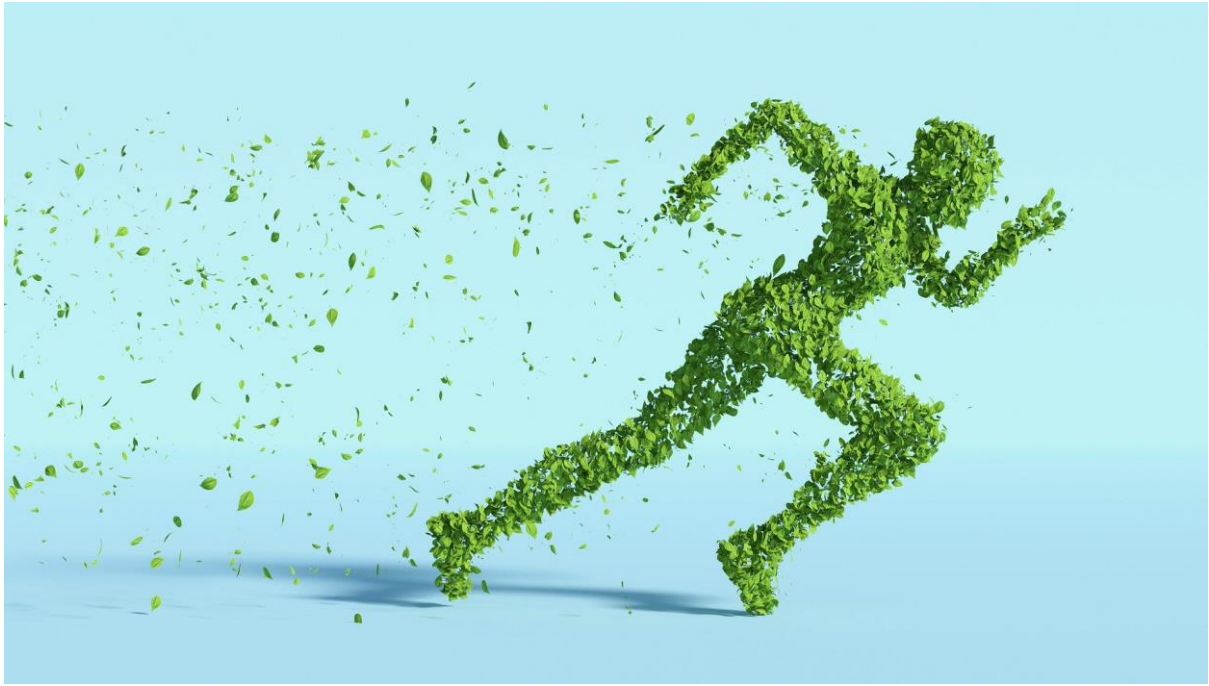


Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland 3

-T45 Welten-

Modul Rahmendaten

Ort: Karlsruhe

Datum: 10.03.2022

Status: Entwurf

Impressum

Langfristszenarien 3

Projektleitung << Impressum Bezeichnung >>

Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI

Breslauer Straße 48, 76139 Karlsruhe
Dr. Frank Sensfuß, frank.sensfuss@isi.fraunhofer.de

Consentec GmbH

Grüner Weg 1, 52070 Aachen
Dr. Christoph Maurer, maurer@consentec.de

Verantwortlich für den Inhalt des Textes

Vorname Nachname, email@isi.fraunhofer.de; Vorname Nachname, email@isi.fraunhofer.de; Vorname Nachname, email@isi.fraunhofer.de; Vorname Nachname, email@isi.fraunhofer.de; Vorname Nachname, email@isi.fraunhofer.de; Vorname Nachname, email@isi.fraunhofer.de

Beteiligte Institute

Consentec GmbH

Grüner Weg 1, 52070 Aachen
Dr. Christoph Maurer, maurer@consentec.de (Administrative Leitung)

Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI

Breslauer Straße 48, 76139 Karlsruhe
Dr. Frank Sensfuß, frank.sensfuss@isi.fraunhofer.de (Projektleitung)
Gerda Deac, gerda.deac@isi.fraunhofer.de (Projektmanagement)

ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg

Wilckensstraße 3, 69120 Heidelberg
Peter Mellwig, peter.mellwig@ifeu.de

Technische Universität Berlin

Straße des 17. Juni 135, 10623 Berlin
Prof. Dr. Joachim Müller-Kirchenbauer, jmk@er.tu-berlin.de

Verfasst im Auftrag von

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWK)

Scharnhorststr. 34-37, 10115 Berlin

Veröffentlicht

November 2022

Hinweise

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

Inhalt

Impressum 2

1 Gebäude (Wohn- und Nichtwohngebäude) 4
1.1 Einleitung 4
1.1 Methodik 4
1.2 Rahmendaten 6
1.2.1 Bilanzrahmen 6
1.2.2 Wohnflächenentwicklung 7
1.2.3 Biomassepotenzial für den Gebäudesektor 8
1.2.4 Gebäude-Szenarien im Überblick 8
1.2.5 Gebäudeeffizienz 9
1.3 Szenario T45-Strom 10
1.3.1 Ziele 10
1.3.2 Ergebnisse 11
1.3.3 Einordnung 13
1.4 Szenario T45-PtG/PtL 13
1.4.1 Ziele 13
1.4.2 Ergebnisse 13
1.4.3 Einordnung 16
1.5 Szenario T45-H_2 16
1.5.1 Ziele 16
1.5.2 Ergebnisse 17
1.5.3 Einordnung 19
1.6 Szenario T45-RedEff 19
1.6.1 Ziele 19
1.6.2 Ergebnisse 19
1.6.3 Einordnung 22
1.7 Szenario T45-RedGas 22
1.7.1 Ziele 22
1.7.2 Ergebnisse 22
1.7.3 Einordnung 24
1.8 Gegenüberstellung einzelner Technologien 25
1.8.1 Wärmenetze 25
1.8.2 Gase 25
1.8.3 Biomasse 26
1.8.4 Strom 27
1.9 Fazit 28

1 Gebäude (Wohn- und Nichtwohngebäude)

1.1 Einleitung

Der Gebäudesektor ist einer der großen Treibhausgasemittenten Deutschlands. Ohne einen grundlegenden Umbau des Gebäudesektors ist die Erreichung der Klimaziele nicht denkbar. Es werden drei Hauptszenarien für den Gebäudesektor untersucht, die sich hinsichtlich der Bedeutung der Energieträger in den Nachfragesektoren analog zu den anderen Sektoren entwickeln:

- T45-Strom
  starker Fokus auf Wärmeversorgung mit elektrischen Wärmepumpen, hohe Gebäudeeffizienz
- T45-PtG/PtL
  hoher Anteil von synthetischem Methan für die Wärmeversorgung, moderate Verbesserung der Gebäudeeffizienz
- T45-H_2
  hoher Anteil von erneuerbarem Wasserstoff für die Wärmeversorgung, moderate Verbesserung der Gebäudeeffizienz

Zusätzlich wurden zwei Unterszenarien untersucht:

- T45-RedEff
  Sensitivität zu T45-Strom mit nur moderater Verbesserung der Gebäudeeffizienz
- T45-RedGas
  sehr rascher Ausstieg aus fossilem Erdgas vor dem Hintergrund des russischen Angriffs auf die Ukraine

Die Szenarioergebnisse beleuchten die Transformationspfade, die sich aus den wechselseitigen Abhängigkeiten der verschiedenen Technologien und den zu erzielenden Transformationsgeschwindigkeiten ergeben.

1.1 Methodik

Die Entwicklungen von Nutz-, End- und Primärenergiebedarf sowie von Treibhausgasemissionen für die Bereitstellung von Raumwärme und Warmwasser im deutschen Gebäudebestand werden mit dem Bottom-up-Modell GEMOD berechnet. Die Berechnung ist eng an die Bilanzierungsverfahren für Einzelgebäude gemäß Gebäudeenergiegesetz (GEG) angelehnt. Der Gebäudebestand wird über eine Gebäudetypologie mit 52 Wohngebäudetypen (angelehnt an die Typologie nach IWU 2015) und 169 Nichtwohngebäudetypen abgebildet. Der Bilanzraum entspricht der Bilanzierung des Klimaschutzplans. Der Gebäudebestand umfasst private Haushalte und Gewerbe, Handel und Dienstleistungen (GHD). Industriegebäude sind nicht in der Gebäudebilanz enthalten, sondern werden im Industriesektor bilanziert.

Auf Basis der Gebäudebaualter und typischer Verteilung der Nutzungsdauern werden die Sanierungszeitpunkte von Bauteilen und technischer Gebäudeausrüstung berechnet. Die Nutzungszyklen können verkürzt werden, jedoch sollen Maßnahmen außerhalb der gegebenen Sanierungszyklen vermieden werden. Nach einer Sanierung sind die Bauteile für einen gewissen Zeitraum von weiteren Maßnahmen ausgenommen. Die Sanierungen werden nach verschiedenen Ambitionsgraden unterschieden in konventionelle, ambitionierte und „Pinselsanierungen". Konventionelle Sanierungen halten die jeweils geltenden Mindestanforderungen ein (GEG), ambitionierte Sanierungen

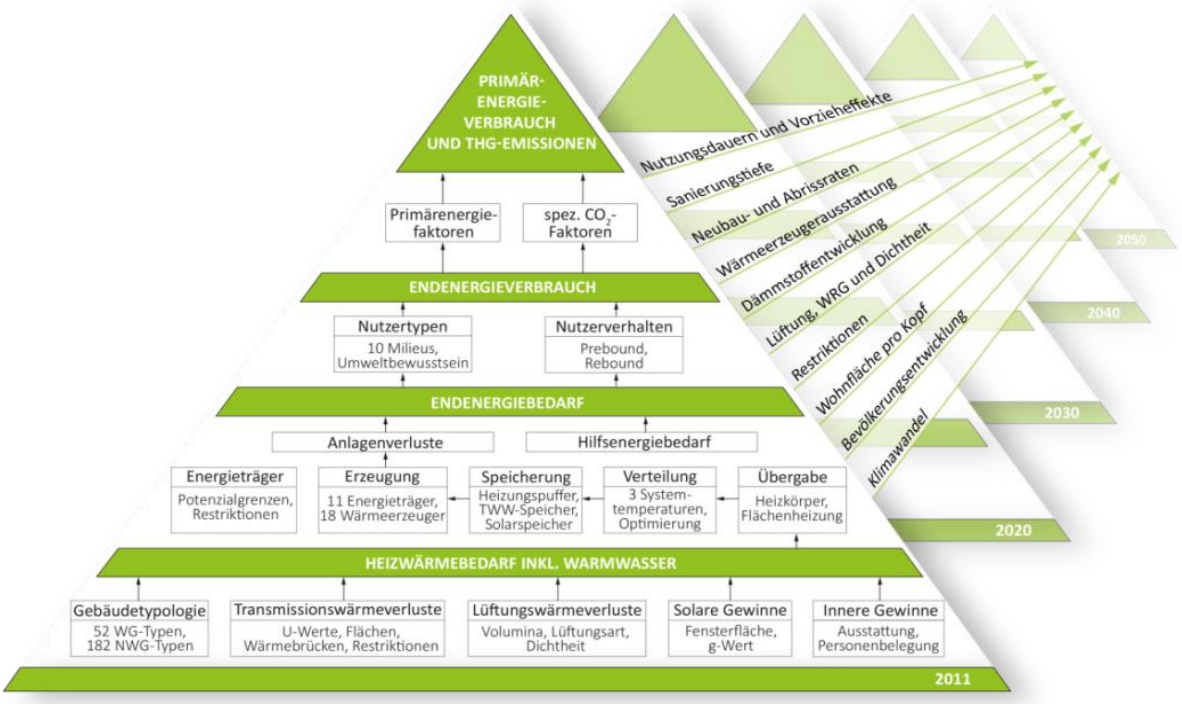
erfüllen die (höheren) Anforderungen bestimmter Förderprogramme (Bundesförderung für effiziente Gebäude (BEG)). Pinselsanierungen führen nicht zu energetischen Verbesserungen.

Das Gebäudemodell GEMOD berechnet den Endenergieverbrauch für Raumwärme und Warmwasser in Gebäuden, unterteilt nach den eingesetzten Energieträgern. Die Abweichungen zwischen dem tatsächlichen Verbrauch und dem berechneten Wärmebedarf werden mit Hilfe empirisch ermittelter Verbrauchsfaktoren (IWU 2015) angepasst. Damit werden typische Verhaltensmuster der Bewohner in Abhängigkeit von der energetischen Gebäudequalität berücksichtigt (Rebound-Effekt, Prebound-Effekt).

GEMOD unterscheidet 15 verschiedene Wärmeerzeuger sowie dezentrale Öfen und thermische Solaranlagen. Wirkungsgrade und Anlagenverluste werden in Abhängigkeit vom Wärmebedarf des jeweiligen Gebäudes berechnet. Welche Wärmeerzeuger installiert werden, kann das Modell endogen entscheiden. Dabei wird neben den Wärmegestehungskosten auch die Trägheit des Marktes berücksichtigt. Die Potenzialgrenzen der einzelnen Heizungstechnologien können exogen vorgegeben werden. In den vorliegenden Szenarien sind die Potenzialgrenzen bestimmend für die Ergebnisse, da sie den Handlungsspielraum maßgeblich beschränken. Um die spezifischen technologischen Schwerpunkte der Szenarien abbilden zu können, müssen die betriebswirtschaftlichen Entscheidungen übergangen werden. Die Szenarien müssten für ihre Realisierung mit entsprechenden politischen Instrumenten flankiert werden – zum Beispiel Fördermittel, Kommunikation oder Ordnungsrecht. Deren Ausgestaltung kann mit der Modellierung jedoch nicht definiert werden, ist aber auch nicht Ziel der Langfristszenarien.

Die Modellergebnisse des Gebäudesektors gehen in die Systemoptimierung des Energiesystems von Deutschland ein, wo die Erzeugungs- und Netzkapazitäten zur Deckung der Verbräuche in allen Sektoren modelliert werden. Der Vergleich der volkswirtschaftlichen Kosten der Szenarien erfolgt auf Ebene der Gesamtsysteme und ist daher nicht Teil dieses Berichts.

Abbildung 1-1: Übersicht über das Gebäudemodell GEMOD



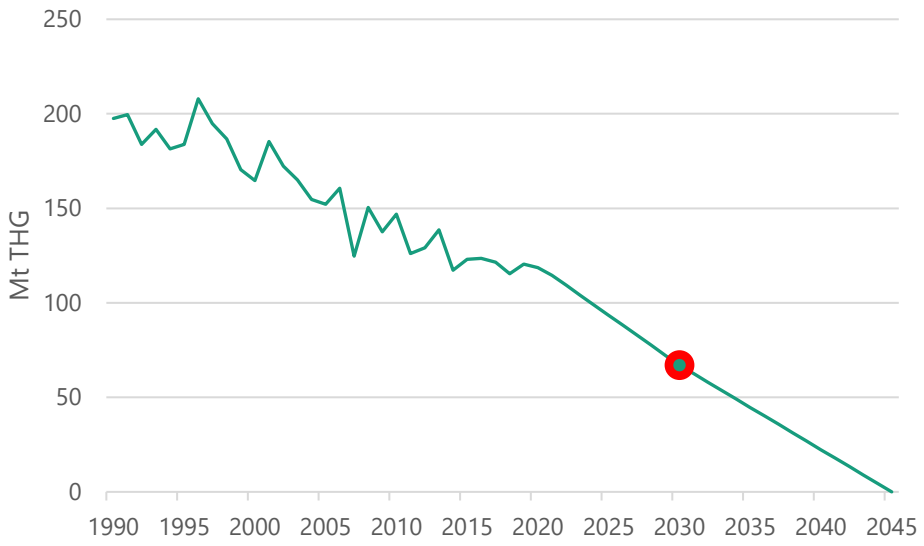
1.2 Rahmendaten

1.2.1 Bilanzrahmen

Der Endenergieverbrauch des Gebäudesektors wird entsprechend der Bilanzgrenzen des Gebäudeenergiegesetzes (GEG) berechnet. Er umfasst den Endenergieverbrauch für Raumwärme und Trinkwarmwasser sowie für Lüftung, und Hilfsenergie. Nicht in der Bilanz enthalten sind Haushaltsstrom, Beleuchtung oder Prozesswärme. Diese werden in den jeweiligen Modellen des Fraunhofer Instituts für System- und Innovationsforschung (ISI) bilanziert. Im Unterschied zur Bilanzierungsrahmen des Gebäudeenergiegesetzes werden auch nicht-handelbare Umweltenergien dargestellt. Dies sind insbesondere Solarthermie und Umweltwärme, die mittels Wärmepumpen der Umgebungsluft und dem Erdreich entzogen und nutzbar gemacht wird.

Alle Gebäudeszenarien halten die Vorgaben des Klimaschutzgesetzes (KSG) für den Gebäudesektor ein. (CRF 1.A.4.b – Haushalte und CRF 1.A.4.a - Gewerbe, Handel, Dienstleistung (ohne Militär und Landwirtschaft)) Diese beziehen sich auf Treibhausgas-Emissionen, die bei der Verbrennung von Brennstoffen in Gebäuden entstehen. Bei dieser Bilanzierung nach dem Quellenprinzip werden die Emissionen aus elektrischem Strom und Fernwärme den Versorgungssektoren zugeordnet und nicht dem Gebäudesektor. Im Jahr 2045 wird das Ziel eines klimaneutralen Gebäudebestands erreicht.

Abbildung 1-2: Treibhausgas-Emissionen des Gebäudesektors, Entwicklung seit 1990 und Zielkurve des Klimaschutzgesetzes mit Zwischenziel von 67 Mt in 2030 (eigene Darstellung auf Basis von UBA 2022)



Es wird unterstellt, dass die Akteure die geltenden gesetzlichen Bestimmungen einhalten. Das betrifft insbesondere die Verpflichtung, bei einer Sanierung von Hüllflächenbauteilen bestimmte Mindeststandards in Bezug auf nachträgliche Dämmung einzuhalten. Gebäude mit so genannten Dämm-Restriktionen, in denen aus technischen oder anderen Gründen keine oder nicht die vollständige Dämmschicht aufgebracht werden kann, sind im Modell berücksichtigt. Bei ihnen wird das technisch mögliche Maß an Dämmung vorgesehen[1].

Weiterhin wird unterstellt, dass die im Koalitionsvertrag[2] angekündigte Verpflichtung, nach der jede neu eingebaute Heizung auf der Basis von 65 Prozent erneuerbarer Energien betrieben werden soll, am 01.01.2024 in Kraft tritt.

1.2.2 Wohnflächenentwicklung

Die Entwicklung der Gesamtwohnfläche in Deutschland wurde auf Grundlage der demografischen Entwicklung und der Fortschreibung der Pro-Kopf-Wohnfläche abgeleitet. Beide Faktoren sind abgestimmt mit dem Nationalen Energie und Klimaplan[3] und dem Projektionsbericht[4]. Die Entwicklung der Wohnflächen ist in Tabelle 1-1 dargestellt.

[1] BHT, ifeu 2012

[2] Koalitionsvertrag 2021— 2025 zwischen der Sozialdemokratischen Partei Deutschlands (SPD), Bündnis 90 / die Grünen und den Freien Demokraten (FDP)

[3] BMWi 2020

[4] Projektionsbericht 2021 für Deutschland

Tabelle 1-1: Wohnflächenentwicklung für private Haushalte

Entwicklung der…	Einheit	2020	2030	2040	2050
Pro-Kopf-Wohnfläche	m^2	45,8	47,9	51,1	52,1
Bewohnte Wohnfläche abzüglich Leerstand	in Mrd. m^2	3,81	4,02	4,27	4,32

In den Szenarien wurde bewusst kein verändertes Nutzerverhalten berücksichtigt, wie es in der Realität durch steigende Energie- und CO_2-Preise oder durch einen angespannten Immobilienmarkt zu erwarten wäre. Lediglich das Nutzerverhalten, das in der Vergangenheit empirisch zu beobachten war, geht in Form eines Verbrauchs/Bedarfs-Abgleichs in die Berechnungen ein. Damit wird abgebildet, dass die Bewohner in effizienteren Gebäuden sich weniger sparsam verhalten als in ineffizienten Gebäuden. Verhaltensänderungen, die darüber hinaus gehen, betreffen vor allem die Entwicklung der Pro-Kopf-Wohnfläche. Die Höhe der Raumtemperaturen und die Lüftungsgewohnheiten werden nicht im Sinne der Zielerreichung verändert. Die Szenarien sind vor allem auf die Modellierung von technischen Lösungswegen fokussiert und sollen nicht durch verhaltensbedingte Aspekte überlagert werden, die die Zielerreichung scheinbar erleichtern würden. Die grundsätzlichen technischen Aussagen behalten trotzdem ihre Gültigkeit. Allerdings könnten Verhaltensänderungen dazu beitragen, die Zielerreichung zu erleichtern, da alle Szenarien technisch äußerst anspruchsvoll sind.

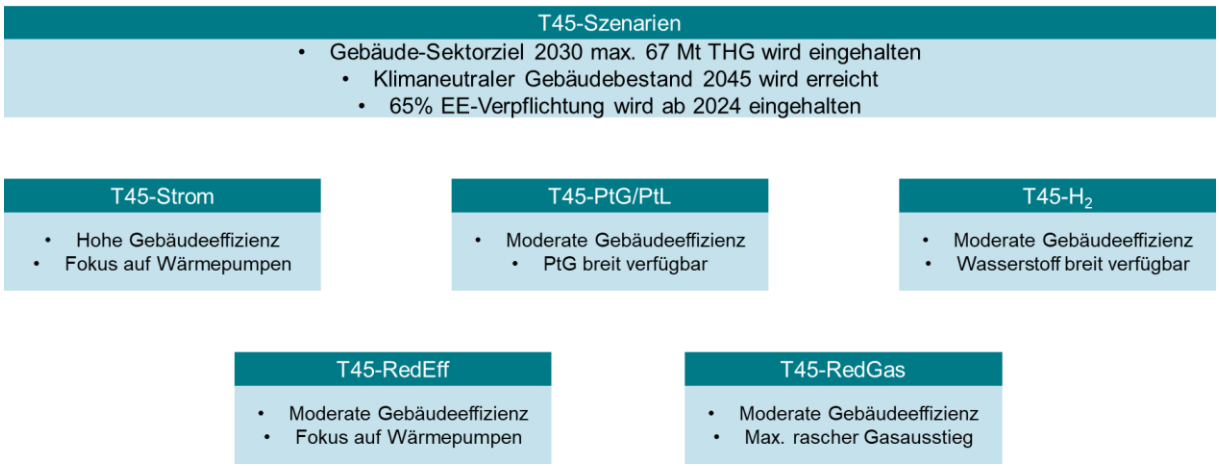
1.2.3 Biomassepotenzial für den Gebäudesektor

Das Biomassepotenzial, das für den Gebäudesektor zur Verfügung steht, wurde im Vergleich zu vorigen Modellierungen der Langfristszenarien vermindert. Das Potenzial von Waldholz für die energetische Nutzung beträgt im Jahr 2045 31 TWh. Diese Menge könnte vorrangig für den Gebäudesektor zur Verfügung stehen. Die Annahmen zur Entwicklung der Randbedingungen, wie der stofflichen Nutzung und der Waldschäden, können jedoch nur grob getroffen werden. Bei einer pessimistischeren Einschätzung der Randbedingungen kann das Potenzial auch bis auf null sinken. Weitere Biomassefraktionen könnten für den Gebäudesektor erschlossen werden, wie beispielsweise Schilf oder Hackschnitzel aus Kurzumtriebsplantagen. Jedoch besteht auch hier eine Nutzungskonkurrenz zu den anderen Sektoren bzw. sind die bestehenden Heizungstechnologien nicht für sie geeignet. Die Berechnung des Biomassepotenzials ist in einem separaten Bericht dargestellt (Frh. ISI et al. 2023). Holzpellet- und Hackschnitzel-Kessel werden in allen Szenarien (außer T45-RedGas) ab 2024 weniger zugebaut und ab 2030 vorrangig in Gebäuden zugebaut, die nur schwierig auf einen guten Effizienzstandard gebracht werden können. Der Verbrauch von Holzpellets, Hackschnitzeln und Scheitholz geht in allen Szenarien deutlich zurück. Auch wenn eine möglichst effiziente Verbrennung der geringen Potenziale anzustreben ist, wird unterstellt, dass Scheitholz für Öfen und Kamine nicht auf null zurückgeht, sondern in ländlichen Gebieten weiterhin eingesetzt wird.

1.2.4 Gebäude-Szenarien im Überblick

Es wurden fünf Szenarien für den Gebäudesektor berechnet. Sie fügen sich in verschiedenen Konstellationen in die Modellierung des Gesamtsystems ein.

Abbildung 1-3: Szenarien für den Gebäudesektor im Überblick



Die Szenarien zeigen unterschiedliche Wege, um die Klimaziele im Gebäudesektor einzuhalten. Dazu wird ein Set von Rahmenbedingungen vorgegeben und die sich daraus ergebende Entwicklung ausgewertet. Die Hauptszenarien T45-Strom, T45-PtG/PtL und T45-H_2 werden ergänzt durch die Sensitivitätsszenarien T45-RedEff und T45-RedGas.

1.2.5 Gebäudeeffizienz

Die Anforderungen an die Gebäudeeffizienz werden exogen vorgegeben. In allen Szenarien steigt das Sanierungsniveau gegenüber den heutigen Anforderungen. Zu diesem Zweck werden die zulässigen Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Werte) gegenüber Anlage 7 des aktuellen Gebäudeenergiegesetzes (in dem die Anforderungen seit 2009 nicht verändert wurden) ab 2025 im Durchschnitt um 23 Prozent verbessert. Dies entspricht etwa den Vorgaben, die im Koalitionsvertrag festgelegt wurden („auszutauschende Teile *sollen* dem Effizienzhaus 70 entsprechen")[5]. Die Anforderungen gelten, sobald eine Sanierung durchgeführt wird. Eine Pflicht zu nachträglichen Dämm-Maßnahmen außerhalb der gegebenen Sanierungszyklen ist nicht vorgesehen. Die Anforderungen an die Dämmung werden nur im Jahr 2025 verschärft und bleiben danach bis 2045 unverändert. Es wäre nicht sinnvoll, die Verschärfung in mehreren zeitlichen Abstufungen durchzuführen. Aufgrund der langen Sanierungszyklen der Bauteile muss schnellstmöglich ein zielorientiertes Dämm-Niveau eingeführt werden. Die Anforderungen werden für jede Bauteilart (Dach, Fassade, Keller, etc.) spezifisch im Rahmen ihrer jeweiligen technischen Möglichkeiten angepasst.

In T45-Strom wird eine höhere Effizienz verwirklicht als in den anderen Szenarien. Sie wird umgesetzt durch höhere Anforderungen an Sanierungen. Die Neubauanforderungen unterscheiden sich kaum, da sie bereits im Koalitionsvertrag[5] auf einem ambitionierten Niveau festgelegt wurden. Es wird unterstellt, dass diese Vorgabe auch in das Gebäudeenergiegesetz übernommen wird. Es wird davon ausgegangen, dass es weiterhin Fördermaßnahmen für Sanierungen geben wird, die über das gesetzliche Mindestniveau hinausgehen. Trotz der höheren gesetzlichen Sanierungsanforderungen in T45-Strom wird ein Anteil von 30% noch ambitionierterer Sanierungen unterstellt. So genannte Pinselsanierungen, bei denen keine energetischen Verbesserungen erzielt werden, gehen

[5] [5] Koalitionsvertrag 2021— 2025 zwischen der Sozialdemokratischen Partei Deutschlands (SPD), Bündnis 90 / die Grünen und den Freien Demokraten (FDP)

in allen Szenarien auf 3 Prozent zurück. Alle Sanierungen werden zeitlich an die Nutzungszyklen der Bauteile gekoppelt. Dadurch werden sie dann durchgeführt, wenn Bauteile ohnehin instandgehalten werden müssen. Dies ist kosteneffizient und entspricht der üblichen Herangehensweise vieler Bauherren. In T45-Strom werden die Sanierungszyklen der Bauteile im Durchschnitt um 22 Prozent gegenüber dem Ausgangszustand verkürzt. Maßnahmen werden also vorgezogen bzw. ein Sanierungsstau aufgelöst. Dies ist mit entsprechenden Politikinstrumenten zu unterlegen. Der Anteil von Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung im Jahr 2045 beträgt 20 Prozent. In T45-Strom ist er doppelt so hoch. Die höheren Sanierungsstandards – insbesondere bei geförderten Sanierungen – können mit Hilfe dieser Anlagen leichter erreicht werden. Gleichzeitig ermöglichen sie eine hohe Durchdringung von Lüftungsanlagen, da diese höheren Anforderungen an die Gebäudehülle stellen (insbesondere an die Luftdichtheit).

Tabelle 1-2: Parameter der Gebäudeeffizienz in den Szenarien

	T45-Strom	T45-PtG/PtL	T45-H_2	T45-RedEff	T45-RedGas
Verschärfung der Anforderungen an die Gebäudehülle (Durchschnitt der U-Wert-Verschärfungen)					
Neubau ggü. GEG	24% entspricht EH40 - EH55	22% entspricht EH40 - EH55			
Sanierung ggü. GEG	29% entspricht EH55	23% entspricht EH70			
Anteil geförderter Sanierungen in 2045	30%	15%			
Anteil "Pinselsanierungen" 2045 an allen Sanierungen	3%				
Verkürzung der Sanierungszyklen ggü. 2020 (durchschnittliche Verkürzung der charkteristischen Bauteil-Nutzungsdauern aller Bauteilarten)	22% (Erhöhung der Sanierungs-rate)	0%			
Anteil Lüftungsanlagen mit WRG 2045 am Gesamtbestand	42%	20%			

1.3 Szenario T45-Strom

1.3.1 Ziele

Das Szenario T45-Strom zeigt auf, wie die Ziele im Gebäudebereich mit einem hohen Anteil von elektrischen Wärmepumpen und einer deutlichen, aber trotzdem realistischen Steigerung der Gebäudeeffizienz erreicht werden. Mit dieser Ausrichtung setzt das Szenario einen deutlichen Schwerpunkt auf Energieeffizienz - also auf eine Reduktion des Endenergieverbrauchs. Wärmepumpen können aus einer Einheit Strom drei bis vier Einheiten Wärme erzeugen. Grundsätzlich gilt, je geringer der Wärmebedarf der Gebäude, desto höher der Wirkungsgrad der Wärmepumpen. Das Szenario bildet diesen Synergieeffekt differenziert für den deutschen Gebäudebestand ab.

In diesem Szenario wird ein hoher Marktanteil von Wärmepumpen mit einem möglichst hohen Wirkungsgrad angestrebt. Dabei wird beachtet, dass Wärmepumpen nicht in Gebäuden mit hohem Wärmebedarf eingesetzt werden, sondern nur wenn die Gebäude eine gewisse Mindesteffizienz erreichen, zum Beispiel durch eine nachträgliche Dämmung. Zusätzlich wird die Wärmeverteilung in den Gebäuden zum Teil optimiert, zum Teil gegen Fußbodenheizungen ausgetauscht. Durch die niedrigeren Heizungsvorlauftemperaturen steigt die Effizienz der Wärmepumpen. Synthetische Brennstoffe (Power-to-Gas, Power-to-Liquid, Wasserstoff) stehen in diesem Szenario per Definition nicht für Heizungen in Gebäuden zur Verfügung.

1.3.2 Ergebnisse

Der Endenergieverbrauch für Raumwärme und Warmwasser in privaten Haushalten und GHD geht durch Effizienzmaßnahmen bis zum Jahr 2045 um 48 Prozent gegenüber 2008 zurück. Der Endenergieverbrauch an handelbaren Energieträgern (ohne Solarthermie und Umweltwärme) sinkt um 71 Prozent. Die fossilen Energieträger Heizöl und Erdgas werden in 2045 nicht mehr in Gebäuden eingesetzt. Die Anzahl der Wärmepumpen wächst von rund 1 Million in 2020 auf 5,7 Mio. in 2030 und 18,6 Mio. in 2045. Wärmepumpen stellen in 2045 zwei Drittel des Wärmeenergieverbrauchs bereit, das heißt 45 Prozent des Verbrauchs werden durch Umweltwärme abgedeckt.

Weitere 22 Prozent des Wärmebedarfs werden mit Wärmenetzen gedeckt (siehe dazu Kapitel 1.8.1).

Der Hochlauf von Wärmepumpen erfordert kurzfristig einen Anstieg des jährlichen Absatzes von 154.000 in 2021[6] auf rund 500.000 Stück ab 2024. Ein solcher Anstieg ist bereits in der Strategie der Bundesregierung vorgesehen.[7] In 2022 ist die Nachfrage nach Wärmepumpen aufgrund des Angriffs auf die Ukraine stark gestiegen. Dennoch ist der vorgesehene Hochlaufpfad außerordentlich ambitioniert.

Bei der Transformation des Wärmeerzeugerbestands von Heizkesseln zu Wärmepumpen ist zu beachten, ob die Gebäude für die Beheizung mit einer Wärmepumpe geeignet sind. Die Jahresarbeitszahl (Effizienz) von Wärmepumpen hängt stark von der Heizkreisvorlauftemperatur ab, die für die ausreichende Beheizung in einem Gebäude benötigt wird. Diese richtet sich wiederum nach der Effizienz der Gebäudehülle und der Dimensionierung der Heizkörper. Wärmepumpen können in ungedämmten Altbauten in der Regel nicht effizient und wirtschaftlich betrieben werden. Durch Teilsanierungen und Verbesserungen der Heizkreise können die Gebäude aber für den Umstieg auf Wärmepumpen vorbereitet werden, bevor diese tatsächlich eingebaut werden. Die Gebäude werden somit „Niedertemperatur-ready" (NT-ready)[8]. Für den raschen Markthochlauf von Wärmepumpen ist also eine genügende Anzahl von geeigneten Gebäuden von großer Bedeutung. Da der Umstieg auf eine Wärmepumpe gleichzeitig an den Nutzungszyklus des vorhandenen Wärmeerzeugers gebunden ist, ist es besonders wichtig, diejenigen Gebäude vorzubereiten, deren vorhandener Wärmeerzeuger absehbar auszutauschen ist. Durch die höheren und schnelleren Effizienzsteigerungen im Szenario T45-Strom werden mehr Gebäude rechtzeitig NT-ready als in den anderen Szenarien, so dass stets ein ausreichend großer Pool an geeigneten Gebäuden für den Einbau von Wärmepumpen zur Verfügung steht.

Wenn Gebäude zum Zeitpunkt des Wärmeerzeugertausches noch nicht NT-ready sind, können sie an kalten Tagen, an denen die Leistung der Wärmepumpe nicht ausreicht, entweder mit einem Gas-Heizkessel beheizt werden (Hybrid-Wärmepumpe) oder mit einem direktelektrischen Heizstab. Hybrid-Wärmepumpen sind dann so auszulegen, dass die Wärmepumpe mindestens 65 Prozent der Jahreswärmeenergie bereitstellt (65%-Anforderung ab 01.01.2024). Beide Lösungen sind als Übergangslösungen zu betrachten, die den Zeitraum überbrücken, bis das jeweilige Gebäude ausreichend saniert ist, um allein von der Wärmepumpe beheizt zu werden. Da Hybrid-Wärmepumpen mit einem Gas-Heizkessel unterstützt werden, können sie in diesem Szenario nur für einen begrenzten Zeitraum zwischen 2024 und spätestens 2030 installiert werden. Ab 2045 stehen in diesem Szenario keine Gase für den Betrieb mehr zur Verfügung und Hybrid-Anlagen müssen ggf. vor Ablauf ihres Nutzungszyklus stillgelegt werden. Bis 2030 werden in diesem Szenario 340.000 Hybrid-Wärmepumpen installiert.

[6] BWP 2022

[7] Gemeinsame Absichtserklärung von BMWK und BMWSB

[8] ifeu 2021

In T45-Strom werden vor allem direktelektrische Heizstäbe für die Beheizung an den kältesten Tagen eingesetzt, weil die zu überbrückende Zeit bis zum Erreichen von NT-ready durch die intensivere Sanierungstätigkeit kürzer ist als in den anderen Szenarien und Heizstäbe deutlich geringere Investitionen erfordern als Hybrid-Wärmepumpen. In Abbildung 1-4 ist dies im Anteil von Strom-Direktheizungen integriert.

Abbildung 1-4: Endenergieverbrauch für Raumwärme und Warmwasser in privaten Haushalten und GHD sowie Nutzwärmeverbrauch für Heizung und Trinkwarmwasser im Szenario T45-Strom

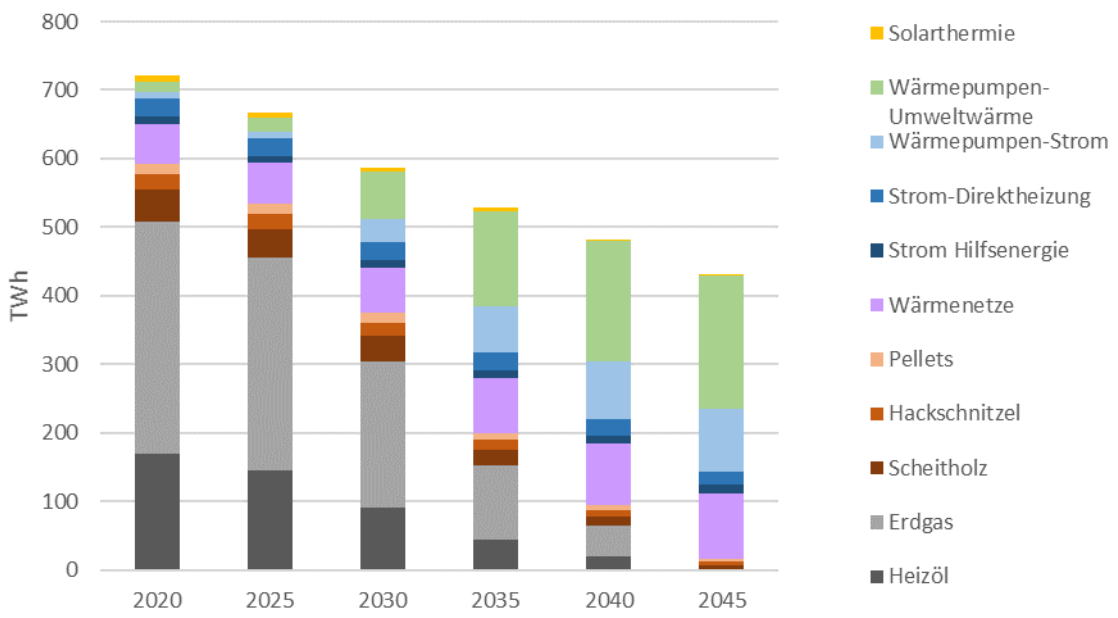
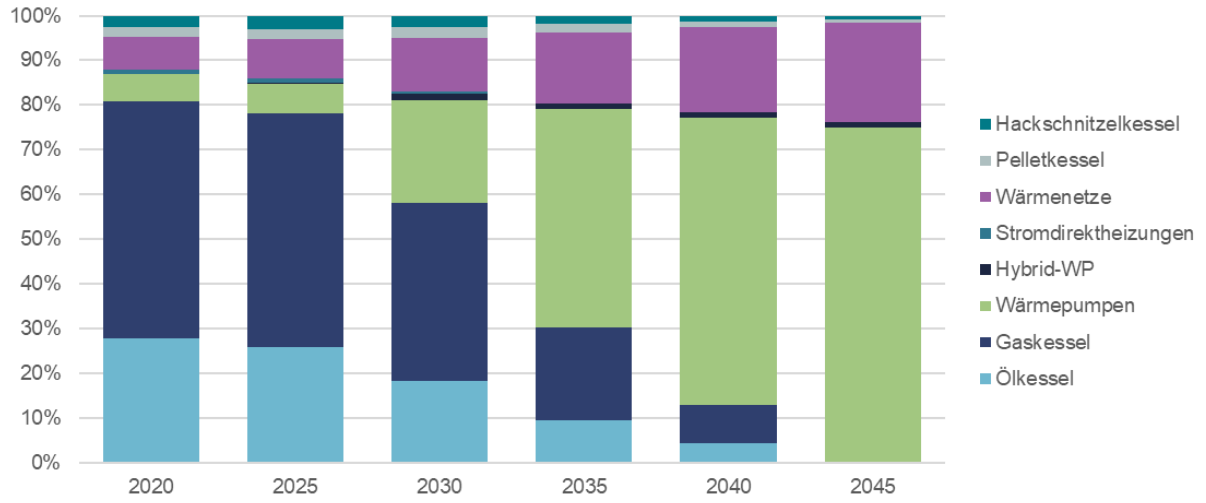


Tabelle 1-3: Endenergieverbrauch für Raumwärme und Warmwasser in privaten Haushalten und GHD im Szenario T45-Strom in TWh

	2020	2025	2030	2035	2040	2045
Heizöl	168,5	144,4	90,5	43,3	19,3	0,0
Erdgas	340,0	310,9	214,1	108,8	45,0	0,0
Scheitholz	45,6	41,3	36,6	23,1	12,5	7,2
Hackschnitzel	24,0	22,9	19,0	14,0	9,4	5,5
Pellets	14,0	14,5	14,2	11,0	7,4	3,8
Wärmenetze	59,0	59,4	66,5	79,1	90,1	95,2
Strom Hilfsenergie	10,6	10,8	11,2	11,6	11,9	12,8
Strom-Direktheizung	26,6	25,1	25,4	26,0	23,4	18,3
Wärmepumpen-Strom	8,1	9,8	34,7	68,3	85,0	92,7
Wärmepumpen-Umweltwärme	16,4	20,3	69,2	138,3	175,6	194,3
Solarthermie	8,3	6,9	5,9	4,8	2,8	1,5

Abbildung 1-5: Bestand an Wärmeerzeugern im Szenario T45-Strom



1.3.3 Einordnung

Die größten Herausforderungen in dem Szenario resultieren aus den ambitionierten Anforderungen an Gebäudeeffizienz, also Dämmung, Luftdichtheit und Wärmerückgewinnung. Neben den technischen Restriktionen, die in der Berechnung bereits berücksichtigt sind, mangelt es bei einigen betroffenen Gebäudeeigentümern an Akzeptanz gegenüber tiefen Sanierungen. Die hohe Effizienz ermöglicht in diesem Szenario einen konsistenten und geradlinigen Transformationspfad, der technisch zwar ambitioniert, aber realisierbar erscheint.

1.4 Szenario T45-PtG/PtL

1.4.1 Ziele

Das Szenario zeigt, wie die Klimaziele für den Gebäudesektor eingehalten werden können, wenn synthetisches Methan (Power-to-Gas, PtG) für die Beheizung verfügbar ist. Dabei wird auch die zeitliche Entwicklung der Verfügbarkeit von PtG berücksichtigt und mit der Zielerreichung abgeglichen. Die Anforderungen an die Gebäudeeffizienz steigen gegenüber den aktuellen Regelungen im GEG an, bleiben jedoch hinter der Sanierungstiefe des Szenarios T45-Strom zurück. Sie repräsentieren in etwa das Wärmeschutzniveau, das im Koalitionsvertrag vorgesehen ist.

1.4.2 Ergebnisse

Der Endenergieverbrauch im Gebäudesektor geht durch Effizienzmaßnahmen bis zum Jahr 2045 um 34 Prozent gegenüber 2008 zurück. Der Endenergieverbrauch an handelbaren Energieträgern (ohne Solarthermie und Umweltwärme) sinkt um 54 Prozent. Fossiles Heizöl und Erdgas sind in 2045 nicht mehr im Versorgungsmix. Synthetisches Methan wird ab 2030 mit stetig steigendem Anteil dem fossilen Erdgas beigemischt, bis es 2045 unvermischt in den Netzen fließt. Es trägt dann 166 TWh oder 31 Prozent zur Wärmeversorgung bei. Der gesamte Gasverbrauch reduziert sich durch effizientere Gebäude und Energieträgerwechsel von 2020 bis 2045 um 51 Prozent.

Die Anzahl der Wärmepumpen wächst bis 2030 auf 5,2 Mio. Stück. Zusätzlich werden bis 2030 2 Mio. Hybrid-Wärmepumpen mit Gas-Heizkesseln installiert. Bis 2045 gibt es insgesamt 12 Mio. Wärmepumpen im Bestand.

Wärmenetze decken 17 Prozent des Wärmebedarfs (siehe dazu Kapitel 1.8.1).

Synthetisches Methan (PtG) steht aktuell noch nicht für die Gebäudewärme zur Verfügung. Für die Einhaltung der Klimaziele bis 2030 ist der Hochlauf von PtG das entscheidende Kriterium. Die verfügbare PtG-Menge definiert, in welchem Maß andere Technologien für die Zielerreichung herangezogen werden müssen. Es wird unterstellt, dass in dem Szenario 32 TWh synthetisches Methan (PtG) in 2030 für den Gebäudesektor zur Verfügung stehen. Diese werden im bestehenden Erdgasnetz beigemischt.

Für die Einhaltung des Klimaziels 2030 wird der Bestand von monovalenten Gasheizkesseln bis 2030 um 35 Prozent vermindert. Neue Gaskessel werden nur in Verbindung mit Hybrid-Wärmepumpen installiert, die mindestens 65% des Wärmebedarfs abdecken. Im Gegensatz zu T45-Strom steht für die Gebäude, die für den Einbau einer monovalenten Wärmepumpe noch nicht geeignet (NT-ready) sind, eine Hybrid-Wärmepumpe als langfristige Option zur Verfügung. Gase für den Betrieb des Spitzenlastkessels sind in diesem Szenario auch in 2045 verfügbar. Gleichzeitig ist die Anzahl der Gebäude, die nicht NT-ready sind, höher als in T45-Strom, weil die Gebäudeeffizienz weniger ambitioniert voranschreitet. Die Verpflichtung zur Nutzung von 65% erneuerbaren Energie bei Austausch des Wärmeerzeugers kann zwar auch durch eine entsprechend hohe Beimischung von erneuerbaren Gasen erfüllt werden, jedoch stehen diese bei Inkrafttreten der Verpflichtung nicht zur Verfügung. Die Umstellung des Heizungsmarktes ist vergleichbar grundlegend wie im Szenario T45-Strom. Wenn die Verfügbarkeit von PtG nach 2030 stärker anwächst, können wieder Gas-Brennwertkessel installiert werden. Es wird angenommen, dass ihr Marktanteil nach 2030 schrittweise wieder auf das Niveau von 2020 zurückkehrt. Voraussetzung ist, dass das Gasnetz dieselbe Abdeckung bietet wie heute. Sie verdrängen die Wärmepumpen dann wieder aus dem Bestand. Diese Entwicklung ist nicht durch kostenbasierte Investitionsentscheidungen begründet, sondern modellexogen vorgegeben. Die Zahl der Gaskessel wächst dann bis 2045 auf 9,1 Mio. Stück einschließlich der Kessel an

Abbildung 1-6: Endenergieverbrauch für Raumwärme und Warmwasser in privaten Haushalten und GHD sowie Nutzwärmeverbrauch für Heizung und Trinkwarmwasser im Szenario T45-PtG/PtL

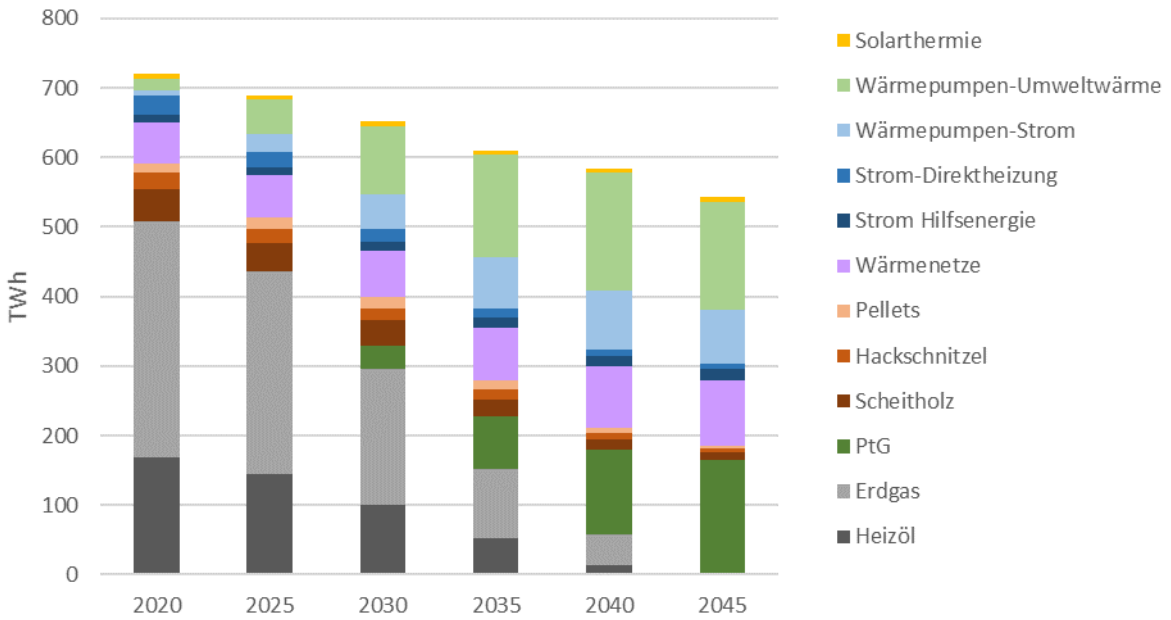
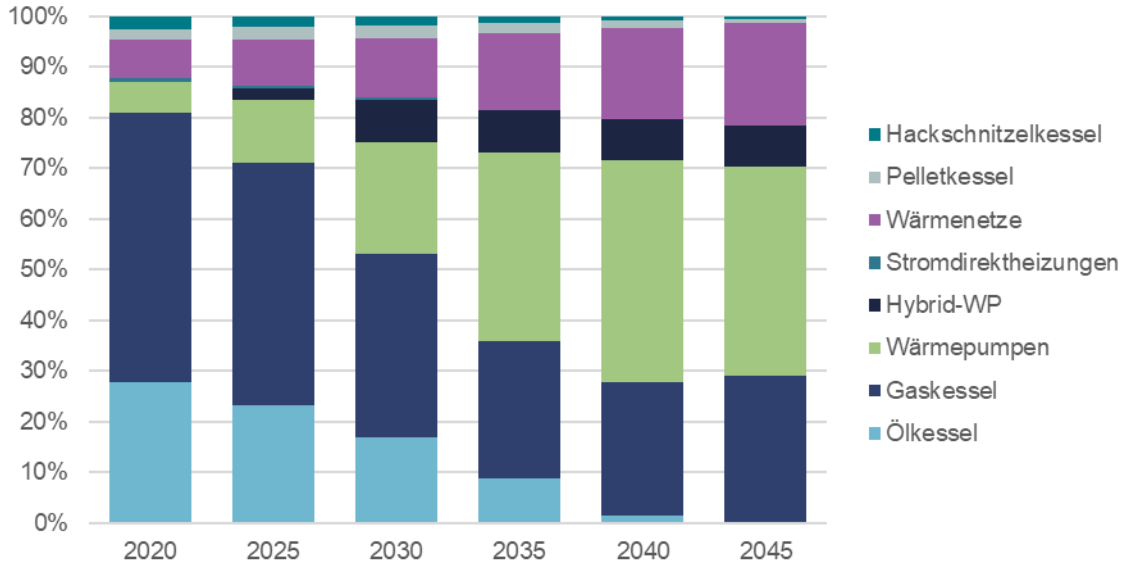


Tabelle 1-4: Endenergieverbrauch für Raumwärme und Warmwasser in privaten Haushalten und GHD im Szenario T45-PtG/PtL in TWh

	2020	2025	2030	2035	2040	2045
Heizöl	168,5	144,2	101,2	53,1	14,5	0,0
Erdgas	340,0	291,3	195,7	98,1	44,0	0,0
PtG	0,0	0,0	32,3	76,5	120,7	165,9
Scheitholz	45,6	40,9	36,5	24,4	14,7	9,4
Hackschnitzel	24,0	20,2	17,6	14,0	9,4	6,1
Pellets	14,0	16,9	16,1	12,6	8,3	4,2
Wärmenetze	59,0	60,8	66,5	77,2	88,0	93,8
Strom Hilfsenergie	10,6	11,2	12,5	13,3	14,5	15,8
Strom-Direktheizung	26,6	22,0	17,9	13,2	9,8	7,9
Wärmepumpen-Strom	8,1	25,6	50,7	74,6	84,6	76,8
Wärmepumpen-Umwelt-wärme	16,4	49,5	98,6	147,3	169,4	156,0
Solarthermie	8,3	7,0	6,1	5,6	5,6	6,4

Abbildung 1-7: Bestand an Wärmeerzeugern im Szenario T45-PtG/PtL



1.4.3 Einordnung

Der Transformationspfad im Szenario T45-PtG/PtL ist inkonsistent, weil die zentrale Technologie – synthetisches Methan (PtG) – in größeren Mengen erst ab 2030 verfügbar sein wird und die Zwischenziele einen Umweg über Ersatztechnologien - Wärmepumpen - erfordern. Die Menge von PtG in 2030 ist limitierend für den Pfad: Je mehr PtG bereits in 2030 bereitsteht, desto weniger muss der Bestand der Wärmeerzeuger umgebaut werden und desto mehr Gasheizkessel können im Gesamtverlauf betrieben werden. Ein zweimaliges Umschwenken des Heizungsmarktes – zunächst auf Wärmepumpen und nach 2030 zurück auf Gasheizkessel – führt aufgrund der Trägheit bis 2045 nicht zu einem eingeschwungenen Heizungsbestand und ist überdies den Akteuren kaum vermittelbar.

Die Anforderungen an die Sanierung der Gebäudehülle sind zwar weniger ambitioniert als in T45-Strom, stellen aber eine Verschärfung gegenüber den aktuellen Anforderungen dar. Auch hier kann es zu Akzeptanzproblemen kommen.

1.5 Szenario T45-H_2

1.5.1 Ziele

Das Szenario zeigt einen Pfad zur Einhaltung der Klimaziele, bei dem Wasserstoff (H_2) für die Beheizung in Einzelgebäuden verfügbar ist. Wie im Szenario T45-PtG/PtL wird die zeitliche Entwicklung der Verfügbarkeit von Wasserstoff berücksichtigt und mit der Zielerreichung abgeglichen. Die Anforderungen an die Gebäudeeffizienz entsprechen denen in T45-PtG/PtL. Sie steigen gegenüber den aktuellen Regelungen im GEG an, bleiben jedoch hinter der Sanierungstiefe des Szenarios T45-Strom zurück. Sie repräsentieren damit etwa das Wärmeschutzniveau, das im Koalitionsvertrag vorgesehen ist.

1.5.2 Ergebnisse

Der Endenergieverbrauch im Gebäudesektor geht durch Effizienzmaßnahmen bis zum Jahr 2045 um 34 Prozent gegenüber 2008 zurück. Der Verbrauch von handelbaren Energieträgern (ohne Solarthermie und Umweltwärme) geht um 59 Prozent zurück. In 2045 werden Heizöl und Erdgas nicht mehr eingesetzt. Wasserstoff wird dem fossilen Erdgas zunächst beigemischt. Bis 2045 erfolgt eine Umstellung auf 100% Wasserstoff in Netzen und Geräten. Wasserstoff trägt dann mit 107 TWh oder 20 Prozent zur Wärmeversorgung bei. Der gesamte Gasverbrauch (Erdgas und Wasserstoff) reduziert sich durch effizientere Gebäude und Energieträgerwechsel von 2020 bis 2045 um 68 Prozent.

Bis 2030 steigt die Anzahl der Wärmepumpen auf 5,2 Mio. Stück zuzüglich 2 Mio. Hybrid-Wärmepumpen in Kombination mit einem Gas-Heizkessel. In 2045 sind 15,4 Mio. Wärmepumpen im Bestand. Sie stellen dann 54 Prozent des Wärmeenergieverbrauchs bereit.

Wärmenetze decken 17 Prozent des Wärmebedarfs (siehe Kapitel 1.8.1).

Ähnlich wie im Szenario T45-PtG/PtL ist die zentrale Technologie des Szenarios – grüner Wasserstoff - aktuell nicht in nennenswerten Größenordnungen für die Gebäudeversorgung verfügbar. Die Einhaltung der Sektorziele 2030 hängt vom Hochlauf der Wasserstoffproduktion ab bzw. von der Verfügbarkeit für den Gebäudesektor. Wie in T45-PtG/PtL wird unterstellt, dass in 2030 eine Menge von 32,3 TWh für die Feuerung in dezentralen Heizkesseln zur Verfügung steht. Würde diese Menge dem Erdgasnetz beigemischt werden, ergäbe sich ein Anteil von 44 Volumenprozent. Aktuell darf die Beimischung maximal 10 Prozent betragen[9], jedoch wurde in einem Feldversuch bereits eine Beimischung von 20 Prozent Wasserstoff realisiert[10]. Bei einer Beimischung von 20 Prozent könnten 12,5 TWh über die vorhandenen Erdgasnetze verteilt werden. Die verbleibenden 19,8 TWh müssen über andere Netze fließen. Netze und Endgeräte mussten für diese höhere Quote nicht angepasst werden. Ähnlich wie in T45-PtG/PtL müssen für die Einhaltung des Sektorziels bis 2030 5,2 Mio. Wärmepumpen installiert werden. In der gleichen Zeit werden 2 Mio. neue Gaskessel mit Hybrid-Wärmepumpen in Gebäude eingebaut, die für den alleinigen Betrieb mit einer Wärmepumpe nicht ausreichend vorbereitet sind. Die Gaskessel der Hybrid-Wärmepumpen bleiben bis nach 2045 in Betrieb. Zwischen 2030 und 2045 müssen Gasnetze und Endgeräte auf 100% Wasserstoff umgestellt werden (Frh ISI et al. 2021, Kapitel über Gasnetze). Es wird unterstellt, dass die Kessel in hybriden Anlagen auf den Betrieb mit 100% Wasserstoff umgerüstet werden können. Während der Zeit der Umstellung der Gasnetze von Erdgas auf Wasserstoff wird mit Einschränkungen für den erneuten Hochlauf von neuen monovalenten Gaskesseln nach 2030 gerechnet. Bauherren, die ihren Wärmeerzeuger turnusgemäß ersetzen müssen und nicht in einem Gebiet sind, das bereits auf 100% Wasserstoff umgestellt wurde, können zwar einen Gaskessel einbauen, der für den Betrieb mit reinem Wasserstoff grundsätzlich geeignet ist. Jedoch sind bei der späteren Umstellung größere Anpassungsmaßnahmen am Heizkessel erforderlich. So muss bei den bisher verfügbaren Geräten der Brenner getauscht werden, wenn auf 100% Wasserstoff umgestellt wird. Außerdem wird unterstellt, dass das Wasserstoffnetz nicht dieselbe Abdeckung bieten wird wie das heutige Erdgasnetz. Es wird daher unterstellt, dass Gaskessel nach 2030 zwar wieder vermehrt eingebaut werden, jedoch vorrangig in den Gebieten, die bereits auf 100% Wasserstoff umgestellt wurden. Ab 2040 nimmt der Marktanteil von Gasheizkesseln wieder zu, was sich in den verbleibenden fünf Jahren bis zur Zielerreichung nur schwach im Bestand abbildet. In 2045 sind dann 5,8 Mio. Gasheizkessel im Bestand (inklusive der Kessel in Hybrid-Wärmepumpen).

[9] DVGW 2021

[10] E.ON, Avacon, DVGW, 2021

Abbildung 1-8: Endenergieverbrauch für Raumwärme und Warmwasser in privaten Haushalten und GHD sowie Nutzwärmeverbrauch für Heizung und Trinkwarmwasser im Szenario T45-H_2

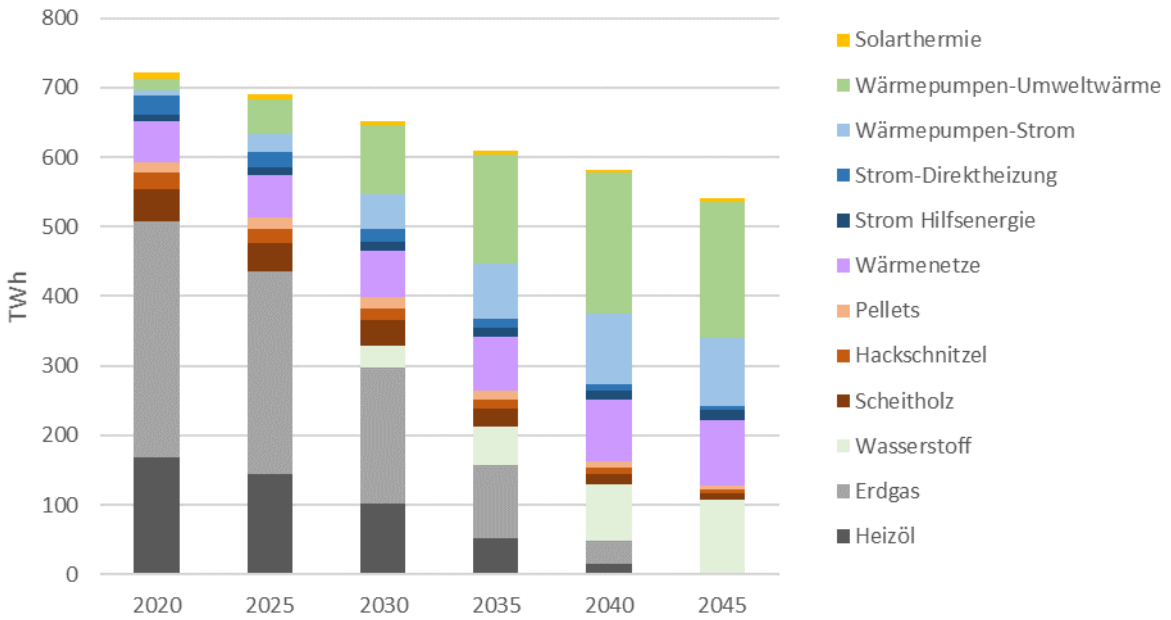
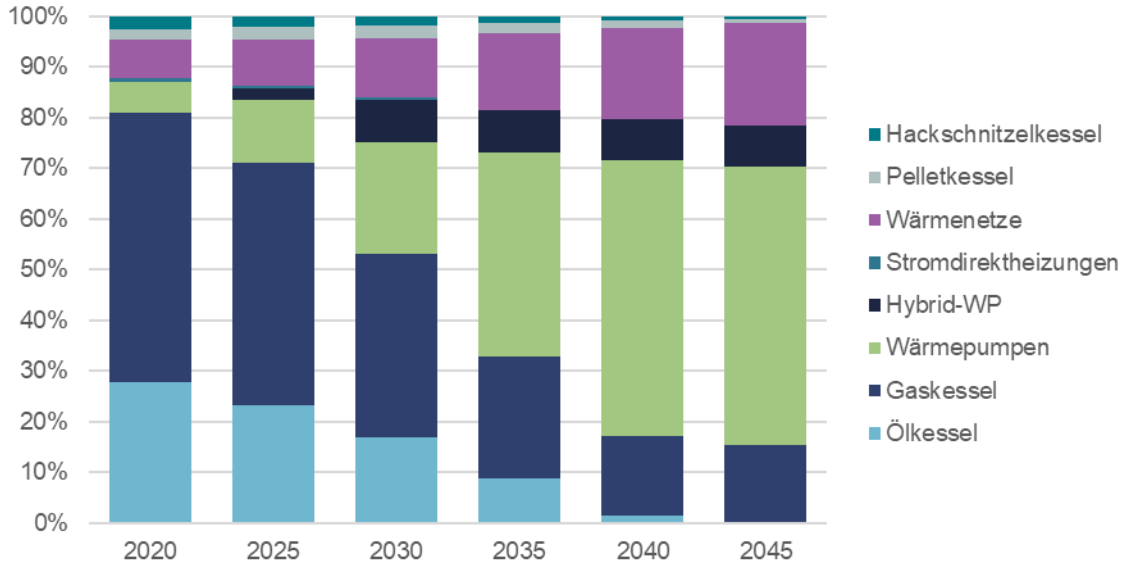


Tabelle 1-5: Endenergieverbrauch für Raumwärme und Warmwasser in privaten Haushalten und GHD im Szenario T45-H_2 in TWh

	2020	2025	2030	2035	2040	2045
Heizöl	168,5	144,2	101,2	53,1	14,5	0,0
Erdgas	340,0	291,3	195,7	103,4	34,5	0,0
Wasserstoff	0,0	0,0	32,3	56,9	81,5	107,2
Scheitholz	45,6	40,9	36,5	24,4	14,7	9,4
Hackschnitzel	24,0	20,2	17,6	14,0	9,4	6,1
Pellets	14,0	16,9	16,1	12,6	8,3	4,2
Wärmenetze	59,0	60,8	66,5	77,2	88,4	94,1
Strom Hilfsenergie	10,6	11,2	12,5	13,2	14,1	14,9
Strom-Direktheizung	26,6	22,0	17,9	13,0	9,1	7,0
Wärmepumpen-Strom	8,1	25,6	50,7	79,4	100,7	96,3
Wärmepumpen-Umweltwärme	16,4	49,5	98,6	157,0	202,6	197,0
Solarthermie	8,3	7,0	6,1	5,2	4,4	4,7

Abbildung 1-9: Bestand an Wärmeerzeugern im Szenario T45-H_2



1.5.3 Einordnung

Wie in T45-PtG/PtL hängt die Konsistenz des Transformationspfades von der Verfügbarkeit der erneuerbaren Gase – hier Wasserstoff - in 2030 ab. Der bis 2030 erforderliche Abbau von Gasheizkesseln im Bestand erschwert nach 2030 ihren erneuten Hochlauf. Dieser wird zusätzlich erschwert durch die erforderliche Umstellung von Gasnetzen und Endgeräten von beigemischtem auf reinen Wasserstoff. Ein ungehinderter Hochlauf wird erst nach 2040 erwartet, wenn die Umstellung abgeschlossen ist.

1.6 Szenario T45-RedEff

1.6.1 Ziele

Das Szenario ist als Sensitivitätsrechnung zu T45-Strom angelegt. Die Beheizung der Gebäude geschieht mit einem starken Fokus auf elektrischen Strom und Wärmepumpen. Synthetische Gase stehen per Definition nicht zur Verfügung. Im Vergleich zu T45-Strom wird die Gebäudeeffizienz weniger ambitioniert verbessert. Die Anforderungen an Neubau und Sanierung entsprechen denen der Szenarien T45-PtG/PtL und T45-H_2. Das Szenario zeigt, welche Maßnahmen erforderlich sind, um die geringere Gebäudeeffizienz zu kompensieren und wie sie sich auf den Energieverbrauch im Gesamtbestand auswirken.

1.6.2 Ergebnisse

Durch die Effizienzmaßnahmen sinkt der Endenergieverbrauch 2045 um 35 Prozent gegenüber 2008 im Vergleich zu einer Reduktion um 48 Prozent in T45-Strom. Der Verbrauch von handelbaren Energieträgern (ohne Solarthermie und Umweltwärme) sinkt um 66 Prozent (71 Prozent in T45-Strom). Um das Sektorziel 2030 zu erreichen, müssen 8 Mio. Wärmepumpen installiert werden, davon sind 629.000 Hybrid-Wärmepumpen. Das sind knapp 2,3 Mio. Wärmepumpen mehr als in T45-Strom. Sie kompensieren den höheren Verbrauch an Heizöl und Erdgas, der aus der geringeren Gebäudeeffizienz resultiert. Diese Anzahl wird als kaum realisierbar eingeschätzt und zeigt die kon-

zeptionellen Schwächen dieses Szenarios auf. Der gesamte Stromverbrauch im Gebäudesektor beträgt in 2030 in T45-RedEff 93,9 TWh. Er ist damit 22,6 TWh höher als in T45-Strom. Die gesamte installierte Leistung der Wärmepumpen liegt bei 31,1 GW und ist damit 16 Prozent höher als in T45-Strom. In 2045 sind 19,5 Mio. Wärmepumpen im Bestand (867.000 mehr als in T45-Strom). Der Strommehrverbrauch des Gebäudesektors beträgt dann 45,6 TWh oder 37 Prozent. Die installierte Leistung ist um 15 GW bzw. 19 Prozent höher als in T45-Strom.

Tabelle 1-6: Ergebnisse der Szenarien T45-Strom und T45-RedEff im Vergleich

	T45-Strom	T45-RedEff
Verbrauchssenkung 2045 ggü. 2008	48%	35%
Anzahl Wärmepumpen 2030	5,9 Mio.	8,2 Mio.
davon Hybrid-Wärmepumpen 2030	0,35 Mio.	0,65 Mio.
Stromverbrauch Wärmepumpen 2030	34,7 TWh	63,9 TWh
Stromverbrauch Gebäude gesamt 2030	71,3 TWh	93,9 TWh
Installierte Leistung Wärmepumpen 2030	26,7 GW	31,1 GW
mittlere Arbeitszahl der Wärmepumpen 2030	3,0	2,8
Anzahl Wärmepumpen 2045	18,9 Mio.	19,7 Mio.
davon Hybrid-Wärmepumpen 2045	0,35 Mio.	0,65 Mio.
Stromverbrauch Wärmepumpen 2045	92,7 TWh	150,3 TWh
Stromverbrauch Gebäude gesamt 2045	123,8 TWh	169,4 TWh
Installierte Leistung Wärmepumpen 2045	81,5 GW	96,7 GW
mittlere Arbeitszahl der Wärmepumpen 2045	3,1	2,7

Die Wärmemenge, die mit Wärmenetzen bereitgestellt wird, wurde gegenüber T45-Strom nicht variiert (siehe Kapitel 1.8.1). In T45-Strom reicht diese Menge für die Wärmeversorgung von 5,4 Mio. Gebäuden, in T45-RedEff sind es aufgrund des höheren Verbrauchs nur 4,6 Mio. Gebäude.

Für die Erreichung des Sektorziels 2030 stehen nur die Optionen Wärmepumpen und Wärmenetze zur Verfügung. Erneuerbare Gase oder höhere Gebäudeeffizienz sind per Definition ausgeschlossen. Der Ausbau von Wärmenetzen wurde gegenüber T45-Strom nicht weiter gesteigert, da er dort bereits als äußerst ambitioniert anzusehen ist. Somit ist ein unrealistisch steiler Ausbau von Wärmepumpen erforderlich. Hybrid-Wärmepumpen können bis 2030 in problematischen Gebäuden eingesetzt werden. Jedoch ist ein massenhaftes Ausrollen nicht sinnvoll, da der Energieträger Gas in diesem Szenario absehbar nicht bis zum Ende ihrer Nutzungsdauer verfügbar ist. Gebäude, in denen Hybrid-Wärmepumpen installiert sind, müssen vor 2045 mindestens so weit saniert werden, dass die Wärmepumpen den Bedarf ohne den zusätzlichen Gaskessel decken können.

Monovalente Wärmepumpen arbeiten in diesem Szenario im Durchschnitt mit geringerer Effizienz (-13% in 2045), da die Gebäudedämmung langsamer und unambitionierter voranschreitet. Dies erfordert im Mittel höhere Heizkreistemperaturen, welche sich ungünstig auf die Arbeitszahlen der Wärmepumpen auswirken.

Abbildung 1-10: Endenergieverbrauch für Raumwärme und Warmwasser in privaten Haushalten und GHD sowie Nutzwärmeverbrauch für Heizung und Trinkwarmwasser im Szenario T45-RedEff

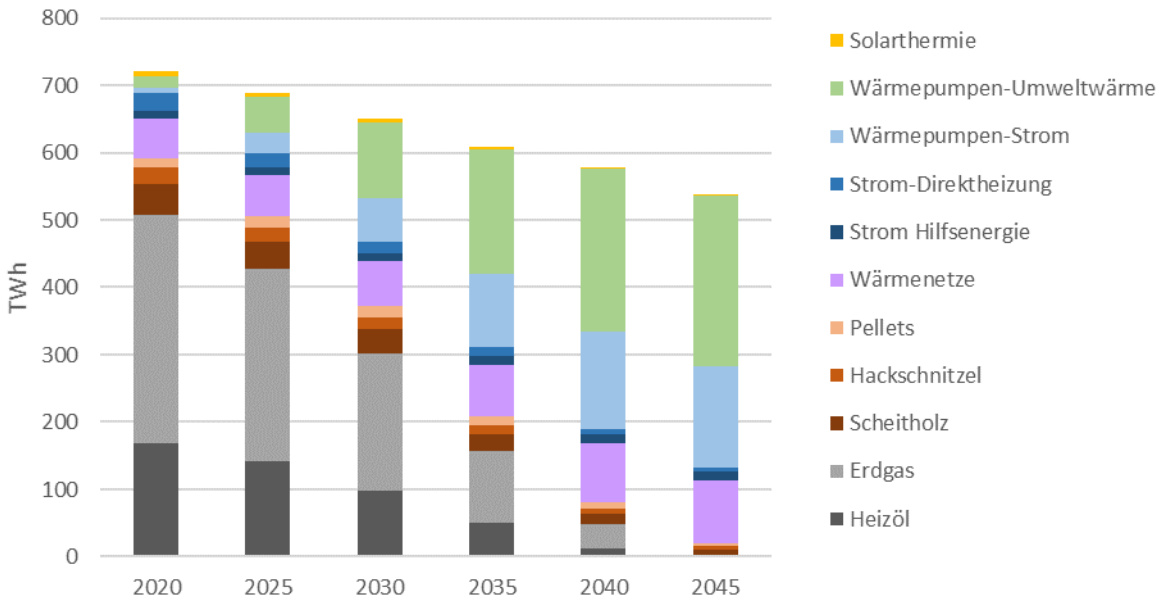
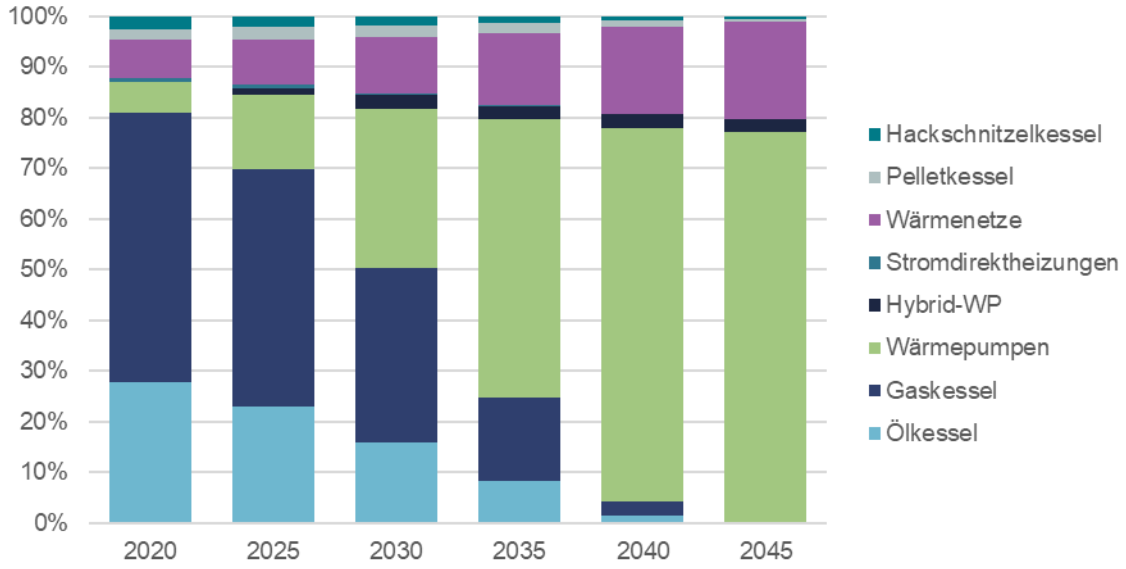


Tabelle 1-7: Endenergieverbrauch für Raumwärme und Warmwasser in privaten Haushalten und GHD im Szenario T45-RedEff in TWh

	2020	2025	2030	2035	2040	2045
Heizöl	168,5	141,9	97,7	50,0	12,3	0,0
Erdgas	340,0	285,4	204,0	107,3	35,9	0,0
Scheitholz	45,6	40,9	36,5	24,4	14,7	9,4
Hackschnitzel	24,0	20,2	17,6	14,0	9,4	6,1
Pellets	14,0	16,9	16,1	12,6	8,2	4,2
Wärmenetze	59,0	60,9	66,6	77,3	88,6	93,8
Strom Hilfsenergie	10,6	11,2	12,4	12,9	13,3	13,4
Strom-Direktheizung	26,6	21,9	17,6	12,3	7,9	5,7
Wärmepumpen-Strom	8,1	29,4	63,9	109,1	144,6	150,3
Wärmepumpen-Umweltwärme	16,4	53,6	112,9	184,3	241,9	253,5
Solarthermie	8,3	6,9	5,7	3,9	2,2	2,0

Abbildung 1-11: Bestand an Wärmeerzeugern im Szenario T45-RedEff



1.6.3 Einordnung

Das Szenario macht deutlich, wie entscheidend die Synergieeffekte zwischen hoher Gebäudeeffizienz und Wärmepumpen sind. Die geringere Effizienz kann mangels Alternativen nur durch einen unrealistisch steilen Wärmepumpen-Hochlauf kompensiert werden. Durch den höheren Wärmebedarf der Gebäude und die daraus resultierende niedrigere Wärmepumpeneffizienz übersteigt der Stromverbrauch der Gebäude in 2045 den Wert in T45-Strom um 37 Prozent.

1.7 Szenario T45-RedGas

1.7.1 Ziele

Das Szenario T45-RedGas zeigt einen möglichst raschen Ausstieg aus der Abhängigkeit von Gasen auf, wie er vor dem Hintergrund des russischen Überfalls auf die Ukraine zu diskutieren ist. Die Treibhausgas-Senkungsziele für den Gebäudesektor werden auch in diesem Szenario erfüllt. Das Szenario zeigt die Versorgungsalternativen, aber quantifiziert auch die Herausforderungen und zeigt die Konsequenzen eines so raschen Ausstiegs aus einer Gasversorgung.

1.7.2 Ergebnisse

Der Gasverbrauch wurde in dem Szenario in der Zeit zwischen 2025 und 2030 exogen um 217 TWh oder 78 Prozent gesenkt. Der gesamte Endenergieverbrauch verringert sich durch verbesserte Gebäudeeffizienz in diesem Zeitraum um 35 TWh. Die verbleibende Lücke von 182 TWh wird mit allen verfügbaren Energieträgern im Rahmen ihrer Potenziale und ihrer Zukunftsfähigkeit aufgefüllt:

- Heizöl 2,4 TWh
  Der Beitrag von Heizöl ist gering, weil er einerseits durch das Sektorziel 2030 limitiert wird und andererseits Heizöl absehbar nicht bis zum Ende der Nutzungsdauer von neu installierten Heizkesseln verfügbar sein wird.
- Biomasse 37,4 TWh
  Holzheizungen tragen zum Erreichen des Sektorziels 2030 bei und können daher in großer

Zahl zugebaut werden. In erster Linie werden Holzpellet-Kessel als Ersatz für Gasheizungen installiert. Kaminöfen übernehmen große Teile der Wärmeversorgung in Gebäuden, die weiterhin eine Gasheizung haben.

- Wärmenetze 21 TWh
  Dies erfordert einen Ausbau der Wärmenetze, der mehr als dreimal so schnell ist wie der bereits ambitionierte Ausbau in den anderen Szenarien. Er kann nur mit disruptiven Technologieentwicklungen gelingen, wie zum Beispiel „Pop-up-Wärmenetzen" mit hoher Standardisierung und vereinfachter Verrohrung bei aneinandergereihter Bebauung.
- Wärmepumpen 124 TWh
  Für diese Wärmemenge müssten bis 2030 12,2 Mio. Wärmepumpen installiert werden. Das ist utopisch und verdeutlicht die extremen Anforderungen, die dieses Szenario stellen würde. Die Wärmepumpen können nicht als Hybrid-Anlagen installiert werden, weil diese wiederum Gase benötigen würden. Wenn Gebäude nicht für den Betrieb mit monovalenten Wärmepumpen geeignet sind, müssen elektrische Heizstäbe zusätzlich einspringen. Durch das schlechte Zusammenspiel von Gebäuden und Wärmepumpen erzielen sie im Mittel nur eine Jahresarbeitszahl von 1,9. Bis 2045 verbessert sie sich durch steigende Gebäudeeffizienz auf 2,5.
- Alternativ: erneuerbare Gase 86 TWh
  Alternativ zu dem extremen Hochlauf auf 12,2 Mio. Wärmepumpen bis 2030 wird ein realistischerer Hochlauf auf 6 Mio. Wärmepumpen dargestellt. Um die Versorgungslücke zu schließen, sind dann 86 TWh an erneuerbaren Gasen erforderlich. Diese Menge wird ebenfalls als extreme Herausforderung gewertet.

Abbildung 1-12: Endenergieverbrauch für Raumwärme und Warmwasser in privaten Haushalten und GHD sowie Nutzwärmeverbrauch für Heizung und Trinkwarmwasser im Szenario T45-RedGas

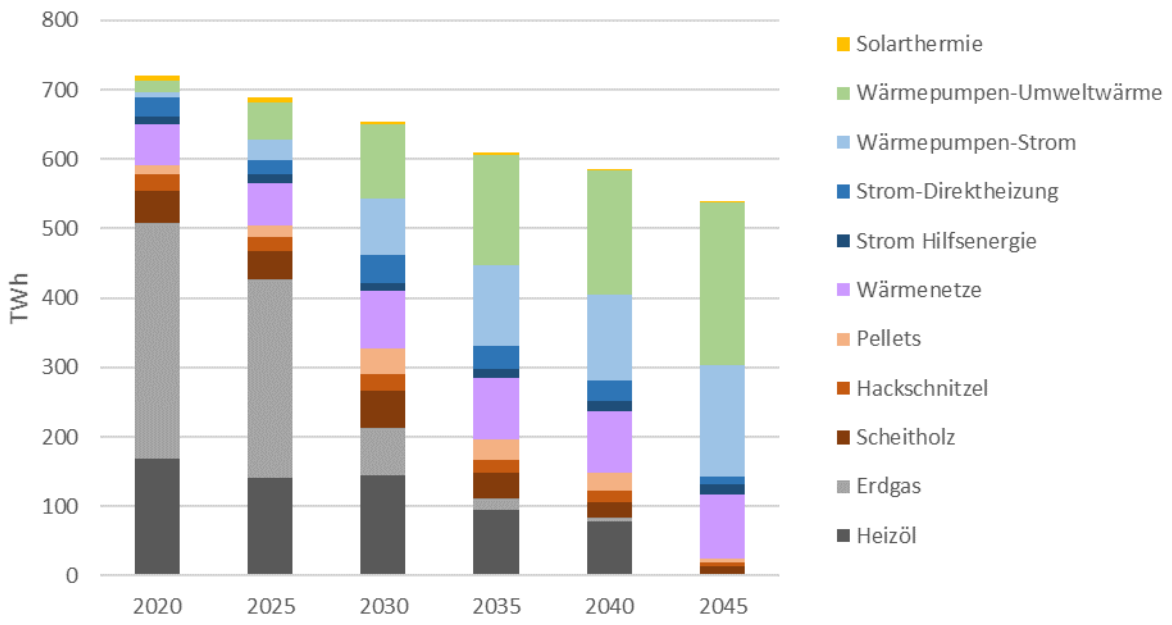
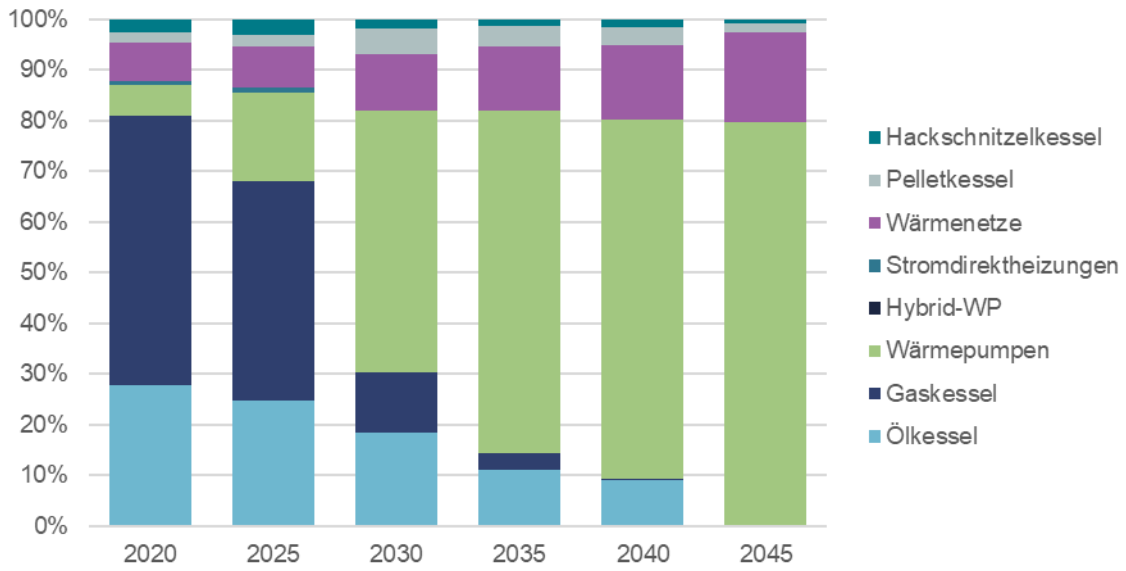


Tabelle 1-8: Endenergieverbrauch für Raumwärme und Warmwasser in privaten Haushalten und GHD im Szenario T45-RedGas in TWh

	2020	2025	2030	2035	2040	2045
Heizöl	168,5	141,9	144,3	95,0	78,5	0,0
Erdgas	340,0	285,4	68,2	17,0	5,6	0,0
Scheitholz	45,6	40,9	54,8	36,6	22,0	14,2
Hackschnitzel	24,0	20,2	23,2	19,1	17,3	4,7
Pellets	14,0	16,9	37,4	28,3	25,2	5,4
Wärmenetze	59,0	60,9	81,9	88,6	89,3	93,6
Strom Hilfsenergie	10,6	11,2	11,9	12,4	13,5	13,4
Strom-Direktheizung	26,6	21,9	40,8	34,4	30,1	12,5
Wärmepumpen-Strom	8,1	29,4	80,5	115,5	123,2	158,9
Wärmepumpen-Umwelt-wärme	16,4	53,6	107,4	159,2	179,2	235,0
Solarthermie	8,3	6,9	4,0	3,0	2,4	1,9

Abbildung 1-13: Bestand an Wärmeerzeugern im Szenario T45-RedGas



1.7.3 Einordnung

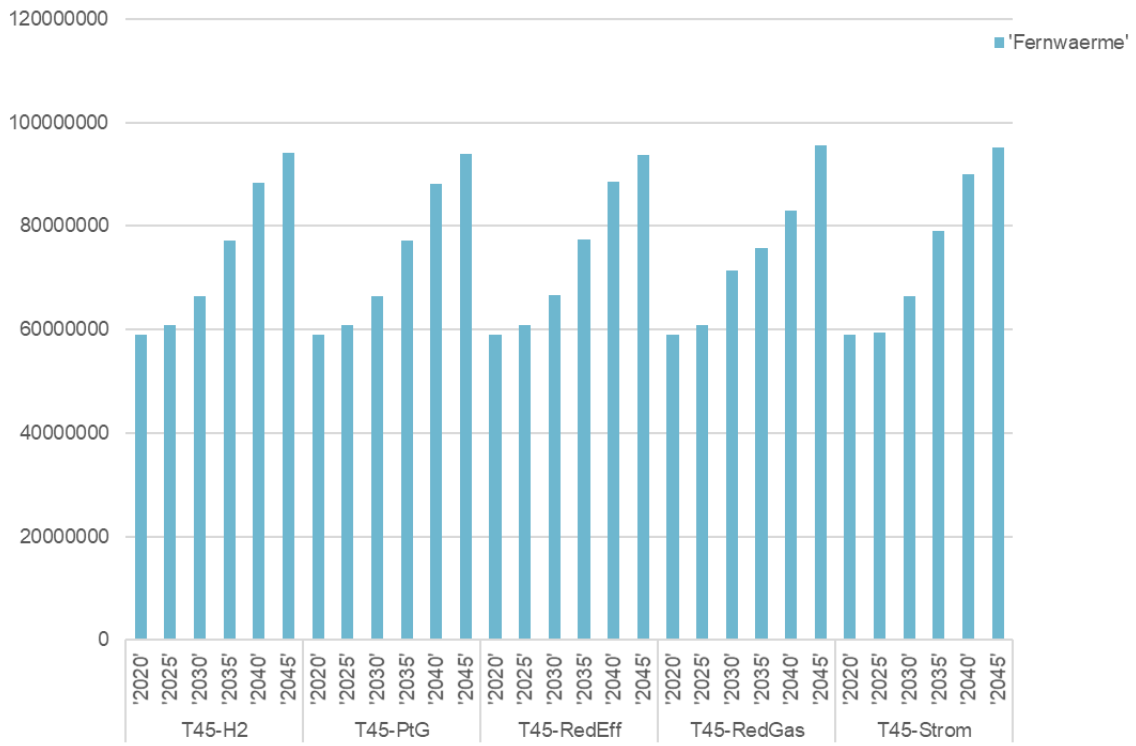
Es ist höchst unwahrscheinlich, dass die Ersatztechnologien für den raschen Wegfall von Erdgas in dem hier gezeigten Maß aufwachsen können. Weder Wärmenetze noch Wärmepumpen oder erneuerbare Gase sind in der hier erforderlichen Geschwindigkeit und Menge zu erwarten. Nach 2025 installierte Öl- und Holzheizungen können vielfach nicht bis zum Ende ihrer technischen Nutzungsdauer betrieben werden. Das Szenario zeigt, dass so grundlegende Umwälzungen nicht mehr mit den bestehenden Marktmechanismen und Technologien zu beherrschen sind, sondern disruptive Technologie- und Roll-out-Lösungen brauchen. Insofern kann es als Ausgangspunkt dienen für Szenarien, bei denen harte äußere Zwänge enge zeitliche Grenzen setzen.

1.8 Gegenüberstellung einzelner Technologien

1.8.1 Wärmenetze

In allen Szenarien ist ein gleichmäßiger Hochlauf der Wärmenetz-Wärme auf rd. 94 TWh in 2045 unterstellt. Dies wird als äußerst ambitioniert eingeschätzt. Der Hochlauf entspricht einer Steigerung des Wärmeabsatzes von knapp 60 Prozent gegenüber 2020. Pro Jahr werden durchschnittlich 1,6 TWh zugebaut. Durch den gleichzeitig sinkenden Wärmebedarf der Gebäude muss die Anzahl der Wärmenetzanschlüsse um den Faktor 2,9 bis 3,1 (T45-Strom) wachsen. Dazu sind jährlich 130.000 bis 150.000 Neuanschlüsse sowie ein Zubau von 600 bis 1200 km Verteilnetztrassen erforderlich. Einzige Ausnahme ist das Szenario T45-RedGas. Hier gibt es eine abrupte Zunahme zwischen 2025 und 2030 aufgrund des radikalen Gasausstiegs.

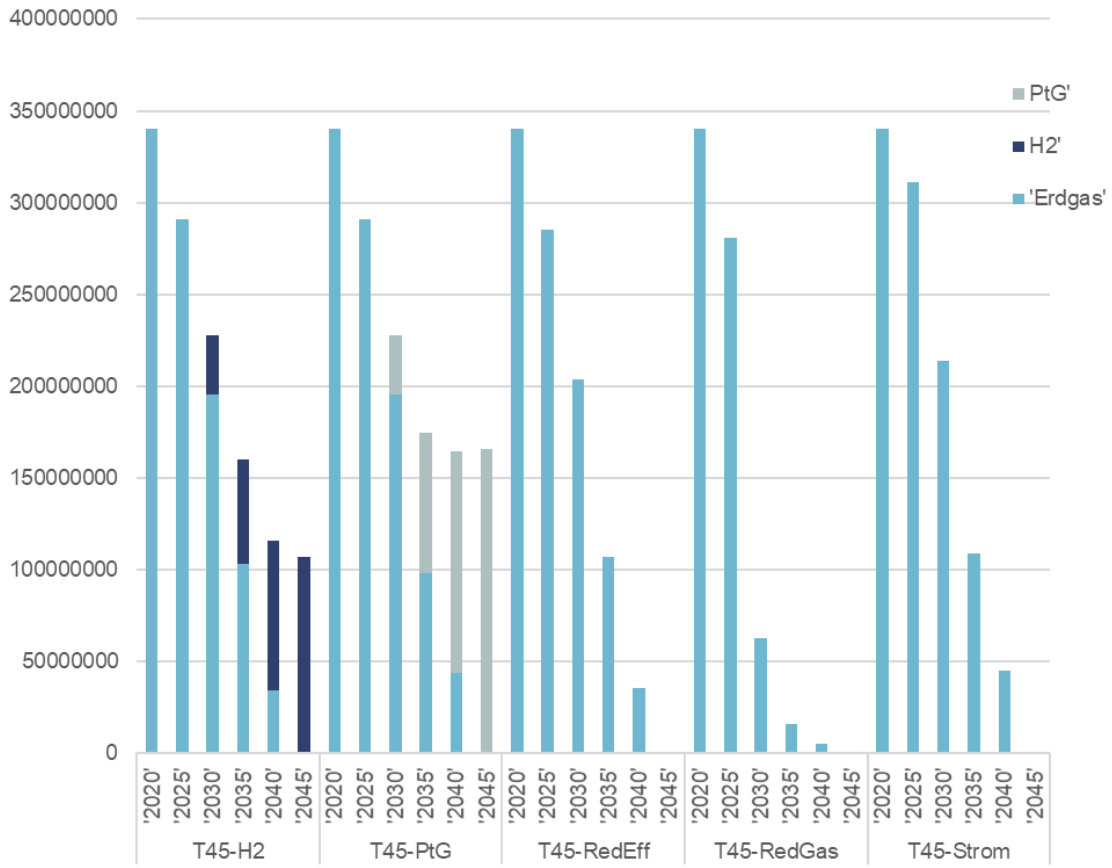
Abbildung 1-14: Vergleich der Bereitstellung von Endenergie durch Wärmenetze



1.8.2 Gase

Der Verbrauch von fossilem Erdgas geht in allen Szenarien (außer T45-RedGas) bis 2030 auf eine ähnliche Menge zurück, um die Klimaziele für den Gebäudesektor einzuhalten. Bis 2045 geht er auf null herunter. In den Szenarien T45-PtG/PtL und T45-H_2 gibt es einen fließenden Übergang zu den jeweiligen erneuerbaren Gasen. In beiden Szenarien wird eine Menge von 32 TWh in 2030 vorausgesetzt. Während des Hochlaufs der erneuerbaren Gase sinkt der Gesamtgasverbrauch zunächst weiter, bis der Bestand an Gas-Heizkesseln sich wieder stabilisiert. Dies ist in T45-PtG/PtL früher und auf einem höheren Niveau erreicht als in T45-H_2, weil in T45-PtG/PtL keine Umstellung von Netzen oder Geräten erforderlich ist. Bis 2045 beträgt der Gasverbrauch in T45-PtG/PtL 166 TWh und in T45-H_2 107 TWh. Der Wieder-Hochlauf ist in beiden Szenarien dann noch nicht abgeschlossen.

Abbildung 1-15: Vergleich der Bereitstellung von Endenergie durch Gase

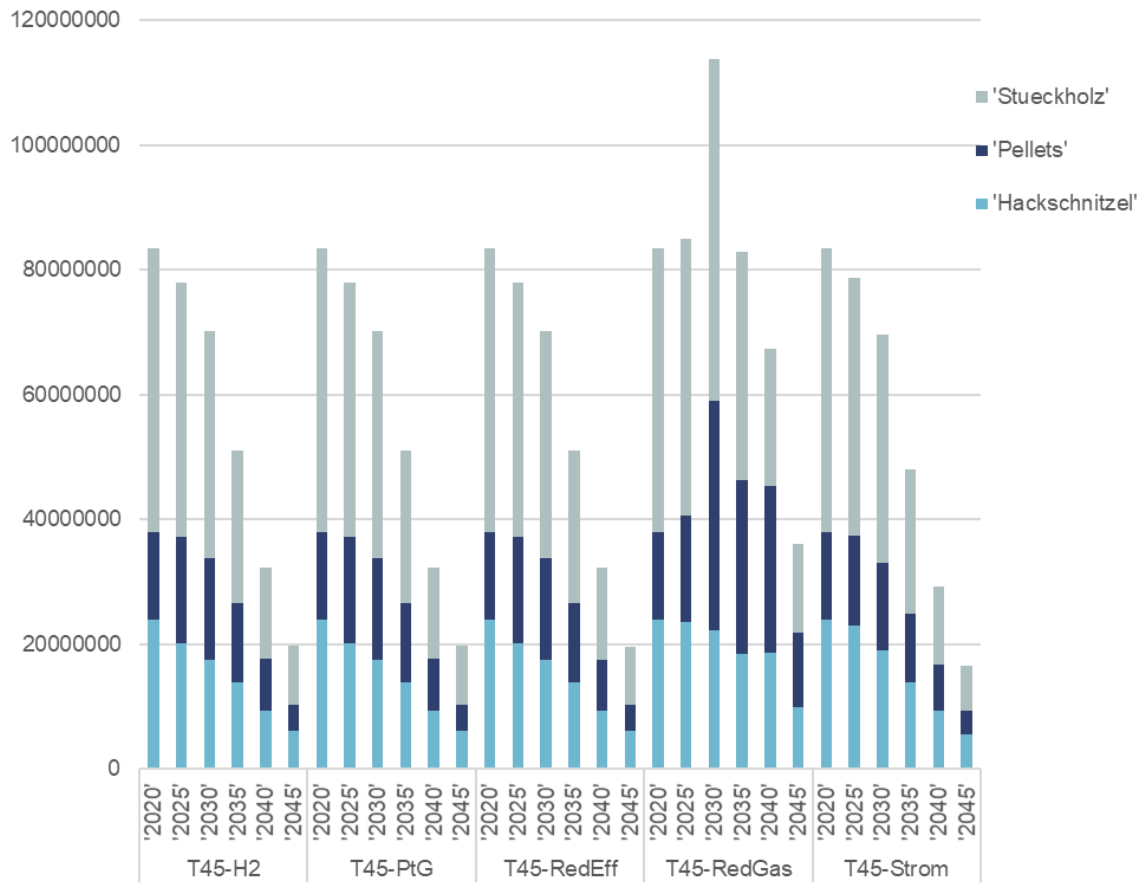


1.8.3 Biomasse

Der Einsatz von Biomasse geht in allen Szenarien (außer T45-RedGas) gleichmäßig zurück. Das Gesamtpotenzial für die Verbrennung in Gebäuden ist auf 31 TWh begrenzt (siehe Kapitel 1.2.3 und den separaten Bericht über das Biomassepotenzial (Frh ISI et al. 2023)). Aufgrund der hohen Sensitivität externer Einflüsse auf das Potenzial (zum Beispiel Waldschäden, Fleischreduktion) wird das Potenzial in den Szenarien sicherheitshalber nicht ausgeschöpft.

In T45-RedGas zeigt sich deutlich ein Peak-Verbrauch in 2030, der benötigt wird, um den abrupten Gasausstieg zu kompensieren. Danach werden die Wärmeerzeuger vor Ablauf ihrer Nutzungsdauer zurückgebaut. Dennoch ist dieser Bestand zu träge, so dass das Potenzial in 2045 überschritten wird.

Abbildung 1-16: Vergleich der Bereitstellung von Endenergie durch Biomasse



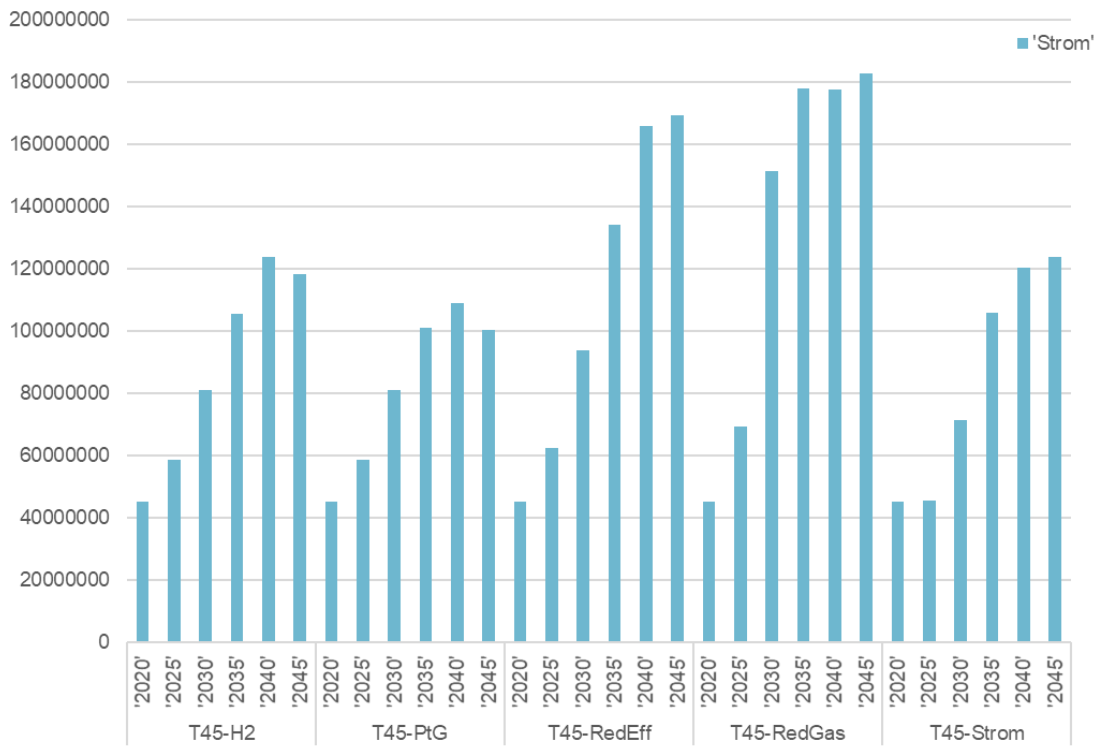
1.8.4 Strom

Der Stromverbrauch in Abbildung 1-17 umfasst den gesamten Verbrauch des Gebäudesektors inklusive Stromdirektheizungen, Wärmepumpen, elektrischer Wassererwärmung und Hilfsenergie. Haushaltsstrom ist nicht enthalten. Der Verbrauch wächst in allen Szenarien mindestens auf das Doppelte. In 2045 hat das Szenario T45-PtG/PtL den geringsten Stromverbrauch (100,5 TWh) gefolgt von T45-H_2 (118,2 TWh) und T45-Strom (123,8 TWh). In beiden Gas-Szenarien gibt es einen Stromverbrauchs-Peak in 2040, nach dem der Verbrauch durch den Hochlauf der erneuerbaren Gase wieder sinkt. Der Stromverbrauch in T45-H_2 ist in 2045 nur 4,5 Prozent geringer als in T45-Strom, obwohl 3,3 Mio. Wärmepumpen weniger installiert sind. Das ist mit den hohen Synergieeffekten zwischen Gebäudeeffizienz und Wärmepumpeneffizienz in T45-Strom zu erklären.

Wie stark diese Synergie ist, wird auch im Vergleich zwischen T45-Strom und T45-RedEff sichtbar. Diese Szenarien unterscheiden sich vor allem durch die Effizienzanforderungen an Bestandssanierungen. Der Verbrauch in T45-RedEff steigt bis 2045 auf 169,4 TWh und ist damit um 45,6 TWh bzw. 37 Prozent höher als in T45-Strom. Weil der Energiebedarf der Gebäude höher ist, laufen die Wärmepumpen mit geringerer Effizienz. Zudem müssen mehr Wärmepumpen installiert werden, um die Sektorziele einzuhalten. Dadurch müssen sie vermehrt in weniger geeigneten Gebäuden eingesetzt werden.

In T45-RedGas steigt der Verbrauch in 2045 auf 184,8 TWh. Durch den plötzlichen Gasausstieg sind hier noch Wärmepumpen mit Unterstützung durch direktelektrische Heizstäbe in Betrieb.

Abbildung 1-17: Vergleich der Bereitstellung von Endenergie durch Strom



1.9 Fazit

Die Szenarien stehen nicht gleichberechtigt nebeneinander, sondern es gibt große Unterschiede hinsichtlich ihrer spezifischen Herausforderungen und der allgemeinen Umsetzbarkeit. Der Ambitionsgrad ist in allen Szenarien außerordentlich hoch, was bereits aus dem Ziel des klimaneutralen Gebäudebestands, der in 23 Jahren erreicht werden soll, resultiert. Wenn dies akzeptiert ist, zeigt sich, dass die drei Hauptszenarien jeweils eine kritische Annahme enthalten, aber jenseits davon umsetzbar erscheinen. In T45-Strom ist die kritische Annahme die Umsetzung der hohen Effizienzstandards bei der Gebäudehülle, in T45-PtG/PtL und T45-H_2 ist es die verfügbare Menge der erneuerbaren Gase in 2030. Dagegen zeigen T45-RedEff und T45-RedGas die Konsequenzen der unterstellten Pfade auf: Sie erfordern so abrupte Veränderungen der Gebäude- und Beheizungsstruktur, dass sie als nicht realisierbar einzustufen sind. Die zentralen Ergebnisse und Einordnungen zeigt Tabelle 1-9 im Vergleich.

Tabelle 1-9: Gegenüberstellung und Einordnung der Szenarien

	T45-Strom	T45-PtG/PtL	T45-H_2	T45-RedEff	T45-RedGas
Reduktion des Endenergie-verbrauchs	48%	34%	34%	35%	35%
Anzahl Wärmepumpen in 2030 in Mio. Stück	5,4	5,2	5,2	7,4	12,2
Anzahl Wärmepumpen in 2045 in Mio. Stück	18,3	10,0	13,4	18,8	19,4
Anzahl Hybrid-Wärmepumpen in 2030 in Mio. Stück	0,34	2,0	2,0	0,63	-
Einordnung Wärmepumpen-hochlauf	Synergien mit ambitionierter Gebäudeeffizienz. Dadurch sind Hybrid-Wärmepumpen kaum erforderlich. Realistischer Hochlauf	Starker Zubau für Gas-Szenario. Hybrid-Wärmepumpen können nach 2030 mit PtG betrieben werden.	Starker Zubau für Gas-Szenario. Hybrid-Wärmepumpen können nach 2030 mit Wasserstoff betrieben werden, sofern das Gasnetz umgestellt ist.	Unrealistisch hoher Anstieg von Wärmepumpen erforderlich, um geringere Gebäude-effizienz zu kompensieren. Keine Versorgungs-alternativen	Extremer Anstieg von Wärmepumpen erforderlich. Hybrid-WP können nicht eingesetzt werden. JAZ extrem schlecht.
Endenergiedeckung mit Wärmenetzen in 2045 in TWh	95	94	94	94	94
Stromverbrauch im Gebäudesektor in 2045 in TWh	124	101	118	169	185
Endenergiedeckung mit Biomasse in 2045 in TWh	17	20	20	20	24
Einordnung Transformationspfad	Hohe Gebäudeeffizienz ist technisch anspruchsvoll und wenig akzeptiert. Wird sie umgesetzt, ist das Szenario robust und nutzt bestehende EE-Potenziale effektiv.	Inkonsistenter Pfad wegen später Verfügbarkeit von PtG. Bis 2030 Schwenk zu Wärmepumpen, danach zurück zu Gaskesseln.	Inkonsistenter Pfad wegen später Verfügbarkeit von Wasserstoff. Bis 2030 Schwenk zu Wärmepumpen, danach zurück zu Gaskesseln. Gasnetzumstellung erschwert Gaskessel Roll-Out nach 2030.	Schlechtere Gebäudeeffizienz - erfordert mehr Wärmepumpen - mindert JAZ - erhöht Stromverbrauch um 37%	unrealistischer Ausbau von Wärmenetzen und Wärmepumpen, sowie inkonsistenter Ausbau von Holzheizungen

- In allen Szenarien sind äußerst ambitionierte Maßnahmen erforderlich, um die Ziele in 2030 und 2045 zu erreichen.
- Synergieeffekte zwischen Gebäudeeffizienz und Wärmepumpen in T45-Strom. Bei reduzierter Effizienz ist ein unrealistisch hoher Wärmepumpen-Hochlauf erforderlich.
- Die Gas-Szenarien können das Sektorziel nur einhalten, wenn 2030 min. 32 TWh Wasser-stoff, synthetisches Methan oder Biomethan in der Breite verfügbar sind und der gesamte Gasverbrauch bis dahin um ein Drittel gesenkt wird.
- Durch die späte Verfügbarkeit von Wasserstoff bzw. synthetischem Methan schwenkt der Heizungsmarkt bis 2030 auf Wärmepumpen und danach zurück zu Gaskesseln. Bis 2045 wächst der Verbrauch von Wasserstoff auf 107 TWh (T45-H_2) bzw. EE-Methan auf 166 TWh (T45-PtG/PtL).
- In allen Szenarien findet mindestens eine Verdoppelung des Stromverbrauchs statt.

- In allen Szenarien muss die Anzahl der Wärmenetzanschlüsse knapp verdreifacht werden.
- Die künftige Verfügbarkeit von fester Biomasse für den Gebäudesektor ist fraglich (Rückgang um min. zwei Drittel).
- Hybrid-Wärmepumpen werden nur zwischen 2024 und 2030 installiert.

Literaturverzeichnis

Beuth Hochschule für Technik Berlin, ifeu, 2012, Technische Restriktionen bei der energetischen Modernisierung von Bestandsgebäuden, im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), 2020, Die Nationale Wasserstoffstrategie

Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB), 2022, Gemeinsame Absichtserklärung, Mehr Tempo bei der Transformation der Wärmeversorgung: Wir brauchen schneller mehr Wärmepumpen, https://www.bmwsb.bund.de/SharedDocs/downloads/Webs/BMWSB/DE/veroeffentlichungen/termine/gemeinsame-absichtserklaerung.pdf?__blob=publicationFile&v=2, abgerufen 01.11.2022

Bundesverband Wärmepumpe (BWP), 2022, Absatzzahlen für Heizungswärmepumpen; in Deutschland 2015 bis 2021, https://www.waermepumpe.de/presse/pressemitteilungen/details/starkes-wachstum-im-waermepumpenmarkt/#content, abgerufen 01.11.2022

Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e. V., 2021, Technischer Hinweis – Merkblatt DVGW G 221 (M), Leitfaden zur Anwendung des DVGW-Regelwerks auf die leitungsgebundene Versorgung der Allgemeinheit mit wasserstoffhaltigen Gasen und Wasserstoff

E.ON, Avacon und DVGW, 2021, Gemeinsame Presseinformation, Erstmals 20 Prozent Wasserstoff im deutschen Gasnetz, https://www.dvgw.de/medien/dvgw/verein/aktuelles/presse/gempi-dvgw-avacon-eon-beimischung-h2.pdf, abgerufen 01.11.2022

Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI, Consentec, ifeu, TU Berlin, 2023, Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland 3 -T45 Welten - Rahmendaten zu Biomassepotenzialen und den Emissionen aus dem Landwirtschafts- und dem LULUCF-Sektor, im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz, https://langfristszenarien.de/enertile-explorer-wAssets/docs/LFS-3_T45_Bericht_Biomassepotenziale_20230724_o.Ae_.pdf

Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI, Consentec, ifeu, TU Berlin, 2023, Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland 3 -T45 Welten - Webinar Netze, im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz, https://langfristszenarien.de/enertile-explorer-wAssets/docs/Webinar-Netze.pdf

IEA (2021), World Energy Outlook 2021, IEA, Paris, https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2021

ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung, 2021, Energieeffizienz als Türöffner für erneuerbare Energien im Gebäudebereich

Koalitionsvertrag 2021— 2025 zwischen der Sozialdemokratischen Partei Deutschlands (SPD), Bündnis 90 / die Grünen und den Freien Demokraten (FDP)

Öko-Institut, Fraunhofer ISI, IREES, Thünen-Institut, Projektionsbericht 2021 für Deutschland

Umweltbundesamt (UBA), 2022, Entwicklung und Zielerreichung der Treibhausgas-Emissionen in Deutschland in der Abgrenzung der Sektoren des Bundes-Klimaschutzgesetztes, https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/treibhausgasminderungsziele-deutschlands#nationale-treibhausgasminderungsziele