernwärme ist laut Klimaschutzgesetz nicht mit in den Gebäuden bilanziert.

Die Endenergiebereitstellung in Gebäuden für Warmwasser und Heizungswärme basiert heute (Stand 2018) auf den Energieträgern Erdgas (49 %), Heizöl (21 %), Biomasse, Wärmenetzen und zu geringen Anteilen Strom, Solarthermie und Umweltwärme in absteigender Reihenfolge.

¹¹ Primärenergieverbrauch Gebäude pro Bruttoinlandsprodukt (BIP)

¹² THG-Emissionen von Gebäuden pro Primärenergieverbrauch von Gebäuden

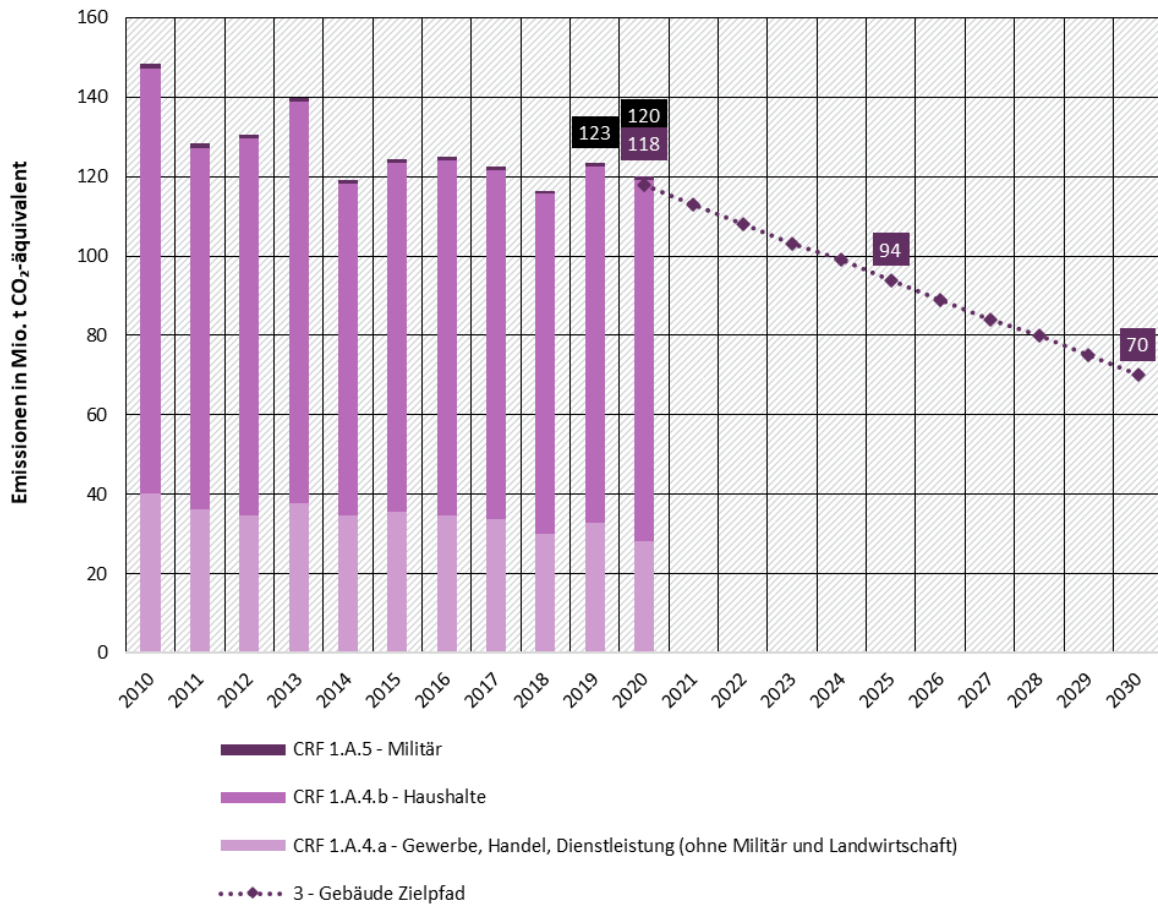


Abbildung 3.1: Treibhausgasemissionen des Gebäudesektors seit 2010 und Ziele des alten (2019) und verschärften KSG (2021) (UBA, 2021d).

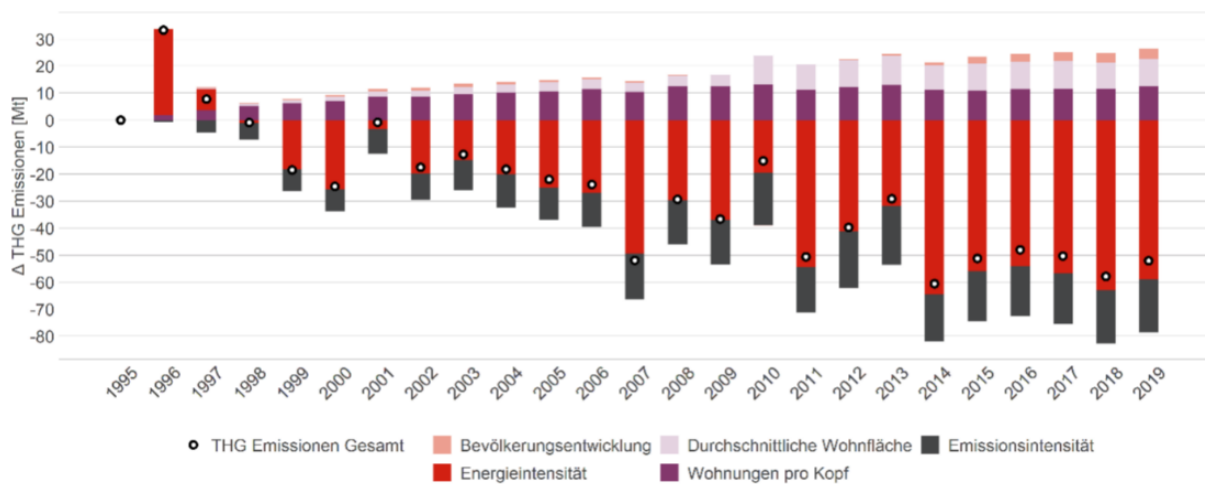


Abbildung 3.2: Dekomposition der Treibhausgasemissionen im Bereich privater Haushalte (ERK, 2021).

Der Gebäudebestand

Der Gebäudebestand setzt sich derzeit aus ca. 19 Millionen Wohngebäuden sowie 21 Millionen Nichtwohngebäuden (davon 1,9 Mio. beheizt oder gekühlt) zusammen (Hörner, 2021). 86,6 % der Wohngebäude sind in Privatbesitz, 7,5 % und weitere 5,4 % in Besitz von Wohnungseigentümergemeinschaften und Wohnungsunternehmen. Der Anteil von Eigentumswohnungen ist insbesondere bei den Ein- und Zweifamilienhäusern mit 96 % dominierend, während Mehrfamilienhäuser mehrheitlich im Besitz von Eigentümergemeinschaften (33,6 %) und Wohnungsunternehmen (23,5 %) sind. Der energetische Zustand der Gebäude ist je nach Gebäudetyp, Besitzerstruktur, Baualtersklasse etc. unterschiedlich. Im Wohngebäudebestand sind derzeit rund 42 % der Außenwandflächen gedämmt, 78 % der Dachflächen und 37 % der Fußbodenfläche. Bei allen Wohngebäuden liegt die Gesamtmodernisierungsrate für den Wärmeschutz bei 0,99 % pro Jahr, bei Altbauten (bis 1978) bei 1,43 % pro Jahr. Im Vergleich dazu liegen die Erneuerungsraten der Wohngebäudefassaden bei 2,27 % (Gesamtgebäudebestand). Die Differenz kann als verpasste Chance für energetische Sanierung betrachtet werden. Derzeit werden in Altbauten (bis 1978) bei 43 % der Gebäude ein Heizkessel mit Erdgas eingesetzt und bei 30 % ein Heizkessel mit Heizöl. Wärmepumpen machen in dieser Gebäudeklasse (bis 1978) einen Anteil am Bestand von 0,6 % aus. In Neubauten (ab Baujahr 2010) dagegen sind 41 % der Heizsysteme erdgasbetriebene Heizkessel und bereits 39 % der Installationen elektrische Wärmepumpen. (Cischinsky et al., 2018)

Die Haushaltsgröße ist in Deutschland über die letzten Jahrzehnte kontinuierlich gesunken. Während sich 1991 im Schnitt knapp 2,3 Personen einen Haushalt teilten, waren es 2018 bereits weniger als zwei Personen (Statistisches Bundesamt (DESTATIS), 2020). Gleichzeitig steigt die durchschnittliche Wohnfläche pro Person im Schnitt um 0,1 m² pro Jahr und lag 2019 bei 47,0 m² pro Person (Statistisches Bundesamt (DESTATIS), 2021). Große Teile der Energienachfrage im Gebäudesektor, wie Beleuchtung, Heizen und Kühlen, skalieren mit der Wohnfläche, so dass sich das Bevölkerungswachstum zusammen mit zunehmendem Pro-Kopf-Flächenbedarf in immer höherer Nachfrage nach Energiedienstleistungen niederschlägt.

Eckpfeiler der Wärmewende

Zur benötigten Reduktion der Treibhausgasemissionen des Gebäudesektors gibt es zwei Hauptdimensionen (die Reduktion der Endenergienachfrage sowie der Energieträgerwechsel) wie in Tabelle 3.1 dargestellt.

Säule 1: Reduktion der Endenergienachfrage	Säule 2: Energieträgerwechsel
<ul style="list-style-type: none">• Verbesserung der energetischen Qualität des Gebäudebestands (energetische Gebäudenhüllsanie rung)• (Teil)-Austausch von Radiatoren für Bereitstellung von Niedertemperaturwärme• Verminderung des Trends der steigenden Pro-Kopf Wohnfläche	<ul style="list-style-type: none">• Umstieg von fossilen Energieträgern auf erneuerbare Energieträger im Gebäude und bei der Fernwärmebereitstellung• Beschleunigung der Austauschraten von Heizsystemen

Tabelle 3.1: Die Säulen der Wärmewende.

3.3 Abbildung der Wärmewende in Energiesystemmodellen

Um die Rolle der Säulen der Wärmewende bewerten zu können, wurde das Energiesystemmodell REMod als Leitmodell verwendet. Zusätzlich werden die Ergebnisse mit den Systemmodellen TIMES und REMIND verglichen.

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

Die Ergebnisse des Modells folgen damit einem normativen Ansatz und grenzen sich von explorativen Modellen ab, die die Änderung des Gebäudebestands auf Basis von Investitionsentscheidungsverhalten abbilden. Im Modell REMod werden keine politischen Rahmenbedingungen wie Förderungen oder CO₂-Preise abgebildet. Zielgröße ist die Einhaltung des CO₂-Minderungspfades bzw. des CO₂-Budgets.

Der vorliegenden Analyse liegt die Annahme einer **vollständigen Dekarbonisierung bis zum Jahr 2045** und einer Reduktion der Treibhausgasemissionen um -65 % gegenüber dem Jahr 1990 im Jahr 2030, gemäß der Verschärfung des Klimaschutzgesetzes (Kabinettsbeschluss 12.05.2021), zugrunde. Die nachfolgend dargestellten Ergebnisse folgen einem normativen Ansatz und können als mögliche Zielsysteme interpretiert werden, um die Treibhausgasemissionsreduktionsziele zu erreichen. Eine ausführliche Modellbeschreibung findet sich im Appendix dieses Berichts. Für die systemanalytische Bewertung der Wärmewende wurden die verschiedenen Technologieszenarien mit den Modellen REMod, TIMES und REMIND gerechnet, die in Kapitel 1 dargestellt wurden.

3.4 Direkte und indirekte Elektrifizierung

Abbildung 3.3 zeigt die Entwicklung der Endenergienachfrage der verschiedenen Szenarien als Ergebnis der Modelle REMod, TIMES und REMIND. Dabei zeigen sich folgende robuste Entwicklungen über die Modelle:

- Die Endenergienachfrage reduziert sich über alle Szenarien und Modelle deutlich (bis 2030 um 13 - 18 % und bis 2050 um 30 - 47 %), dabei unterscheidet sich die Höhe und der Gradient der Reduktion.
- Der Endenergieträger Gas wird in den Modellen mit Ausnahme der Szenarien *Wasserstoff (Import)* und *E-Fuels* nahezu vollständig ersetzt.
- Die direkte Elektrifizierung nimmt in allen Szenarien und Modellen eine prominente Rolle ein.
- Wasserstoff spielt ausschließlich im *Wasserstoff*-Szenario eine Rolle.

Kleinere Unterschiede ergeben sich allerdings zwischen den Modellen in den folgenden Punkten:

In REMIND verbleibt über alle Szenarien ein geringer Anteil am Energiebedarf, der aufgrund des trägen Austauschs von Heiztechnologien im Gebäudebestand weiterhin mit flüssigen Energieträgern versorgt wird. Diese Energieträger stammen bis 2045 jedoch fast vollständig aus erneuerbaren Quellen. In TIMES und REMod werden flüssige Energieträger hingegen vollständig ersetzt.

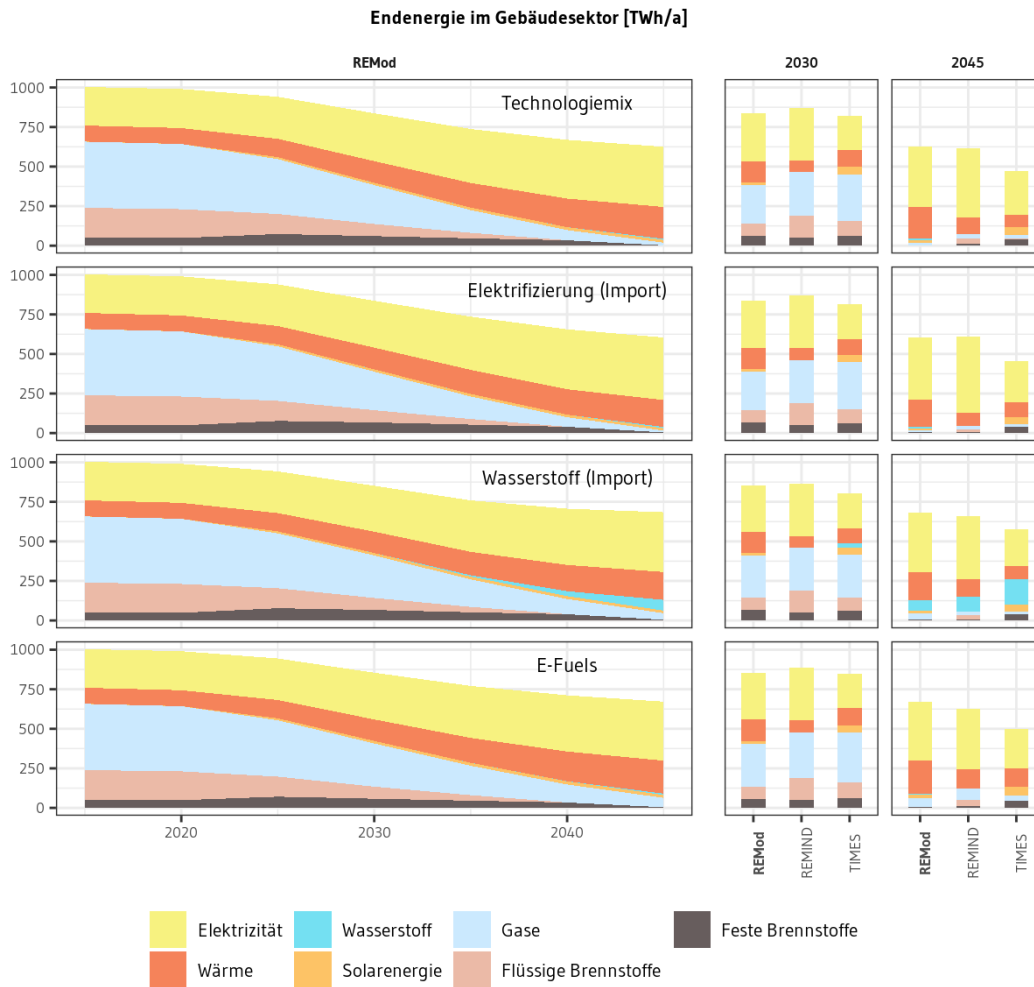


Abbildung 3.3: Entwicklung der Endenergienachfrage im Gebäudesektor der Szenarien mit den Modellen REMod-D, TIMES und REMIND.

Im Folgenden werden die Ergebnisse des Modells REMod näher analysiert, das im Rahmen dieser Analyse des Wärmesektors als Leitmodell fungiert. Um die **Rolle der direkten und indirekten Elektrifizierung** im Gebäudesektor näher zu untersuchen, werden die verschiedenen Szenarien miteinander verglichen. Abbildung 3.4 zeigt die Entwicklung der Endenergienachfrage in den beiden Szenarien *Wasserstoff (Import)* und *Elektrifizierung (Import)*, die die Bandbreite der Nachfragereduktion darstellen. Hierbei zeigt sich, dass der Einsatz von Strom und Fernwärme ansteigt, wohingegen Gas fast vollständig verschwindet. Bereits im Jahr 2030 ist der Erdgasverbrauch stark rückläufig. Wasserstoff wird nur im expliziten *Wasserstoff-Szenario* eingesetzt und wird dort jedoch ein wichtiger Bestandteil (ca. 10 % an der Nachfrage). Wichtig ist auch, dass sich die Zusammensetzung des Gases (Methan) über den Zeitverlauf anpasst. Im Jahr 2050 setzt sich das Methan vorrangig aus Biogas (75 - 90 %) und synthetischem Methan (aus EE-Strom erzeugt) zusammen. Einen Restanteil stellt Wasserstoff im Erdgasnetz dar.

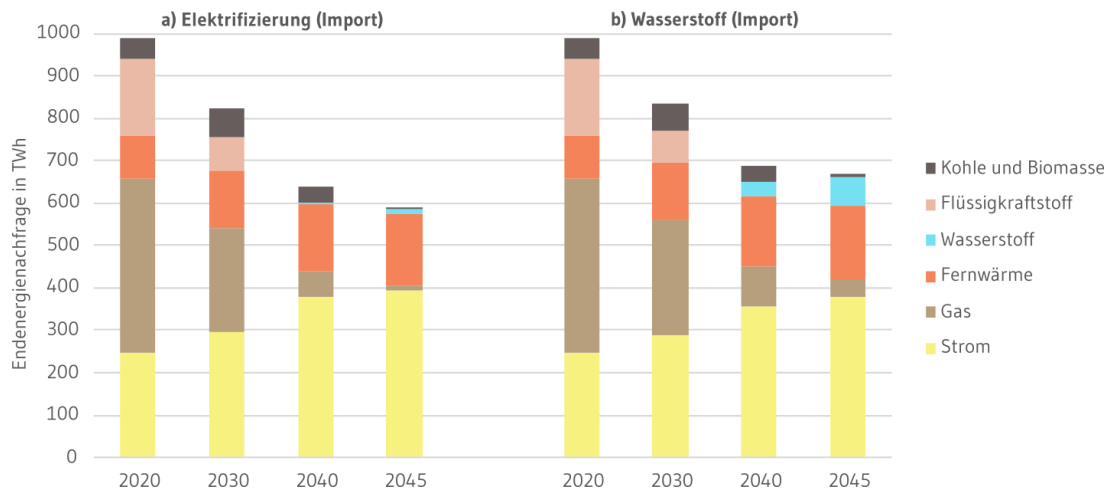


Abbildung 3.4: a) Endenergienachfrage im Gebäudesektor im Elektrifizierung (Import)-Szenario und b) im Wasserstoff (Import)-Szenario (Anmerkung: Strom beinhaltet die Basisstromlast; Umweltwärme ist nicht dargestellt).

Wie bereits festgestellt, ist die Rolle der Fernwärme als effiziente Wärmebereitstellung in verdichteten Gebieten ein wichtiger Baustein, wenn die Dekarbonisierung der Fernwärmenetze durchgeführt wird. Wichtigster Bestandteile einer solchen Strategie ist die Elektrifizierung der Fernwärmenetze. Wie Abbildung 3.5 zeigt, ist die Rolle der direkten Elektrifizierung durch Wärmepumpen und Heizstäbe in den Wärmenetzen in allen Szenarien im Jahr 2045 dominant. Hierbei nehmen Wärmenetze auch eine wichtige Flexibilisierungsoption ein, da die Heizstäbe (und Wärmespeicher) Flexibilität für das Stromnetz bereitstellen.

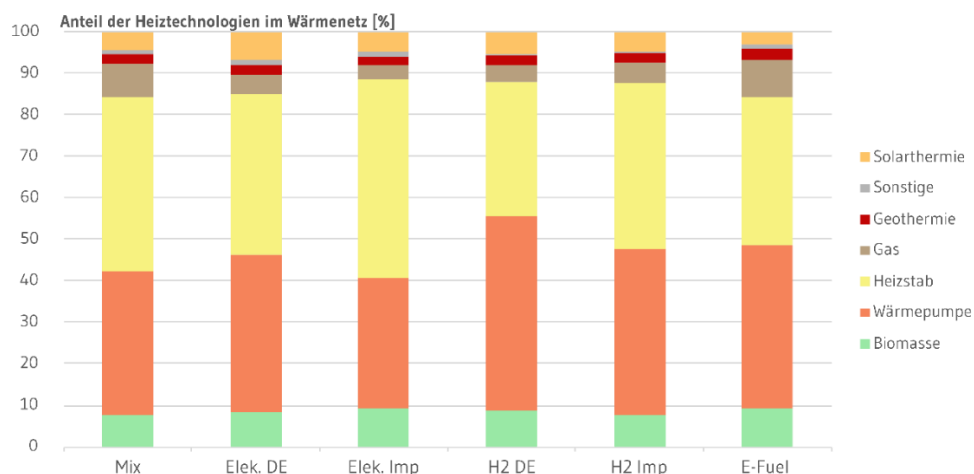


Abbildung 3.5: Ergebnis der Zusammensetzung der Fernwärme im Jahr 2045 in den Technologieszenarien.

3.5 Heizträgerwechsel in Gebäuden

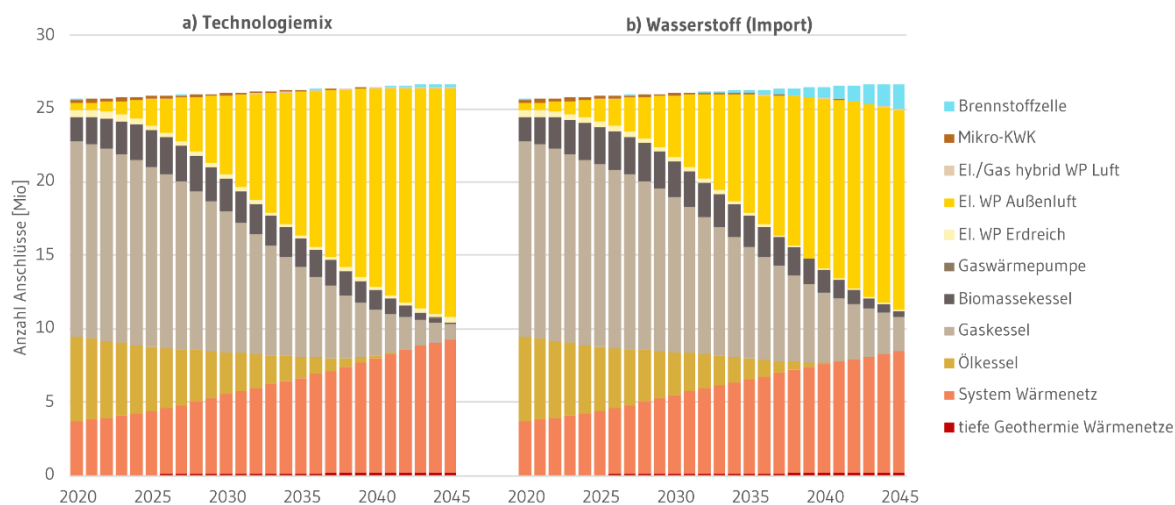


Abbildung 3.6: Zusammensetzung der Heiztechnologien in Technologiemix- und Wasserstoff (Import)-Szenario.

In Abbildung 3.6 ist die Zusammensetzung der Heiztechnologien in den Szenarien *Technologiemix* und *Wasserstoff (Import)* dargestellt. Deutlich zu erkennen ist in beiden Szenarien ein Rückgang der Gaskessel. Dieser fällt im Szenario *Wasserstoff (Import)* etwas geringer aus, da mehr Gaskessel mit synthetisch hergestelltem CO₂-neutralen Methan betrieben werden. Die größere Verfügbarkeit von synthetischen Brennstoffen macht sich auch in einem verstärkten Einsatz von Brennstoffzellen bemerkbar, die vor allem mit Wasserstoff betrieben werden. Als deutlicher Trend ist in beiden Szenarien ein großer Anstieg von elektrischen Wärmepumpen sowie von Anschlüssen an ein Wärmenetz zu erkennen. Die absoluten Zahlen am Gebäudebestand sind in Tabelle 3.2 dargestellt.

Szenario	Heiztechnologie	2020	2030	2040	2045
Technologiemix	Anschlüsse ans Wärmenetz (Mio.)	3.397	5.143	7.463	8.676
Technologiemix	Elektrische Wärmepumpe (Mio.)	0.859	5.287	12.890	14.998
Wasserstoff (Import)	Anschlüsse ans Wärmenetz (Mio.)	3.397	5.137	7.095	7.857
Wasserstoff (Import)	Elektrische Wärmepumpe (Mio.)	0.859	4.162	10.912	12.834

Tabelle 3.2: Anzahl der elektrischen Wärmepumpen und Anschlüsse an Wärmenetze in den Szenarien Technologiemix und Wasserstoff (Import).

Allgemein zeigt sich, dass die Zusammensetzung der Heizsysteme relativ robust über alle Szenarien hinweg ist:

- Elektrische Wärmepumpen machen bis zum Jahr 2045 den Großteil des Bestands aus, zudem spielt die Fernwärme eine zentrale Rolle.
- In den Szenarien der indirekten Elektrifizierung haben zudem Gaskessel höhere Anteile am Bestand.
- Generell ist die Rolle der indirekten Elektrifizierung jedoch sehr untergeordnet gegenüber der direkten Elektrifizierung.
- Die Verwendung von Brennstoffzellen und H₂-Kesseln spielt nur in den Szenarien *Wasserstoff (Import)* und *Wasserstoff (inländisch)* eine Rolle. Das heißt, dass bei günstigem Import von großen Mengen an Wasserstoff oder bei heimischer Produktion dieser eine Rolle zur Versorgung von Gebäuden spielen könnte.

3.6 Sanierung und Energieeffizienz im Gebäudesektor

Neben dem Energieträgerwechsel ist die zweite Säule der Wärmewende die Reduktion der Wärmenachfrage. Folgende Stellschrauben tragen zu einer Nachfragereduktion bei:

- Erhöhung der Sanierungsrate und Sanierungstiefe
- Reduktion des Pro-Kopf-Verbrauchs beheizter Wohnfläche
- Effizienz der Heiztechnologien

Sanierungsrate- und Sanierungstiefe

In allen Szenarien wird ein schneller Anstieg der Sanierungsaktivitäten von heute ca. 1 % der Gebäude pro Jahr (Deutsche Energie-Agentur (dena), 2021) auf mehr als 2 % angestrebt, um die Energienachfrage in den Gebäuden nachhaltig zu senken.

Abbildung 3.7 spannt die Bandbreite der Sanierungsrate zwischen den Szenarien auf. Auffällig dabei ist, dass bis zum Jahr 2030 in allen Szenarien die Sanierungsrate stark ansteigt. Szenarioübergreifend gilt die Annahme einer maximalen Sanierungsrate von 2,5 % wegen begrenzter Handwerkskapazitäten. In den Szenarien *Wasserstoff (Import)*, *Wasserstoff (inländisch)* und *Elektrifizierung (inländisch)* steigt die Sanierungsrate auf das Maximum von 2,5 % an, während in den anderen Szenarien die Sanierungsrate nicht ganz auf die angenommene Potenzialgrenze ansteigt. Grund hierfür sind die begrenzten und teuren Optionen in diesen Szenarien, die die Sanierung attraktiver erscheinen lassen. Generell ist der starke Anstieg in allen Szenarien darauf zurückzuführen, dass das Reduktionsziel von 65 % in 2030 erreicht werden muss. Nach dem Jahr 2030 ist

die Sanierungsrate zwischen den Technologieszenarien jedoch deutlich unterschiedlich. Durch einen gewissen Sanierungs- bzw. Investitionszyklus könnte die Sanierungsrate ab 2035 wieder sinken, falls in den kommenden 15 Jahren hohe Sanierungsraten erreicht werden. Für die komplette Bandbreite der Technologieszenarien zeigt sich, dass für die Zielkompatibilität im kostenoptimalen Fall bis zum Jahr 2050 je nach Szenario lediglich 5-18 % unsanierte Gebäude verbleiben. Dabei fällt auf, dass in den beiden Szenarien heimischer Wasserstoff (95 % saniert in 2050) sowie heimische Elektrifizierung (90 % des Gebäudebestands saniert) die Sanierungsrate am höchsten ist. In diesen Fällen liegt der Fokus auf heimischer Erzeugung und die Möglichkeiten der Dekarbonisierung durch Importe von Strom und synthetischer Energieträger sind begrenzt. Deswegen muss auf die nationalen Möglichkeiten des Erneuerbare-Energien(EE)-Ausbaus sowie der Bedarfsreduzierung, z. B. durch energetische Sanierung von Gebäuden, zurückgegriffen werden. Jedoch sind bei der Sanierungsrate auch die Gesamtkosten der Betroffenen zu berücksichtigen. Bei hohen Kosten für Sanierungsmaßnahmen können die Betroffenen höhere Betriebskosten (aufgrund fehlender Sanierung und folglich höheren Wärmebedarf) trotzdem präferieren.

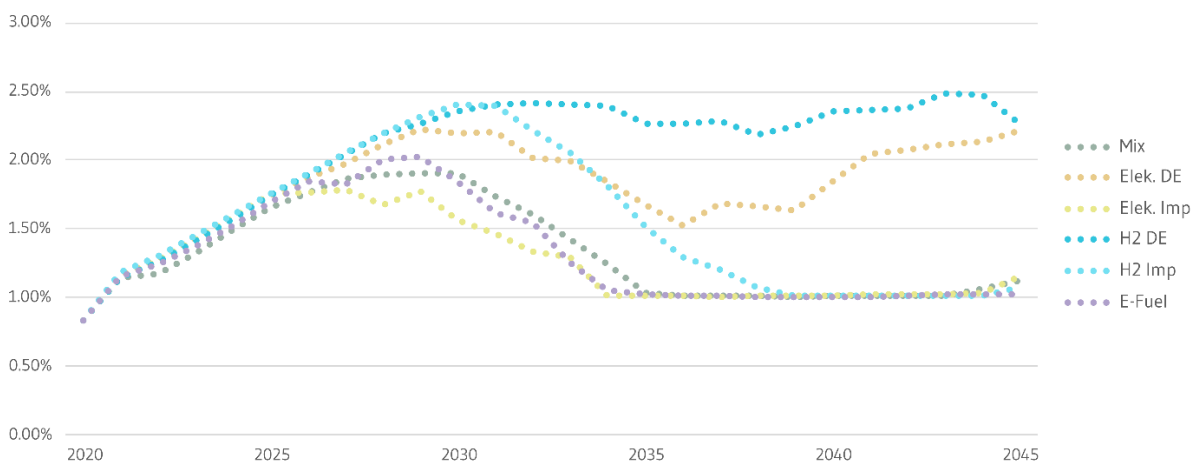


Abbildung 3.7: Sanierungsraten in allen Szenarien.

Sanierungstiefe

An dieser Stelle wird analysiert, welche Sanierungstiefen (sprich welche Gebäudestandards) aus Kosten- und Systemperspektive in einem klimaneutralen Energiesystem und den untersuchten Szenarien zum Einsatz kommen. Generell wurden zwei verschiedene Sanierungspakete untersucht:

- Reduktion des Wärmebedarfs um 50 %: entspricht in etwa dem Programm KfW-70 bis -55 bei Verwendung einer Erdgasheizung plus Solarthermie¹³
- Reduktion des Wärmebedarfs um 64 %: entspricht in etwa dem Passivhausstandard bzw. dem KfW-40 Standard

Über alle Szenarien hinweg wird das Sanierungspaket (KfW -70 bis -55) aus Kosten-Nutzen-Sicht präferiert. In Abbildung 3.8 ist der Anteil der sanierten und unsanierten Gebäude im *Technologiemix*-Szenario aufgetragen. Bis zum Jahr 2045 sind über 70 % der Gebäude saniert, im Vergleich zu ca. 35 % im Jahr 2020. Der Passivhausstandard ist in Bezug auf die Gebäudesanierung mit hohen energetischen Anforderungen verknüpft. Das bedeutet, dass der Niedrigenergie-Standard (KfW-55) ausreichend bei einer Sanierung ist und trotzdem die Dekarbonisierung der Gebäude erreicht werden kann. Auch unsanierte Gebäude bzw. Gebäudehüllen werden in den Szenarien durch einen Austausch des Heizsystems oder des Energieträgerwechsels dekarbonisiert.

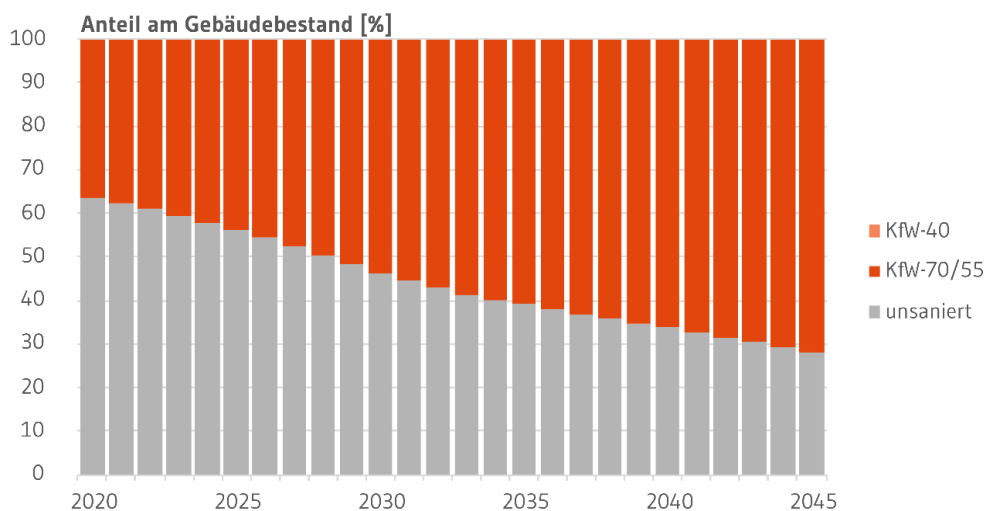


Abbildung 3.8: Anteil des sanierten und unsanierten Gebäudebestands nach Sanierungspaket im Technologiemix-Szenario.

¹³ In dem Modell werden die einzelnen Effizienzhausstandards nicht explizit berechnet, daher dient die Einordnung in die KfW-Programme einer Orientierung (KfW -70 kurzfristig und -55 mittel- bis langfristig).

Die Notwendigkeit einer tiefen Sanierung des Gebäudebestands ist abhängig vom möglichen Zubau der erneuerbaren Energietechnologien. Es ist aus Systemsicht kosteneffizienter, Wind- und Photovoltaik-Kapazitäten zuzubauen und damit die direkte oder indirekte Dekarbonisierung der Verbrauchssektoren zu ermöglichen, als tiefe energetische Sanierung (Passivhausstandard) durchzuführen. Ist dies jedoch nicht möglich (bspw. durch fehlende Produktionskapazitäten, Flächenverfügbarkeiten, fehlende Akzeptanz etc.), ist die tiefe Sanierung eine alternative Möglichkeit, das Ziel der Klimaneutralität zu erreichen. Letztendlich führt die tiefe Sanierung zu Energieeinsparungen und damit kann sie zur Zielerreichung beitragen, auch wenn die Analyse gezeigt hat, dass dies mit Mehrkosten gegenüber dem kostenoptimalen System verbunden ist. Neben der Sanierung der Gebäudehülle spielen niederschwellige Sanierungen, wie der Austausch von Heizkörpern zur Reduktion der Heizkreistemperaturen in Bestandsgebäuden, eine wichtige Rolle. Sie sind ein wichtiger Baustein für die effiziente Verwendung von zukunftsfähigen Heizsystemen. Die Effizienz bzw. Jahresarbeitszahl einer Wärmepumpe verbessert sich beispielsweise bei niedrigen Heizkreistemperaturen. Abbildung 3.9 zeigt den Anteil an Bestandsgebäuden, die im kostenoptimalen Zielsystem (hier dargestellt für das *Technologiemix*-Szenario) eine Umstellung von Vorlauftemperaturen von 65°C auf 35°C durchführen. In diesem Szenario findet bis zum Jahr 2050 etwa eine Verdopplung des Anteils statt.

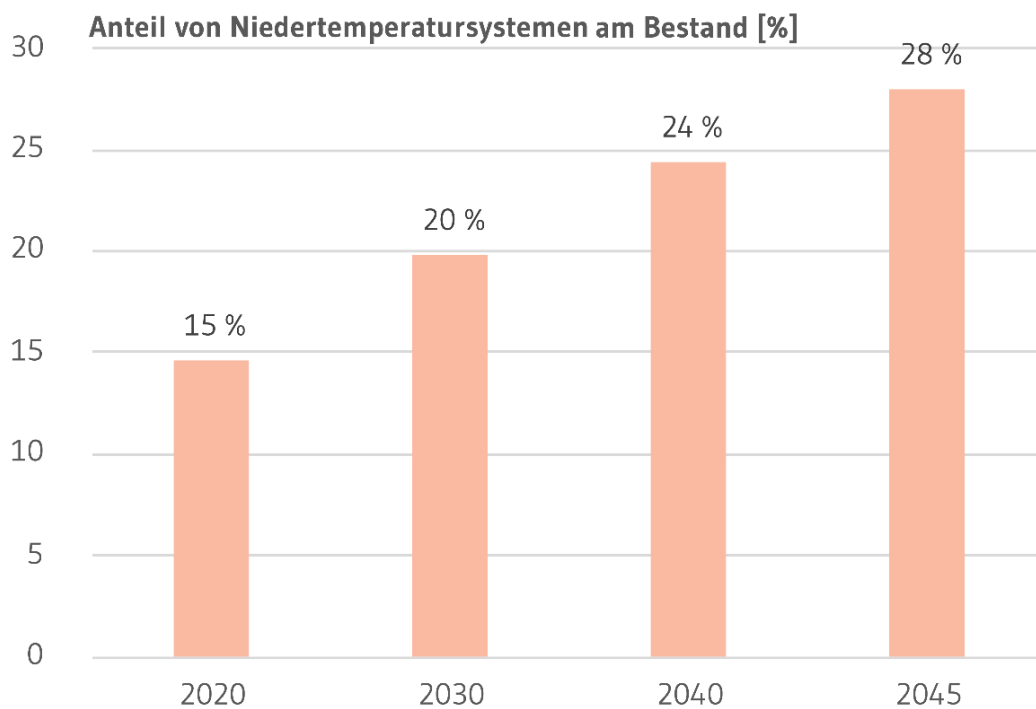


Abbildung 3.9: Entwicklung des Anteils von Niedertemperatursystemen (35°C Vorlauftemperatur) an Bestandsgebäuden (ohne Neubau) im Technologiemix-Szenario.

Rolle der beheizten Wohnfläche

Dieser Abschnitt analysiert den Einfluss einer effizienten Nutzung von Wohnraum auf das Energiesystem. Um dieser Frage nachzugehen, wurde ein Vergleichsszenario *Technologiemix Efficiency* zum *Technologiemix*-Szenario betrachtet, unter der Annahme einer Reduktion der beheizten Wohnfläche. Während in allen Szenarien die Anzahl der Gebäude/Anschlüsse von Heiztechnologien von 2020 bis 2050 um 5 % steigt, nimmt sie im Szenario *Technologiemix-Efficiency* um 3,5 % ab. Dies steht im Kontrast zu den aktuellen Entwicklungen, die zeigen, dass Effizienzgewinne in Wohngebäuden fast vollständig durch eine steigende Wohnfläche kompensiert werden (BMWi, 2020b). Auch die meisten Prognosen zeigen, dass sich der Trend der steigenden Wohnfläche in Zukunft fortführt (Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR), 2015).

Das Szenario *Technologiemix Efficiency* arbeitet auch in den Sektoren Verkehr und Industrie mit sinkender Energienachfrage, um die Auswirkung von Verhaltensänderung in relevanter Breite zu untersuchen. Die zentralen Annahmen entsprechen denen des Szenarios „Suffizienz“ in der Studie „Wege zu einem klimaneutralen Energiesystem“ (Sterchele et al., 2020).

	Durchschnittlicher jährlicher Zubau im Vergleich zum <i>Technologiemix</i> -Szenario (2022-2030)	Kumulierter Zubau im Vergleich zum <i>Technologiemix</i> -Szenario (2022-2050)
Wärmenetze	- 11,4 %	- 14,5 %
Luft-Wärmepumpen	- 23,3 %	- 2,7 %
Gaskessel	+ 18 %	+ 6,4 %

Tabelle 3.3: Einfluss eines geringeren Pro-Kopf-Verbrauchs beheizter Wohnfläche auf den Zubau von Fernwärmeanschlüssen, Luft-Wärmepumpen und Gaskesseln.

Die Endenergienachfrage im Gebäudesektor würde sich durch die getroffene Annahme im Jahr 2050 gegenüber dem Vergleichsszenario um ca. 120 TWh reduzieren. Der Trend der Zusammensetzung der Heizsysteme ist robust gegenüber dem Vergleichsszenario und setzt sich bis zum Jahr 2045 vorrangig aus Wärmepumpen und defossilisierter Fernwärme zusammen. Ein Unterschied ergibt sich jedoch wie erwartet bei den absoluten Markthochläufen der Heiztechnologien. Die Unterschiede im Zu-/Rückbau von Wärmenetzen, Luft-Wärmepumpen sowie Gaskessel, ist in Tabelle 2.5 dargestellt. Kumulativ wird die Transformation des Bestands der Heiztechnologien im Szenario *Technologiemix-Efficiency* in den Jahren 2022-2050 um 18 % günstiger als im *Technologiemix*-Szenario. Trotz der höheren Sanierungsaktivitäten werden durch die Reduktion der Wohnfläche die Sanierungsmaßnahmen um 12 % günstiger.

Der im Modell vorgegebene mögliche Korridor für die Sanierungsrate ist Tabelle 3.4 dargestellt. In beiden Szenarien zeigt sich, dass Sanierungsaktivitäten vor allem in den Jahren von 2022 bis 2030 eine schnelle Möglichkeit sind, durch den damit einhergehenden geringeren Energiebedarf CO₂-Emissionen einzusparen. Ab dem Jahr 2035 wird in beiden Szenarien nur noch die minimal erforderliche Sanierungsrate ausgeschöpft.

		2021	2030	2040	2045
Technologiemix-Efficiency	Min	1 %	1 %	2 %	2 %
	Max	1 %	2 %	3 %	3 %
	Ergebnis	1 %	1,7 %	2 %	2 %
Technologiemix	Min	1 %	1 %	1 %	1 %
	Max	1 %	2,5 %	2,5 %	2,5 %
	Ergebnis	1 %	1,9 %	1 %	1 %

Tabelle 3.4: Korridor für die Sanierungsrate in den Szenarien Technologiemix und Technologiemix-Efficiency.

3.7 Prioritäten für den Zeithorizont 2030

Zusammenfassend aus der Analyse des Wärmesektors ergeben sich folgende Prioritäten für den Zeitraum bis 2030 für die Minderung der Treibhausgasemissionen um 65 % gegenüber dem Jahr 1990. Substanzielle Emissionsminderungen sind durch die beiden Säulen „Energieträgerwechsel“ und „Energetische Gebäudesanierung“ zu erreichen. Daher sind folgende Zielmarken anzustreben:

- Elektrische Wärmepumpen als zentrale Heizungstechnologie in Bestand und Neubau deutlich stärker zuzubauen (bis 2030 ca. 400.000 Stück jährlich, vgl. Szenario *Technologiemix*)
- Die Fernwärme ausbauen und defossilisieren (bis 2030 ca. 160.000 Neuanschlüsse jährlich, vgl. Szenario *Technologiemix*)
- Der Szenario Vergleich zeigt die robuste Ausschöpfung des maximal angenommenen Anstiegs der Sanierungsrate von 1 % auf 2,5 % bis zum Jahr 2030 (im Durchschnitt der Jahre 2022-2030 1,9 %).
- Die Rechnungen der kostenoptimalen Systemzusammensetzung zeigt, dass eine Sanierungstiefe von -50 % Reduktion (KfW-70 bis -55) systemoptimal ist, während die Option

der Vollsanierung (Passivhausstandard; KfW-40) nur in dem Fall gezogen wird, wenn andere Dekarbonisierungslösungen, wie der Ausbau Erneuerbarer, nur in begrenztem Maße zur Verfügung stehen. Durch die begrenzte Sanierungsrate bis zum Jahr 2030 sollten mindestens etwa 56 % des Gebäudebestands mit mindestens KfW-70 bis -55 saniert sein. Zudem sind niederschwellige Sanierungen, wie der Austausch von Heizsystemen zur Reduktion der Vorlauftemperaturen, Bestandteil der kostenoptimalen Lösung. Bis zum Jahr 2030 wird die Anzahl der Bestandsgebäude mit Vorlauftemperaturen von 35°C nahezu verdoppelt.

- Die Reduktion der Pro-Kopf-Fläche und Anhebung der minimalen Sanierungsrate führt zu einer Kostenreduktion bei der Umstellung der Heiztechnologien und der Sanierungsaktivitäten.

3.8 Welche Instrumente und Maßnahmen sind für die Zielerreichung besonders wichtig?

Um die genannten Herausforderungen zu adressieren, die für ein Erreichen der Klimaziele des Gebäudesektors auf Basis der Modellrechnungen als notwendig erachtet werden, bedarf es einer Weiterentwicklung des bisherigen politischen Rahmens. Es steht ein breites und vielfältiges Spektrum an Instrumenten zur Verfügung, das von finanzieller Förderung, energetischer Gebäudeberatung über regulatorische Anforderungen, beispielsweise im Rahmen des Gebäudeenergiegesetzes (GEG), hin zur Bepreisung von CO₂ im Verkehrs- und Gebäudesektor reicht. Dennoch entsprechen die jährlichen Emissionsminderungen nicht dem, was für einen klimaneutralen Gebäudebestand geboten ist. Politische Instrumente sollten dabei insbesondere folgende (bereits oben identifizierte) Handlungsfelder adressieren: eine Steigerung der energetischen Sanierungsrate und mittleren Sanierungstiefe sowie ambitioniertere energetische Standards im Neubau, einen Energieträgerwechsel von fossilen zu erneuerbaren Wärmeversorgungssystemen (dezentral und in Wärmenetzen) sowie einen deutlich stärkeren Ausbau der Wärmenetze als dies aktuell der Fall ist (Engelmann et al., 2021; Steinbach et al., 2021). Herausfordernd für die Ausgestaltung politischer Instrumente sind im Gebäudesektor insbesondere heterogene Akteurs- und Gebäudestrukturen, und damit auch die Komplexität der jeweilig zugrunde liegenden individuellen Entscheidungen in Bau, energetische Sanierungen und Modernisierungen (Engelmann et al., 2021). Neben einer Anpassung bestehender Instrumente und der Neueinführung möglicher weiterer Instrumente, bedarf es einer Überprüfung der Konsistenz der Instrumente hinsichtlich ihres gemeinsamen Wirkens. Insbesondere sollte verhindert werden, dass Instrumente konträr zueinander wirken und ihre Lenkungswirkung dabei (in Teilen) aufheben.

Es besteht zu großen Teilen Konsens darüber, dass der intendierte Mechanismus des Brennstoffemissionshandelsgesetz (BEHG) ein wichtiger Pfeiler zur Erfüllung der sektorspezifischen Emissionsziele durch das Klimaschutzgesetz bis 2045 ist (Edenhofer et al., 2019; EWI and FiFo, 2019; Öko-Institut and Hamburg Institut, 2021). Gleichzeitig werden durch eine CO₂-Bepreisung nicht alle Herausforderungen gleichermaßen und in hinreichender Weise adressiert, weshalb es einer Einbettung dieses Instruments in einen politischen Rahmen bedarf (EWI and FiFo, 2019). Ein Mix an Instrumenten aus den Bereichen Ordnungsrecht und finanzieller Förderung, die jeweils auf Zielkompatibilität ausgerichtet sind, sowie Beratungs- und Informationsmaßnahmen ist notwendig, um die verschiedenen Hemmnisse der Wärmewende des Gebäudesektors tatsächlich zu bewältigen. Neben Instrumenten, die primär auf eine Defossilisierung des Gebäudesektors abzielen, ist zudem essenziell, die Sozialverträglichkeit der Wärmewende sicherzustellen. Dies kann im Rahmen spezifischer Instrumente zur Abfederung sozialer Härten, aber auch, insofern möglich, einer unmittelbaren sozialverträglichen Ausgestaltung der jeweiligen Klimaschutz-Instrumente erfolgen. Im Rahmen des Ariadne-Projekts wurde bereits ein zweiteiliges Hintergrundpapier veröffentlicht, in welchem perspektivisch mögliche Instrumente für die Wärmewende aufgezeigt und diese auf Basis von Literatur hinsichtlich ihrer Klimaschutz- und Verteilungswirkung beschrieben wurden (Berneiser et al., 2021; Meyer et al., 2021). Zudem wurden die ausgewählten Instrumente von verschiedenen Stakeholdern in den Dimensionen Klimaschutzwirkung, Verteilungswirkung, ökonomische Effizienz, gesellschaftliche Akzeptanz und politische Umsetzbarkeit bewertet.

Auf Basis der Ergebnisse wurden perspektivisch mögliche, zentrale politische Instrumente identifiziert und deren mögliches Zusammenwirken diskutiert. Im Folgenden werden aus den unter anderem daraus erlangten Erkenntnissen Elemente für eine konsistente Klimaschutzpolitik für Gebäudewärme beschrieben.

- Die verschiedenen Instrumente übergreifend sollte ein **Zielfahrplan** entwickelt werden, durch welchen die notwendige energetische Entwicklung des Gebäudesektors gemonitort bzw. evaluiert wird (Engelmann et al., 2021). Dies ermöglicht eine frühzeitige Nachjustierung von Instrumenten und bietet Planungs- und Investitionssicherheit für Eigentümerinnen und Investoren. Bau- und Sanierungsaktivitäten können so transparenter auf Zielkonformität überprüft werden.
- Neben der Etablierung eines Zielfahrplans sollten auch weitere Planungsinstrumente (verbindlich) implementiert werden, so **gebäudeindividuelle Sanierungsfahrpläne** (iSFP) und eine **strategische kommunale Wärmeplanung**. Dadurch werden informierte Ent-

scheidungen ermöglicht und die Koordination einer Vielzahl an möglichen oder notwendigen Maßnahmen für einzelne Gebäude, aber auch Quartiere und Kommunen, unterstützt (für einen Überblick zur strategischen kommunalen Wärmeplanung siehe Köhler et al., 2021). Im Bereich der verpflichtenden kommunalen Wärmeplanung können somit Investitionen in den Ausbau der netzgebundenen Wärmeversorgung langfristig geplant und angereizt werden. Insgesamt kann durch Planungsinstrumente ein effizienter Einsatz finanzieller Mittel sichergestellt werden, was insbesondere für Technologien mit hohen Investitionskosten (wie beispielsweise der Wärmenetzaus- und -umbau) sinnvoll ist.

- In der Kategorie *Steuern und Abgaben* ist insbesondere die Entwicklung des CO₂-Preispfades hervorzuheben. Es bestehen unterschiedliche Aussagen darüber, wie hoch der **CO₂-Preis** im Gebäudesektor ausfallen müsste, um eine ausreichende Lenkungswirkung zu entfalten. Konsens besteht jedoch darüber, dass ein deutlich höherer Preis notwendig ist als bisher im BEHG bis 2025 vorgesehen (siehe bspw. Bach et al., 2019; Frondel, 2019; Ragwitz et al., 2021). Je höher der CO₂-Preis jedoch ausfällt, desto entscheidender werden entsprechende Rückverteilungsmechanismen und Maßnahmen zur Abfederung sozialer Härten. Möglichkeiten sind dabei etwa eine Pro-Kopf-Rückverteilung der Mehreinnahmen und die (bereits beschlossene) Deckelung bzw. perspektivische Absenkung der EEG-Umlage (Geichert et al., 2019). Im vermieteten Wohnungsbestand reizt die derzeitige vollständige Übernahme der CO₂-Preis Mehrkosten durch die Mieterinnen zwar energie-sparendes Verhalten an, Investitionen in erneuerbare Wärmeversorgungssysteme und energetische Sanierungen, wenn überhaupt, jedoch nur auf indirektem Weg (z. B. durch eine höhere Nachfrage nach Wohnungen mit hohen Effizienzstandards) (Keimeyer et al., 2020). Um die proklamierte Lenkungswirkung durch vorausschauendes Investitionsverhalten zu entfalten, bedarf es insbesondere der frühzeitigen Kommunikation der Preis-pfade.

Darüber hinaus kann die Ausrichtung der Höhe der Grund- und Grunderwerbssteuer bei Eigentumswechsel an der Energieeffizienz eines Gebäudes die Attraktivität von energetisch hochwertigen Immobilien fördern (siehe bspw. Henger, 2020; Prognos et al., 2015).

- Aus *ordnungsrechtlicher* Sicht bedarf es insbesondere einer Neuaufsetzung des **Gebäudeenergiegesetzes GEG** (ifeu et al., 2021). Dabei sollte unter anderem eine Umstellung auf CO₂ als Bewertungsmaßstab für die Erfüllung von Anforderungen erfolgen und Emissionsfaktoren anhand der während der Betriebsdauer zu erwartenden CO₂-Emissionen berechnet werden (Ragwitz et al., 2021). Zudem bedarf es ambitionierterer Anforderun-

gen an Neubau sowie langfristig adäquater energetischer Anforderungen an Bestandsgebäude (ifeu et al., 2021). Um individuell auftretende Belastungen abzufedern, könnte eine Förderung hoher Effizienzstandards trotz energetischer Vorgaben ermöglicht werden (ifeu et al., 2021; Klinski, 2021). Der Einbau von Öl- und Kohleheizungen wird im derzeitigen GEG zwar bereits verboten, jedoch mitsamt weitreichenden Ausnahmeregelungen. Perspektivisch bedarf es neben einer Einschränkung der Ausnahmen voraussichtlich auch an Obergrenzen für lebenszyklusbezogene THG-Intensitäten für alle Heizkessel mit fossilen Brennstoffen (ifeu et al., 2021) und/oder ggf. auch an Installations- und Betriebsverboten von Gasheizungen. Zur Förderung des Ausbaus und Defossilisierung der Wärmenetze wäre es sinnvoll, dass in der **Wärmelieferverordnung** (WärmeLV) geforderte Verfahren zur Darstellung der Kostenneutralität bei Umstellung auf einen Wärmeliefervertrag abzuschwächen: Bei Umstellung auf eine klimafreundlichere Wärmeherzeugung (beispielsweise durch Großwärmepumpen, Geothermie, Solarthermie) sollte eine begrenzte Kostensteigerung zulässig sein (Ragwitz et al., 2021). Zudem könnte ein sukzessiv anwachsender Mindestanteil an erneuerbaren Energien und Abwärme in Fernwärmesystemen (z. B. als Ergänzung zu einer verlässlichen Förderung von Investitions- und Betriebskosten) eingeführt werden.

- Im Bereich der **Förderinstrumente** sollten alle Förderungen für nicht zielkompatible Technologien und Standards auslaufen (das heißt Förderungen von Technologien mit CO₂-Emissionen, beispielsweise auch Gasbrennwertkessel, oder Sanierungs- und Effizienzmaßnahmen, die nicht zielkompatibel sind). Um sozialen Härten zu entgegenen, könnten die jeweiligen Fördersummen zudem an Einkommen und Vermögen ausgerichtet werden. Weiterhin könnte die steuerliche Förderung von energetischen Gebäudesanierungen, die seit 2020 für Selbstnutzende gilt, auch auf Mietobjekte ausgeweitet werden.
- Perspektivische **informativische Instrumente** sollten sowohl individuelle spezifische Informationsbereitstellung, beispielsweise im Rahmen eines verpflichtenden individuellen Sanierungsfahrplans (iSFP), sowie Maßnahmen zur Behebung des Fachkräftemangels umfassen. Durch Letzteren bzw. einen Mangel an Nachwuchs in Handwerk, Planung und Heizungsindustrie wird die Umsetzbarkeit der Wärmewende gefährdet. Möglichkeiten zur Fachkräftegewinnung sind zum Beispiel Nachwuchs- und Umschulungsprogramme, Maßnahmen zur Erhöhung der Attraktivität der Berufe durch Gleichwertigkeit der Abschlüsse sowie die Anpassung der Aus- und Weiterbildungsprogramme von Handwerkern an zielkompatible Technologien (Ragwitz et al., 2021).

- Großes Potenzial zur THG-Einsparung liegt zudem in Suffizienzmaßnahmen bzw. Instrumenten, die (über den CO₂-Preis hinweg) energiesparendes und flächensparendes Verhalten belohnen (bspw. zur Eindämmung von Rebound-Effekten und Begrenzung der kontinuierlich ansteigenden Wohnfläche pro Person, siehe Fischer et al., 2016; Kenkmann et al., 2019). Bisher spielen solche Aspekte im politischen Instrumentarium eine stark untergeordnete Rolle.

Literaturangaben

- Bach S, Isaak N, Kemfert C, Kunert U, Schill W-P, Wagner N, Zaklan A, 2019. Für eine sozialverträgliche CO₂-Bepreisung Forschungsvorhaben „CO₂-Bepreisung im Wärme- und Verkehrssektor: Diskussion von Wirkungen und alternativen Entlastungsoptionen“: im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU). [Aufruf am: 30.09.2021] URL: https://www.diw.de/documents/publikationen/73/diw_01.c.635193.de/diwkompakt_2019-138.pdf.
- Berneiser J, Burkhardt A, Alexander R, Köhler B, Meyer R, Sommer S, Yilmaz Y, Herkel S, 2021. Maßnahmen und Instrumente für eine ambitionierte, klimafreundliche und sozialverträgliche Wärmewende im Gebäudesektor – Teil 1: Analyse der Herausforderungen und Instrumente im Gebäudesektor. Ariadne-Hintergrund. [Aufruf am: 30.09.2021] URL: <https://ariadneprojekt.de/publikation/herausforderungen-und-instrumente-im-gebuedesektor/>.
- BMWi, 2020b. Energieeffizienz in Zahlen 2020. Entwicklungen und Trends in Deutschland 2020. [Aufruf am: 30.09.2021] URL: <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/energieeffizienz-in-zahlen-2020.html>.
- Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) (Hrsg), 2015. Wohnungsmarktprognose 2030. BBSR-Analysen KOMPAKT 07/2015. [Aufruf am: 30.09.2021] URL: <https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/forschung/fachbeitraege/wohnen-immobilien/wohnungsmarktprognose/Prognose2030/Prognose2030.html>.
- Cischinsky H, Diefenbach N, IWU, 2018. Datenerhebung Wohngebäudebestand 2016. Datenerhebung zu den energetischen Merkmalen und Modernisierungsraten im deutschen und hessischen Wohngebäudebestand. [Aufruf am: 30.09.2021] URL: https://www.iwu.de/fileadmin/user_upload/dateien/gebaeudebestand/prj/Endbericht_Datenerhebung_Wohngeb%C3%A4udebestand_2016.pdf.
- Deutsche Energie-Agentur (dena), 2021. dena-Gebaudebericht 2021 – Fokusthemen zum Klimaschutz im Gebäudebereich. [Aufruf am: 30.09.2021] URL: https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2021/dena-GEBAEUDEBEREICH_2021_Fokusthemen_zum_Klimaschutz_im_Gebaeudebereich.pdf.
- Edenhofer O, Flachsland C, Kalkuhl M, Knopf B, Pahle M, 2019. Optionen für eine CO₂-Preisreform. MCC-PIK-Expertise für den Sachverständigenrat zur Begutachtung der gesamtwirtschaftlichen Entwicklung. [Aufruf am: 30.09.2021] URL: https://www.mcc-berlin.net/fileadmin/data/B2.3_Publications/Working%20Paper/2019_MCC_Optionen_f%C3%BCr_eine_CO2-Preisreform_final.pdf.
- ERK, 2021. Bericht zur Vorjahresschatzung der deutschen Treibhausgasemissionen für das Jahr 2020. Prüfung und Bewertung der Emissionsdaten gemäß § 12 Abs. 1 Bundes-Klimaschutzgesetz. [Aufruf am: 30.09.2021] URL: https://expertenrat-klima.de/content/uploads/2021/04/210415_Bericht_Expertenrat_Klimafragen_2021.pdf.
- Engelmann P, Köhler B, Meyer R, Dengler J, Herkel S, Kießling L, Quast A, Berneiser J, Bär C, Sterchele P, et al., 2021. Systemische Herausforderung der Wärmewende. In: Umweltbundesamt (Hrsg) Climate Change 18/2021 [Aufruf am: 30.09.2021] URL: <https://www.umweltbundesamt.de/en/publikationen/systemische-herausforderung-der-waermewende>.
- EWI, FiFo, 2019. CO₂-Bepreisung im Gebäudesektor und notwendige Zusatzinstrumente. In: Energiewirtschaftliches Institut an der Universität zu Köln gGmbH (Hrsg) [Aufruf am: 30.09.2021] URL: <https://www.ewi.uni-koeln.de/de/publikationen/co2-bepreisung-im-gebuedesektor-und-notwendige-zusatzinstrumente/>.

- Fischer C, Blanck R, Brohmann B, Cludius J, Förster H, Heyen DA, Hünecke K, Keimeyer F, Kenkmann T, Scheicher T, et al., 2016. Konzept zur absoluten Verminderung des Energiebedarfs: Potenziale, Rahmenbedingungen und Instrumente zur Erreichung der Energieverbrauchs-ziele des Energiekonzepts. *Climate Change*, 17/2016. [Aufruf am: 30.09.2021] URL: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/climate_change_17_2016_konzept_zur_absoluten_verminderung_des_energiebedarfs.pdf.
- Frondel M, 2019. CO₂-Bepreisung in den nicht in den Emissionshandel integrierten Sektoren. RWI - Leibniz-Institut für Wirtschaftsforschung, Essen, Germany (RWI Materialien Diskussionspaper) [Aufruf am: 30.09.2021] URL: <http://www.rwi-essen.de/publikationen/rwi-materialien/464/>.
- Geichert S, Rietzler K, Schreiber S, Stein U, 2019. Wirtschaftliche Instrumente für eine klima- und sozialverträgliche CO₂-Bepreisung: Gutachten im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit. *IMK Study*, No. 65. [Aufruf am: 30.09.2021] URL: <https://www.econstor.eu/bitstream/10419/206808/1/1677239328.pdf>.
- Henger R, 2020. Kommt eine mutlose Grundsteuerreform? -Simulations- und Wirkungsanalyse verschiedener Reformmodelle.
- Hörner M, 2021. Der Bestand der Nichtwohngebäude in Deutschland: Daten und Fakten. Abschlussvortrag am 28.04.2021 zu ENOB:dataNWG. [Aufruf am: 30.09.2021] URL: https://www.datanwg.de/fileadmin/user/iwu/210428_IWU_PT_dataNWG_DatenundFakten.pdf.
- ifeu, EEI, schulde darup, 2021. Neukonzeption des Gebäudeenergiegesetzes (GEG 2.0) zur Erreichung eines klimaneutralen Gebäudebestandes. [Aufruf am: 30.09.2021] URL: https://www.ifeu.de/fileadmin/uploads/2021_04_GEG_2.0_BET_V2_4_.pdf.
- Keimeyer F, Klinski S, Braungardt S, Bürger V, 2020. Begrenzung der Umlagemöglichkeit der Kosten eines Brennstoff- Emissionshandels auf Mieter*innen - Kurzstudie. [Aufruf am: 30.09.2021] URL: <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Kurzstudie-Umwaelzung-CO2-Bepreisung.pdf>.
- Kenkmann T, Cludius J, Fischer C, Fries T, Keimeyer F, Schumacher K, Brischke L-A, Leuser L, 2019. Flächensparend Wohnen. *Texte* 104/2019. Öko-Institut, Freiburg / Darmstadt / Berlin [Aufruf am: 30.09.2021] URL: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/flaechensparend-wohnen>.
- Klinski S, 2021. Zu den Möglichkeiten der öffentlichen Förderung im Bereich bestehender gesetzlicher Pflichten („Fördern trotz Fordern“). [Aufruf am: 30.09.2021] URL: https://deneff.org/wp-content/uploads/2021/08/Klinski_Expertise_Fo%CC%88rdern_und_Fordern_2021-03-09_final.pdf.
- Köhler B, Bürger V, Weidinger R, Doderer H, Schäfer-Stradowsky S, Tänzler D, 2021. Strategische kommunale Wärmeplanung. *Ariadna Analyse*. [Aufruf am: 30.09.2021] URL: <https://ariadneprojekt.de/publikation/analyse-strategische-kommunale-waermeplanung/>.
- Meyer R, Berneiser J, Burkhardt A, Doderer H, Eickelmann E, Henger R, Köhler B, Sommer S, Yilmaz Y, Blesl M, et al., 2021. Maßnahmen und Instrumente für eine ambitionierte, klimafreundliche und sozialverträgliche Wärmewende im Gebäudesektor – Teil 2: Instrumentensteckbriefe für den Gebäudesektor. *Ariadne-Hintergrund*. [Aufruf am: 30.09.2021] URL: <https://ariadneprojekt.de/news/instrumenten-vielfalt-in-der-waermewende-viele-wege-aber-welcher-fuehrt-ans-ziel/>.
- Öko-Institut, Hamburg Institut, 2021. *Agenda Wärmewende 2021*. [Aufruf am: 30.09.2021] URL: <https://www.stiftung-klima.de/app/uploads/2021/06/2021-06-10-Waermewende-2021.pdf>.
- Prognos, ifeu, IWU, 2015. *Hintergrundpapier zur Effizienzstrategie Gebäude*. , Berlin, Heidelberg, Darmstadt [Aufruf am: 30.09.2021] URL: https://www.prognos.com/sites/default/files/2021-01/20151220_prognos_hintergrundpapier_ees.pdf.

- Ragwitz M, Henning H-M, Billerbeck A, Bracke R, Bradke H, Fleiter T, Gerhardt N, Held A, Herkel S, Kost C, et al., 2021. 7 Empfehlungen zum Gelingen der Energiewende. [Aufruf am: 30.09.2021] URL:
https://www.cines.fraunhofer.de/de/jcr:content/contentPar/teaser_overview/teaserPar/teaser_542074243/linklistParsys/downloadcomponent/file.res/Fraunhofer_CINES_7%20Empfehlungen.pdf.
- Statistisches Bundesamt (DESTATIS) (Hrsg), 2020. Fachserie 3 Reihe 1: Bevölkerung und Erwerbstätigkeit - Haushalte und Familien. Ergebnisse des Mikrozensus. [Aufruf am: 30.09.2021] URL: https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Bevoelkerung/Haushalte-Familien/Publikationen/_publikationen-innenhaushalte.html.
- Statistisches Bundesamt (DESTATIS) (Hrsg), 2021. Fachserie 5 Reihe 3: Bautätigkeit und Wohnungen - Bestand an Wohnungen. [Aufruf am: 30.09.2021] URL:
https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Wohnen/Publikationen/Downloads-Wohnen/bestand-wohnungen-2050300207004.pdf;jsessionid=A7D8E95B4791CB0FDF2F4B664F949ECF.live742?__blob=publicationFile.
- Steinbach J, Deurer J, Senkpiel C, Brandes J, Berneiser J, Kost C, 2021. Wege zur Erreichung eines klimaneutralen Gebäudebestandes 2050. [Aufruf am: 30.09.2021] URL:
https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/veroeffentlichungen/bbsr-online/2021/bbsr-online-23-2021-dl.pdf;jsessionid=73531272080617B321FED614B90E8ED3.live11311?__blob=publicationFile&v=2.
- Sterchele P, Brandes J, Heilig J, Wrede D, Kost C, Schlegl T, Bett A, Henning H-M, 2020. Studie: Wege zu einem klimaneutralen Energiesystem - Die deutsche Energiewende im Kontext gesellschaftlicher Verhaltensweisen. [Aufruf am: 30.09.2021] URL:
<https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/veroeffentlichungen/bbsr-online/2021/bbsr-online-23-2021.html>.
- UBA, 2021d. Vorjahresschätzung der deutschen Treibhausgas Emissionen für das Jahr 2020. Stand 15.03.2021. [Aufruf am: 26.08.2021] URL:
https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/361/dokumente/2021_03_10_trendtabellen_thg_nach_sektoren_v1.0.xlsx



Der rote Faden durch die Energiewende: Das Kopernikus-Projekt Ariadne führt durch einen gemeinsamen Lernprozess mit Politik, Wirtschaft und Gesellschaft, um Optionen zur Gestaltung der Energiewende zu erforschen und politischen Entscheidern wichtiges Orientierungswissen auf dem Weg zu einem klimaneutralen Deutschland bereitzustellen.

Folgen Sie dem Ariadnefaden:

 @AriadneProjekt

 ariadneprojekt.de

Mehr zu den Kopernikus-Projekten des BMBF auf kopernikus-projekte.de

Wer ist Ariadne? Durch den Faden der Ariadne gelang Theseus in der griechischen Mythologie die sichere Navigation durch das Labyrinth des Minotaurus. Dies ist die Leitidee für das Energiewende-Projekt Ariadne. Im Konsortium von mehr als 25 Forschungseinrichtungen führt Ariadne durch einen gemeinsamen Lernprozess mit Politik, Wirtschaft und Gesellschaft, erforscht Optionen zur Gestaltung der Energiewende und erarbeitet wichtiges Orientierungswissen für politische Entscheider. Wir sind Ariadne:

adelphi | Brandenburgische Technische Universität Cottbus – Senftenberg (BTU) | Deutsche Energie-Agentur (dena) | Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung (DIW) | Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) | Ecologic Institute | Fraunhofer Cluster of Excellence Integrated Energy Systems (CINES) | Guidehouse Germany | Helmholtz-Zentrum Hereon | Hertie School | Hochschule für Wirtschaft und Umwelt Nürtingen-Geislingen (HfWU) | ifok | Institut der deutschen Wirtschaft Köln | Institut für Klimaschutz, Energie und Mobilität | Institute For Advanced Sustainability Studies (IASS) | Mercator Research Institute on Global Commons and Climate Change (MCC) | Öko-Institut | Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK) | RWI – Leibniz-Institut für Wirtschaftsforschung | Stiftung 2° – Deutsche Unternehmer für Klimaschutz | Stiftung Umweltenergierecht | Technische Universität Darmstadt | Technische Universität München | Universität Greifswald | Universität Hamburg | Universität Münster | Universität Potsdam | Universität Stuttgart – Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER) | ZEW – Leibniz-Zentrum für Europäische Wirtschaftsforschung