
Wärmewende 2030

Schlüsseltechnologien zur Erreichung der mittel- und langfristigen Klimaschutzziele im Gebäudesektor

STUDIE

Agora
Energiewende



Wärmewende 2030

IMPRESSUM

STUDIE

Wärmewende 2030

Schlüsseltechnologien zur Erreichung der mittel- und langfristigen Klimaschutzziele im Gebäudesektor

ERSTELLT IM AUFTRAG VON

Agora Energiewende
Anna-Louisa-Karsch-Straße 2 | 10178 Berlin
T +49 (0)30 700 14 35-000
F +49 (0)30 700 14 35-129
www.agora-energiewende.de
info@agora-energiewende.de

PROJEKTLEITUNG

Matthias Deutsch
matthias.deutsch@agora-energiewende.de

Satz: UKEX GRAPHIC und Juliane Franz
Titelbild: iStock/bubutu-
Druck: produtur GmbH

107/01-S-2017/DE

Veröffentlichung: Februar 2017

DURCHFÜHRUNG DER STUDIE

Hauptbearbeitung

Fraunhofer-Institut für Windenergie und
Energiesystemtechnik (IWES)
Königstor 59 | 34119 Kassel

Norman Gerhardt, Fabian Sandau, Dr. Sarah
Becker, Angela Scholz

Entwicklung Gebäudewärme und Einbindung
von Wärmepumpen

Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP)
Gottschalkstr. 28a | 34127 Kassel

Patrick Schumacher, Dr. Dietrich Schmidt

DANKSAGUNG

Wir danken den Teilnehmern des Expertenworkshops für die Beiträge zur Diskussion und den Verantwortlichen der in dieser Analyse verglichenen Szenariostudien für ihre Mitwirkung – darunter Vertreter des Fraunhofer-Instituts für Solare Energiesysteme, des Öko-Instituts und der Prognos AG. Die Verantwortung für die Ergebnisse und Schlussfolgerungen liegt ausschließlich bei Agora Energiewende und Fraunhofer IWES und IBP.

Bitte zitieren als:

Fraunhofer IWES/IBP (2017): Wärmewende 2030. Schlüsseltechnologien zur Erreichung der mittel- und langfristigen Klimaschutzziele im Gebäudesektor. Studie im Auftrag von Agora Energiewende

www.agora-energiewende.de

Vorwort

Liebe Leserin, lieber Leser,

der Klimaschutzplan 2050 der Bundesregierung gibt auch für den Gebäudesektor ein Klimaschutzziel vor: Dieser soll im Jahr 2030 nur noch 70 bis 72 Millionen Tonnen CO₂ ausstoßen. Die Wärmewende bei Gebäuden muss sich auf drei Pfeiler stützen: Energieeffizienz, CO₂-arme Wärmenetze und objektnahe Erneuerbare Energien. Offen ist jedoch, wie groß der Beitrag dieser Ansätze jeweils ausfallen sollte – gerade auch mit Blick auf den Pfad in Richtung des ehrgeizigen Klimaschutzziels 2050.

Wir haben daher die Fraunhofer-Institute für Windenergie und Energiesystemtechnik (IWES) und für

Bauphysik (IBP) beauftragt, Mindestniveaus für Schlüsseltechnologien und -ansätze zur Dekarbonisierung zu untersuchen. Im Ergebnis zeigt sich, dass wir bei der energetischen Sanierung, der Marktdurchdringung mit Wärmepumpen und dem Ausbau der Wärmenetze noch deutlich nachlegen müssen, um die Energiewende im Gebäudewärmesektor auf den richtigen Weg zu bringen.

Ich wünsche Ihnen eine anregende Lektüre!

Ihr Dr. Patrick Graichen
Direktor Agora Energiewende

Die Ergebnisse auf einen Blick:

1

Der Wärmesektor braucht den Ölausstieg: Der klimagerechte und kosteneffiziente Gebäudewärmemix im Jahr 2030 enthält rund 40 Prozent Gas, 25 Prozent Wärmepumpen und 20 Prozent Wärmenetze – aber fast kein Öl. Während Gas in seiner Bedeutung damit ungefähr dem heutigen Niveau entspricht, sollten aus Klimaschuttsicht die Ölheizungen bis 2030 weitestgehend durch Umweltwärme (Wärmepumpen) ersetzt werden. Wärmenetze sind ebenfalls zentral; bis zum Jahr 2030 vor allem in Verbindung mit Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen und zunehmend stärker mit Solarthermie, Tiefengeothermie, industrieller Abwärme und Großwärmepumpen.

2

Effizienz entscheidet: Der klimagerechte Gebäudewärmeverbrauch im Jahr 2030 ist um ein Viertel kleiner als 2015. Energieeffizienz ist die tragende Säule der Dekarbonisierung, sie macht Klimaschutz kostengünstig. Hierfür ist eine Sanierungsrate von zwei Prozent pro Jahr verbunden mit einer großen Sanierungstiefe nötig. Die Trendentwicklung bei der energetischen Gebäudesanierung ist aber völlig unzureichend, um dieses Ziel zu erreichen.

3

Die Wärmepumpenlücke: In Trendszenarien werden bis 2030 rund zwei Millionen Wärmepumpen installiert – gebraucht werden aber bis dahin fünf bis sechs Millionen. Um dies zu erreichen, sollten Wärmepumpen nicht nur in Neubauten, sondern auch in Altbauten frühzeitig installiert werden, zum Beispiel als bivalente Wärmepumpensysteme mit fossilen Spitzenlastkesseln. Werden die Wärmepumpen flexibel gesteuert und ersetzt man bis 2030 die alten Nachtspeicherheizungen durch effiziente Heizungen, führen die fünf bis sechs Millionen Wärmepumpen kaum zu einer Steigerung der Spitzenlast, die durch thermische Kraftwerke gedeckt werden muss.

4

Erneuerbarer Strom für die Wärmepumpen: Für 2030 brauchen wir ein Erneuerbare-Energien-Ziel von mindestens 60 Prozent am Bruttostromverbrauch. Um das 2030-Klimaziel zu erreichen, muss der zusätzliche Stromverbrauch, der aus dem Wärme- und Verkehrssektor kommt, CO₂-frei gedeckt werden. Die im EEG 2017 beschlossenen Erneuerbare-Energien-Ausbau-Mengen reichen hierfür aber nicht aus.

Inhalt

Kurzfassung	7
2 Hintergrund und methodischer Ansatz	21
3 Dekarbonisierungsoptionen in den Sektoren	25
3.1 Gebäudewärme	25
3.2 Industrielle Prozesswärme	31
3.3 Verkehr	32
3.4 Strom	33
4 Szenarienvergleich: Mindestniveaus zum Einsatz von Schlüsseltechnologien im Gebäudewärmesektor	37
4.1 Vergleichene Szenarien	37
4.2 Treibhausgasemissionen	38
4.3 Gebäudewärmeverbrauch	39
4.4 Wärmenetze und Erneuerbare-Energien-Optionen	41
4.5 Dezentrale Wärmepumpen	42
4.6 Stromverbrauch für Wärmeanwendungen	46
4.7 Zusammenfassung	47
5 Sensitivitätsrechnungen zum Energiesystem 2030	51
5.1 Klimaziele für 2030 in Deutschland und Europa	51
5.2 Einführung und Übersicht der Sensitivitäten	52
5.3 Basisszenario (Basis KK)	56
5.4 Basisszenario mit Berücksichtigung von Brennstoffwechsel (Basis KK + Gas)	60
5.5 Defizitvariante mit geringerer Dämmung (Dämm(-))	63
5.6 Defizitvariante mit weniger E-Mobilität (EMob(-))	66
5.7 Defizitvariante mit weniger dezentraler Flexibilität (Flex(-))	69
5.8 Zusammenfassung: Wärmepumpen und Spitzenlast	72
6 Kritische Weichenstellungen vor 2030	75
6.1 Pfadabhängigkeiten 2030 für Gebäudewärme in Hinblick auf langfristige Klimaziele und offene Fragen	75
6.2 Schlussfolgerungen für den Stromsektor	79
7 Anhang	83
7.1 Vergleich zur Energieeffizienzstrategie Gebäude	83
7.2 Luftwärmepumpen, bivalente Wärmepumpensysteme, Erdwärmepumpen, Gaswärmepumpen und Ölheizungen	84
7.3 Kosten zusätzlicher Gasturbinen zur Deckung der Spitzenlast	88
7.4 Szenarioannahmen und Detailergebnisse zu Gebäuden	88
Literaturverzeichnis	89

Kurzfassung

Wo müssen wir 2030 stehen, damit wir die Energiewendeziele 2050 erreichen können?

Der Weg zur Verringerung der deutschen Treibhausgasemissionen um 80 bis 95 Prozent gegenüber 1990 ist noch lang. Dabei alleine auf das Zieljahr 2050 zu schauen, birgt das Risiko, die notwendigen Maßnahmen auf die lange Bank zu schieben. Für die Zwischentappe 2030 gab es bisher vor allem ein Gesamtminderungsziel von minus 55 Prozent Treibhausgasemissionen gegenüber 1990 sowie ein Unterziel für den nicht vom EU-Emissionshandel abgedeckten Bereich von minus 38 Prozent gegenüber 2005.¹

Die vorliegende Analyse liefert robuste Leitplanken für den Zwischenschritt 2030, um einen klareren Rahmen für wichtige Zielgrößen entwickeln und rechtzeitig die notwendigen Maßnahmen mit dem Planungshorizont 2030 anstoßen zu können. Sie fokussiert auf Mindestniveaus für die Durchdringung von Schlüsseltechnologien an der Schnittstelle von Strom- und Wärmesektor, die bis 2030 erreicht werden sein müssen. Hierbei handelt es sich vor allem um Gebäudeeffizienz, Wärmenetze und Wärmepumpen, von denen die letzteren beiden vertieft analysiert werden.

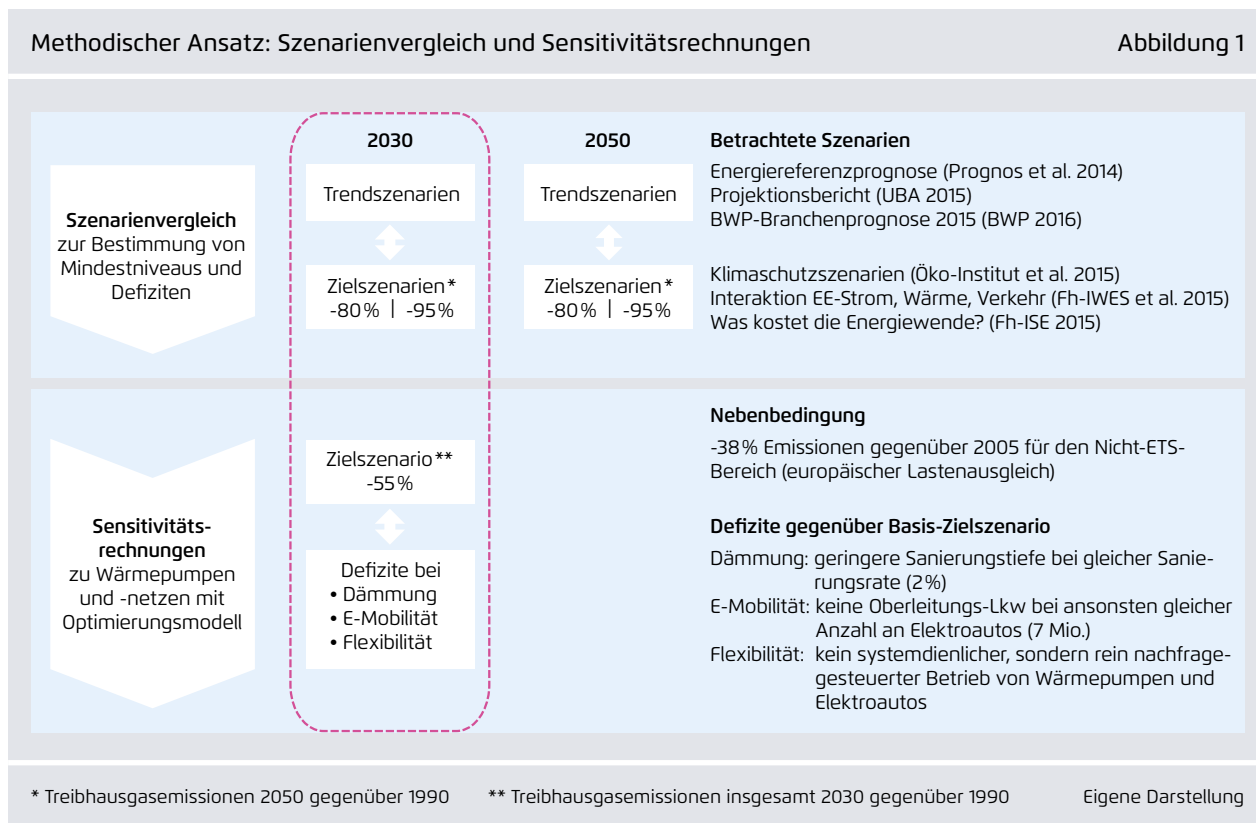
Zur Bestimmung der Mindestniveaus werden in einem ersten Schritt wesentliche aktuelle Zielszenarien für eine Treibhausgasreduzierung um 80 bis 95 Prozent miteinander verglichen (Abbildung 1). Hieraus ergeben sich Bandbreiten für die benötigte Entwicklung bis 2030 und 2050, die den bisher erwarteten Trends gegenübergestellt werden, um Defizite zu

identifizieren. Besonders relevant sind dabei mögliche Pfadabhängigkeiten – also die Frage, unter welchen Bedingungen die Gesellschaft 2030 tatsächlich noch die Wahl hat, sich für einen Pfad in Richtung 95 Prozent Treibhausgasreduzierung bis 2050 zu entscheiden.

In einem zweiten Schritt werden Sensitivitätsrechnungen für 2030 mit einem Energiesystem-Optimierungsmodell durchgeführt. Auf dieser Basis wird analysiert, inwieweit das Mindestziel einer Reduktion der Treibhausgase um 55 Prozent bis 2030 erreicht werden kann, wenn Defizite bei einzelnen Schlüsseltechnologien durch Maßnahmen in anderen Bereichen kompensiert werden müssen. Ausgangspunkt der Betrachtung ist ein Basisszenario mit einer Sanierungsrate von zwei Prozent bei hoher Sanierungstiefe, mit sieben Millionen Elektroautos und dem Einsatz von Oberleitungs-Lkws² sowie der systemdienlichen Steuerung von Wärmepumpen und Elektroautos. Die in den Sensitivitätsrechnungen variierten Parameter betreffen dabei die Gebäudedämmung, die Durchdringung der Elektromobilität sowie die Flexibilität von Wärmepumpen und Elektromobilität (Pkw und Lkw). Als weitere Nebenbedingung muss im Rahmen des europäischen Klimaschutzbeschlusses das Reduktionsziel (Basisjahr 2005) von minus 38 Prozent bis 2030 für den deutschen Nicht-Emissionshandels-Sektor eingehalten werden, das heißt für die Bereiche dezentrale Wärme, Verkehr und Landwirtschaft.

1 Zusätzlich liegen seit Ende 2016 die Sektorziele des Klimaschutzplans 2050 vor. Diese konnten in der vorliegenden Arbeit noch nicht berücksichtigt werden (Bundesregierung 2016).

2 Elektro-Lkws (inklusive Batterie-elektrische und Plug-in-Hybrid-elektrische Lkws) haben dabei einen Anteil von 24 Prozent am Gesamtenergieverbrauch aller Lkws.



Der klimaneutrale Gebäudebestand 2050 muss auf Effizienz, objektnahe Erneuerbare Energien und dekarbonisierte Wärmenetze setzen

Stand der politischen Diskussion im Bereich der Gebäudewärme ist die Energieeffizienzstrategie Gebäude der Bundesregierung.³ In dieser werden Potenziale und Restriktionen für Verbrauchseinsparungen und Erneuerbare Energien ausgewertet, um daraus einen Lösungsraum zum Erreichen eines nahezu klimaneutralen Gebäudebestands abzuleiten – das heißt eine Reduktion des nicht erneuerbaren Primärenergiebedarfs bis 2050 um rund 80 Prozent gegenüber 2008.

Laut diesem Lösungsraum kann der Wärme-Endenergieverbrauch von Haushalten, Gewerbe und In-

dustriehallen durch Einsparungen um durchschnittlich 40 bis 60 Prozent gesenkt werden. Noch mehr Gebäudeeffizienz erscheint angesichts einer Vielzahl an Restriktionen schwer möglich. Für objektnahe Erneuerbare Energie aus Umweltwärme, Solarthermie und Biomasse mit ihren jeweiligen technologiespezifischen Restriktionen werden „realistisch erschließbare“ Potenziale angegeben. Erweitert man diese um aktuellere Potenzialschätzungen für Umweltwärme⁴ und den hierfür benötigten Wärmepumpenstrom, so ergibt sich eine Bandbreite für objektnahe Wärme aus Erneuerbaren Energien von 196 bis 447 Terawattstunden pro Jahr.⁵ Die Differenz im Vergleich zum Wärmeverbrauch muss durch dekarbonisierte Wärmenetze erbracht werden. Alle drei Säulen der Treib-

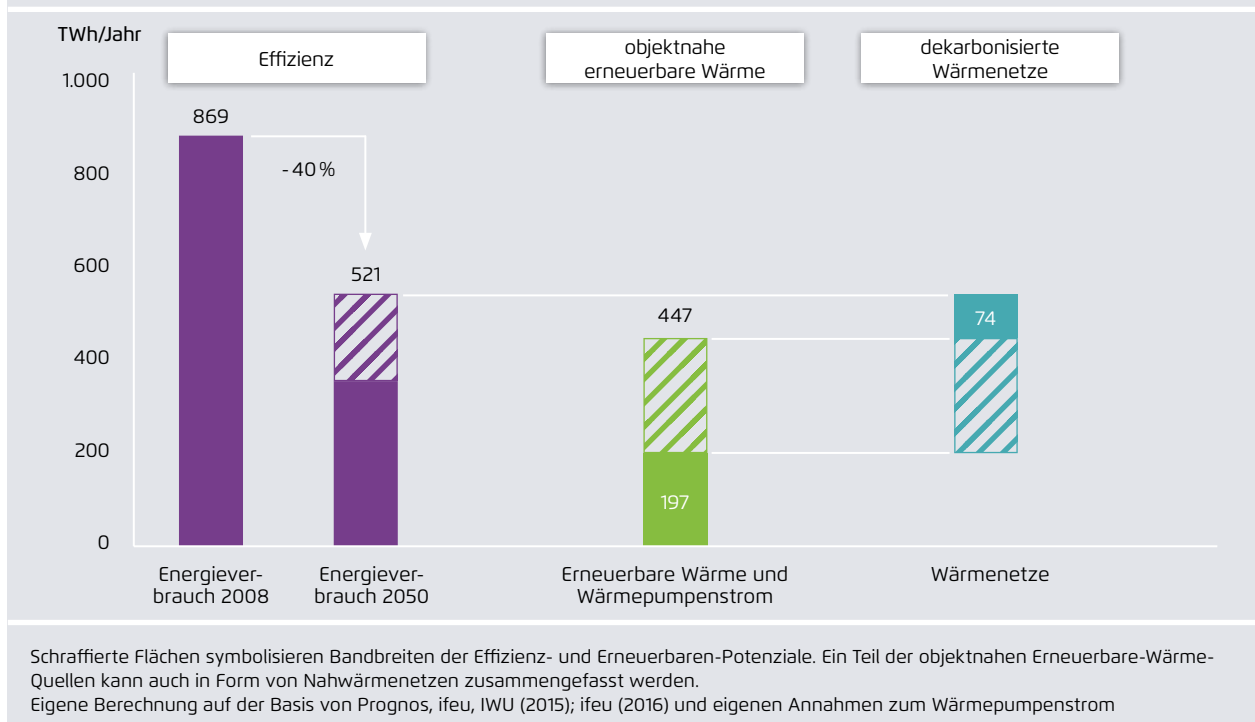
3 Die hier gemachten Aussagen beziehen sich dabei insbesondere auf das Hintergrundpapier (Prognos, ifeu, IWU 2015) zur Energieeffizienzstrategie Gebäude (BMWi 2015). Siehe dazu auch Bundesregierung (2016).

4 ifeu (2016)

5 Solarthermie: 53 bis 69 Terawattstunden pro Jahr; Biomasse: 69 bis 139 Terawattstunden pro Jahr; Umweltwärme: 58 bis 186 Terawattstunden pro Jahr. Hinzu kommt ein abgeschätzter Wärmepumpenstrom von 17 bis 53 Terawattstunden pro Jahr.

Dekarbonisierungs-Optionen am Beispiel einer 40-prozentigen Verringerung des Endenergieverbrauchs an Wärme bei Gebäuden in TWh pro Jahr

Abbildung 2



hausgasverringern im Gebäudewärmesektor sind beispielhaft anhand einer 40-prozentigen Verringerung des Wärmeenergieverbrauchs in Gebäuden in Abbildung 2 dargestellt. Dabei ist eine gewisse Trennschärfe unvermeidlich, da ein Teil der objekt-nahen Erneuerbare-Wärme-Quellen auch in Form von Nahwärmenetzen zusammengefasst werden kann.

Die Trendentwicklung bei Gebäudewärmeeffizienz und Wärmenetzen ist unzureichend.

Energieeffizienz ist die tragende Säule der Dekarbonisierung. Der Schlüssel für das Erreichen klimapolitischer Zielpfade liegt in der Sanierung von Bestandsgebäuden. Die verglichenen Zielszenarien gehen fast einheitlich von einem starken Rückgang des Wärmeverbrauchs um rund 40 Prozent bis 2030 und etwa 60 Prozent bis 2050 gegenüber 2008 (temperaturbereinigt) aus. Die Trendentwicklung beim Wärmeverbrauch reicht hierfür nicht aus – ganz besonders

dann nicht, wenn auf eine Treibhausgasumverminderung um 95 Prozent gegenüber 2008 abgezielt werden soll.

Wärmenetze helfen vor allem in Ballungsräumen, wo der Einsatz dezentraler Erneuerbarer an Grenzen stößt. Im Szenarienvergleich erscheint das Potenzial des Ausbaus von (Fern-)Wärmenetzen von heute circa 10 Prozent⁶ auf etwa 23 Prozent des Endenergiebedarfs bis 2050 deutlich steigerbar (Abbildung 3), aber dennoch beschränkt, da der Großteil des Wärmemarktes in allen Szenarien von dezentralen Heizkesseln bestimmt wird. Während bei den Minus-80-Prozent-Szenarien noch größere Bandbreiten für den notwendigen Wärmenetzanteil denkbar sind, werden die Spielräume in den Minus-95-Prozent-Szenarien erheblich kleiner: Bis 2030 muss sich der Anteil von Wärmenetzen am Endenergiebedarf der Gebäude insbesondere dann deutlich steigern, wenn für 2050 eine Verringerung der Treibhausgasemissionen um 95 Prozent gegenüber 1990 angestrebt wird.

⁶ ohne ländliche biogene Nahwärmenetze

Andernfalls erscheint der Sprung von einem niedrigen Niveau 2030 auf das hohe Niveau 2050 unrealistisch.

Für eine nachhaltige Dekarbonisierung der Wärmenetze sind eine starke Temperaturabsenkung und die Einbindung von Tiefengeothermie, Großsolarthermie oder/und Ab- und Umweltwärmenutzung (Abwasser, Industrie, Flüsse, Klärwasser u. a.) mittels Großwärmepumpen wesentlich. In den Sensitivitätsrechnungen für 2030 ergibt sich ein Ausbaubedarf der Wärmenetze auf 15 bis 21 Prozent des Gebäudeendenergieverbrauchs.⁷ Dabei erscheint insbesondere die Kombination mit Freiflächensolarthermie sinnvoll, was allerdings stark von den lokalen Gegebenheiten abhängt. Hier besteht weiterer Forschungsbedarf. Großwärmepumpen sind heute schon wirtschaftlich, wenn Kühlung und Wärmbedarf gleichzeitig anfallen,

und sie haben ein großes Potenzial für Wärmenetze. Insbesondere wenn höhere Quelltemperaturen und damit eine höhere Effizienz möglich ist, ist auch eine frühere Wirtschaftlichkeit gegeben. Im Bereich der Tiefengeothermie gibt es bereits heute einzelne Projekte, wohingegen Industrieabwärme bislang in einem äußerst geringen Maße genutzt wird.

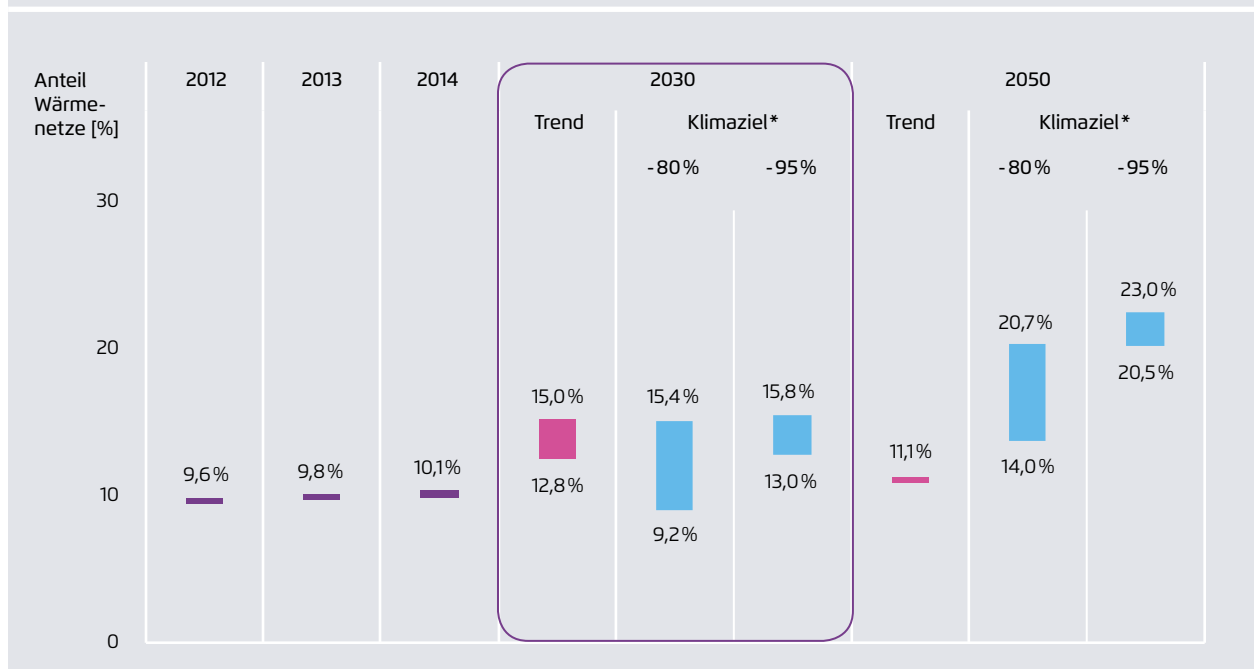
Bis 2030 benötigt Deutschland fünf bis sechs Millionen Wärmepumpen, um eine Treibhausgasminderung um 55 Prozent im Jahr 2030 und mindestens 80 Prozent im Jahr 2050 erreichen zu können.

In allen Zielszenarien zeigt sich die dezentrale Wärmepumpe zur Gebäudeversorgung als eine Schlüsseltechnologie mit hoher bis sehr hoher Marktdurchdringung. Im Vergleich dazu treten in den Trendszenarien die Hemmnisse des gegenwärtigen regulatorischen Rahmens zutage. Damit klafft im Jahr 2030 eine Lücke von etwa drei bis vier Millionen Wärmepumpen zwischen dem Niveau der Trend-

⁷ Hier werden höhere Werte als im Szenarienvergleich 2030 erreicht, da der größere Zubau an Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen in Wärmenetzen dazu dient, Defizite bei einzelnen Schlüsseltechnologien zu kompensieren.

Szenarienvergleich: Anteil von Wärmenetzen am Endenergiebedarf der Gebäude in Prozent

Abbildung 3



* Das Klimaziel minus 80 Prozent umfasst auch Szenarien mit 83 und 85 Prozent Treibhausgasminderung. Prognos et al. (2014); Fh-ISE (2015); Fh-IWES et al. (2015); Öko-Institut et al. (2015); UBA/BMUB (2015)

szenarien und dem benötigten Zielwert von fünf bis sechs Millionen Wärmepumpen (Abbildung 4).⁸

Der Wärmepumpenabsatz pro Jahr steigt in den Trendszenarien zwar um rund 60 Prozent gegenüber dem heutigen Stand, er müsste sich aber für die Erreichung der Zielszenarien im Mittel mehr als verfünffachen. Hierbei ist deutlich zwischen Neubau- und Bestandsgebäuden zu unterscheiden. Im Neubaubereich müssen gemäß Energieeinsparverordnung (fossile) Primärenergieanforderungen eingehalten werden, sodass Wärmepumpen trotz hoher Stromkosten seit 2016 im Absatzmarkt eine wichtige Rolle spielen. In Bestandsgebäuden beträgt der Anteil von Wärmepumpen an allen Heizungssystemen derzeit dagegen nur etwa zwei Prozent. Grundsätzlich können Teile dieses Wärmepumpenmarktes auch durch Nahwär-

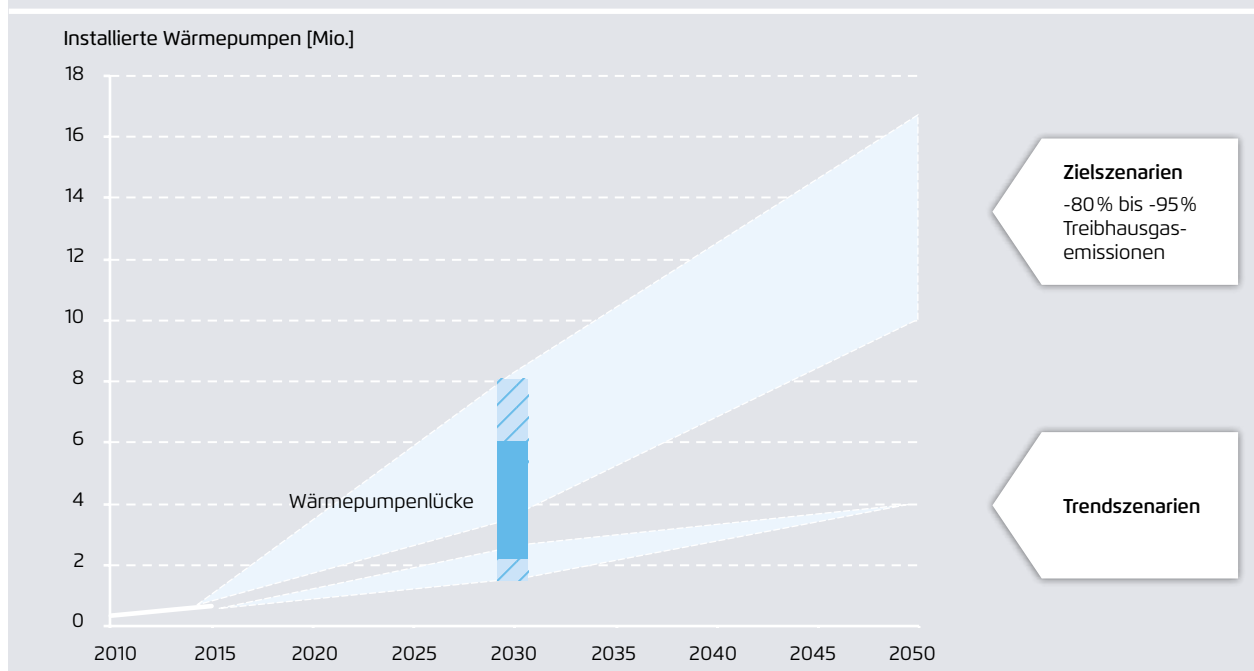
menetze zur Versorgung kleinerer Quartiere zum Beispiel auf Basis von Erdsondenfeldern gedeckt werden. Hier sind die Übergänge zwischen dezentralen und netzgebundenen Wärmepumpen fließend.

Angesichts der bestehenden Trägheiten und Restriktionen für Veränderungen des Heizungsbestands kann man nicht zu einem beliebigen Zeitpunkt von einem 80-Prozent- auf einen 95-Prozent-Treibhausgasminderungs-Pfad umschwenken. Abbildung 5 zeigt die Gelegenheitsfenster für einen Heizungstausch als gestrichelte Linien. Wenn keine Heizungssysteme vor Ende ihrer eigentlichen technischen Lebensdauer ersetzt – und damit entwertet – werden sollen, ist ein ambitioniertes Mindestniveau an Wärmepumpen für 2030 notwendig. Im Vergleich der beiden Beispielszenarien ISWV 83 und ISWV 95 zeigt sich, dass für 2030 der Punkt des oberen langfristigen Szenariopfades angestrebt werden müsste, was einem Wärmepumpenbestand von rund 8,1 Millionen Anlagen entspricht. Eine analoge Betrachtung für die beiden Klimaschutzszenarien KSz 80 und

8 Der Wert von fünf Millionen Wärmepumpen ergibt sich aus den weiter unten beschriebenen Sensitivitätsrechnungen für 2030; der Wert von 6 Millionen aus dem Klimaschutzziel von minus 95 Prozent bis 2050.

Anzahl der Wärmepumpen im Szenarienvergleich in Millionen und Wärmepumpenlücke

Abbildung 4

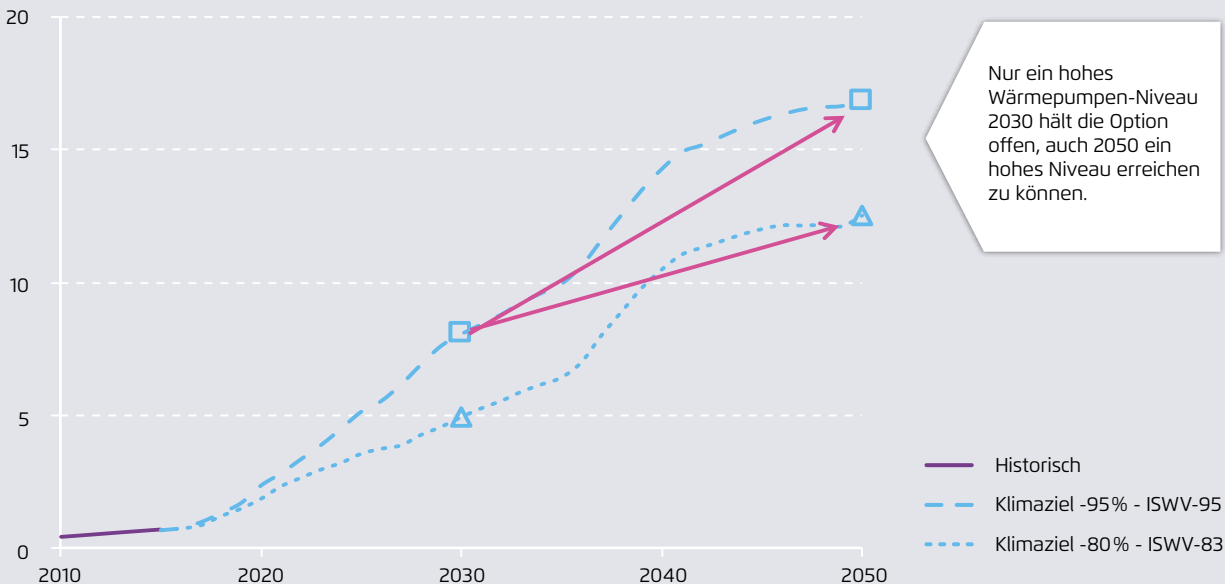


Ein Teil der Wärmepumpen in Einzelobjekten kann auch in Form von Nahwärmenetzen zusammengefasst werden. BWP (2016); Prognos et al. (2014); Fh-ISE (2015); Fh-IWES et al (2015); Öko-Institut et al. (2015); UBA/BMUB (2015)

Anzahl Wärmepumpen in den ISWV-Szenarien in Millionen

Abbildung 5

Installierte Wärmepumpen [Mio.]



Hinweis: Das entsprechende hohe Niveau in den Klimaschutzenszenarien (KSz 95) liegt bei rund 6 Mio. Wärmepumpen (2030), um bis 2050 dann rund 14 Mio. zu erreichen (Öko-Institut et al. 2015). Die gestrichelten Entwicklungspfade unterstellen, dass Heizungssysteme nicht vor Ende ihrer eigentlichen technischen Lebensdauer ersetzt werden. Diese beträgt bei fossilen Kesseln 25 Jahre. Fh-IWES et al. (2015)

KSz 95 ergibt für 2030 rund 5,8 Millionen Wärmepumpen. Insgesamt liegt also ein Mindestniveau 2030, welches dem Pfad in Richtung minus 95 Prozent Treibhausgasemissionen für 2050 offen hält, bei etwa 6 bis 8 Millionen Wärmepumpen.

Die Dekarbonisierung mithilfe von Wärmepumpen kann helfen, Defizite bei Gebäudedämmung und Elektromobilität bis 2030 zu kompensieren.

Ob die Emissionsziele für 2030 von minus 55 Prozent Treibhausgasemissionen gegenüber 1990 und minus 38 Prozent Emissionen im Nicht-ETS-Bereich gegenüber 2005 erreicht werden können, hängt von den Beiträgen der einzelnen Sektoren ab. Im Wärmebereich ist Gebäudedämmung entscheidend, im Verkehrssektor Elektromobilität. In einem Basisszenario für 2030 gehen wir von einer Steigerung der Gebäudesanierungsrate auf zwei Prozent bei hoher Sanierungstiefe und von einer starken Durchdringung der Elektromobilität aus, das heißt von sieben

Millionen Elektroautos im Jahr 2030 und einer frühzeitigen Einführung des Oberleitungs-Hybrid-Lkw. Außerdem bieten die neuen Stromverbraucher Flexibilität, weil Wärmepumpen mit Wärmespeichern installiert und Elektroautos systemdienlich geladen werden.

Zur Einordnung der folgenden Ergebnisse ist vorab festzuhalten, dass auch ein stärkerer Zubau an Wärmepumpen Teil eines Heizungsmix ist, der sich vor dem Hintergrund der Dekarbonisierungsziele dynamisch über die Zeit weiterentwickelt. Für das hier relevante Zieljahr 2030 werden im berechneten Basisszenario neben Wärmepumpen auch weiterhin in erheblichem Umfang dezentrale Gaskessel zugebaut, weil der Optimierungsalgorithmus nach der volkswirtschaftlich kostengünstigsten Lösung unter der Restriktion des vorgegebenen Treibhausgasemissionsziels sucht.⁹

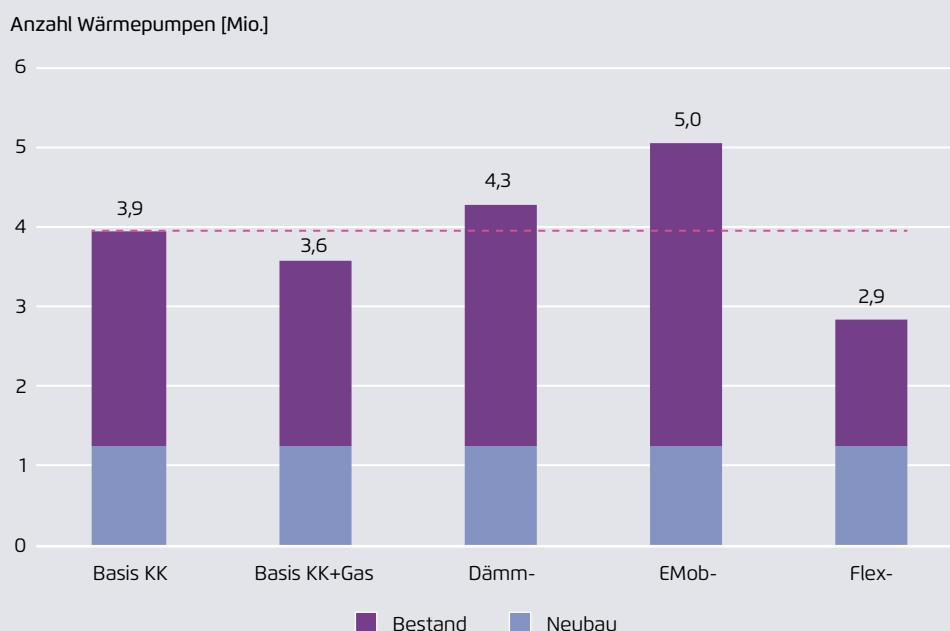
⁹ Details dazu finden sich im nächsten Abschnitt zum Gebäudewärmemix 2030.

In der Basisrechnung („Basis KK“) werden 2030 knapp vier Millionen installierte Wärmepumpen benötigt, um die Emissionsziele zu erreichen (Abbildung 6). Unterstellt man eine **geringere Sanierungstiefe („Dämm-“)**, steigt der Wärmeverbrauch. Die Dekarbonisierung der dezentralen Wärmeversorgung ist in diesem Szenario eine besondere Herausforderung: Bestandskessel, deren Emissionen

gesetzt sind, schränken das verfügbare CO₂-Budget, insbesondere im Nicht-ETS-Bereich, ein, während eine höhere Wärmenachfrage durch Zubau zu decken ist. Durch diesen Druck werden zum einen verstärkt Fernwärmelösungen eingesetzt, die die Emissionen aus dem Nicht-ETS-Bereich der dezentralen Anlagen in den ETS-Bereich verschieben, zum anderen wird stärker über Wärmepumpen dekarbonisiert.

Sensitivitätsrechnung mit Anzahl installierter Wärmepumpen in 2030 und Leistung und Energie für Wärmepumpen*

Abbildung 6



Varianten 2030	Basisszenarien		Sensitivitäten		
	Basis KK	Basis KK+Gas	Dämm-	EMob-	Flex-
Annahmen	Kohlekonsenspfad (18,5 GW Kohle-Kraftwerke)	Kohlekonsenspfad + Brennstoffwechsel von Kohle auf Gas	geringerer Dämmstandard	Geringerer Anteil von E-Mobilität	Keine dezentrale Flexibilität bei Wärmepumpen und Elektroautos**
Höchste abgerufene Leistung durch Wärmepumpen [GW]	17	11	20	21	10
Verbrauchte Energiemenge durch Wärmepumpen [TWh]	36	22	42	43	16

* Wärmepumpen beinhalten Erdwärmepumpen, monovalente und bivalente Luftwärmepumpen

** Elektroautos werden nicht netzdienlich geladen, Oberleitungs-Hybrid-Lkw können nicht auf Hybridbetrieb umschalten und Wärmepumpen werden ohne Wärmespeicher installiert

Insbesondere wird dies durch bivalente Luftwärmepumpen (in Kombination mit Gasspitzenlastkesseln) erreicht. Die Zahl der Wärmepumpen steigt damit auf über vier Millionen. Im Ausgleich dazu sinkt die Anzahl der neu installierten Gaskessel.

Bei einer **geringeren Durchdringung an Elektromobilität („EMob(-)“)** wird das CO₂-Budget im Nicht-ETS-Bereich noch stärker eingeschränkt. Im Ergebnis muss bei der Wärmeversorgung von Gebäuden noch stärker dekarbonisiert werden: Gaskessel werden deutlich weniger zugebaut, dafür kommen mehr Fernwärme und mehr und effizientere Wärmepumpen zum Einsatz (das heißt, der Anteil der Erdwärmepumpen erhöht sich). Die Zahl der Wärmepumpen steigt auf fünf Millionen im Jahr 2030, um die Einhaltung des Nicht-ETS-Ziels zu gewährleisten.

Bei **fehlender Flexibilität („Flex(-)“)** von Wärmepumpen und Elektroautos verringert sich die Zahl der Wärmepumpen auf knapp drei Millionen. Damit weicht das Optimierungsmodell diesen unflexiblen Verbrauchern aus. Stattdessen verschieben die im Modell neu zugebauten Fernwärmelösungen die Emissionen aus dem Nicht-ETS- in den ETS-Bereich, wo sie durch einen verstärkten Einsatz von Gaskraftwerken leichter kompensiert werden können. Diese kurzfristige Kostenoptimierung zahlt sich aber langfristig nicht aus, wenn noch ambitioniertere Emissionsziele erreicht werden sollen und die Elektrifizierung dieser Verbraucher unerlässlich wird. Auf lange Sicht ist die Flexibilität neuer Stromverbraucher wie Wärmepumpen oder Elektromobilität wesentlich, um fluktuierende Erneuerbare Energien effizient einzubinden. Flexibilität und die Nutzung von bivalenten Wärmepumpensystemen und Oberleitungs-Lkws können beide helfen, die Höchstlast zu reduzieren.

Durch Wärmepumpen kommt es grundsätzlich zu einer Erhöhung der Spitzenlast. In den hier betrachteten Sensitivitäten liegt die höchste abgerufene Leistung der Wärmepumpen bei 10 bis 21 Gigawatt.

Insgesamt zeigen die Sensitivitätsrechnungen, unter welchen Bedingungen die Klimaziele 2030 noch erreicht werden können. Vor dem Hintergrund einer unsicheren weiteren Entwicklung bei der Gebäudedämmung und der Elektromobilität sollte auf ein robustes Mindestniveau an Wärmepumpen für das Jahr 2030 abgezielt werden, mit dem auch mögliche Defizite in den beiden genannten anderen Bereichen kompensiert werden können. Ein solches Niveau liegt bei fünf Millionen Wärmepumpen.

Der klimagerechte Gebäudewärmemix im Jahr 2030 besteht aus rund 40 Prozent Gas, 25 Prozent Wärmepumpen und 20 Prozent Wärmenetzen.

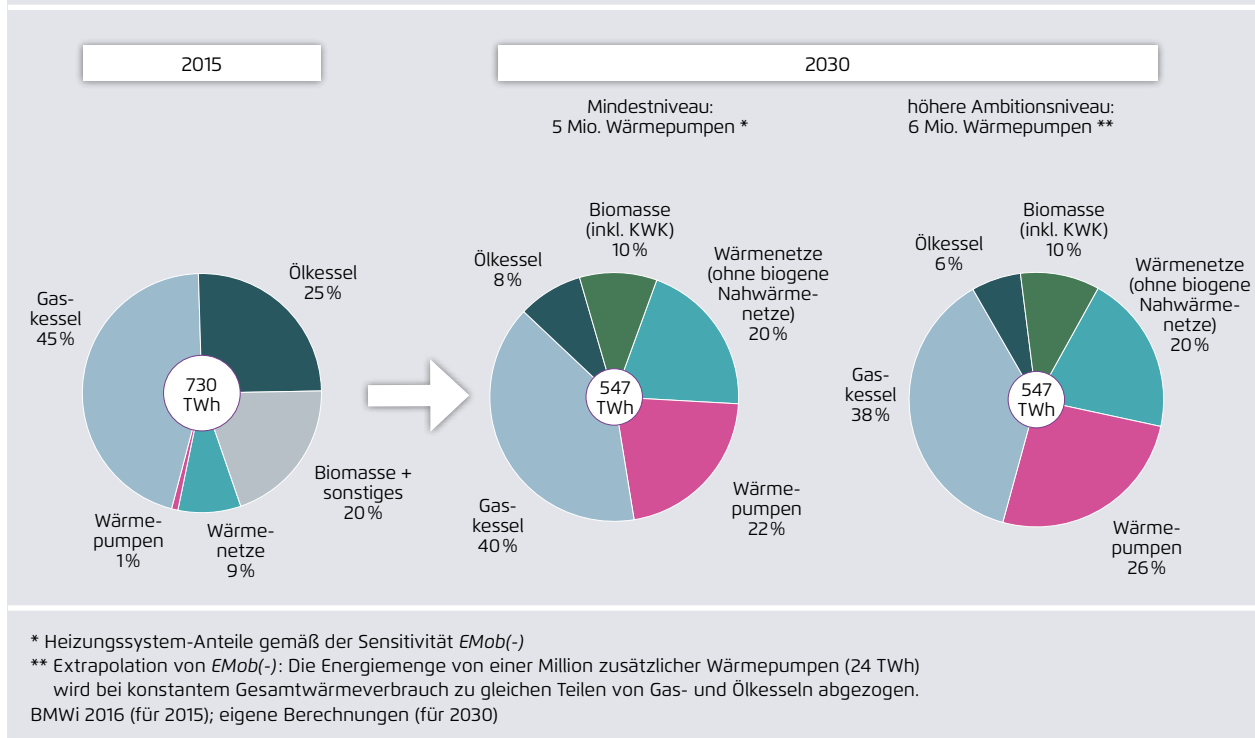
Eine klimagerechte Deckung des nach den Effizienzmaßnahmen im Jahr 2030 noch verbleibenden Gebäudewärmeverbrauchs von Haushalten und Gewerbe in Höhe von 547 Terawattstunden wird durch einen Mix aus Gas, Wärmepumpen und Fern- und Nahwärme bereitgestellt.

Aus der Berechnung der Sensitivität EMob(-) mit **fünf Millionen Wärmepumpen** für 2030 ergeben sich dabei folgende Anteile am Wärmeverbrauch (Abbildung 7): 40 Prozent Gaskessel, von denen knapp die Hälfte bis 2030 neu zugebaut werden; 22 Prozent Wärmepumpen, darunter mehr als die Hälfte Erdwärmepumpen und knapp ein Drittel bivalente Luftwärmepumpen, die in Kombination mit Gaskesseln betrieben werden¹⁰; 20 Prozent Fernwärmenetze, 10 Prozent Biomasse inklusive biogener Nahwärmenetze sowie 8 Prozent Ölkessel. Gegenüber der Ausgangsverteilung von 2015 mit einem gesamten Wärmeverbrauch von rund 730 Terawattstunden ergeben sich die größten prozentualen Veränderungen bei Ölheizungen, welche die höchsten spezifischen CO₂-Emissionen aufweisen. Der Ölanteil fällt von 25 Prozent (2015) auf 8 Prozent (2030).

¹⁰ Komplettlösungen mit beiden Wärmeerzeugern sind auch als sogenannte Hybridwärmepumpen erhältlich (BDH 2014).

Gebäudewärme-Mix 2015 und 2030 mit zwei verschiedenen Ambitionsniveaus für Wärmepumpen als Anteile am Wärmeverbrauch in Prozent

Abbildung 7



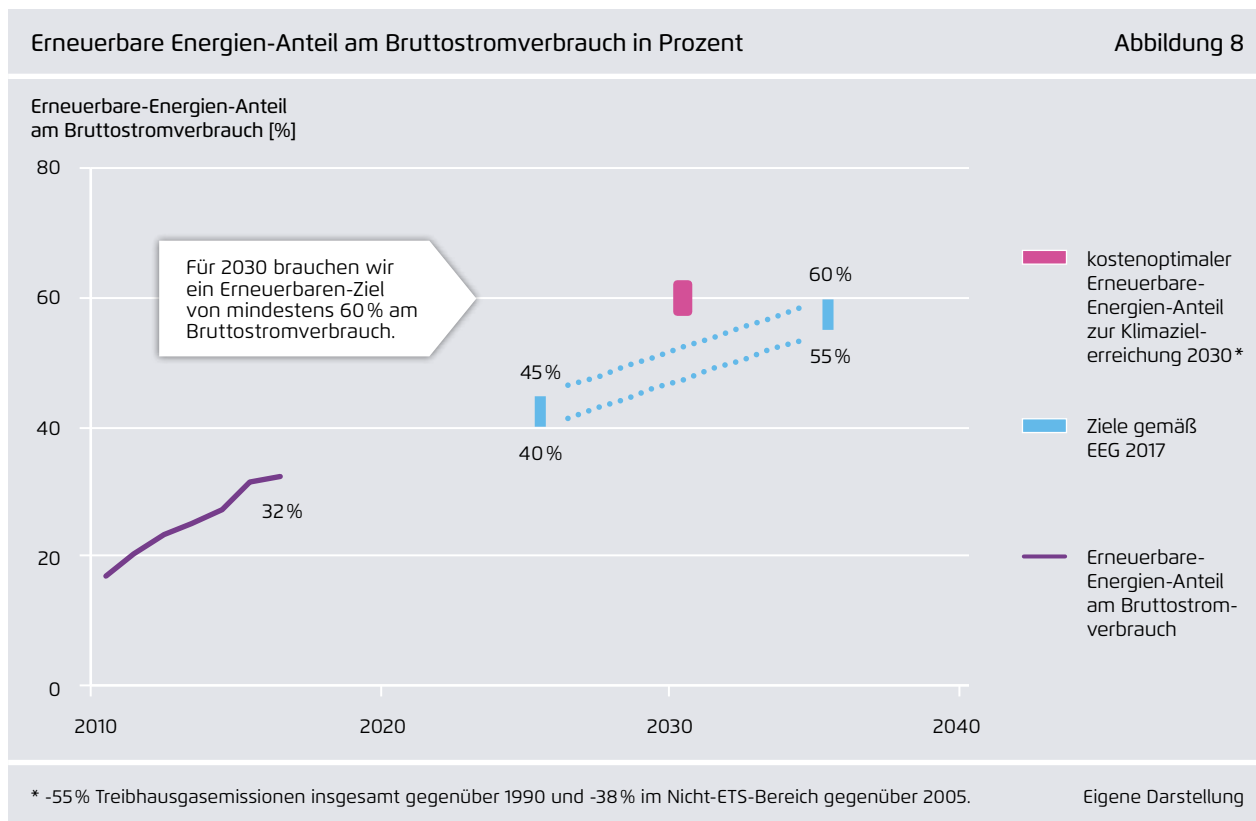
Die CO₂-ärmeren Gasheizungen verlieren im gleichen Zeitraum nur fünf Prozentpunkte. Die größten Zuwächse verzeichnen dagegen Wärmepumpen und Wärmenetze.

Wird ein höheres Ambitionsniveau mit sechs Millionen Wärmepumpen für 2030 angestrebt, welches den Pfad in Richtung minus 95 Prozent Treibhausgasemissionen für 2050 offen hält, kommt es zu weiteren Verschiebungen im Gebäudewärmemix, die hier nur mit einer Extrapolation bei gleichbleibendem Gesamtwärmeverbrauch illustriert werden. Zieht man die zusätzlichen Wärmepumpen-Energiemengen zu gleichen Teilen von Öl und Gas ab, ergibt sich die rechte Verteilung in Abbildung 7, mit 6 Prozent Ölkesseln, 38 Prozent Gaskesseln sowie 26 Prozent Wärmepumpen.

Für 2030 brauchen wir ein Erneuerbaren-Ziel von mindestens 60 Prozent am Bruttostromverbrauch.

In der hier durchgeführten Modellierung wurden zwei Restriktionen für Deutschland im Jahr 2030 berücksichtigt: das Treibhausgasemissionsziel von insgesamt minus 55 Prozent gegenüber 1990 und das Reduktionsziel im Rahmen des europäischen Klimaschutzbeschlusses von minus 38 Prozent (Basisjahr 2005) für den deutschen Nicht-Emissionshandels-Sektor. Daneben gibt es weitere Eingangsgrößen, die einen relevanten Einfluss auf das Ergebnis für 2030 haben. Hierzu zählen auf der Erzeugungsseite insbesondere Vorgaben zur Kohlekraftwerksleistung¹¹, die angenommenen Brennstoffpreise und Erneuerbare-Energien-Kosten. Nachfrageseitig geht es vor allem um den Nettostromexport von 32 Terawatt-

¹¹ auf Basis des von Agora Energiewende vorgeschlagenen Kohlekonsenspfades.



stunden¹² sowie neue Stromverbraucher in den Sektoren Wärme und Verkehr mit den oben genannten Annahmen zur Gebäudeeffizienz und Elektromobilität.

Um die auferlegte Emissionsbeschränkung einzuhalten, können im Modell verschiedene Dekarbonisierungsoptionen genutzt werden, wie der Zubau von Gaskraftwerken und Erneuerbaren Energien. Ausgehend von diesen Optionen wird der günstigste Mix ermittelt. Aus den Sensitivitätsrechnungen für 2030 ergibt sich damit unter den dargestellten Annahmen ein kostenoptimaler Erneuerbare-Energien-Anteil am Bruttostromverbrauch im Bereich von knapp 58 bis 62 Prozent (Abbildung 8).

Im Ergebnis zeigt sich, dass der aktuelle Erneuerbare-Energien-Korridor – von 40 bis 45 Prozent bis 2025 und 55 bis 60 Prozent bis 2035 – nicht ausreicht, um die übergeordneten Klimaschutzziele zu minimalen

Kosten zu erfüllen. Daher sollte der EEG-Zielkorridor entsprechend auf mindestens 60 Prozent bis zum Jahr 2030 angehoben werden.

Wärmepumpe oder grünes Gas?

Die in dieser Analyse verglichenen Energiesystemzielszenarien und Sensitivitätsrechnungen mit einem Optimierungsmodell kommen übereinstimmend zu dem Ergebnis, dass Wärmepumpen in Zukunft eine wichtige Rolle bei der Wärmebereitstellung für Gebäude einnehmen sollten. Gleichzeitig gibt es in der energiepolitischen Diskussion Stimmen, die diese Schlussfolgerung infrage stellen. Ein häufig vorgebrachtes Gegenargument ist, dass ein rascher und breiter Einbau moderner Gasbrennwertkessel schneller und günstiger CO₂-Emissionen reduzieren würde. Angesichts dieser Kontroverse sollen hier noch einmal die wichtigsten Herausforderungen für Wärmepumpen benannt und insbesondere im Zusammen-

12 Dieser ergibt sich aus der europäischen Strommarktsimulation für 2030.

hang mit der Alternative Gas verglichen werden.¹³ Kriterien für den Vergleich sind Treibhausgasemissionen, Energieeffizienz und Auswirkungen auf die Spitzenlast.

Während die **Treibhausgasemissionen** eines ausschließlich mit fossilem Gas betriebenen Heizkessels über die Zeit gleich bleiben, verringert sich die heute schon geringe Emissionsintensität von Wärmepumpen mit zunehmendem Erneuerbare-Energien-Anteil an der Stromerzeugung weiter. Für einen zukünftigen Mehrverbrauch an Strom durch neue Wärmeanwendungen muss dann auch ein zusätzlicher Ausbau an Erneuerbaren Energien erfolgen.¹⁴ Will Gas hier mithalten, muss es mit steigendem Dekarbonisierungsdruck auch zunehmend selbst „grün“¹⁵ werden. Und bei begrenzten Biomassepotenzialen¹⁶ wird Erdgas nur mithilfe von *Power-to-Gas* weitreichend dekarbonisieren können. Damit geht es in der Konsequenz um den konkurrierenden Einsatz von erneuerbar erzeugtem Strom für zwei verschiedene Anwendungen: Wärmepumpen und *Power-to-Gas*.

Angesichts langfristig begrenzter Flächenpotenziale Erneuerbarer Energien in Deutschland und absehbaren Akzeptanzproblemen wird es darum gehen, bei der Nutzung einer Kilowattstunde Erneuerbare-Energien-Strom auf eine möglichst hohe **Energieeffizienz** zu achten. Während Wärmepumpen über die Nutzung von Umweltwärme aus einer Kilowattstunde Strom rund 3 bis 4,5 Kilowattstunden Heizwärme erzeugen, macht *Power-to-Gas* aufgrund von Umwandlungsverlusten das Gegenteil und reduziert die eingesetzte Kilowattstunde Strom grundsätzlich, sodass dann 0,24 bis 0,84 Kilowattstunden

Wärme übrigbleiben.¹⁷ Zwischen den Wärmeausbeuten beider Anwendungen liegt also ein Faktor von rund 4 bis 19. Natürlich bietet *Power-to-Gas* dabei zusätzlich den Vorteil der langfristigen Speicherbarkeit.¹⁸ Aber selbst wenn man bei der Wärmepumpe die Verluste eines saisonalen Wärmespeichers hinzudaddiert, ändert sich diese Betrachtung nicht wesentlich.¹⁹ Damit ist die Nutzung von Strom in Wärmepumpen der Nutzung über *Power-to-Gas* aus Sicht der Energieeffizienz grundsätzlich klar überlegen.

Eine wichtige Herausforderung beim gleichzeitigen Betrieb einer großen Anzahl von Wärmepumpen (und zukünftig auch Elektroautos) stellt die **Erhöhung der Spitzenlast** dar. In einem Stromsystem mit weiter steigenden Anteilen aus Windkraft und Photovoltaik kann es Zeiten mit größerer und mit kleinerer Erzeugung aus Erneuerbaren Energien geben – wobei die Erzeugung aus Windkraftanlagen grundsätzlich besser zur Stromnachfrage für Wärmepumpen in der Heizperiode passt. Diese fluktuierende Erzeugung beinhaltet insbesondere auch Perioden mit wenig Sonnenenergie und gleichzeitig wenig Wind (Dunkelflaute). Zusätzlich können auch noch besonders niedrige Temperaturen auftreten mit besonders hohem Heizbedarf und besonders geringer Effizienz von Wärmepumpen. In der hier durchgeführten Modellierung wurden diese Zusammenhänge so gut wie möglich abgebildet, um den Einfluss auf die Spitzenlast zu bestimmen: Für das repräsentative Wetterjahr 2006 wurde in stündlicher Auflösung fluktuierende Erneuerbare-Erzeugung simuliert, zusammen mit dynamischen, außentemperaturabhängigen Wärmepumpenwirkungsgraden, die sich nach Technologien und Gebäudetypen unterscheiden.

13 Weitere technische Details finden sich in Kapitel 6.1 und im Anhang 7.2.

14 Eine weitergehende Diskussion zur Emissionsintensität des Wärmepumpenstroms findet sich in Kapitel 3.4.

15 BDEW et al. (2016)

16 Vgl. Kapitel 3.1 und Fh-IWES (2015a).

17 FENES et al. (2015, Tab. A 2.5.1). Abwärmenutzung in dezentralen *Power-to-Gas*-Anlagen kann dabei helfen, die Ausbeute zu verbessern (dena 2016).

18 Eine Eigenschaft, die *Power-to-Gas* als Langzeitspeicher für ein Stromsystem mit hohen Anteilen Erneuerbarer Energien sehr wichtig macht (FENES et al. 2014).

19 Prognos, ifeu, IWU (2015, Tab. 3-6)

Hinsichtlich einer Erhöhung der Spitzenlast ist zu unterscheiden zwischen Fragen der Versorgungssicherheit – das heißt der Leistungsvorhaltung für die kritischste Stunde im Jahr – und der Stromerzeugung aus thermischen Kraftwerken über längere Zeiträume, zum Beispiel während einer Dunkelflaute. In diesem Zusammenhang müssen drei relevante Fälle betrachtet werden:

1. Bis zum Jahr 2030 dürfte die Zunahme des Leistungsbedarfs durch Wärmepumpen verkraftbar sein, wie die obigen Sensitivitätsrechnungen zeigen. Zwar benötigen diese bis zu 21 Gigawatt zusätzliche Spitzenleistung. Aber angesichts der heute circa 35 Gigawatt benötigten Leistung für Direktstrom (insbesondere Durchlauferhitzer und Nachtspeicherheizungen) kann ein Austausch von Nachtspeicherheizungen durch Wärmepumpen oder effiziente Gaskessel die Integration einer zunehmenden Zahl von Wärmepumpen in das Stromsystem ermöglichen.
2. Im Jahr 2050 hängt die Deckung der Spitzenlast vor allem von den Treibhausgasminderungszielen und dem damit noch bestehenden Emissionsbudget ab. Bei einem Emissionsziel von minus 80 Prozent bis 2050 darf der Stromsektor noch weiter (kleine Mengen) CO₂ emittieren, sodass die Spitzenlast relativ kostengünstig durch zusätzliche erdgasbetriebene Gasturbinen gedeckt werden kann.²⁰
3. Bei einem ambitionierten Klimaschutzziel von minus 95 Prozent darf der Stromsektor im Jahr 2050 dagegen überhaupt kein CO₂ mehr emittieren, weil das verbleibende Emissionsbudget den nur schwer zu dekarbonisierenden nicht energetischen Emissionen vorbehalten bleiben muss. Zur Sicherung der Spitzenlast muss dann beim Betrieb der Gaskraftwerke auf *Power-to-Gas* zurückgegriffen werden. Aufgrund der hohen *Power-to-Gas*-Umwandlungsverluste ist diese Form der Leistungssicherung teurer als im Fall von fossilem Gas. Trotzdem gilt auch hier, dass aufgrund der wenigen relevanten Stunden im Jahr diese Zusatzkosten

im Vergleich zu anderen möglichen Dekarbonisierungsoptionen vernachlässigbar sind.²¹

Das Problem der Wärmepumpenspitzenlast ist also beherrschbar. Im Gegensatz dazu taucht ein solches Problem bei Gas nicht auf, da die Gasinfrastruktur für solche Heizlasten ausreichend dimensioniert ist.

Die wohl größte Herausforderung für Wärmepumpen besteht in der Notwendigkeit einer hinreichenden **Gebäudeeffizienz**. Damit hängt ihre Durchsetzung wesentlich an der Absenkung des Gebäudewärmebedarfs vor allem in Bestandsgebäuden, welcher in den hier durchgeführten Berechnungen per Annahme vorgegeben wurde. In den Sensitivitätsrechnungen werden beispielsweise eine Steigerung der Sanierungsrate auf zwei Prozent und eine hohe Sanierungstiefe unterstellt. Wird eine solche Verbrauchsreduktion in der Realität nicht erreicht, sind die technischen Voraussetzungen für den massiven Ausbau an Wärmepumpen nicht hinreichend gegeben. Andererseits ist bei alten Bestandsgebäuden nicht zwingend sofort eine Vollsanierung notwendig, um Wärmepumpen zu ermöglichen. Schon eine Erneuerung von Fenstern und Dach kann viel erreichen. Und auch Fußbodenheizungen sind entbehrlich, wenn stattdessen Niedertemperaturradiatoren eingebaut werden, die im Vergleich nur unwesentlich schlechtere Ergebnisse erzielen. Außerdem können bivalente Luftwärmepumpen in Kombination mit Gas- oder Ölkesseln für besonders kalte Stunden eine Brückentechnologie darstellen, um der Herausforderung

²⁰ siehe Anhang 7.3 zur Illustration der Zusatzkosten von Gasturbinen im Vergleich zu Wärmepumpen

²¹ Die *Power-to-Gas*-Rückverstromung in einem Gas- und Dampf-Kraftwerk macht aus einer Kilowattstunde Strom nur noch 0,3 bis 0,38 Kilowattstunden Strom (FENES et al. 2015, Tab. A 2.5.1). Aus diesem Strom wird danach mit Wärmepumpen unter Verwendung von Umweltwärme allerdings wieder eine größere Heizwärme erzeugt. Nur in den wenigen Stunden, in denen bei Temperaturen unter null Grad Celsius der Wirkungsgrad der Luftwärmepumpe (COP) unter 2,5 fällt und gleichzeitig keine Erneuerbaren Energien einspeisen, verschlechtert sich die Effizienz der *Power-to-Gas*-Rückverstromung mit Wärmepumpe gegenüber einer Kombination von *Power-to-Gas* mit Brennwertkessel.

iterativer Sanierung zu begegnen. Zur Vermeidung von *Lock-in*-Effekten müsste in der Anlagenauslegung dabei gewährleistet werden, dass die Leistung der Wärmepumpe ausreicht, um das Gebäude nach umfassender Gebäudesanierung alleine zu versorgen. Zudem existieren weitere innovative Wärmepumpentechnologien wie zum Beispiel Kombinationen von Eisspeichern mit Solarabsorbern oder hocheffiziente Direktverdampfer.²² Es gibt also unterschiedliche Möglichkeiten, um Bestandsgebäude wärmepumpenkompatibel zu machen.

Nicht untersucht wurden im Rahmen dieses Projektes **mögliche Verteilnetz-Implikationen** bei hoher Gleichzeitigkeit im Einsatz von Wärmepumpen. Hier können weitere Kosten anfallen, die im Rahmen der hier durchgeführten Modellierung nicht erfasst wurden. Andererseits steht der Ausbau der Stromverteilnetze ohnehin an und dürfte auch mit Verweis auf die als Alternative bereits existierenden Gasverteilnetze kaum zur Disposition stehen.²³

Insgesamt erscheint der stark zunehmende Einsatz von Wärmepumpen im Gebäudewärmesektor für das Energiesystem treibhausgasmindernd, energieeffizient und hinsichtlich der Spitzenlast beherrschbar. Seine Achillesferse ist, dass für alte Bestandsgebäude ein Mindestmaß an energetischer Modernisierung benötigt wird – was beim alternativen Betrieb von Gasheizkesseln mit fossilem Erdgas zunächst entfallen kann. Allerdings muss auch der Energieträger Gas einen Beitrag zur **Dekarbonisierung** liefern und über die Zeit zunehmend grüner werden. Damit steigen die Kosten von Gas, sodass es sich immer mehr lohnen wird, auch gasbeheizte Gebäude hinreichend zu dämmen. Langfristig erscheint grünes Gas im Bestand ganz ohne Sanierung aus Kostensicht wenig plausibel. Hinsichtlich der Anforderungen an die Gebäudehülle mögen die ersten Schritte auf dem Weg der Dekarbonisierung mit Gas also etwas einfacher ausfallen. Eine Garantie für den kostengünstigeren

Pfad zum Erreichen der Klimaziele 2050 lässt sich damit allein aber nicht geben. Wenn grünes Gas eine Rolle im dekarbonisierten Gebäudesektor haben wird, dann gegebenenfalls aufgrund von Konsumentenpräferenzen: Wenn ein Teil der Bürger es präferieren, ihre Häuser weiterhin mit Gas zu beheizen anstatt zu sanieren beziehungsweise eine Wärmepumpe einzubauen, dann sollte dies möglich sein – das Gas müsste dann nur, analog zum Strom, stetig grüner werden und würde dementsprechend teurer.

Instrumentell kann Gas auf zwei Wegen grün gemacht werden:

- (1) durch sich immer weiter verschärfende CO₂- Benchmarks beziehungsweise entsprechende Primärenergiefaktoren als notwendige Anforderungen an Heizungssysteme und/oder
- (2) durch eine Pflicht zur Beimischung von zunehmend mehr CO₂-neutralem Gas mithilfe von begrenzt vorhandener Biomasse und mittels *Power-to-Gas*.

Damit stellt sich für zukünftige Arbeiten die Frage, welcher Entwicklungspfad für den Großteil der Bestandsgebäude langfristig günstiger ist: in Richtung Wärmepumpen oder in Richtung zunehmend grünem Gas. Und da die Konkurrenz um Flächen für Erneuerbare-Energien-Strom in Deutschland groß ist, wird die Antwort auf diese Frage maßgeblich davon abhängen, zu welchen Kosten zukünftig *Power-to-Gas*-Produkte wie Wasserstoff und synthetisches Erdgas im Ausland erzeugt und nach Deutschland importiert werden können. Zudem wird entscheidend sein, mit welchen weiteren *Power-to-Gas*-Nachfragern in Verkehr und Industrie der Gebäudewärmesektor dann konkurrieren muss, in soweit diese noch schlechter elektrifiziert werden können als die Gebäudewärme – oder teilweise gar nicht. Diese Fragen sollen in künftigen Studien genauer untersucht werden.

22 siehe Kapitel 6.1 und Anhang 7.2 für Details

23 E-Bridget et al. (2014)

2 Hintergrund und methodischer Ansatz

Der Weg zur Verringerung der deutschen Treibhausgasemissionen um 80 bis 95 Prozent gegenüber 1990 ist noch lang. Dabei alleine auf das Zieljahr 2050 zu schauen, birgt das Risiko, die notwendigen Maßnahmen auf die lange Bank zu schieben. Für die Zwischenetappe 2030 gab es bisher vor allem ein Gesamtminierungsziel von minus 55 Prozent Treibhausgasemissionen gegenüber 1990 sowie ein Unterziel für den nicht vom EU-Emissionshandel abgedeckten Bereich von minus 38 Prozent gegenüber 2005.²⁴

Die vorliegende Analyse liefert robuste Leitplanken für den Zwischenschritt 2030, um einen klareren Planungsrahmen für wichtige Zielgrößen entwickeln und rechtzeitig die notwendigen Maßnahmen mit dem Planungshorizont 2030 anstoßen zu können. Sie fokussiert auf Mindestniveaus für die Durchdringung von Schlüsseltechnologien an der Schnittstelle von Strom- und Wärmesektor, die bis 2030 erreicht worden sein müssen. Hierbei handelt es sich vor allem um Gebäudeeffizienz, Wärmenetze und Wärmepumpen, von denen die letzteren beiden vertieft analysiert werden.

Zur Bestimmung der Mindestniveaus werden in einem ersten Schritt wesentliche aktuelle Zielszenarien für eine Treibhausgasreduzierung um 80 bis 95 Prozent miteinander verglichen (Abbildung 9). Hieraus ergeben sich Bandbreiten für die benötigte Entwicklung bis 2030 und 2050, die den bisher erwarteten Trends gegenübergestellt werden, um Defizite zu identifizieren. Besonders relevant sind dabei mögliche Pfadabhängigkeiten – also die Frage, unter welchen Bedingungen wir 2030 tatsächlich noch die Wahl haben, uns für einen Pfad in Richtung 95 Pro-

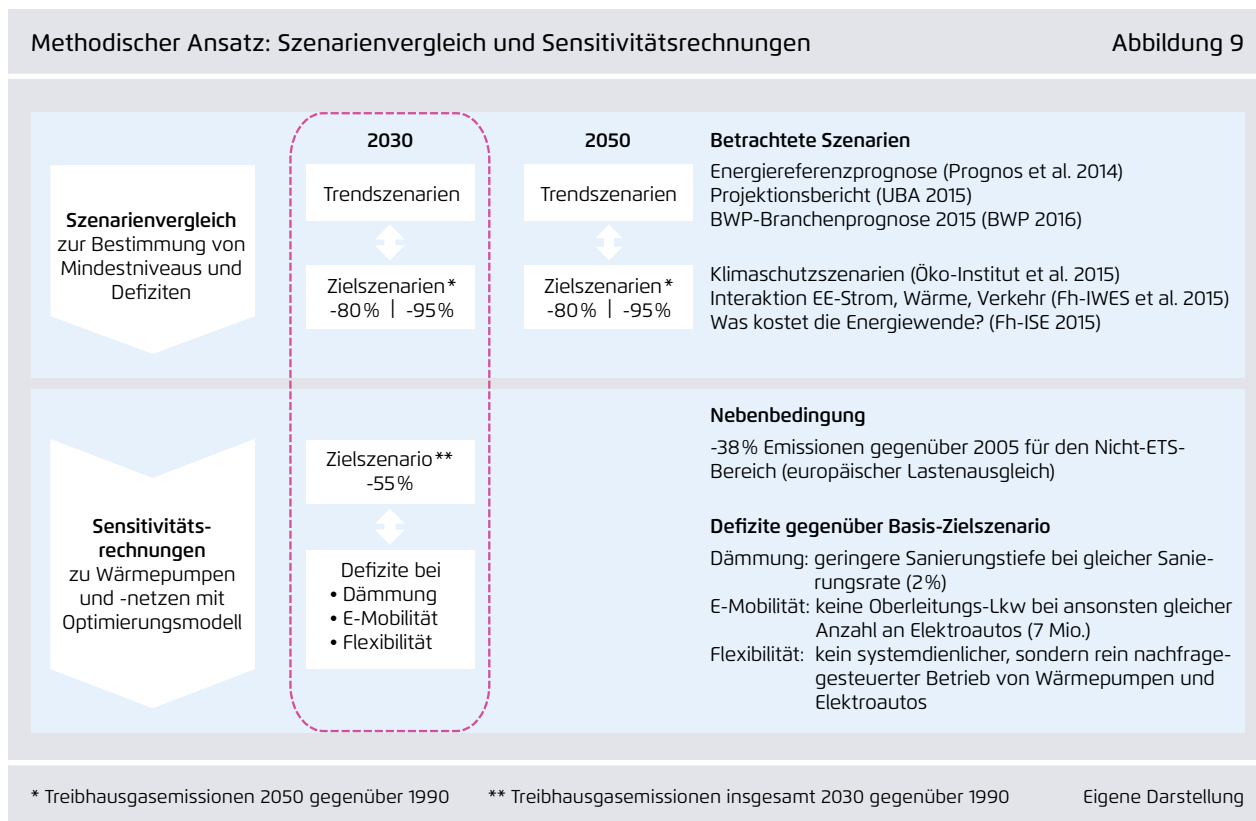
zent Treibhausgasreduzierung bis 2050 zu entscheiden. Denn eine solche Entscheidung dürfte effektiv nur dann möglich sein, wenn die Marktentwicklung bei Schlüsseltechnologien bis 2030 ausreichend verläuft.

In einem zweiten Schritt werden Sensitivitätsrechnungen für 2030 mit einem Energiesystem-Optimierungsmodell durchgeführt. Auf dieser Basis wird analysiert, inwieweit das Mindestziel einer Reduktion der Treibhausgase um 55 Prozent bis 2030 erreicht werden kann, wenn Defizite bei einzelnen Schlüsseltechnologien durch Maßnahmen in anderen Bereichen kompensiert werden müssen. Ausgangspunkt der Betrachtung ist ein Basisszenario mit einer Sanierungsrate von zwei Prozent bei hoher Sanierungstiefe, mit sieben Millionen Elektroautos und dem Einsatz von Oberleitungs-Lkws sowie der systemdienlichen Steuerung von Wärmepumpen und Elektroautos. Die in den Sensitivitätsrechnungen variierten Parameter betreffen dabei die Gebäudedämmung, die Durchdringung der Elektromobilität (Fokus Oberleitungs-Lkws) sowie die Flexibilität von Wärmepumpen und Elektromobilität (Pkws und Lkws). Als weitere Nebenbedingung muss im Rahmen des europäischen Lastenausgleichs das Reduktionsziel (Basisjahr 2005) von minus 38 Prozent für den deutschen Nicht-Emissionshandels-Sektor eingehalten werden.

Auf Basis des Szenarienvergleichs und der Sensitivitätsrechnungen sollen die Einflussgrößen auf die notwendige Durchdringung der Schlüsseltechnologien ermittelt werden. Ziel ist es dabei, ein besseres Verständnis für die Abhängigkeiten zwischen den Zielen 2030 und 2050 zu vermitteln.

Während sich im Bereich der Mobilität der energiepolitische und wissenschaftliche Konsens hinsichtlich der zentralen Rolle der Elektromobilität verdichtet hat, bestehen in der Transformation der

²⁴ Zusätzlich liegen seit Ende 2016 die Sektorziele des Klimaschutzplans 2050 vor. Diese konnten in der vorliegenden Arbeit noch nicht berücksichtigt werden (Bundesregierung 2016).



Wärmeversorgung (Gebäude und Industrie) immer noch größere Divergenzen hinsichtlich der Rolle einzelner Erneuerbarer Energien untereinander (Biomasse, Solarthermie, Umweltwärme, Tiefengeothermie) und im Vergleich zur Gebäudesanierung, hinsichtlich der Rolle dezentraler Kessel versus Wärmenetze sowie hinsichtlich der Rückwirkungen einer zunehmenden Elektrifizierung auf den Stromsektor. Aus diesem Grund fokussiert sich die vorliegende Studie auf den Bereich der Wärme und Strom-Wärme-Kopplung, eingebunden in das Gesamtenergieversorgungssystem. Sie setzt den Wärmebereich in Wechselwirkung mit dem Straßenverkehr und betrachtet damit die Beiträge aller dieser Bereiche zur Erreichung der Klimaziele.

Die Studie ist folgendermaßen aufgebaut:

→ In **Kapitel 3** wird in die aktuelle Struktur des Energieverbrauchs und in mögliche Dekarbonisierungsoptionen in den Sektoren Gebäudewärme, industrielle Prozesswärme, Verkehr und Strom

eingeführt. Im Mittelpunkt der Betrachtung steht dabei der Gebäudewärmesektor.

- In **Kapitel 4** wird auf Basis eines breiten Szenarienvergleichs von Minus-80-Prozent-Zielszenarien einerseits und Minus-95-Prozent-Zielszenarien andererseits die notwendige Durchdringung von Schlüsseltechnologien für das Zwischenziel 2030 bewertet. Diese werden mit Trendszenarien kontrastiert, um absehbare Fehlentwicklungen zu identifizieren und Handlungsempfehlungen abzuleiten.
- In **Kapitel 5** wird auf Basis eigener Sensitivitätsrechnungen zur Erreichbarkeit eines Mindestziels von minus 55 Prozent Treibhausgasemissionen im Jahr 2030 bewertet, wie Ziel- oder Maßnahmenverfehlungen in einzelnen Bereichen in anderen Bereichen wieder kompensiert werden müssen, um das Mindestziel sicher zu erreichen.
- In **Kapitel 6** werden Schlussfolgerungen gezogen in Hinblick darauf, was robuste Pfade zur Erreichbarkeit von Klimazielen für einzelne Technologien und für die Transformation von Anwendungsbereichen bedeuten können.

→ Im **Anhang** finden sich ein Vergleich des Gebäude-wärmeverbrauchs zwischen den hier betrachteten Zielszenarien und der *Energieeffizienzstrategie Gebäude* (7.1), eine Diskussion der Rolle von Luftwärmepumpen, bivalenten Wärmepumpensystemen, Gaswärmepumpen und Ölheizungen (7.2), eine Darstellung der Kosten zusätzlicher Gasturbinen zur Deckung der Spitzenlast (7.3) sowie wichtige Szenarioannahmen zur Sensitivitätsrechnung (7.4).

3 Dekarbonisierungsoptionen in den Sektoren

Dieses Kapitel beschreibt die aktuelle Struktur des Energieverbrauchs und mögliche Dekarbonisierungsoptionen in den Sektoren Gebäudewärme, industrielle Prozesswärme, Verkehr und Strom. Im Mittelpunkt der Betrachtung steht dabei der Gebäudewärmesektor.

Für das Erreichen der deutschen Klimaziele sind die gesamten Treibhausgasemissionen entscheidend, die sich aus energetischen und nichtenergetischen Emissionen zusammensetzen. Abbildung 10 zeigt die Emissionen von 2010 bis 2014 getrennt nach Sektoren und stellt diese den klimapolitischen Zielen gegenüber: minus 55 Prozent Treibhausgasemissionen bis 2030 und minus 80 bis minus 95 Prozent bis 2050 (Bezugsjahr 1990). Dabei werden alle zukünftigen energetischen Emissionen zum „Energiesektor“ zusammengefasst. Bei einer Treibhausgasverringerung bis 2050 um 95 Prozent verbleibt nur Spielraum

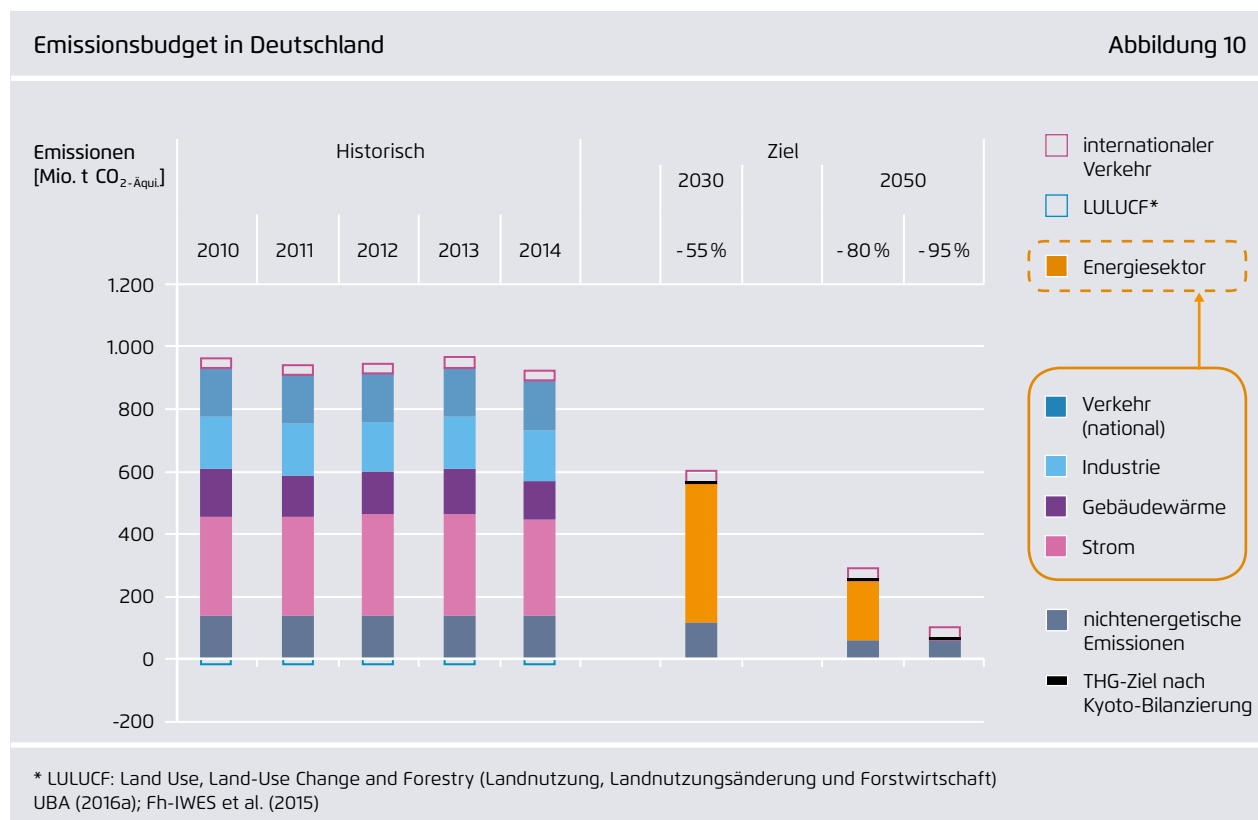
für die schwer vermeidbaren nichtenergetischen Emissionen. Die energetischen Emissionen müssen dagegen vollständig vermieden werden.

3.1 Gebäudewärme

Status Quo

Die Treibhausgasemissionen der Gebäudewärme machen derzeit je nach Wetterjahr circa 17 bis 20 Prozent der energiebedingten Emissionen und 15 bis 17 Prozent der Gesamtemissionen aus, wenn man gemäß der Systematik des Nationalen Inventarberichts nur die direkten Emissionen nach Emittenten betrachtet, das heißt ohne anteilige Emissionen der Stromerzeugung für Stromheizungen.²⁵

²⁵ Die Treibhausgasemissionen werden je nach Ansatz methodisch unterschiedlich bilanziert: Aus der Bilanzierung der Energieeinsparverordnung sind dies Primärenergie-



Die Entwicklung des Energieverbrauchs im Gebäudewärmesektor²⁶ weist temperaturbereinigt eine kontinuierliche, wenn auch geringe Reduktion um rund fünf Prozent auf – von 803 Terawattstunden (2010) auf 764 Terawattstunden (2015) (Abbildung 11). In Hinblick auf die Effizienz und die Durchdringung von Technologien ist aufgrund der Anforderungen der Energieeinsparverordnung eine Trennung zwischen Bestandsgebäuden und Neubau²⁷ wichtig (Abbil-

dung 12). Während in Bestandsgebäuden der relative Erneuerbare-Energien-Anteil in Summe gering ist und von Biomasse dominiert wird, finden im Neubaubereich höhere Anteile von Wärmepumpen²⁸ und Solarthermie in Kombination mit Gas Einzug. Dabei liegt der spezifische Verbrauch des Neubaubereichs aufgrund der höheren Gebäudestandards zwar deutlich niedriger. Neubauten werden aber im Vergleich zum dominanten Altbau auch langfristig nur einen begrenzten Anteil an den beheizten Flächen insgesamt haben.²⁹

faktoren inklusive Vorketten, aus Sicht der Endenergieverbrauchsgruppen sind dies direkte Emissionen, aber es werden zum Beispiel innerhalb von Haushalten die Emissionen von Strom und Wärme aggregiert. Nach der Systematik des Nationalen Inventarberichts (NIR) werden die Emissionsverursacher bilanziert – und damit wird auch die Stromerzeugung separat erfasst.

- 26 Hier unterstellt als Raumwärme und Warmwasser für Haushalte und Gewerbe ohne Hilfsenergie. Eine Einordnung der Hilfsenergie findet sich zum Beispiel in Prognos, ifeu, IWU (2015).
- 27 Neubau wird hier definiert als Abriss und Neubau sowie neue Bauflächen ab 01.01.2010.

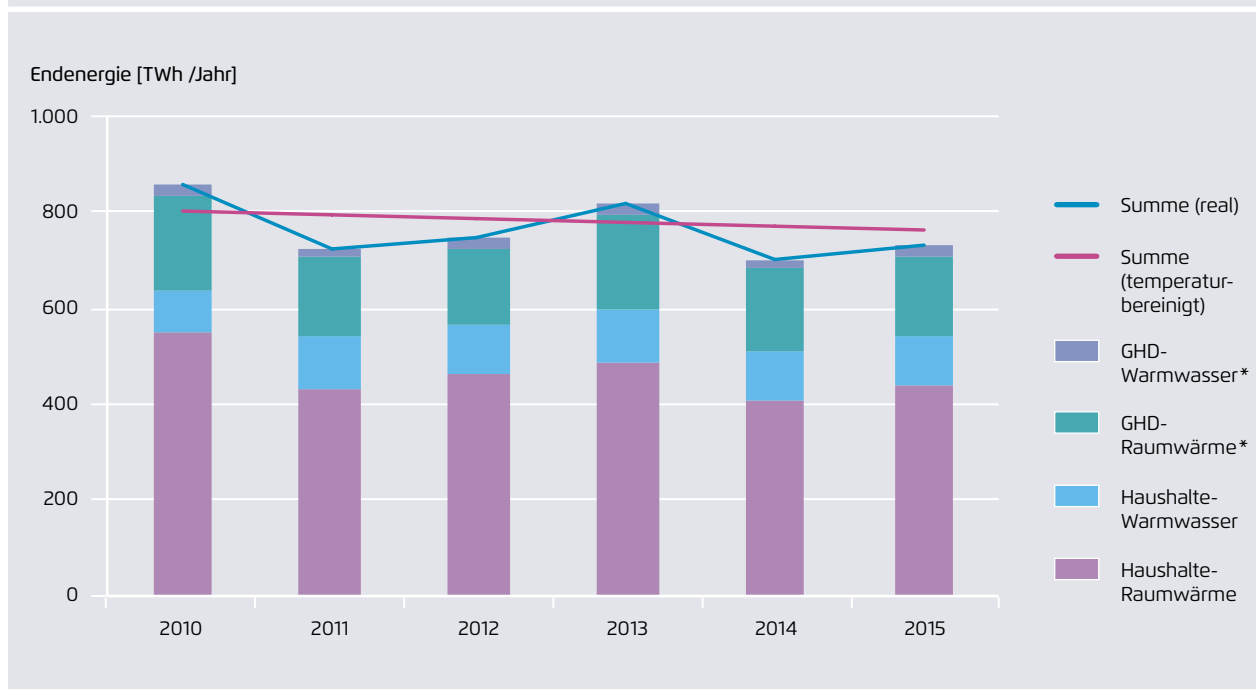
Dekarbonisierungsoptionen

Im Rahmen der *Energieeffizienzstrategie Gebäude* des BMWi³⁰ wurde das gegenwärtige sektorale energiepolitische Ziel analysiert, bis zum Jahr 2050 einen

- 28 Wärmepumpen sind 2015 im Neubaubereich mit circa 210.000 Anlagen vertreten und im Altbaubereich mit 460.000 – in Summe 670.000.
- 29 siehe dazu auch Anhang 7.4
- 30 BMWi (2015); Prognos, ifeu, IWU (2015)

Gebäudewärme-Endenergieverbrauch 2010 bis 2015 in Terawattstunden pro Jahr

Abbildung 11



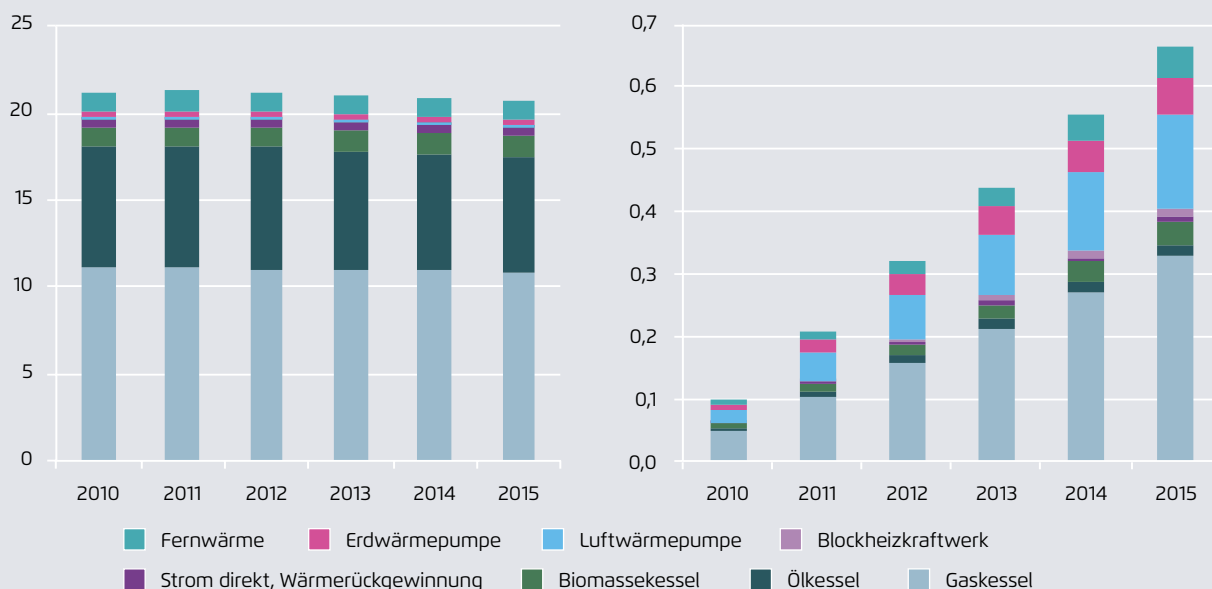
* GHD: Gewerbe, Handel, Dienstleistungen

BMWi (2016) mit eigenen Anpassungen

Anzahl der Heizungsanlagen: Bestandsgebäude (links) versus Neubaugebäude seit 2010 (rechts) in Millionen

Abbildung 12

Anzahl Heizungen [Mio.]



Fh-IBP

nahezu klimaneutralen Gebäudebestand zu erreichen – das heißt den nicht erneuerbaren Primärenergiebedarf gegenüber 2008 um rund 80 Prozent zu verringern.³¹ Zur Erreichung des Ziels bestehen drei grundsätzliche Optionen mit individuellen Potenzialen und Restriktionen:

- Energieeffizienz beziehungsweise die Reduktion des Energieverbrauchs³²
- objektnahe Erneuerbare-Energien-Wärmebereitstellung
- Erneuerbare-Energien-Wärmebereitstellung mittels Wärmenetzen

31 Dieses Ziel basiert auf anderen Vergleichsgrößen als den oben dargestellten Treibhausgasemissionen (Primärenergie, Entwicklung von Primärenergiefaktoren inklusive Vorketten, Berücksichtigung von Beleuchtung u. a.) und wird im Kapitel 4 vereinheitlicht und zu verschiedenen Klimazielszenarien in Bezug gesetzt.

32 Hierbei handelt es sich um ein Wechselspiel aus Gebäudedämmung, neuen Heizungsanlagen, Reduktion von Verteil- und Zirkulationsverlusten und Klimawandel einerseits sowie *Rebound*-Effekten andererseits.

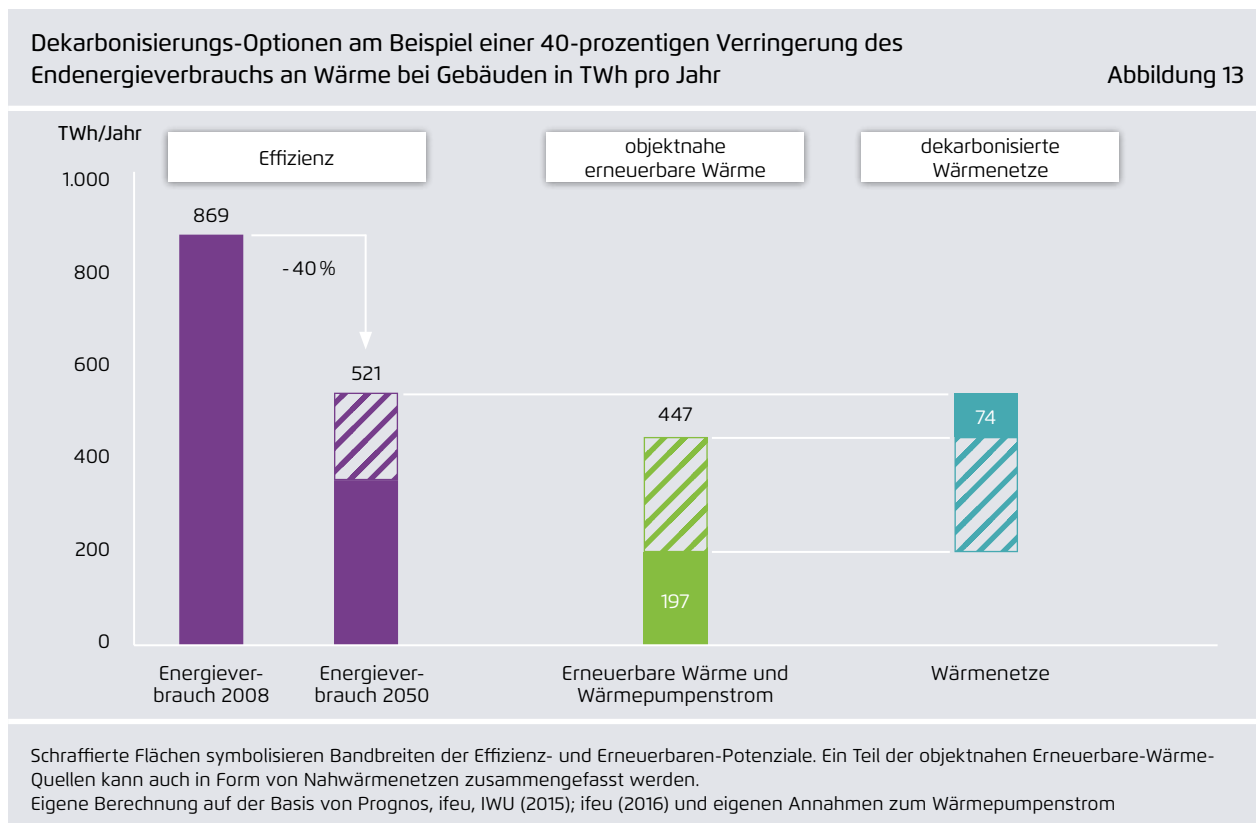
Das mögliche Zusammenspiel der drei Optionen ist beispielhaft anhand einer 40-prozentigen Verringerung des Wärmeenergieverbrauchs in Gebäuden in Abbildung 13 dargestellt.

Bezüglich der Rolle der **Effizienz** wurde im Rahmen der *Energieeffizienzstrategie Gebäude* ein Effizienzsockel als langfristige Untergrenze des Wärme-Endergieverbrauchs von Haushalten, Gewerbe und Industriehallen für 2050 bestimmt, der mit 345 Terawattstunden einer Verbrauchsreduktion um rund 60 Prozent gegenüber 2008 entspricht.³³

Für die **dezentrale Objektversorgung** mit Umweltwärme, Solarthermie und Biomasse wurden im Rahmen der *Energieeffizienzstrategie Gebäude* „realistisch erschließbare“ Potenziale angegeben³⁴. Bei

33 siehe dazu Kapitel 4.3.

34 Solarthermie: 53 bis 69 Terawattstunden pro Jahr; Biomasse: 69 bis 139 Terawattstunden pro Jahr; Umweltwärme: 58 bis 100 Terawattstunden pro Jahr (Prognos, ifeu, IWU 2015).



einigen Technologien bestehen technische Restriktionen wie zum Beispiel die Höhe des solaren Deckungsanteils, die Konkurrenz zwischen den Sektoren um die Nutzung von Biomasse oder die tatsächliche Umsetzbarkeit von Sondenbohrungen für Erdwärmepumpen im Fall von Bestandsgebäuden. Hier können Wärmenetze in Kombination mit zentral verfügbaren Erneuerbare-Energien-Ressourcen mögliche bestehende Lücken schließen.

Die Wärmebereitstellung mit **Wärmenetzen** kann einerseits durch einen Ausbau und die Steigerung des Anschlussgrades existierender Netze in Verbindung mit Erneuerbare-Energien-Wärme dekarbonisiert werden. Fernwärme macht derzeit mit rund 75 Terawattstunden circa 10 Prozent des Gebäudewärme-Endenergieverbrauchs aus. Andererseits können neue Netze gebaut werden. Das Potenzial von Wärmenetzen wurde im Rahmen der *Energieeffizienzstrategie Gebäude* nicht untersucht. Dagegen wurde in einer detaillierten, mit geografischen Informationssystemen durchgeführten räumlichen Analyse

aller deutschen Wohngebäude ein Wärmenetzpotenzial von 32 Prozent am Wärme-Endenergieverbrauch ermittelt.³⁵

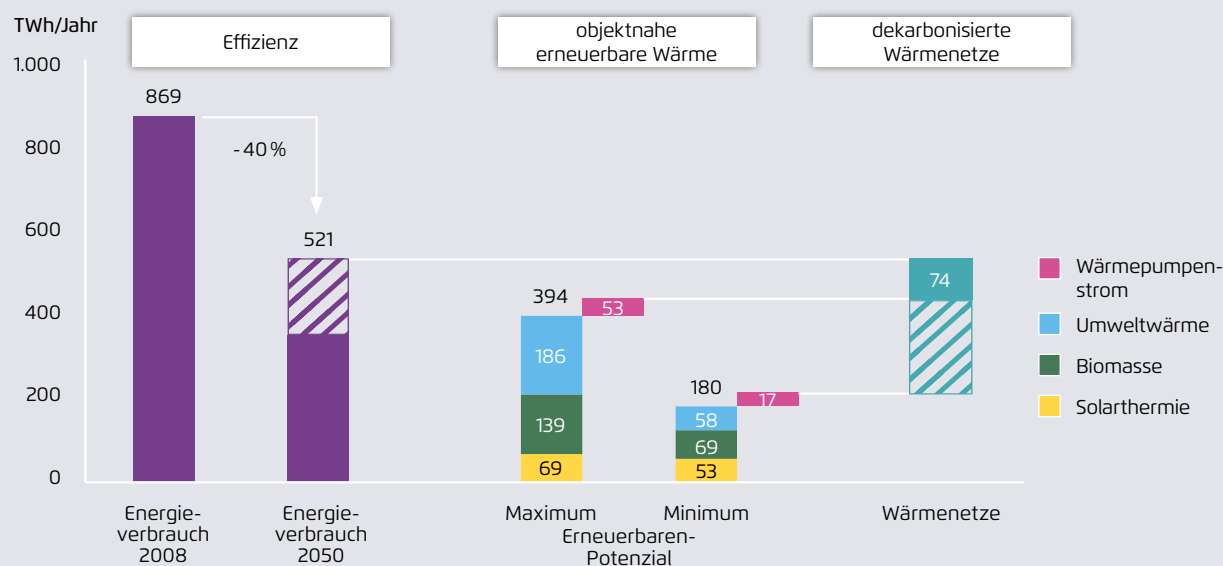
Auch die Potenziale dezentraler Wärmepumpen sind begrenzt. Für **Umweltwärme** aus dezentralen Erdwärmepumpen wurde im Rahmen der oben genannten Untersuchung ein sehr hohes technisches Potenzial von 186 Terawattstunden und damit langfristig circa 70 Prozent des Endenergiebedarfs im Wohngebäudebereich ermittelt (Abbildung 14). Hinzu kommen weitere Umweltwärmepotenziale in den Bereichen Erdwärmepumpen in Nichtwohngebäuden und bei dezentralen Luftwärmepumpen.

Offene Fragen bestehen ebenso im Bereich der solarthermischen Wärmenetze mit saisonalen Speichern und bei der Verfügbarkeit der petrothermalen Tiefengeothermie. Geothermie weist mit circa 410 Tera-

35 ifeu (2016). Für den Nichtwohngebäudebereich liegt eine vergleichbare Analyse hingegen nicht vor.

Dekarbonisierungsoptionen bei Gebäuden und objektnahe Erneuerbaren-Potenziale in Terawattstunden pro Jahr

Abbildung 14



Für die Verbrauchsreduktion wurde ein beispielhafter Wert von minus 40 Prozent unterstellt. Der Lösungsraum aus der Effizienzstrategie Gebäude reicht von minus 40 bis minus 60 Prozent. Die maximale Umweltwärme beinhaltet nur Erdwärmepumpen in Wohngebäuden. Ein Teil der objektnahen Erneuerbare-Wärme-Quellen kann auch in Form von Nahwärmenetzen zusammengefasst werden. Eigene Berechnung auf Basis von Prognos, ifeu, IWU (2015), ifeu (2016) und eigenen Annahmen zum Wärmepumpenstrom

wattstunden angebotsseitig ein vielfaches technisches Potenzial der bestehenden Fernwärme auf.³⁶ Starke Einschränkungen beziehungsweise Unsicherheiten bestehen durch lokal vorhandene Wärmesenken (Nachfrageseite) und die Wirtschaftlichkeit am Standort.

Welche der hier genannten technischen Potenziale tatsächlich erschlossen werden, dürfte vor allem auch von der Entwicklung der jeweiligen Kosten und der Einbettung in das Gesamtsystem abhängen. Eine weitergehende Diskussion zu offenen Fragen bei einzelnen Technologien findet sich in Kapitel 6.1.

Vor- und Nachteile verschiedener Erneuerbare-Energien-Optionen

Die verfügbaren Erneuerbare-Energien-Optionen weisen unterschiedliche Vor- und Nachteile auf, wel-

che der Tabelle 1 zu entnehmen sind.³⁷ Wärmenetze bieten dabei grundsätzlich die Möglichkeit, schneller eine große Zahl von Verbrauchern zu erschließen und in der zeitlichen Entwicklung kurzfristiger Erneuerbare-Energien-Anlagen einzubinden. Teilweise sind Wärmenetze auch kostengünstiger und ermöglichen es, große zentrale wirtschaftliche Erneuerbare-Energien-Ressourcen anzubinden. Andererseits gehen damit Leitungsverluste und Effizienzverluste einher, zum Beispiel wegen geringer Wirkungsgrade von Wärmepumpen aufgrund des höheren Temperaturniveaus. Dagegen kann eine dezentrale Objektversorgung höhere Energieeffizienz ermöglichen, auch wenn damit teilweise höhere Kosten einhergehen.

36 Annahmen: 80 Prozent nutzbare Fläche in Deutschland, 343 Gigawatt_{th} Leistung bei 1.200 Volllaststunden monovalenter Nutzung (Deinhardt 2016)

37 Nicht in Tabelle 1 aufgeführt sind Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen (KWK). KWK-Anlagen selbst stellen eine Effizienztechnologie für den Stromsektor dar, deren Rolle sich vor allem auch aus dem Strommarkt bedingt. Im Gegensatz zur Industrieprozesswärme bestehen dabei im Gebäudebereich aufgrund des niedrigen Temperaturniveaus auch grundsätzlich Alternativen zur KWK (siehe dazu auch Kapitel 6.1).

Vor- und Nachteile verschiedener Erneuerbare-Wärme-Technologien

Tabelle 1

		Biomasse	Solarthermie	Umweltwärme (Wärmepumpe)	Tiefengeothermie	Power-to-Heat (Heizstab, Elektrokessel)	Power-to-Gas mit Gasbrennwertkessel
Objektversorgung	+	Status quo im ländlichen Raum		Effizienz	nicht relevant		Gas-Infrastruktur vorhanden
	-	Emissionen	Kosten, begrenzter solarer Deckungsanteil	Kosten	nicht relevant	Kosten IKT, geringe Effizienz	Kosten, geringe Effizienz
bestehende Wärmenetze	+	geringere Emissionen	Kosten	Abwasser-nutzung	vollständige Dekarbonisierung möglich	Kosten, hohe Leistungen, Kombination mit KWK	nicht relevant
	-	Nutzungskonkurrenz	begrenzte Flächen, Konkurrenz zu Müll-HKW/ Abwärme	teilweise geringe Effizienz, zusätzlich chemischer Energieträger notwendig	Kosten	geringe Effizienz	nicht relevant
ländliche Wärmenetze und neue urbane Netze	+	geringere Emissionen	Kosten, Kombination mit KWK (Stadt)	Effizienz, Wärmequellen	vollständige Dekarbonisierung möglich	Kosten, hohe Leistungen, Kombination mit KWK	nicht relevant
	-	Nutzungskonkurrenz			Kosten	geringe Effizienz	nicht relevant

Eigene Darstellung

Bei Wärmenetzen muss dabei zwischen bestehenden Hochtemperaturnetzen sowie neuen Wärmenetzen im urbanen und im ländlichen Raum unterschieden werden. Grundsätzlich benötigen Wärmenetze für ihre Wirtschaftlichkeit eine hinreichende Wärmedichte und einen entsprechend hohen Anschlussgrad der Verbraucher³⁸.

Zentrale Rolle der Einbindung von Umweltwärme mittels Wärmepumpen

Wärmepumpen stellen weniger eine Erneuerbare-Energien-Quelle dar als vielmehr eine Effizienztechnologie, welche es insbesondere ermöglicht, Umweltwärme auf einem niedrigen Temperaturniveau nutzbar zu machen. Im dezentralen Bereich handelt es sich hierbei um Umweltwärme aus Erdwärme, Luft oder Wasser (Brunnen). Die Umweltwirkung kann noch gesteigert werden, wenn die Hilfsenergie Strom

zunehmend durch Erneuerbare-Energien-Strom bereitgestellt wird.

Während Erdwärmepumpen als sehr effizient gelten, bestehen in der energiepolitischen Diskussion gegenüber **Luftwärmepumpen in Bestandsgebäuden** bislang noch größere Vorbehalte hinsichtlich der Effizienz. Dabei existieren in der technischen Umsetzung vielfältige Optionen (monovalente drehzahlvariable Luftwärmepumpen, welche ohne Heizstab auskommen, Niedertemperatur-Heizkörper statt Fußbodenheizung, Solarabsorbermatten und Eisspeicher). Bivalente Wärmepumpen mit zusätzlichem Gas- oder Ölkessel³⁹ ermöglichen es, auch bei unsa-

38 siehe auch ifeu (2015)

39 Nicht gemeint sind damit Wärmepumpen, welche für die Spitzenlast an sehr kalten Tagen einen elektrischen Heizstab benötigen und die man als bivalent-monoenergetisch bezeichnen könnte. Bei modernen Luftwärmepumpen ist ein solcher Heizstab aufgrund der drehzahlvariablen Teillastfähigkeit und höheren Leistungsauslegung nicht notwendig.

nierten Gebäuden effiziente Wärmepumpen bereits heute einzuführen und nach einer schrittweisen Sanierung und Reduktion der Vorlauftemperaturen und Höchstlast das Gebäude später vollständig durch Umweltwärme effizient zu versorgen. Weitergehende Überlegungen und Analysen dazu finden sich in Anhang 7.2.

3.2 Industrielle Prozesswärme

Status quo

Der Industriebereich ist durch den Brennstoffverbrauch für die Prozesswärmebereitstellung sowie durch nichtenergetische Emissionen geprägt. Raumwärme und Trinkwarmwasser der Industriebäude machen circa 13 Prozent des Wärmeverbrauchs aus. Die Industriegewärmebereitstellung ist für circa 21 Prozent der energiebedingten Emissionen verantwortlich beziehungsweise 18 Prozent der Gesamtemissionen. Es dominiert der Energieträger Erdgas, gefolgt von Kohle. Derzeit werden mehr als 50 Prozent der Wärmeerzeugung aus KWK-Anlagen

für die Industrie bereitgestellt.⁴⁰ KWK-Wärme macht damit einen Anteil von circa 20 Prozent der Industriegewärme aus. Im Bereich der Erneuerbaren Energien wird fast ausschließlich Biomasse eingesetzt (vorwiegend Reststoffe).

Dekarbonisierungsoptionen

Entscheidend für die Dekarbonisierung sind die unterschiedlichen Temperaturniveaus der einzelnen Verbraucher insbesondere von Warmwasser, Dampf und Thermoöl. Als KWK können im Bereich bis 300 Grad Celsius Gas- und -Dampf-Kraftwerke eingesetzt werden, bis circa 500 Grad Celsius Gasturbinen mit Abhitzeessel. Das KWK-Potenzial könnte von derzeit circa 48 Prozent auf circa 66 Prozent gesteigert werden.⁴¹ In diesem höheren Temperatur-

40 Hierbei bestehen Unsicherheiten aufgrund einer fehlenden Datenbasis (stromseitige Trennung in Eigenstromerzeugung und öffentliche Versorgung, aber keine wärme-seitige Differenzierung).

41 Prognos et al. (2015a)

Industriegewärme-Endenergieverbrauch 2010 bis 2014 in Terawattstunden pro Jahr

Abbildung 15



BMWi (2016); Prognos et al. (2015a)

bereich stellt die KWK eine zentrale Effizienztechnologie dar, da es keine technische Alternativen zum Einsatz von chemischen Energieträgern gibt. Elektrokessel können zur Verwendung von „überschüssigem“ Erneuerbare-Energien-Strom eingesetzt werden in Kombination mit KWK-Anlagen oder Heizkesseln.

In den Bereichen von 100 bis zukünftig 140 Grad Celsius können Hochtemperatur-Wärmepumpen zur Anwendung kommen, wenn entsprechende Abwärmepotenziale vorhanden sind.⁴² Sie stellen damit eine Effizienztechnologie zur Abwärmenutzung dar. Hierbei bestehen aber noch große Unsicherheiten, welche Abwärmepotenziale (Temperaturniveaueignung, gleicher Standort) realistisch sind und welcher Anteil dieser Potenziale direkt (das heißt ohne Wärmepumpen) oder nur mithilfe von Wärmepumpen genutzt werden kann. Solarthermie bietet Anwendungsmöglichkeiten in der Bereitstellung von heißem Wasser. Im Hochtemperaturbereich kann vermehrt Biomasse eingesetzt werden. Energieeffizienz geht häufig einher mit dem Wechsel zu neuen, oftmals strombasierte Verfahren (zum Beispiel mechanische Energie statt Wärme, Steigerung von Recycling zur Sekundärmetall-Herstellung).

3.3 Verkehr

Status quo

Der nationale Verkehr ist für circa 20 Prozent der energiebedingten Emissionen verantwortlich beziehungsweise für 17 Prozent der Gesamtemissionen, welche auch fast ausschließlich vom Straßenverkehr verursacht werden. Der internationale Verkehr ist hierbei nicht Bestandteil des nationalen Klimaziels. Dabei nimmt das Verkehrsaufkommen sowohl im motorisierten Individualverkehr als auch im Stra-

ßen Güterverkehr in den letzten Jahren zu. Herausforderungen bestehen insbesondere im stark wachsenden Güterverkehr und im sehr stark wachsenden Flugverkehr.⁴³ Bei den Erneuerbaren Energien ist der Anteil von Biokraftstoffen am Straßenverkehr mit circa sechs Prozent sehr gering.

Dekarbonisierungsoptionen

Zur Dekarbonisierung des Straßenverkehrs bestehen drei grundsätzliche Optionen:

- Verkehrsverlagerung (Schiene, ÖPNV, Fahrrad)
- Effizienzsteigerung fossiler Antriebe (Hybridisierung, Leichtbau, Diesel/Erdgas)
- Erneuerbare-Energien-Antriebe (Elektromobilität, Power-to-Gas, Power-to-Liquid)

Mit der Fokussierung auf den Straßenverkehr hat sich in der energiepolitischen Diskussion in der letzten Zeit die zentrale Rolle der E-Mobilität als weitgehender Konsens herausgebildet. Offene Fragen betreffen hierbei im Bereich von Pkws und Leichtnutzfahrzeugen die Rolle von batterieelektrischen Fahrzeugen gegenüber Plug-in-Hybridfahrzeugen und Elektrofahrzeugen mit Reichweitenerweiterung sowie – im Fall der beiden letzteren Fahrzeugtypen – die Höhe der elektrischen Fahranteile, die Auswirkungen von technologischen Innovationen wie Schnellladung, Batteriereichweiten, autonomes Fahren und die Entwicklung und Umsetzung von Mobilitätskonzepten. Im Bereich des Schwerlastverkehrs besteht weiterhin die Grundsatzfrage nach der Einführung eines Oberleitungssystems für Lkws und innerhalb dieses Systems die technische Ausgestaltung (flächendeckendes Stromnetz – ohne mobile Batterie vs. abschnittsweise Nachladenetz mit mobiler Batterie). Gerade in der mittelfristigen Entwicklung (zum Beispiel 2030) bietet der Oberleitungs-Lkw die Chance eines schnelleren Markthochlaufs und einer früheren Elektrifizierung als die im Vergleich dazu langsamere Entwicklung des Pkw-Absatzmarktes.

⁴² Der Temperaturbereich bis 100 °C repräsentierte 2013 knapp 120 TWh des Wärme-Endenergieverbrauchs in der Industrie; der Bereich von 100–200 °C rund 90 TWh. Mehr als 300 TWh benötigten Temperaturniveaus über 200 °C (Prognos et al. 2015b).

⁴³ BVU et al. (2014)

3.4 Strom

Status quo

Die Stromerzeugung ist für circa 40 Prozent der energiebedingten Emissionen verantwortlich beziehungsweise für 34 Prozent der Gesamtemissionen. Mit einem Erneuerbare-Energien-Anteil von 33 Prozent am Bruttostromverbrauch ist in diesem Bereich die dynamischste Steigerung in den letzten Jahren erzielt worden. Aufgrund des in den letzten Jahren immer weiter angestiegenen Stromexportsaldos auf zuletzt 52 Terawattstunden (2015) – verbunden mit dem Ausstieg aus der Kernenergie und dem Einbruch der Preise im europäischen Emissionshandel – konnten die nationalen Emissionen aber kaum reduziert werden.

Dekarbonisierungsoptionen

Zur Dekarbonisierung des Stromsektors lassen sich folgende Optionen unterscheiden:

- Energieeffizienz (Einsparungen im herkömmlichen Verbrauch, Anforderungen an die Effizienz neuer Stromverbraucher)
- Erneuerbare-Energien-Ausbau (Fokus Windkraft und Photovoltaik)
- Änderung des Brennstoffmixes (Merit Order des Kraftwerksparks, Besserstellung von Gas-Kondensationskraftwerken und Gas-KWK gegenüber Kohle
 - im Kraftwerkseinsatz in Hinblick auf die Preisentwicklung oder mögliche Stilllegung von CO₂-Zertifikaten
 - im Neubau beziehungsweise in der Stilllegung von Kraftwerken
- aus nationaler Sicht die Reduktion des Stromexportsaldos (Jedoch wäre dies in Hinblick auf das europäische Emissionsziel nicht relevant und als Flexibilisierungsoption kontraproduktiv.)

Bedeutung des Klimaziels für den Stromverbrauch

Das Treibhausgasemissionsziel ist zentral für die Höhe des Stromverbrauchs.⁴⁴ Je ambitionierter das Emissionsziel ist, desto größer wird die Notwendigkeit einer Elektrifizierung der Nachfragesektoren Gebäudewärme, Verkehr und Industrie, um die energiebedingten Emissionen in Summe reduzieren zu können. Hierfür ist eine starke Reduktion der CO₂-Intensität des Strommixes mithilfe der oben genannten Dekarbonisierungsoptionen die Voraussetzung.

Anhand von zwei eigenen Szenariorechnungen des Fraunhofer IWES, welche auch Bestandteil des Szenarienvergleichs in Kapitel 4 sind, wird beispielhaft die Auswirkung des Emissionsziels auf den Stromverbrauch für das Zieljahr 2050 deutlich (Abbildung 16): Für ein Klimaziel von minus 83 Prozent Treibhausgasemissionen steht die Elektrifizierung durch Effizienztechnologien wie Elektromobilität und Wärmepumpen im Vordergrund, begleitet – wenn gleich auch mit geringerer Bedeutung – von neuen elektrischen Verfahren in der Industrie und der Verwendung von Erneuerbare-Energien-Einspeisespitzen vorrangig durch *Power-to-Heat*-Hybridsysteme, aber auch teilweise durch *Power-to-Gas*. Im Beispiel ergibt sich ein Stromverbrauch von rund 800 Terawattstunden pro Jahr.⁴⁵ Für ein Minus-95-Prozent-Ziel ist der Anstieg des Stromverbrauchs auf rund 1.000 Terawattstunden pro Jahr⁴⁶ vor allem auf die Erzeugung von chemischen Energieträgern (*Power-to-Gas*, *Power-to-Liquid*) zurückzuführen. Aufgrund des Wirkungsgradverlustes (Erneuerbare-

44 Aus einem Vergleich von Minus-80-Prozent-Klimazielszenarien für 2050 ergeben sich als wesentliche Einflussfaktoren auf den Stromverbrauch: die noch zulässigen Emissionen, die Verfügbarkeit von Biomasse sowie die Entwicklung der Nachfrage beziehungsweise Effizienz in den Sektoren Verkehr, Gebäudewärme, Industrie und des herkömmlichen Stromverbrauchs (Fh-IWES 2015a).

45 inklusive internationalem Verkehr

46 beziehungsweise 1.200 Terawattstunden unter Berücksichtigung von internationalem Verkehr

Energien-Strom → Gas → Deckung der Endenergienachfrage) ist dieser Stromverbrauchsanstieg auch bei geringer Reduktion der noch zulässigen Emissionen sehr groß. Hingegen sind die Potenziale für eine direkte Stromnutzung durch Elektromobilität und Wärmepumpen dann schon weitgehend ausgeschöpft. Erzeugungssseitig geht damit ein noch stärkerer Ausbaubedarf von Windkraft und Photovoltaik einher. Außerdem werden der Einsatz von thermischen Kraftwerken und die Rolle von KWK insbe-

sondere im Niedertemperaturbereich stark eingeschränkt.⁴⁷

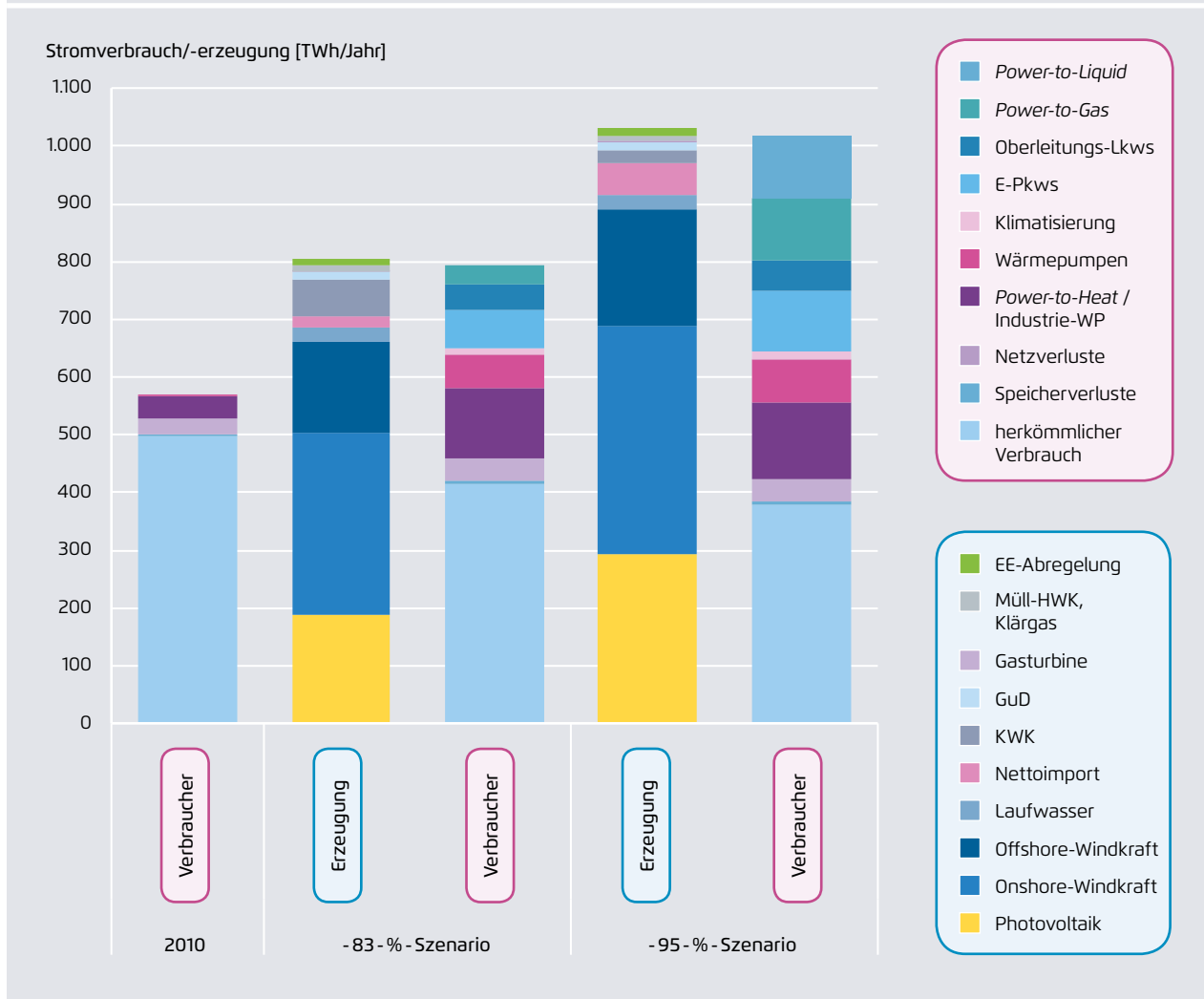
CO₂-Wirksamkeit einer vermehrten Stromnutzung im Wärmebereich

In der energiepolitischen Diskussion wird der Klimanutzen einer zusätzlichen Stromnachfrage aus dem Wärme- oder Verkehrssektor zum Teil hinterfragt – basierend auf der These, dass eine solche Nachfrage

47 siehe dazu auch Kapitel 6.1

Stromerzeugung und -verbrauch in einem Minus-83-Prozent- und einem Minus-95-Prozent-Zielszenario für 2050

Abbildung 16



Fh-IWES et al. (2015) und eigene Berechnung

vor allem zur Mehrproduktion an Strom aus konventionellen Kraftwerken mit erheblich höherer CO₂-Emissionsintensität führe. Diese These wird hier kurz eingeordnet.

Ausgangspunkt der Überlegungen sollte sein, dass für einen zukünftigen Mehrverbrauch an Strom durch neue Wärme- und Verkehrsanwendungen auch ein zusätzlicher Ausbau an Erneuerbaren Energien erfolgen muss.⁴⁸ Der zum Betrieb der Wärmepumpen benötigte Strom kann dabei mit zwei verschiedenen Ansätzen charakterisiert werden: als Durchschnittstrommix oder als Verdrängungstrommix (auch als Grenzstrommix bezeichnet).⁴⁹

Nimmt man einen **Durchschnittstrommix** an, so wird die durchschnittliche Emissionsintensität des deutschen Kraftwerksparks unterstellt, der aus konventionellen Kraftwerken und Erneuerbare-Energien-Anlagen besteht. Dieser Emissionsfaktor wird für 2015 auf rund 535 Gramm CO₂ je Kilowattstunde geschätzt⁵⁰ und verringert sich mit zunehmender Erzeugung aus Erneuerbaren Energien. Für 2030 kann von einem Wert im Bereich von 210 Gramm CO₂ je Kilowattstunde ausgegangen werden (ohne Vorkettenemissionen).⁵¹

Aufwendiger ist die Bestimmung des **Verdrängungstrommix**.⁵² Hierbei wird der Stromnachfrage in hoher zeitlicher Auflösung modellbasiert ein Einsatz von Kraftwerken zugeordnet. Dabei kann es Zeiten mit großer Erneuerbare-Energien-Einspeisung geben und solche mit weniger Erzeugung aus Erneuerbaren – wobei die Erzeugung aus Windkraftanlagen grundsätzlich besser zur Stromnachfrage für Wärmepumpen in der Heizperiode passt.⁵³ Der Verdrängungstrommix führt zu erheblich höheren Emissionen in einem Bereich von gegenwärtig rund 800 bis 900 Gramm CO₂ je Kilowattstunde. Auch diese Emissionsintensität verringert sich mit zunehmendem Erneuerbaren-Zubau. Für 2030 kann von 600 Gramm CO₂ je Kilowattstunde ausgegangen werden.⁵⁴

Daraus ergibt sich eine Bandbreite der anzusetzenden Emissionsintensität, deren oberes Ende vom Verdrängungstrommix und deren unteres Ende vom Durchschnittstrommix bestimmt wird. Mit zunehmendem Erneuerbaren-Ausbau senkt sich die Bandbreite weiter ab. Angesichts dieser zeitlichen Dynamik sollte man für einen heute neu in Betrieb gehenden Verbraucher einen Durchschnittswert der jeweiligen Emissionsintensität über die gesamte Lebensdauer bilden.

Für die weiteren Emissionsberechnungen in dieser Untersuchung wird der deutsche Durchschnittstrommix unterstellt.⁵⁵

48 vgl. Schill (2016); Öko-Institut et al. (2016).

49 BDEW (2015); ifeu (2012); Nymoen, ifeu (2014); UBA (2014)

50 Hierbei lässt sich auch noch der Emissionsfaktor unter Berücksichtigung des Handelssaldos unterscheiden (UBA 2016b). Der Durchschnittstrommix wird beispielsweise in einer aktuellen Studie zur Elektromobilität angesetzt. Darin wird er einerseits als erhebliche Vereinfachung des Zusammenhangs zwischen Erzeugungs- und Nachfrageprofil beschrieben, andererseits als verlässliche erste Näherung (Öko-Institut et al. 2016). Allerdings unterscheidet sich das Nachfrageprofil von Wärmepumpen von dem der Elektromobilität aufgrund der Saisonalität des Wärmebedarfs.

51 Nymoen, ifeu (2014)

52 Die Berechnung des Verdrängungstrommix hat ihren Ursprung in der energetischen Bewertung von KWK-Anlagen (LBD 2015). Der Ansatz eignet sich aber prinzipiell auch für die Bewertung zusätzlicher Stromnachfrage (BDEW 2015).

53 Von Oehsen et al. (2014)

54 Nymoen, ifeu (2014); BDEW (2015)

55 Vergleiche der spezifischen Emissionen unterschiedlicher Heizungssysteme finden sich u. a. in Nymoen, ifeu (2014) und VDE (2015).

4 Szenarienvergleich: Mindestniveaus zum Einsatz von Schlüsseltechnologien im Gebäudewärmesektor

Im Mittelpunkt dieser Untersuchung steht das mittelfristige Klimaziel 2030 und was zur Erreichung des Ziels schon heute an Maßnahmen angestoßen werden muss. Das Jahr 2030 kann dabei aber nicht isoliert betrachtet werden, weil sich aus einem angestrebten langfristigen Zielzustand 2050 Rückwirkungen und Restriktionen für den Pfad dorthin ergeben – und damit auch für das Jahr 2030. Im Gebäudewärmebereich geht es in diesem Zusammenhang vor allem um den Markthochlauf von Erneuerbare-Energien-Wärmeerzeugern, der durch die Altersstruktur bestehender fossiler Kessel und die Umsetzung von Sanierungsraten und -tiefen limitiert ist.

In diesem Sinne wird das hier zu untersuchende Mindestniveau von Schlüsseltechnologien im Jahr 2030 als eine Marktdurchdringung definiert, die es ermöglicht, im Jahr 2050 ein Minus-80-Prozent-Ziel zu erreichen, und dabei ein Minus-95-Prozent-Ziel aber nicht ausschließt. Dementsprechend wird im folgenden Szenarienvergleich immer sowohl das Jahr 2030 als auch das Jahr 2050 ausgewertet. Unter Schlüsseltechnologien verstehen wir hier insbesondere Gebäudeeffizienz, Wärmenetze und Wärmepumpen.

4.1 Vergleichene Szenarien

Für den Szenarienvergleich wurden aktuelle **Zielszenarien** ausgewählt, welche das gesamte Energieversorgungssystem bilanzieren und damit auch die Rückkopplung zwischen den einzelnen Sektoren direkt oder indirekt über ein übergreifendes Klimaziel berücksichtigen.⁵⁶ Zwar unterscheiden sich die

Szenarien in speziellen Annahmen zu verschiedenen Aspekten:

- nur energetische Emissionen vs. Emissionen inklusive nichtenergetischer Bereich
- Emissionen nach Kyoto-Protokoll vs. Emissionen inklusive internationaler Verkehr und LULUCF (*Land use, land use change and forestry*)
- Verfügbarkeit von *Carbon Capture and Storage* (CCS)
- nur national oder Berücksichtigung eines europäischen Lastenausgleichs⁵⁷

Trotz dieser Unterschiede lassen sich die Zielszenarien jedoch durch eine Einteilung in zwei Gruppen miteinander vergleichen: in Szenarien mit einem schwächeren und mit einem schärferen langfristigen Klimaziel (Tabelle 2).⁵⁸ Der Übersichtlichkeit halber werden hier alle weniger ambitionierten Klimaziele als „Minus-80-Prozent-Ziele“ bezeichnet, auch wenn in den Szenarien zum Teil etwas schärfere Reduktionsziele vertreten sind wie minus 83 Prozent oder minus 85 Prozent.

Im Bereich der **Trendszenarien** wurden ebenfalls aktuelle Studien ausgewertet, welche aber aufgrund der Methodik einer Fortschreibung der Wirkung aktueller energiewirtschaftlicher und regulatorischer Rahmenbedingungen auch für einzelne Schlüsseltechnologien nicht zwangsläufig das gesamte Energieversorgungssystem bilanzieren müssen.⁵⁹

56 Fh-ISE (2015); Fh-IWES et al. (2015); Öko-Institut et al. (2015); Prognos et al. (2014)

57 Fh-IWES (2015a)

58 Ein Vergleich weiterer Annahmen für die hier genannten Szenarien wie zum Beispiel Entwicklung von Bevölkerung und Wirtschaft findet sich in Öko-Institut et al. (2016b).

59 BWP (2016); Öko-Institut et al. (2015); Prognos et al.

Ausgewählte Szenarien und Kurzbezeichnung

Tabelle 2

		Kürzel	Heute	2030	2050	Referenz
Zielszenarien	Klimaziel -95%	KSz 95	BMUB-Klimaschutzszenario -95% (2. Modellierungsrunde)			Öko-Institut et al. (2015)
		ISWV 95	Interaktion EE-Strom-Wärme-Verkehr -95% (Erweiterung)			Fh-IWES et al. (2015)
	Klimaziel -80%*	KSz 80	BMUB-Klimaschutzszenario -80% (2. Modellierungsrunde)			Öko-Institut et al. (2015)
		ISE 85	Fh-ISE Was kostet die Energiewende? (-85%)			Fh-ISE (2015)
		ISWV 83	Interaktion EE-Strom-Wärme-Verkehr -83% (Basis)			Fh-IWES et al. (2015)
Trendszenarien	KSz AMS	BMUB-Klimaschutzszenario „Aktuelle Maßnahmen“ (2. Runde)			Öko-Institut et al. (2015)	
	ERP	BMWi-Energiereferenzprognose			Prognos et al. (2014)	
	UBA-PB	UBA-Projektionsbericht 2015			UBA (2015)	
	BWP-BP	BWP-Branchenprognose 2015			BWP (2016)	

* Das Klimaziel minus 80 Prozent umfasst auch Szenarien mit minus 83 Prozent (ISWV 83) und minus 85 Prozent (ISE 85) Treibhausgasminderung.

4.2 Treibhausgasemissionen

Eingangs soll der Blick auf die Treibhausgasemissionen in den einzelnen Sektoren gelegt werden.⁶⁰ Abbildung 17 zeigt für die Jahre 2030 und 2050 jeweils zuerst die Trend- und dann die Zielszenarien. Hierbei wird deutlich, dass die Trendszenarien die Klimaziele klar verfehlen. Gerade langfristig zeigt sich,

(2014); UBA/BMUB (2015). Hierbei sei darauf verwiesen, dass das „Aktuelle Maßnahmen-Szenario“ in den Klimaschutzszenarien der 2. Modellierungsrunde (KSz-AMS) für den Gebäudebereich methodisch nicht vergleichbar mit anderen Trendszenarien ist. Deswegen wird für diesen speziellen Anwendungsbereich im Folgenden das Szenario nicht ausgewiesen.

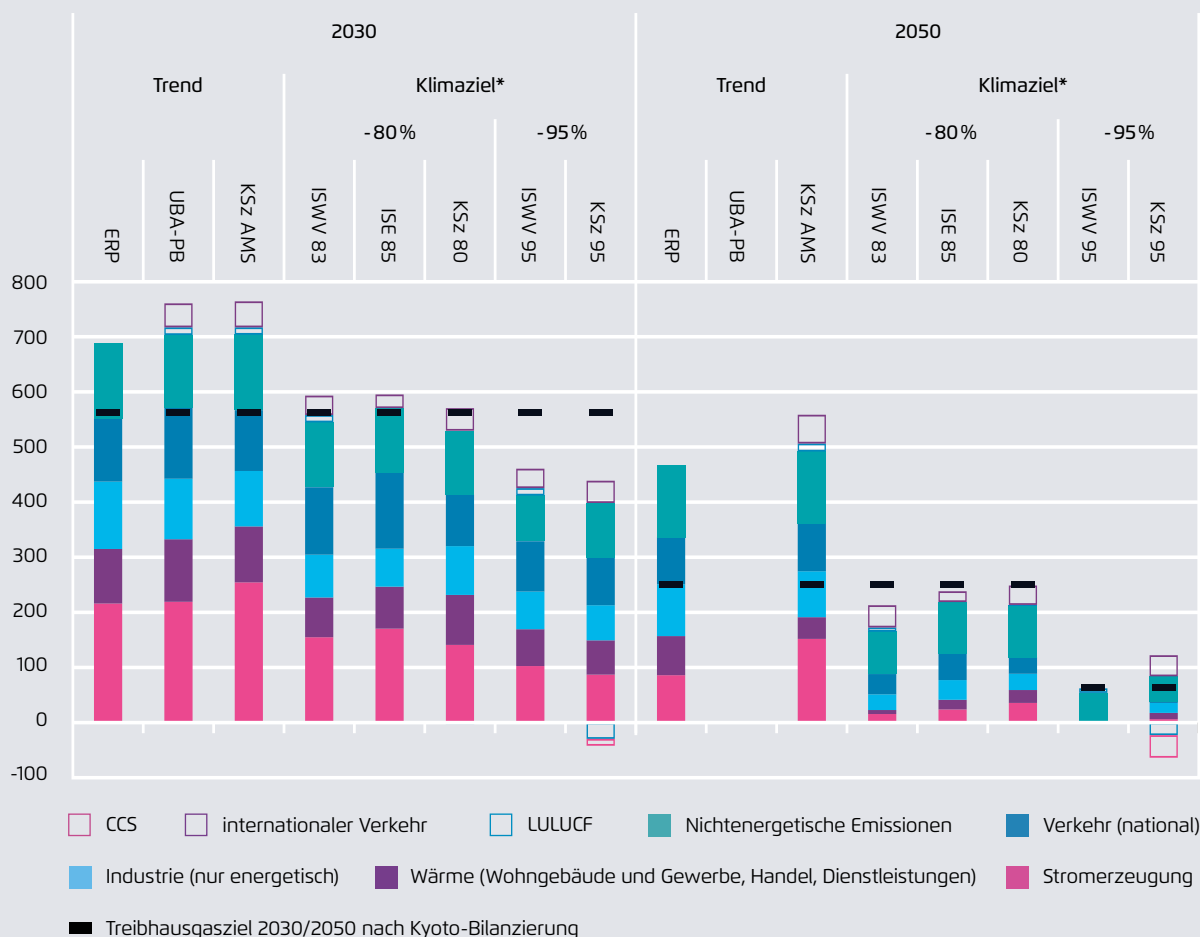
60 Dabei wurde statt der klassischen Auswertung nach den Endverbrauchergruppen Haushalte, Gewerbe, Industrie und Verkehr die Auswertung gemäß der Energiesektoren (Erzeugersicht) gewählt (unter Aufteilung der Emissionen der KWK auf die Koppelprodukte Wärme und Strom).

dass die Dekarbonisierung des Strom- und Gebäudewärmesektors prioritär und leichter zu erreichen ist, während in den Bereichen Verkehr und Industriewärme Treibhausgasemissionen deutlich schwerer zu reduzieren sind. Politische Ziele stehen teilweise in Diskrepanz zu dieser Beobachtung: So besteht zum Beispiel für den Gebäudebereich ein langfristiges Subziel in der Reduktion der fossilen Brennstoffe von minus 80 Prozent gegenüber 2008, welches auch für ein schwächeres Klimaziel als zu gering erscheint.⁶¹ Langfristig dominant bleiben die nichtenergetischen Emissionen (vorwiegend andere Treibhausgase als CO₂ in den Bereichen Landwirtschaft, Industrieprozesse u. a.). **Mit Blick auf 2030 wird deutlich, dass Szenarien, welche langfristig das schärfere Klimaziel erreichen, mittelfristig das Treibhausgasemissionsziel von minus 55 Prozent deutlich unterschreiten.**

61 siehe Anhang 7.1 für Details

Szenarienvergleich: Entwicklung der Treibhausgasemissionen in den Energiesektoren in Millionen Tonnen CO₂-Äquivalenten pro Jahr

Abbildung 17

Emissionen [Mio. t CO₂-Äqui.]

* Das Klimaziel minus 80 Prozent umfasst auch Szenarien mit 83 und 85 Prozent Treibhausgasminderung.

ERP: Prognos et al. (2014); ISE: Fh-ISE (2015); ISWV: Fh-IWES et al (2015); KSZ: Öko-Institut et al. (2015); UBA PB: UBA/BMUB (2015) ⁶²

4.3 Gebäuwärmeverbrauch

Im Rahmen des Szenarienvergleichs wird der Gebäuwärmeverbrauch (Raumwärme RW und Trink-

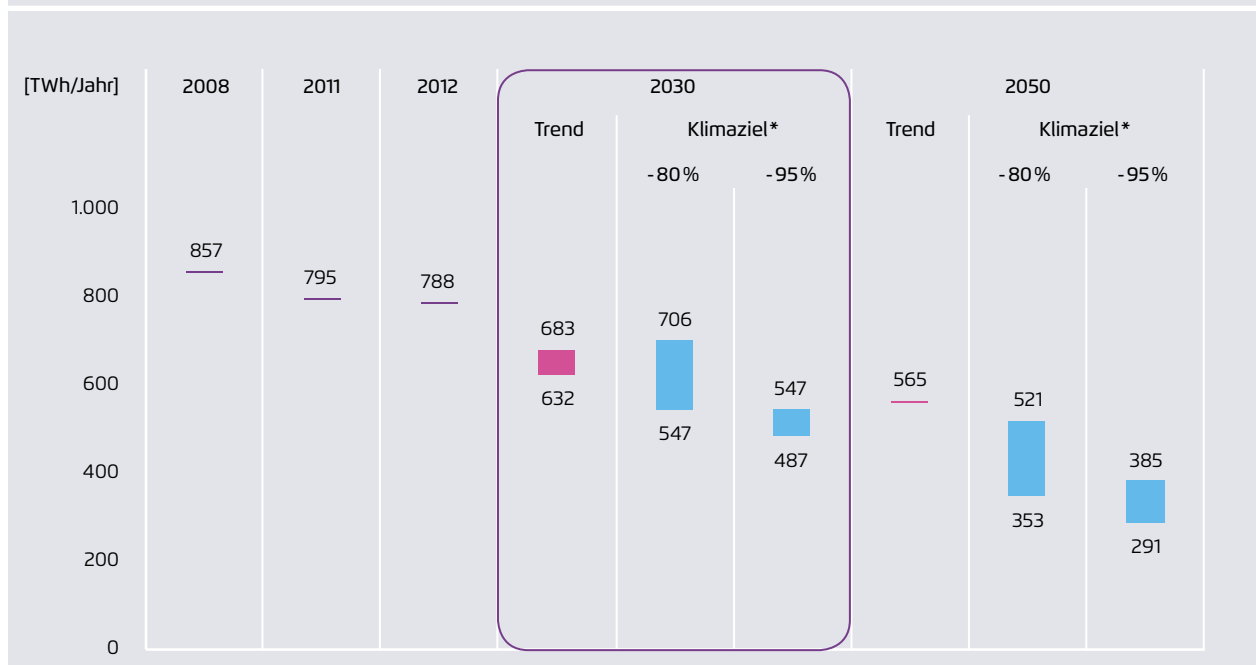
warmwasser TWW) in den Bereichen Haushalte (HH) und Gewerbe (GHD) auf Endenergiebasis erfasst und dargestellt.⁶³ Hierbei wird deutlich, dass die

62 Bei ERP und ISE 85 wurden nichtenergetische Emissionen nicht explizit mit berücksichtigt. Um eine bessere Vergleichbarkeit in der Darstellung zu erzielen, wurden für diese Szenarien die nichtenergetischen Emissionen aus den entsprechenden Klimaschutzszenarien übernommen. Internationaler Verkehr sowie Emissionen/Treibhausgas-senken aus LULUCF sind nicht Teil der Kyoto-Bilanzierung und daher nicht bei allen Studien angegeben.

63 Hierbei kann es zwar noch Abweichungen hinsichtlich der Annahmen zur Bevölkerungs- und Flächenentwicklung, Entwicklung von Anlagenaufwandszahl, Zirkulationsverlusten und Berücksichtigung des Klimawandels geben – und damit Abweichungen in Bezug auf die erforderliche Sanierungsrate und -tiefe. Die Basis Endenergie erlaubt jedoch den Vergleich des notwendigen Energieeinsatzes zur Deckung der Nachfrage.

Szenarienvergleich: Gebäudewärmeverbrauch Endenergie in Terawattstunden pro Jahr

Abbildung 18



* Das Klimaziel minus 80 Prozent umfasst auch Szenarien mit 83 und 85 Prozent Treibhausgasminderung.⁶⁶ Prognos et al. (2014); Fh-ISE (2015); Fh-IWES et al (2015); Öko-Institut et al. (2015); UBA/BMUB (2015)

Trendszenarien nur geringe Senkungen des Wärmeverbrauchs aufweisen. **Letztlich fehlt es unter den heutigen regulatorischen Maßnahmen in Bestandsgebäuden an Verpflichtungen zur Sanierung**, beziehungsweise werden im Fall von Sanierungen die Anforderungen und Regelungen der Energieeinsparverordnung in der Praxis oft umgangen. Im Neubaubereich (Abriss und Neubau sowie neue Bauflächen) führt die Energieeinsparverordnung dagegen schon heute zu hohen Einsparungen, um langfristige Klimaziele zu erreichen, auch wenn es an Umsetzungskontrollen mangelt. Doch macht der Neubaubereich bis 2050 nur circa 16 Prozent der beheizten Wohnfläche (HH) aber circa 35 Prozent der beheizten Nutzfläche (GHD) aus.⁶⁴ Für die Einhaltung von

klimapolitischen Zielszenarien ist dagegen eine sehr hohe Effizienz Voraussetzung; das heißt, die **Gebäudesanierung für Bestandsgebäude ist eine Schlüsseltechnologie**. Die Zielszenarien gehen fast einheitlich von einem starken Rückgang des Wärmeverbrauchs durch Sanierung von 40 bis 66 Prozent gegenüber 2008 (temperaturbereinigt) aus. Zwischen Szenarien, welche langfristig ein unteres oder oberes Klimaziel erreichen, ist dabei der Unterschied relativ gering, da eine möglichst hohe Effizienz in allen Fällen wesentlich erscheint. Darüber hinaus legt ein Vergleich dieser Bandbreiten mit den Ergebnissen der *Energieeffizienzstrategie Gebäude* nahe, dass der Gebäudebereich aus Gesamtsystemsicht überproportional mehr CO₂ einsparen muss.⁶⁵

64 Siehe dazu auch Abbildung 49 im Anhang. Insbesondere im Gewerbebereich ist bis 2050 ein stärkerer Zuwachs der Nutzfläche zu erwarten. Im Wohngebäudebereich wird stattdessen ein spezifischer Zuwachs an Wohnfläche pro Person durch eine Abnahme der Bevölkerung kompensiert.

65 siehe dazu eine detailliertere Darstellung in Anhang 7.1

66 Der besonders hohe Wert von 706 Terawattstunden bei minus 80 Prozent ist u. a. darauf zurückzuführen, dass im ISE-85-Szenario – anders als in den anderen Szenarien – kein Bevölkerungsrückgang bis 2050 angenommen wurde.

4.4 Wärmenetze und Erneuerbare-Energien-Optionen

Wärmenetze

Wärmenetze können eine wichtige Rolle bei der Dekarbonisierung der Gebäudewärme spielen, insbesondere weil sie den Siedlungsbereich mit hoher Wärmedichte adressieren, wo es schwieriger ist, dezentrale Wärmepumpen einzusetzen. Im Szenarienvergleich erscheint das Potenzial des Ausbaus von (Fern-)Wärmnetzen von heute 10 Prozent⁶⁷ auf etwa 23 Prozent des Endenergiebedarfs bis 2050 deutlich steigerbar, aber dennoch beschränkt, da der Großteil des Wärmemarktes in allen Szenarien von dezentralen Kesseln bestimmt wird. Die Bandbreite zwischen den Szenarien mit Anteilen von 9 bis 23 Prozent am Wärmemarkt ist dabei sehr groß. Teilweise wird aber auch schon im Trend unter dem heutigen regulatorischen Rahmen mit einem deutlichen Zuwachs der Wärmenetze gerechnet. **Bis 2030 muss sich der**

67 Ohne ländliche biogene Nahwärmenetze

Anteil von Wärmenetzen am Endenergiebedarf der Gebäude insbesondere dann deutlich steigern, wenn für 2050 eine Verringerung der Treibhausgasemissionen um 95 Prozent gegenüber 1990 angestrebt wird. Andernfalls erscheint der Sprung von einem niedrigen Niveau 2030 auf das hohe Niveau 2050 unrealistisch.

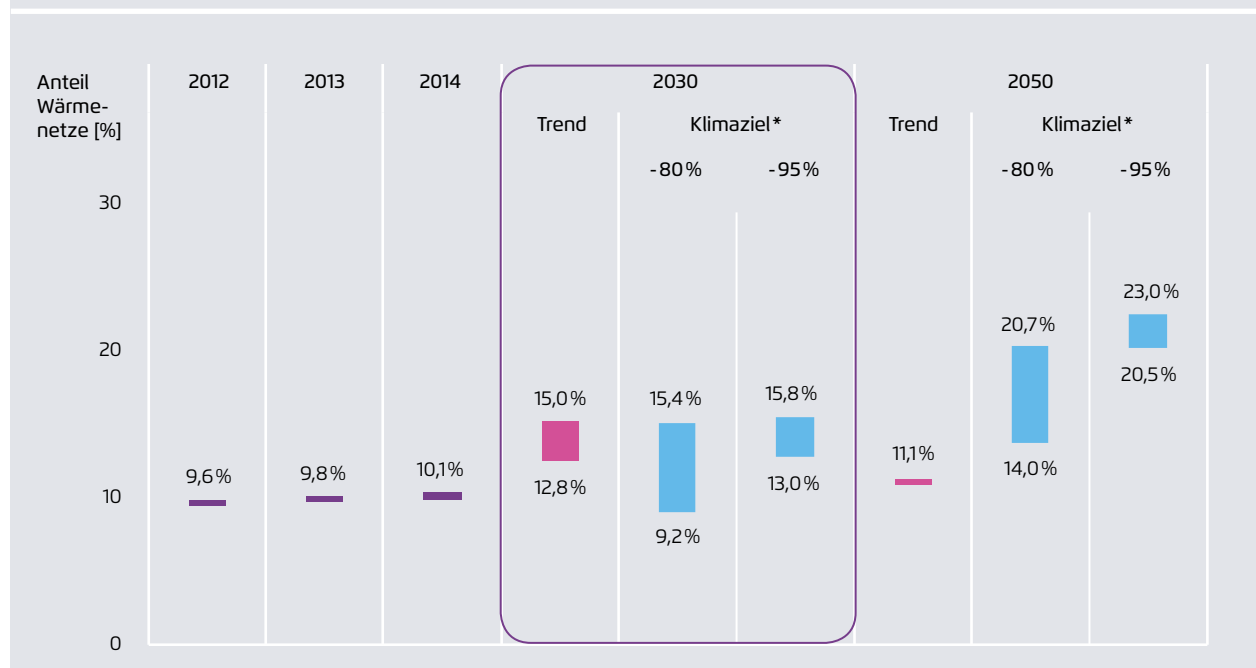
Erneuerbare-Energien-Optionen als Alternative zur dezentralen Wärmepumpe

Wärmenetze stellen auch meist die Voraussetzung für die Integration von nicht strombasierten Erneuerbaren Energien dar.

Die **Solarthermie** ist in allen Szenarien sehr heterogen vertreten mit einer großen Bandbreite von 11 bis 81 Terawattstunden (auch zwischen den Zielszenarien). Teilweise werden in den Szenarien nur dezentrale Dachanlagen ausgewiesen, weil eine Netzeinspeisung methodisch nicht berücksichtigt wird; teilweise nur Solarthermie für Wärmenetze aufgrund einer schlechten Wirtschaftlichkeit von Dachanlagen

Szenarienvergleich: Anteil von Wärmenetzen am Endenergiebedarf der Gebäude in Prozent

Abbildung 19



* Das Klimaziel minus 80 Prozent umfasst auch Szenarien mit 83 und 85 Prozent Treibhausgasminderung. Prognos et al. (2014); Fh-ISE (2015); Fh-IWES et al. (2015); Öko-Institut et al. (2015); UBA/BMUB (2015)

gen. In einigen Szenarien gibt es Kombinationen von Dachanlagen und Wärmenetzen, in anderen zusätzlich auch Anlagen in der Industrie. Dagegen weisen Trendszenarien nur Dachanlagen auf, da hier scheinbar noch größere Hemmnisse im Bereich der Freiflächenanlagen für Fernwärme gesehen werden, wie die Flächenverfügbarkeit oder die Konkurrenz zu anderen Wärmeerzeugern. In Kapitel 5 wird die Bedeutung von Solarthermie im Jahr 2030 im Bereich der Fernwärme und Industrie-Niedertemperaturprozesswärme in den Sensitivitätsrechnungen verdeutlicht.

Die **Tiefengeothermie** ist im Szenarienvergleich außer zur reinen Stromerzeugung für die Wärmeerzeugung fast nicht berücksichtigt worden. Dabei existieren bereits heute zahlreiche Projekte, einerseits in Kombination mit der Stromerzeugung (EEG-Förderung), aber auch als reine Wärmeanlagen. Wie in Kapitel 3.1 beschrieben, weist die Wärmeerzeugung aus Tiefengeothermie angebotsseitig ein vielfaches Potenzial des Fernwärmebedarfs auf, auch wenn nicht alle Wärmenetze in Deutschland gute geothermische Ressourcen aufweisen. Tiefengeothermie könnte aber eine zentrale Rolle zur langfristigen Dekarbonisierung der Fernwärme spielen.⁶⁸

Die **Biomasse** ist traditionell die wichtigste Erneuerbare-Energien-Quelle im Bereich der Gebäudewärme. Dabei sind Holzkessel – sowohl dezentral als auch in Wärmenetzen und Industrie – in den Szenarien fast immer berücksichtigt. Neben der grundsätzlichen Beschränktheit der Ressource zeigen sich in den Szenarien noch weitere Restriktionen für die energetische Nutzung von Holz durch die Konkurrenz von Biomasse-CCS in der Industrie oder durch eine Treibhausgas-Senkenfunktion des Waldes (LULUCF). Im Bereich der Anbaubiomasse (NaWaRo) weisen die Szenarien eine große Bandbreite auf – vom Fokus einer Gaserzeugung (universal einsetzbar) bis hin zur Fokussierung auf Biokraftstoffe (nur Verkehr).

68 siehe auch die Diskussion zur KWK in Kapitel 6.1

In allen Zielszenarien spielt die dezentrale Wärmepumpe eine wichtige Rolle, worauf im nächsten Abschnitt näher eingegangen wird. Einige Studie weisen zusätzlich explizit Großwärmepumpen aus. Grundsätzlich sind jedoch die **Differenzierungen zwischen dezentraler Wärmepumpe und netzgebundener Wärmepumpe** in den Bereichen Nahwärme und Quartierskonzepte in den Szenarien noch **nicht ausreichend getroffen** worden. Hierbei sind die Übergänge eher fließend beziehungsweise es besteht weiterer Forschungsbedarf.⁶⁹

4.5 Dezentrale Wärmepumpen

Szenarienvergleich

Im Szenarienvergleich zeigt sich die dezentrale Wärmepumpe zur Gebäudeversorgung als eine einheitliche Schlüsseltechnologie mit hoher bis sehr hoher Marktdurchdringung in allen Zielszenarien. Im Vergleich dazu treten jedoch in den Trendszenarien die Hemmnisse des gegenwärtigen regulatorischen Rahmens zutage. **Damit klafft im Jahr 2030 eine Lücke von etwa drei bis vier Millionen Wärmepumpen zwischen dem Niveau der Trendszenarien und dem benötigten Zielwert von fünf bis sechs Millionen Wärmepumpen** (siehe Abbildung 20).⁷⁰

Der gegenwärtige **Absatzmarkt** von circa 55.000 Wärmepumpen pro Jahr würde sich in den Trendszenarien auf nur circa 90.000 pro Jahr erhöhen, müsste aber für die Erreichung von Zielszenarien **im Mittel auf circa 360.000 jährlich gesteigert werden**.

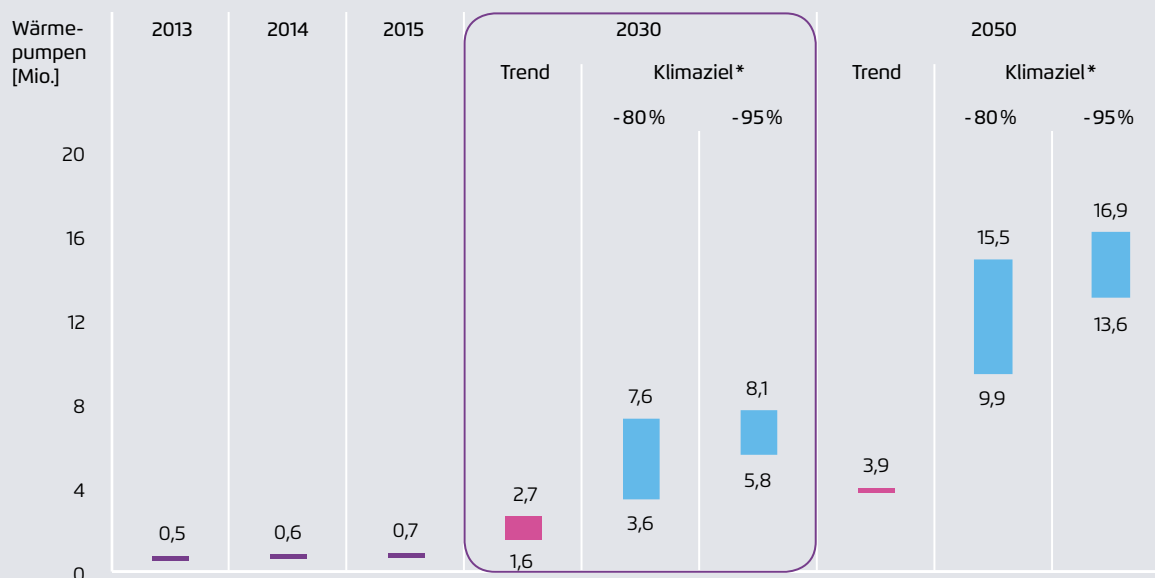
Hierbei ist deutlich zwischen Neubau- und Bestandsgebäuden zu unterscheiden. Im Neubaubereich müssen gemäß Energieeinsparverordnung (fossile) Primärenergieanforderungen eingehalten werden,

69 siehe dazu auch das Beispielprojekt „im Feldlager“ in Kapitel 6.1

70 Der Wert von fünf Millionen Wärmepumpen ergibt sich aus den in Kapitel 5 beschriebenen Sensitivitätsrechnungen für 2030; der Wert von 6 Millionen aus dem Klimaschutzziel von minus 95 Prozent bis 2050 (siehe weiter unten).

Szenarienvergleich: Anzahl installierter Wärmepumpen in Deutschland in Millionen

Abbildung 20



Szenarien	2015	2030	2050
Klimaziel -95%	0,7	ISWV 95	8,1
		KSz 95	5,8
Klimaziel -80%	0,7	ISE 85	7,6
		ISWV 83	4,9
		KSz 80	3,6
Trend	-	ERP	2,7
		UBA-PB	1,6
		BWP-BP	1,6

* Das Klimaziel minus 80 Prozent umfasst auch Szenarien mit 83 Prozent und 85 Prozent Treibhausgasminderung. BWP (2016); Prognos et al. (2014); Fh-ISE (2015); Fh-IWES et al. (2015); Öko-Institut et al. (2015); UBA/BMUB (2015)

sodass Wärmepumpen trotz hoher Stromkosten seit 2016 im Absatzmarkt eine wichtige Rolle spielen. Demgegenüber macht der Bestandsgebäudebereich nur circa ein Drittel des Wärmepumpen-Absatzmarktes aus und fokussiert sich insbesondere auf Tiefensanierungen. Der Anteil von Wärmepumpen an allen Heizungssystemen im Bestandsgebäudebereich beträgt rund zwei Prozent.

Die Rolle von Luftwärmepumpen wird in den Szenarien unterschiedlich eingeschätzt. Während ISE 85 und BWP-BP der Luftwärmepumpe aufgrund der

Wirtschaftlichkeit eine hohe Bedeutung einräumen – und in der Vergangenheit die Bedeutung von Luftwärmepumpen am Absatzmarkt deutlich zugenommen hat –, werden in anderen Szenarien Erdwärmepumpen aus Effizienzgründen bevorzugt, was dort zu deutlich höheren Anteilen führt. Letztlich sind die Übergänge hier jedoch fließend.⁷¹ Relevant ist insbesondere die Frage der höheren elektrischen Stromnachfrage im Winter.⁷²

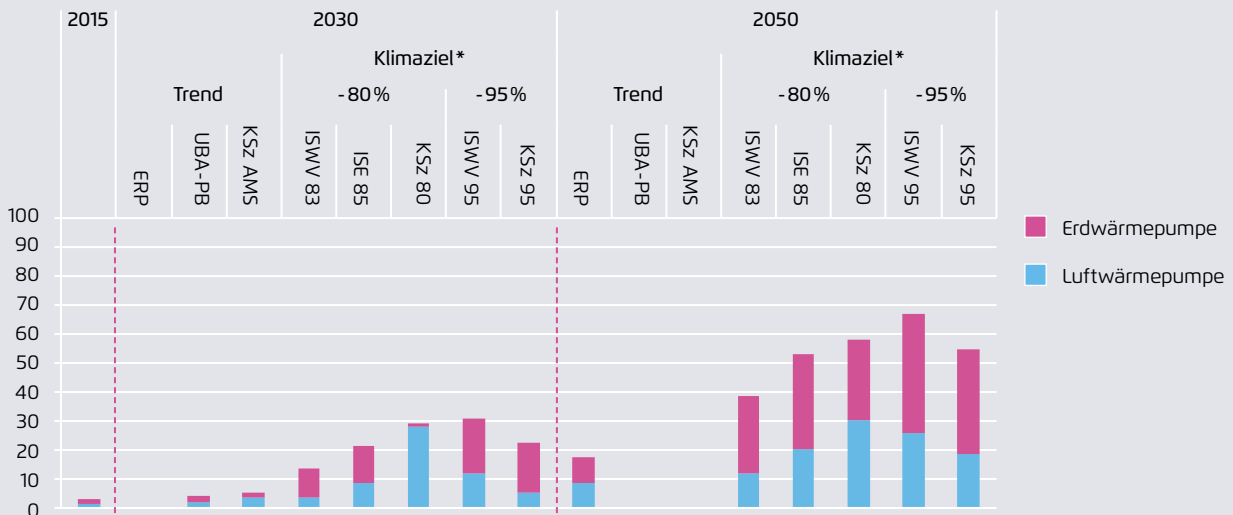
⁷¹ siehe dazu die Analyse in Anhang 7.2

⁷² siehe dazu die Analyse in Kapitel 5.8

Szenarienvergleich: Durchdringung von Wärmepumpen

Abbildung 21

Anteil Wärmepumpen am Gesamtmarkt (Endenergieverbrauch) [%]



Bestand Wärmepumpen [Mio.]



Anteil Wärmepumpen am Gesamtmarkt (Endenergieverbrauch) [%]



* Das Klimaziel minus 80 Prozent umfasst auch Szenarien mit 83 Prozent und 85 Prozent Treibhausgasminderung.
 BWP BP: BWP (2016); ERP: Prognos et al. (2014); ISE: Fh-ISE (2015); ISWV: Fh-IWES et al. (2015); Ksz: Öko-Institut et al. (2015);
 UBA PB: UBA/BMUB (2015)

Pfadabhängigkeiten

Aus der Altersstruktur der heute in Deutschland existierenden Heizungsanlagen in Gebäuden ergeben sich Restriktionen für die weitere Entwicklung, welche in der Entwicklung der Szenarien ISWV 83 und ISWV 95 berücksichtigt wurden. So sind heute circa 40 Prozent der Kessel älter als 25 Jahre. Fossile Kesselanlagen, die heute noch neu installiert werden, legen auch langfristig noch CO₂-Emissionen über viele Jahre fest. Verstärkt wird dies noch dadurch, dass der gegenwärtig durch die fehlenden energiepolitischen Rahmenbedingungen verursachte Sanierungsstau im Heizungsmarkt dazu führt, dass Altanlagen während der Heizsaison ausfallen und dann in kürzester Zeit eins zu eins ausgetauscht werden. Heute besteht bereits die Pflicht zum Kesselaustausch nach 30 Jahren (laut § 10 EnEV mit Ausnahmeregelungen). Um 2050 eine weitgehend CO₂-freie Wärmeversorgung zu erreichen, würde dies schon ab 2020 einen radikalen Umbruch des Wärmeerzeugerabsatzmarktes bedeuten, wenn die 30-Jahre-Regelung weiter besteht.

Bei unterstellter Verkürzung der Kessel-Nutzungsdauer auf 25 Jahre dürften ab 2025 keine rein fossil befeuerten Gas- und Ölkessel mehr neu in Betrieb gehen, wenn man das Erreichen eines Reduktionsziels von 95 Prozent nicht ausschließen will.⁷³

Bei einer Verkürzung der Nutzungsdauer fossiler Kessel auf 25 Jahre ergibt sich im Szenario ISWV 83 eine Entwicklung des Absatzmarktes und der Struktur des Gebäudebestands, die in Abbildung 23 dargestellt sind.⁷⁴ Hieraus wird die Trägheit des Gebäudebereiches deutlich und damit die Notwendigkeit, frühzeitig einen Wandel der Erzeugerstruktur zu initiieren, um langfristige Dekarbonisierungsziele erreichen zu können.

⁷³ Eine Diskussion des Einsatzes von bivalenten Wärmepumpen ohne Lock-In-Effekte und der möglichen Dekarbonisierung von Erdgas findet sich in der Kurzfassung zu diesem Bericht.

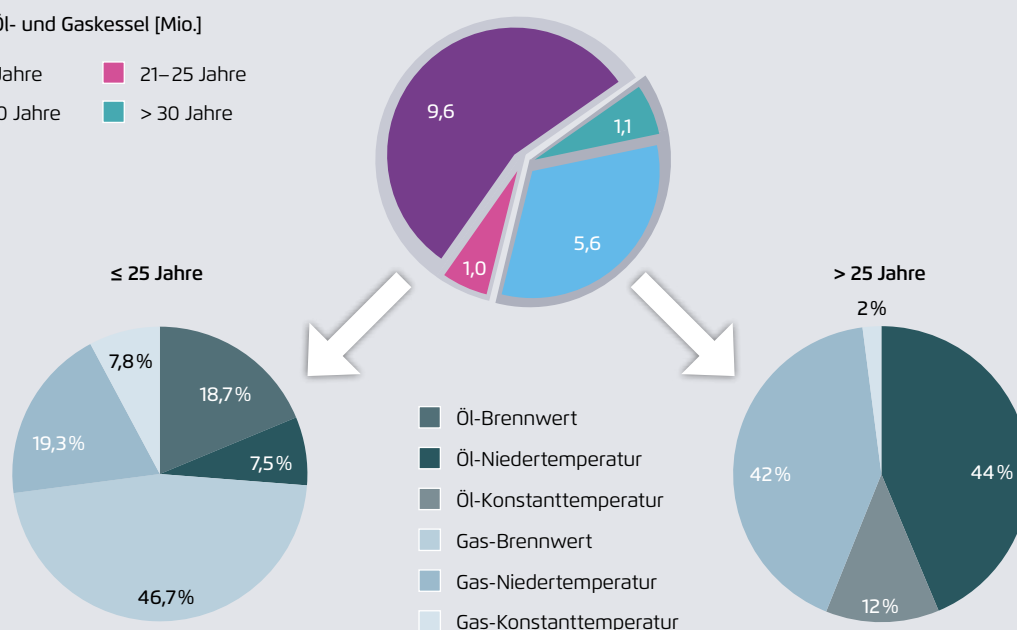
⁷⁴ Hierzu wurde ein Kohortenmodell des Fraunhofer IBP mit Wärmeerzeugern und unterstellter technischer Lebensdauer herangezogen.

Bestand der Öl- und Gaskessel in 2015 und Altersstruktur

Abbildung 22

Bestand Öl- und Gaskessel [Mio.]

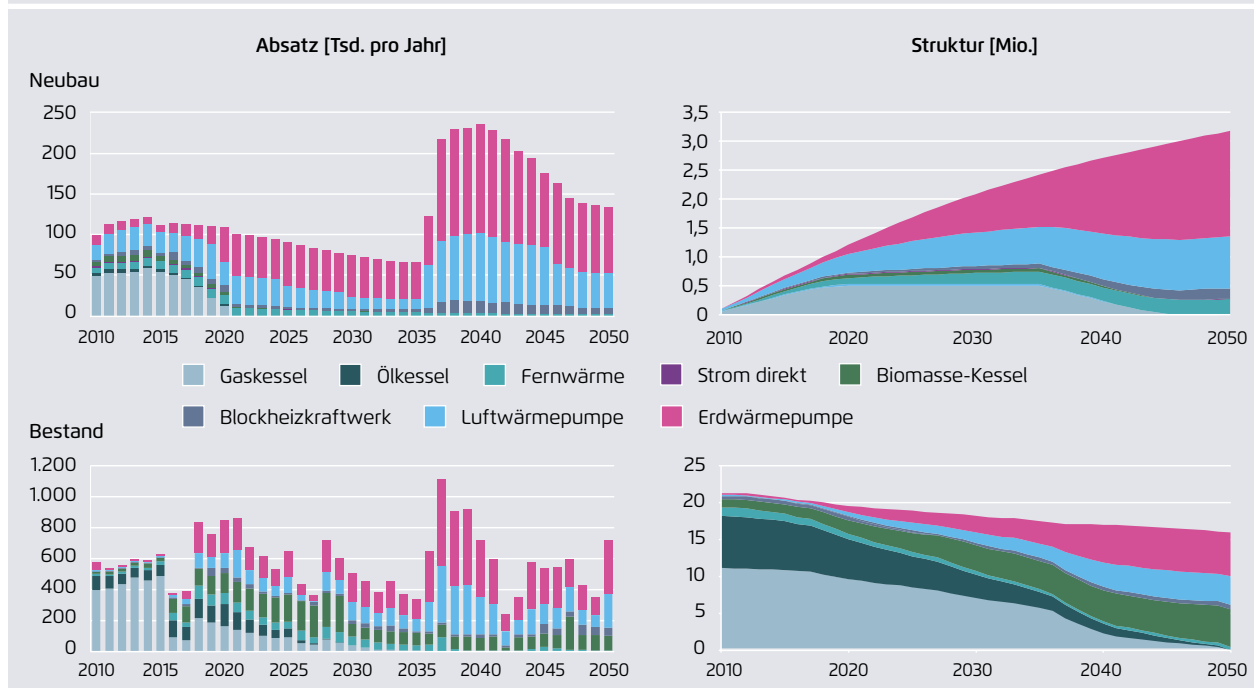
■ ≤ 20 Jahre ■ 21–25 Jahre
■ 26–30 Jahre ■ > 30 Jahre



Datenbasis: Bundesverband der Deutschen Heizungsindustrie mit eigener Fortschreibung

Entwicklung Absatzmarkt und Bestand Wärmeerzeuger im Beispielszenario ISWV 83

Abbildung 23



Datenbasis Fh-IBP, eigene Darstellung mit einer angenommenen Kesselnutzungsdauer von 25 Jahren

Angesichts der bestehenden Trägheiten und Restriktionen für Veränderungen des Heizungsbestands kann man nicht zu einem beliebigen Zeitpunkt von einem Treibhausgasemissionspfad von minus 80 Prozent auf minus 95 Prozent umschwenken. Wenn keine Heizungssysteme vor Ende ihrer eigentlichen technischen Lebensdauer ersetzt – und damit entwertet – werden sollen, ist ein ambitioniertes Mindestniveau an Wärmepumpen für 2030 notwendig. Im Vergleich der beiden Szenarien ISWV 83 und ISWV 95 zeigt sich, dass für 2030 der Punkt des oberen langfristigen Szenariopfadestrebend angestrebt werden müsste, was einem Wärmepumpenbestand von rund acht Millionen Anlagen entspricht (Abbildung 24). Eine analoge Betrachtung für die beiden Klimaschutzszenarien KSz 80 und KSz 95 ergibt für 2030 knapp sechs Millionen Wärmepumpen. **Insgesamt liegt also ein Mindestniveau 2030, welches den Pfad in Richtung minus 95 Prozent Treibhausgasemissionen für 2050 offen hält, bei rund sechs bis acht Millionen Wärmepumpen.**

4.6 Stromverbrauch für Wärmeanwendungen

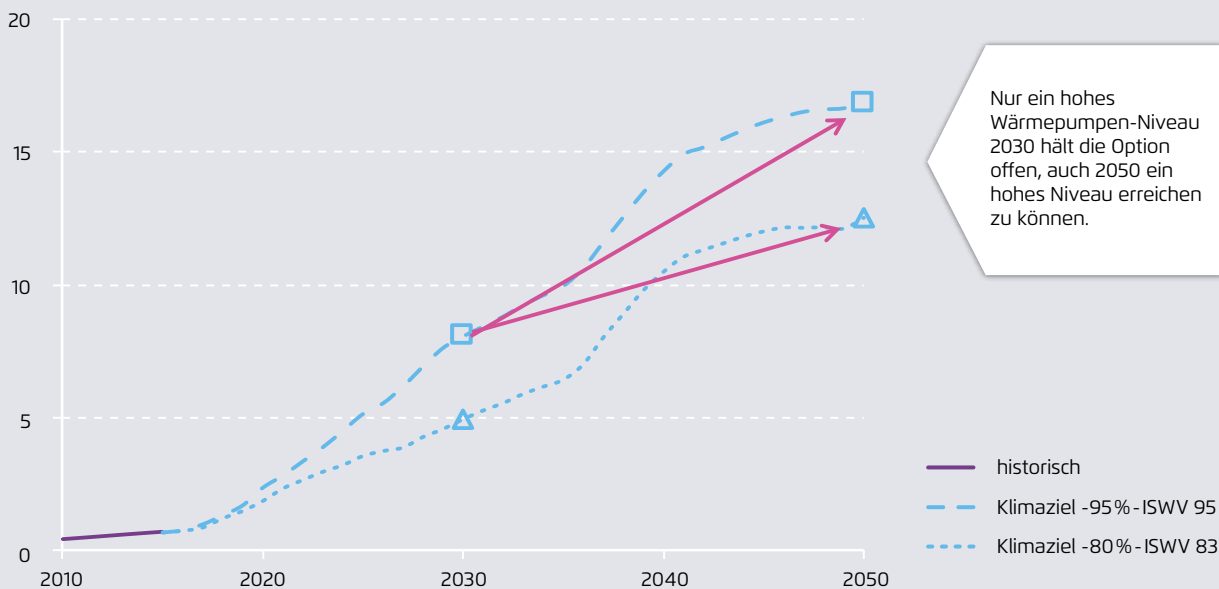
Neben seiner Nutzung in dezentralen Wärmepumpen wird Strom auch in anderen Wärmeanwendungen zur Dekarbonisierung eingesetzt. In den Trendszenarien umfasst dies nur den Stromeinsatz für Hochtemperaturprozesswärme auf gleichbleibendem Niveau sowie einen geringen Zuwachs von Stromverbrauch aus dezentralen Wärmepumpen (Abbildung 25). Aufgrund der wirtschaftlichen und regulatorischen Hemmnisse für eine Stromnutzung sind andere Anwendungen nur in den Zielszenarien und dort insbesondere in der langfristigen Perspektive für 2050 vertreten. Diese Stromanwendungen werden jedoch je nach Methodik unterschiedlich bewertet oder teilweise auch nicht berücksichtigt. So beinhalten die Zielszenarien⁷⁵:

⁷⁵ Zum Vergleich: Im Basisszenario der Langfristszenarien beträgt der dezentrale Wärmepumpenstrom 2030 etwa 19 TWh und 2050 rund 28 TWh (Fh-ISI et al. 2016).

Entwicklung des Wärmepumpenbestands in Millionen *

Abbildung 24

Installierte Wärmepumpen [Mio.]



* Die gestrichelten Entwicklungspfade unterstellen, dass Heizungssysteme nicht vor Ende ihrer eigentlichen technischen Lebensdauer ersetzt werden. Diese beträgt bei fossilen Kesseln 25 Jahre. Hinweis: Das entsprechende hohe Niveau in den Klimaschutzszenarien (KSz 95) liegt bei rund 6 Mio. Wärmepumpen (2030), um bis 2050 dann rund 14 Mio. zu erreichen (Öko-Institut et al. 2015). Fh-IWES et al. (2015)

- teilweise dezentrale Heizstäbe in Kesseln oder Mini-BHKW,
- teilweise netzgebundene Großwärmepumpen,
- langfristig einheitlich *Power-to-Heat* (Elektrodenkessel) netzgebunden,
- teilweise *Power-to-Heat* in der Industrie,
- Industrie-Großwärmepumpen als Schlüsseltechnologie,
- im Fall der 95-Prozent-Szenarien neue elektrische Verfahren zum Ersatz fossiler Prozesswärme, die aber sehr uneinheitlich bewertet werden.

Für 2030 unterscheidet sich die Bedeutung der Stromanwendungen stark darin, wie frühzeitig potenzielle Windkraft- und Photovoltaik-Abregelung relevant wird.

4.7 Zusammenfassung

Eine Verringerung der deutschen Treibhausgas-Emissionen um insgesamt 80 bis 95 Prozent gegenüber 1990 bis zum Jahr 2050 stellt auch erhebliche Anforderungen an den Gebäudewärmesektor. Die drei grundsätzlichen Optionen zur Dekarbonisierung lauten Gebäudeeffizienz, objektnahe Erneuerbare Energien und dekarbonisierte Wärmenetze. Aktuell diskutierte Potenziale beinhalten u. a. eine Senkung des Wärme-Endenergieverbrauchs um 40 bis 60 Prozent gegenüber 2008 und eine weit reichende Rolle von Wärmepumpen im Bereich der objektnahen erneuerbaren Wärme, welche die der dezentralen Solarthermie und Biomasse bei weitem übersteigt. Der mögliche Beitrag der Wärmenetze und die mögliche Rolle großer Solarthermie- und Tiefengeothermieanlagen wurde bislang weniger detailliert untersucht.

Der hier durchgeführte Szenarienvergleich zeigt, dass die Trendentwicklung bei Gebäude-Wärmeeffizienz

Szenarienvergleich: Stromverbrauch durch Wärmeanwendungen in Terawattstunden pro Jahr Abbildung 25



* Das Klimaziel minus 80 Prozent umfasst auch Szenarien mit 83 Prozent und 85 Prozent Treibhausgasminderung.
 ERP: Prognos et al. (2014); ISE: Fh-ISE (2015); ISWV: Fh-IWES et al (2015); KSz: Öko-Institut et al. (2015); UBA PB: UBA/BMUB (2015)

und Wärmenetzen unzureichend ist – ganz besonders dann, wenn auf eine Treibhausgasreduzierung um 95 Prozent gegenüber 2008 abgezielt werden soll. Der Schlüssel für das Erreichen klimapolitischer Zielpfade liegt dabei in der Sanierung von Bestandsgebäuden.

Bis 2030 benötigt Deutschland fünf bis sechs Millionen Wärmepumpen, um eine Treibhausgasreduzierung um 55 Prozent im Jahr 2030 und mindestens 80 Prozent im Jahr 2050 erreichen zu können. In allen Ziels-

zenarien zeigt sich die dezentrale Wärmepumpe zur Gebäudeversorgung als eine Schlüsseltechnologie mit hoher bis sehr hoher Marktdurchdringung. Im Vergleich dazu treten in den Trendszenarien die Hemmnisse des gegenwärtigen regulatorischen Rahmens zu Tage. Damit klafft im Jahr 2030 eine Lücke von etwa drei bis vier Millionen Wärmepumpen zwischen dem Niveau der Trendszenarien und dem benötigten Zielwert von fünf bis sechs Millionen Wärmepumpen. Angesichts der bestehenden Trägheiten und Restriktionen für Veränderungen des Heizungsbe-

stands kann man nicht zu einem beliebigen Zeitpunkt von einem Treibhausgasminderungs-Pfad von minus 80 Prozent auf minus 95 Prozent umschwenken. Wenn keine Heizungssysteme vor Ende ihrer eigentlichen technischen Lebensdauer ersetzt – und damit entwertet – werden sollen, ist ein ambitioniertes Mindestniveau an Wärmepumpen für 2030 notwendig. Ein Mindestniveau 2030, welches dem Pfad in Richtung minus 95 Prozent Treibhausgasemissionen für 2050 offen hält, liegt bei etwa sechs bis acht Millionen Wärmepumpen.

5 Sensitivitätsrechnungen zum Energiesystem 2030

In diesem Kapitel wird analysiert, inwieweit das Mindestziel einer Reduktion der Treibhausgase um 55 Prozent bis 2030 erreicht werden kann, wenn Defizite bei einzelnen Schlüsseltechnologien durch Maßnahmen in anderen Bereichen kompensiert werden müssen. Konkret untersucht werden Defizite bei der Gebäudedämmung, bei der Elektromobilität und bei der Flexibilität der Stromnachfrage. Für die weiteren Betrachtungen ist es zunächst wichtig, das deutsche 55-Prozent-Minderungsziel im europäischen Kontext zu verstehen.

5.1 Klimaziele für 2030 in Deutschland und Europa

Für das Jahr 2030 gibt es zwei relevante Klimaziele: Zum einen das von der Bundesregierung im Energiekonzept 2010 beschlossene Ziel der Treibhausgasemissionsminderung um 55 Prozent, und zum anderen das EU-Ziel einer Reduktion der europäischen Emissionen um 40 Prozent, jeweils gegenüber dem Referenzjahr 1990.

Die Aufteilung des EU-Ziels auf die Mitgliedstaaten erfolgt dabei über zwei Mechanismen: 1. Über den europäischen Emissionshandel (ETS), der im wesentlichen Emissionen aus großen Anlagen und dem innereuropäischen Luftverkehr umfasst, und 2. über den europäischen Lastenausgleich für die restlichen Emissionen des Nicht-ETS-Bereichs (dezentrale Wärme, Verkehr, Landwirtschaft ...), bei der politische Ziele für Einzelländer festgelegt wurden. Das ETS-Ziel beträgt minus 43 Prozent gegenüber 2005, die sich durch den Emissionshandel über Europa verteilen, das Nicht-ETS-Ziel minus 30 Prozent im europäischen Durchschnitt, was sich für Deutschland in ein Nicht-ETS-Reduktionsziel von minus 38 Prozent übersetzt. Für einige europäische Länder gibt es die Möglichkeit, Emissionsreduktionen vom ETS- in den Nicht-ETS-Bereich in geringem Umfang zu verschieben und dafür ETS-Zertifikate stillzulegen. Für Deutschland besteht diese Möglichkeit jedoch nicht. Auch können Emissionsreduktionen durch Landnutzungsänderungen in geringem Umfang (DE: 0,5 Prozent) auf das Nicht-ETS-Emissionsziel angerechnet werden.⁷⁶

⁷⁶ für Details siehe COM (2016)

Definition der Klimaziele 2030 (Mindestziele)

Tabelle 3

	Emissionsbereich	Emissions-Bezugswert und -jahr	Emissionsziel für 2030 ggü. Bezugswert		Gesamtemissionsziel für 2030
Nationales Ziel für Deutschland	Gesamtemissionen	1.251,6 Mio. t (1990)	-55 Prozent	563,2 Mio. t*	563,2 Mio. t*
EU-Ziel für Deutschland	ETS	515,3 Mio. t (2005)	-43 Prozent	294 - 336 Mio. t**	586–628 Mio. t
	Nicht-ETS***	471,6 Mio. t (2005)	-38 Prozent	292 Mio. t	

* Emissionen nach Kyoto – ohne LULUCF und internationalen Verkehr

** Emissionen gemäß Projektionsbericht (UBA 2015). Die Bandbreite der nationalen Verteilung der EU-Emissionen ergibt sich aus der Unsicherheit in der Entwicklung des Stromexportsaldos.

*** dezentrale Wärme, Verkehr, Landwirtschaft, Teile der nichtenergetischen Industrieprozesse

Bei anhaltenden Nettostromexporten im Jahr 2030 (maßgeblich für den Anteil Deutschlands am ETS-Gesamtbudget) wirkt gemäß den Emissionsdaten des Projektionsberichtes⁷⁷ ein nationales Minus-55 Prozent-Ziel restriktiver als ein übergeordnetes EU-ETS-Ziel für Deutschland. Innerhalb des Gesamtziels von minus 55 Prozent THG ist zusätzlich das Nicht-ETS-Ziel mit entscheidend, da die CO₂-Vermeidungskosten im Nicht-ETS-Bereich höher sind als im ETS-Bereich.

Für im Folgenden beschriebene Sensitivitätsrechnungen werden das 55-Prozent-Reduktionsziel (Basisjahr 1990) für alle Emissionen in Deutschland sowie das 38-Prozent-Reduktionsziel (Basisjahr 2005) für den deutschen Nicht-ETS-Bereich zugrunde gelegt. Dabei ist anzumerken, dass eine Reduktion um 55 Prozent ein unteres, schwächeres Klimaziel repräsentiert.⁷⁸

5.2 Einführung und Übersicht der Sensitivitäten

Ziel der Sensitivitätsbetrachtungen ist es, die Wechselwirkungen im Gesamtsystem auf die Mindestdurchdringung der Schlüsseltechnologien zu bewerten. Hierzu wird untersucht, wie bei angenommenen Defiziten in den Bereichen Gebäudedämmung, Elektromobilität und Flexibilität das Klimaziel 2030 durch Ausgleichsmaßnahmen immer noch erreicht werden kann. Diese Kompensation bezieht sich ausschließlich auf ein unteres, schwaches Klimaziel 2030. Für ein langfristiges schärferes Klimaziel von minus 95 Prozent müssten alle potenziellen Maßnahmen – inklusive der hier beschriebenen Kompensationsmaßnahmen – erfolgreich umgesetzt werden. Weiterge-

hende Kompensationsmaßnahmen wären in diesem Verständnis nicht mehr möglich.

Modell

Die Sensitivitätsrechnungen stützen sich auf ein Optimierungsmodell zur sektorübergreifenden Ausbauplanung.⁷⁹ Dieses Modell optimiert bezüglich Anlageinvestitionen und -einsatz sowohl den Strom- als auch den Wärmemarkt – unterteilt in zwölf Gebäudetypen und drei Industrieprozesswärmebereiche – unter den vorgegebenen Randbedingungen verschiedener Verkehrsszenarien, der Entwicklung der nichtenergetischen Emissionen und der Effizienzentwicklung in den einzelnen Bereichen. Ziel der Optimierung ist die Minimierung der Gesamtsystemkosten. Nebenbedingungen sind die Einhaltung der Klimaziele, die Gewährleistung der Lastdeckung in den einzelnen Verbrauchergruppen und die Berücksichtigung von Bestandsanlagen⁸⁰ und -kraftwerken. Vom aktuellen regulatorischen Rahmen wird abstrahiert. Im Modell werden alle Rückkopplungen des Gesamtsystems geschlossen berücksichtigt⁸¹ und endogen in einer linearen Programmierung optimiert. Dabei wird ein komplettes Wetterjahr (hier: 2006 als repräsentatives Jahr) in stündlicher Auflösung durchgerechnet, um der Nutzung von fluktuierenden Erneuerbaren Energien in allen Energiesektoren Rechnung zu tragen. Im Bereich der Wärmepumpen wird die Abhängigkeit der Effizienz von der Außentemperatur dynamisch über technologie- und gebäudespe-

79 Eine einführende Übersicht zum Modell findet sich in Fh-IWES (2016).

80 Dabei wird der bestehende und aktuell geplante Kraftwerkspark zunächst fortgeschrieben und um die Kraftwerke reduziert, die bis 2030 das Ende ihrer Lebensdauer erreichen. Dann werden der Einsatz der übrigen Bestandskraftwerke sowie der Zubau und Einsatz neuer Kraftwerke aus der Optimierung bestimmt. Im Ergebnis kann dabei ein altes Kraftwerk durch beliebige neue Erzeugungskapazität ersetzt werden, je nachdem, was die kostengünstigsten Optionen sind.

81 Exogen vorgegeben sind dabei die Verbrauchsentwicklungen und Verkehrsszenarien beziehungsweise sind diese Teil von Sensitivitätsrechnungen.

77 UBA (2015)

78 Dies zeigt sich darin, dass Szenarien, welche bis 2050 das schärfere Klimaziel von minus 95 Prozent erreichen, mittelfristig das Emissionsziel von minus 55 Prozent Treibhausgasemissionen gegenüber 1990 deutlich unterschreiten. Siehe dazu Kapitel 4.1

zifische COP-Kennlinien abgebildet. Damit können die Auswirkungen des Wärmepumpeneinsatzes auf die Spitzenlast im Strombereich erfasst werden.⁸² Im Pkw-Bereich werden die mit der Nutzung von Elektroautos zusammenhängenden Restriktionen anhand von Fahrprofilen und Batteriefüllständen im Modell abgebildet. Dabei unterscheidet sich der hier für 2030 angesetzte Szenariorahmen teilweise vom bestehenden Szenario ISWV 83⁸³ für 2030. Der europäische Rahmen wurde vorgelagert mittels eines festen Szenariorahmens für das Wetterjahr 2006 simuliert.⁸⁴

82 Für den Zubau dezentraler Heizungs- und KWK-Systeme konnte das Optimierungsmodell aus verschiedenen Optionen auswählen (siehe dazu Anhang 7.2 sowie den Tabellenanhang zu dieser Studie).

83 Fh-IWES et al. (2015)

84 Dieser basiert auf der Studie *The European Power System in 2030: Flexibility Challenges and Integration Benefits* (Fh-IWES 2015b).

Basisszenario und Sensitivitäten

Das hier angesetzte Basisszenario für 2030 beinhaltet unter anderem den von Agora Energiewende vorgestellten Kohlekonsenspfad⁸⁵ mit einer Reduktion der Kohlekraftwerksleistung (*Basis Kohlekonsens/KK*). Ergänzend wird ein alternatives Basisszenario mit Kohlekonsenspfad und Brennstoffwechsel zu Gas untersucht (*Basis KK+Gas*). Dem Basisszenario *Basis KK* werden als Sensitivitäten drei Defizitvarianten gegenübergestellt: mit weniger Gebäudedämmung (*Dämm(-)*), weniger Elektromobilität (*EMob(-)*) und weniger Flexibilität der Stromnachfrage (*Flex(-)*). Tabelle 4 zeigt die beiden Basisszenarien und die Defizitvarianten im Überblick.

Basisszenario

Für die Konstruktion des Basisszenarios ergibt sich zunächst eine Grundsatzfrage für den Stromsektor zum angenommenen Kohleausstiegspfad. Hierbei bestehen zwei Fragen:

85 enervis energy advisors (2015)

Betrachtete Sensitivitäten für 2030

Tabelle 4

Basisszenarien	Defizitvarianten
Fokus ETS-Bereich; durch hohe Durchdringung von E-Mobilität und Oberleitungs-Hybrid-Lkws (durch diese Elektrifizierung → geringere Anforderungen an Gebäudewärmebereich, um Nicht-ETS-Ziel zu erreichen)	Gleiches Emissionsgesamtziel und Nicht-ETS-Subziel wie im Basisszenario, aber Defizite in einzelnen Sektoren, die kompensiert werden müssen.
Basis KK: Kohlekonsenspfad → die spezifischen Mehremissionen der heutigen <i>Merit Order</i> müssen im Modell durch einen höheren Erneuerbare-Energien-Ausbau kompensiert werden (und höhere Rückwirkungen der fluktuierenden Erneuerbare-Energien-Einspeisung auf Wärme- und Verkehrssektor)	Dämm(-): geringerer Dämmstandard + Kohlekonsenspfad → höhere Emissionen im Nicht-ETS-Bereich müssen kompensiert werden
	EMob(-): geringerer Anteil von Elektromobilität (kein Oberleitungs-Hybrid-Lkw) + Kohlekonsenspfad → höhere Emissionen im Nicht-ETS-Bereich, die im Gebäudewärmebereich kompensiert werden müssen
	Flex(-): keine dezentrale Flexibilität bei Wärmepumpen und Elektromobilität + Kohlekonsenspfad → Fokus ETS-Bereich und Stromnachfrage zur Höchstlast
Basis KK + Gas: Kohlekonsenspfad + Brennstoffwechsel von Kohle auf Gas (alle Vollkosten werden im CO ₂ -Preis abgebildet) → die geringeren spezifischen Emission des Stromsektors führen zu einem geringen Erneuerbare-Energien-Ausbaubedarf	

Eigene Darstellung

- Kommt es zur frühzeitigen Stilllegung von älteren ineffizienteren Kohlekraftwerken? und
- Gibt es einen Brennstoffwechsel von Kohle auf Gas in der Grundlastherzeugung?

So bestünde bei den derzeitigen niedrigen Brennstoffpreisen schon bei moderaten CO₂-Zertifikatskosten sehr schnell ein Brennstoffwechsel von Kohle zu Gas in der grenzkostenbasierten *Merit Order* des Strommarktes. Aber andererseits weist die energie-wirtschaftliche Praxis heute einen sehr niedrigen Börsenpreis für Strom auf, mit dem keine direkte Investitionsrefinanzierung möglich ist. Stattdessen werden die Kosten von separaten Fördermechanismen zur CO₂-Einsparung über EEG-Umlage und KWK-Umlage außerhalb des Wettbewerbs zwischen den verschiedenen Dekarbonisierungsoptionen gewälzt. Theoretisch wäre, wenn der Zertifikatspreis die CO₂-Vermeidungskosten widerspiegeln würde (abstrakter Modellansatz), ein Brennstoffwechsel billiger als ein zusätzlicher Erneuerbare-Energien-Ausbau. In der heutigen Realität bleiben die CO₂-Zertifikatspreise aber so niedrig, dass Kohle vor Gas eingesetzt wird. Entsprechend werden in den folgenden Analysen zwei Varianten betrachtet: eine ohne Brennstoffwechsel und eine mit. Die gemeinsame Basis für beide Varianten ist aber der Kohlekonsenspfad mit einer Reduktion der Kohlekraftwerksleistung, da sich angesichts der hohen CO₂-Vermeidungskosten zum Erreichen der 2030er-Klimaziele ein Weiterbetrieb von ineffizienten Kohlekraftwerken in den Modellläufen als unwirtschaftlich erweist.

Dementsprechend wird hier für das Basisszenario eine zusätzliche Variante mit Brennstoffwechsel in Richtung Gas gerechnet (*Basis Kohlekonsens + Gas*). Aufgrund der Orientierung an der gegenwärtigen Praxis bleibt aber die bestehende *Merit Order* in allen weiteren Sensitivitäten die relevante Vergleichsbasis (*Basis Kohlekonsens*).

Basis KK: Das Basisszenario stellt ein sehr ambitioniertes Szenario hinsichtlich Effizienz und Dekarbonisierung dar. Es weist eine hohe Gebäudedämmung

auf (bei einer Steigerung der Sanierungsrate auf zwei Prozent und hoher Sanierungstiefe) als auch eine hohe Durchdringung mit Elektromobilität (sieben Millionen Elektroautos) und eine frühzeitige Einführung des Oberleitungs-Hybrid-Lkw (OH-Lkw). Auch für den herkömmliche Stromverbrauch und die industrielle Prozesswärme werden (einheitlich in allen Sensitivitäten) hohe Einsparungen unterstellt. Im Strommarkt wird weiterhin die bestehende *Merit Order* der Kraftwerke unterstellt.

Für die bestehenden Biogasanlagen wird ein hoher Grad der Flexibilisierung von 75 Prozent der Biogasanlagen mit doppelter BHKW-Leistung und einem Gasspeicher von zwölf Stunden (bezogen auf die mittlere Gasproduktion) unterstellt.⁸⁶ Des Weiteren wird angenommen, dass bis zum Jahr 2030 keine thermischen *Must-run*-Kraftwerke und damit keine Mindesterzeugungsleistungen mehr bestehen. Es wird unterstellt, dass alle Wärmepumpen flexibel mit einem Wärmespeicher inklusive Gebäudemasse von sechs Stunden im Bestandsgebäudebereich und neun Stunden im Neubaubereich⁸⁷ betrieben werden. Bivalente Wärmepumpen werden entsprechend der Anreize des Strommarktes dynamisch eingesetzt⁸⁸. Im Bereich der E-Mobilität nehmen 60 Prozent der Fahrzeuge am Lastmanagement teil. Oberleitungs-Hybrid-Lkws sind in der Lage, zum Zeitpunkt der Jahreshöchstlast auf einen Stromverbrauch zu verzichten und KWK-Systeme sind über Wärmespeicher, Heizkessel und *Power-to-Heat*-Anlagen flexibel abschaltbar und können sogar Strom aufnehmen. Damit stellt das Basisszenario ein sehr flexibles Zielszenario dar.

⁸⁶ gemäß den Annahmen in Fh-IWES (2015b)

⁸⁷ Dies entspricht beispielhaft im Einfamilienhaus einem 800 Liter Heizungsspeicher bei 15 Kelvin Temperaturspreizung und der Nutzung der Gebäudemasse bei 1 Kelvin.

⁸⁸ im Gegensatz zum derzeit etablierten statischen Einsatz der fossilen Kessel in Abhängigkeit von der Außentemperatur (Bivalenzpunkt)

Basis KK + Gas: Für diese Variante werden niedrige Brennstoffpreise angenommen, die zusammen mit steigenden CO₂-Zertifikatspreisen dazu führen, dass Gas als Kraftwerksbrennstoff billiger als Kohle wird.⁸⁹

In diesem Fall ändert sich der Kraftwerkseinsatz grundlegend: Gaskraftwerke werden so viel wie möglich eingesetzt, Kohlekraftwerke seltener oder sogar nur noch als Reserve. Da die Produktion einer Megawattstunde Strom aus Gas nur etwa halb so viel CO₂ produziert wie die einer Megawattstunde aus Kohle, sinkt der CO₂-Ausstoß im Stromsektor deutlich, was das Erreichen des Klimaziels für die Gesamtemissionen wesentlich vereinfacht. Große Teile der Sektoren Wärme und Verkehr unterliegen allerdings dem Nicht-ETS-Ziel, sodass sich dieser Effekt auf sie nicht voll entfaltet.

Defizitvariante Dämm(-) – geringere Gebäudedämmung

Hier wird eine geringere Sanierungstiefe im Gebäudereich angenommen⁹⁰, die 2030 zu einem Mehrverbrauch an Endenergie für Wärme durch private Haushalte sowie durch den Sektor Gewerbe, Handel, Dienstleistungen in Höhe von 50 Terawattstunden jährlich führt. Darüber hinaus sinken die Jahresarbeitszahlen der Wärmepumpen, da bei gleichen Heizflächen höhere Vorlauftemperaturen im Gebäude erreicht werden müssen. Die Wärmepumpen sind also aufgrund der geringeren Dämmung weniger effizient. Der insgesamt höhere Wärmebedarf führt direkt zu einem höheren Verbrauch an fossilen Brennstoffen zum Heizen. Indirekt wird dadurch das Erreichen des Nicht-ETS-Ziels erschwert, sodass größere Anstrengungen in anderen Bereichen notwendig werden. Durch die Gesamtemissionen und die Effizienz der

Wärmepumpen ist auch der Stromsektor betroffen. In dieser Sensitivität wird dabei aber die E-Mobilität auf gleich hohem Niveau wie im Basisszenario gehalten.

Defizitvariante EMob(-) – geringere E-Mobilität (kein Oberleitungs-Hybrid-Lkw)

In der zweiten Sensitivitätsbetrachtung wird untersucht, wie sich eine defizitäre Entwicklung der Elektromobilität auf den Wärmesektor auswirkt. Dazu wird – stellvertretend für eine geringere Marktdurchdringung der Elektromobilität – angenommen, dass es keine Oberleitungs-Lkws gibt (24,7 Terawattstunden weniger Stromverbrauch⁹¹). Ähnlich zum Szenario „Geringere Gebäudedämmung“ hat dies durch mehr Dieserverbrauch (48,7 Terawattstunden) direkt eine Verringerung des verbleibenden Nicht-ETS-Emissionsbudgets zur Folge. Der Wärmesektor, der zu großen Teilen auch in den Nicht-ETS-Bereich fällt, muss dementsprechend mehr Emissionen reduzieren. Durch die Begrenzung der Gesamtemissionen und den geringeren Stromverbrauch der E-Mobilität ist auch der Stromsektor betroffen.

Defizitvariante Flex(-) – keine Flexibilität der neuen dezentralen Sektorkopplungs-Stromverbraucher

In diesem Szenario wird untersucht, welchen Effekt unflexible dezentrale Verbraucher auf das Gesamtsystem haben. Wärmepumpen und Elektroautos werden dabei nicht mehr systemdienlich, sondern rein nachfragegesteuert betrieben (das heißt keine Flexibilität aus Wärme- und Batteriespeichern). Oberleitungs-Lkws bieten keinen Hybridbetrieb mehr an, bei dem zu Zeiten hoher elektrischer Last auf Diesetriebetrieb umgestellt wird. All diese Annahmen können potenziell die Spitzenlast stark erhöhen, weswegen auf sie besonderes Augenmerk bei der Auswertung gelegt wird.

⁸⁹ vgl. das „Low oil price“-Szenario der Internationalen Energieagentur im World Energy Outlook 2015 (IEA 2015).

⁹⁰ Bei gleicher Sanierungsrate von zwei Prozent eine geringere Sanierungstiefe, das heißt, es werden eher Maßnahmen umgesetzt, die einfacher sind als Fassadendämmung wie Fenster, Dach, Kellerdecke.

⁹¹ inklusive Batterie-elektrische Lkws und Plug-in-Hybrid-elektrische Lkws

Bewertung

Im Vergleich der Sensitivitäten werden die folgenden Aspekte betrachtet:

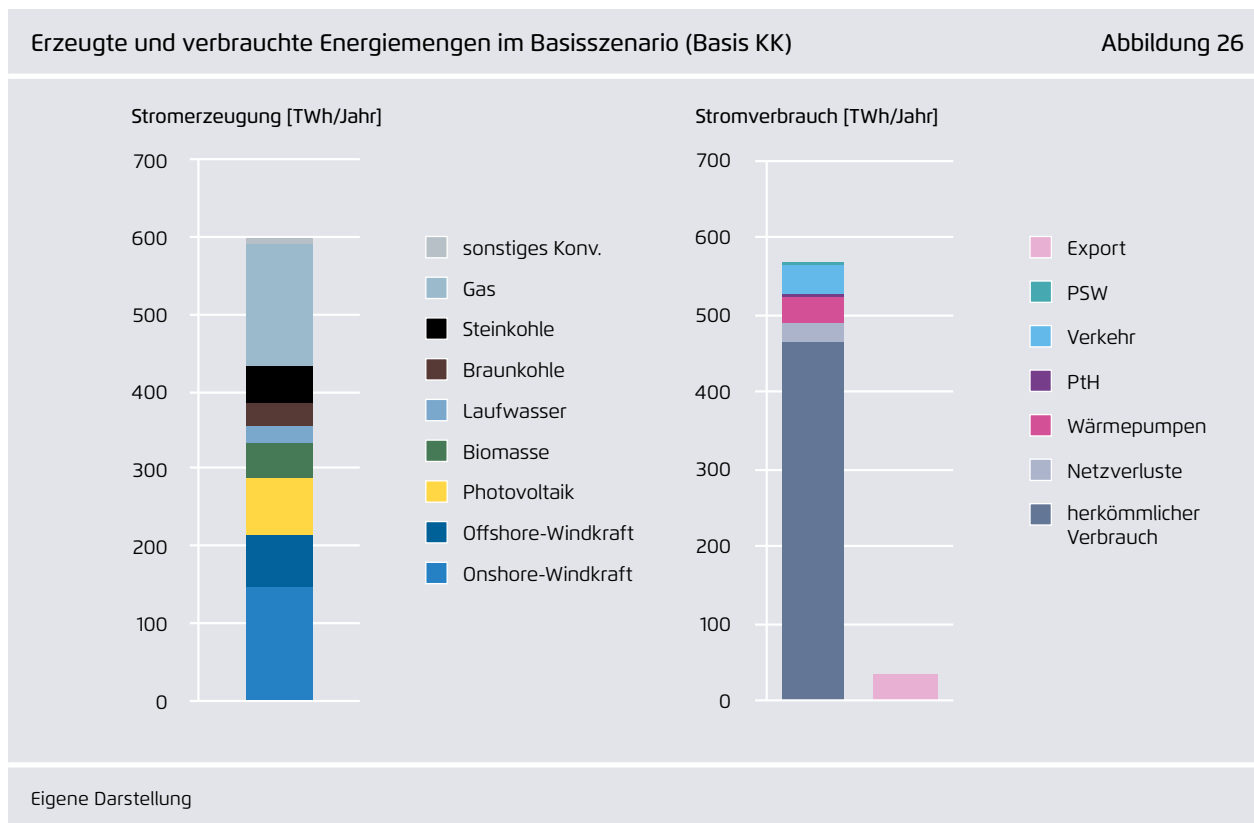
- neue Stromverbraucher und Stromerzeugung
- Erneuerbare-Energien-Anteil am Stromverbrauch
- installierte thermische Stromerzeugungsleistungen – als Indikator für den Zeitpunkt der Jahreshöchstlast (Stunde höchster thermischer Erzeugung)
- Erneuerbare-Energien-Leistungen und Anteile von Windkraft und Photovoltaik
- abgerufene Verbrauchsleistungen
- Anteil der Wärmepumpen am Wärmemarkt
- Anteil der Fernwärme am Wärmemarkt

Eine Kombination von verschiedenen Defiziententwicklungen (wie zum Beispiel weniger Dämmung in Kombination mit weniger E-Mobilität) wurde nicht untersucht.

Die große Kraft-Wärme-Kopplung nimmt eine besondere Rolle ein, da sie zukünftig vollständig dem ETS-Handel unterliegt. Damit ist ein durch den KWK-Ausbau gedeckter Wärmeverbrauch nicht mehr dem Nicht-ETS-Ziel zuzurechnen und das Nicht-ETS-Ziel ist leichter erfüllbar.

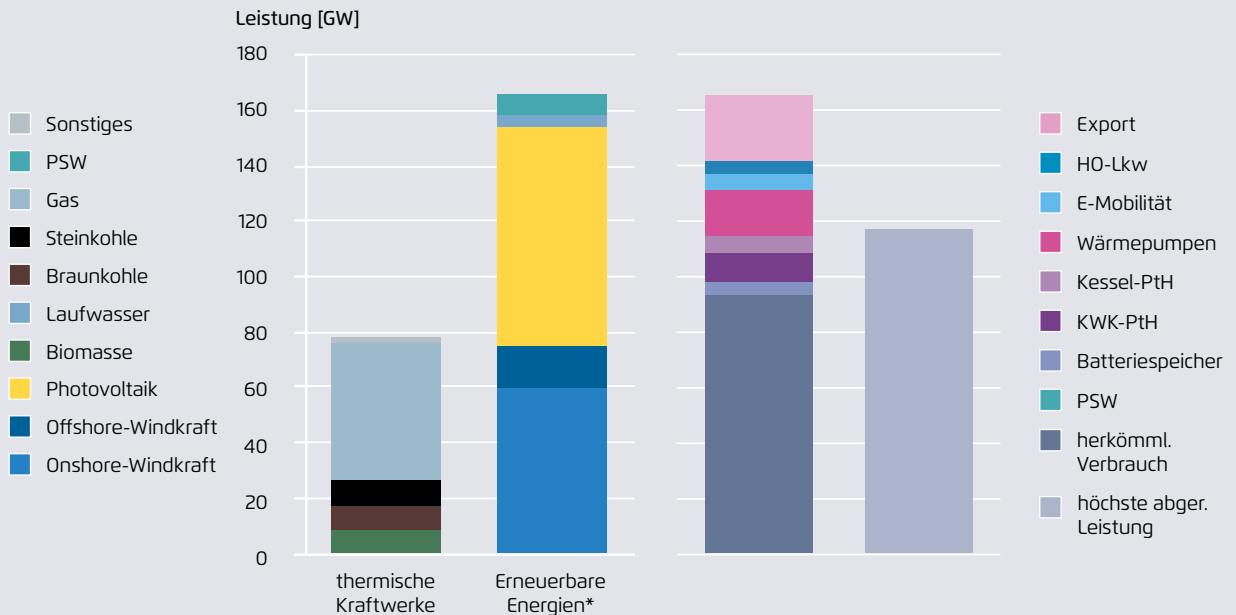
5.3 Basisszenario (Basis KK)

Im kostenminimalen Basisszenario erhöht sich der Nettostromverbrauch zuzüglich Netzverlusten auf 569 Terawattstunden (Abbildung 26). Als neue Verbraucher machen davon Elektromobilität 41 Terawattstunden und Wärmepumpen 36 Terawattstunden aus. *Power-to-Heat* benötigt dagegen nur 2 Terawattstunden, weist aber mit einer installierten Leistung von 16 Gigawatt eine hohe Flexibilität auf. Aufgrund des Nettostromexports von 32 Terawattstunden beträgt die Nettostromerzeugung 600 Terawattstunden. Der Erneuerbare-Energien-Anteil



Installierte Leistungen (links) und abgerufene Höchstlasten (rechts) im Basisszenario

Abbildung 27

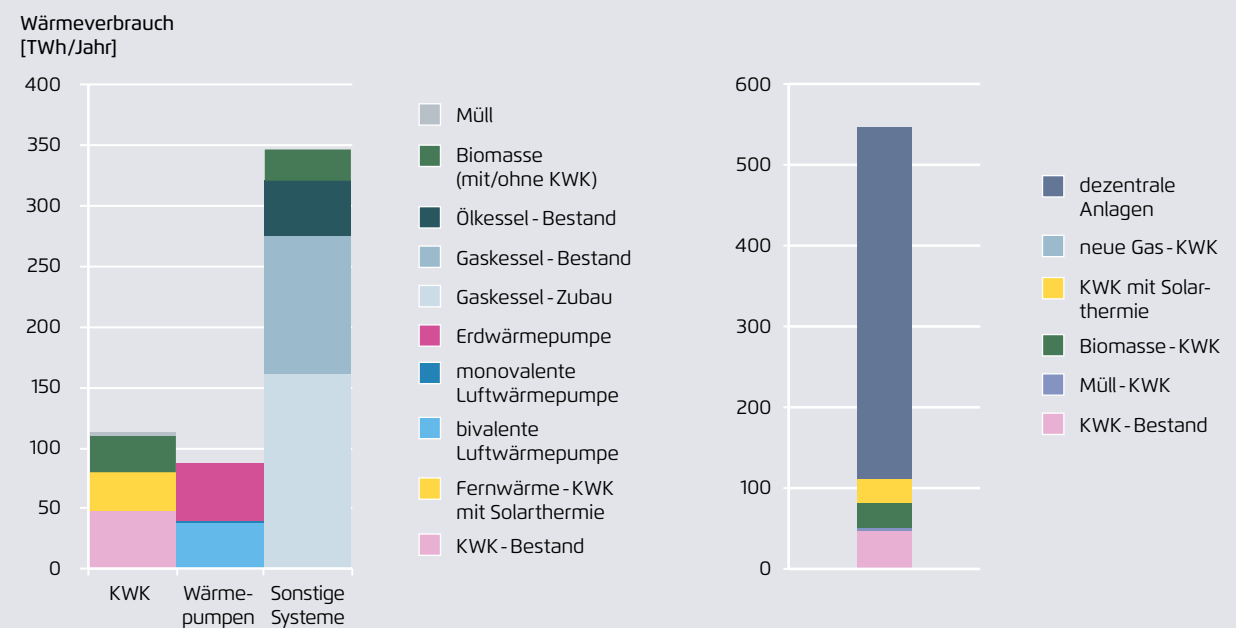


Eigene Darstellung

* ohne Biomassekraftwerke

Zusammensetzung der Wärmeerzeugung in Haushalten und GHD-Gebäuden (Gewerbe, Handel, Dienstleitungen) im Basisszenario (Basis KK)

Abbildung 28



Eigene Darstellung

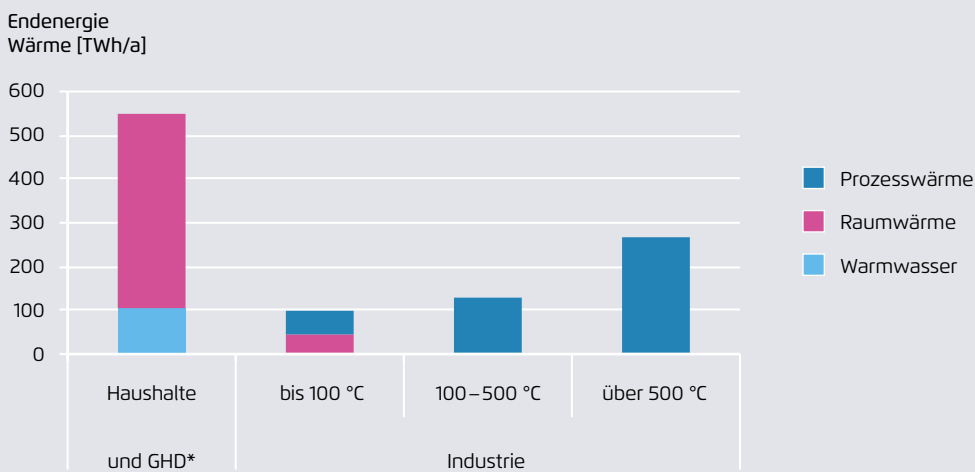
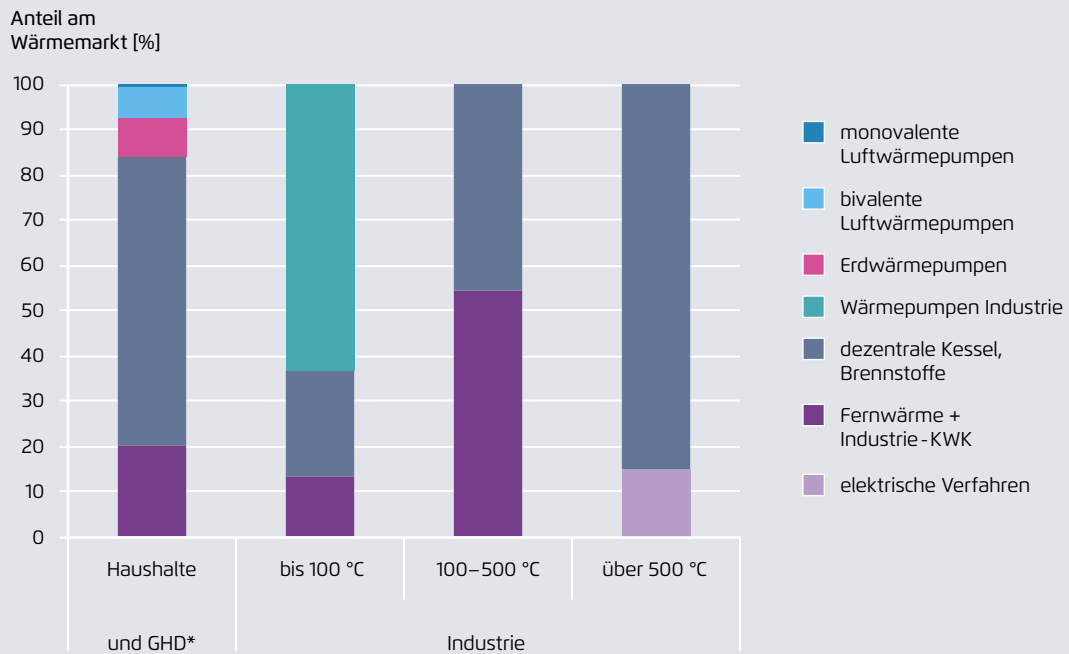
beträgt 61 Prozent am Bruttostromverbrauch⁹² im Jahr 2030. Im Vergleich dazu beträgt das Erneuerbare-Energien-Ziel für das Jahr 2035 nur 55 bis 60 Prozent am Bruttostromverbrauch.

92 beziehungsweise 59,4 Prozent an der Nettostromerzeugung

Die installierten Leistungen steigen im Basisszenario auf 60 Gigawatt Onshore-Windkraft, 15 Gigawatt Offshore-Windkraft (gemäß Ausbauplanung der Bundesregierung) und 79 Gigawatt Photovoltaik (Abbildung 27). Auch wenn das Verhältnis zwischen Windkraft und Photovoltaik weiterer Untersuchungen bedarf, ist dieses Ergebnis ein Indikator

Anteile am Wärmemarkt und Endenergieverbrauch Wärme im Basisszenario (Basis KK)

Abbildung 29



Eigene Darstellung

* GHD: Gewerbe, Handel, Dienstleistungen

dafür, dass auch im Jahr 2030 hohe Anteile Photovoltaik kosteneffizient in das Stromversorgungssystem integrierbar erscheinen. Die für die Deckung der Stromnachfrage über ein Jahr notwendige installierte Leistung thermischer Kraftwerke inklusive Biomasse (ohne zusätzliche Bewertung der Versorgungssicherheit) beträgt knapp 78 Gigawatt. Zusätzliche Batteriespeicher werden nicht gebaut, da sie aus Gesamtsystemkostensicht nicht optimal sind. Die abgerufenen Höchstlasten betragen bei Wärmepumpen 17 Gigawatt und bei Elektromobilität 11 Gigawatt, darunter knapp 5 Gigawatt für Oberleitungs-Hybrid-Lkws.

Der Wärmemarkt im Gebäudebereich (das heißt Haushalte und Gewerbe) wird zu rund 15 Prozent von KWK-Systemen gedeckt (ohne Biomasse-KWK)⁹³. Neue KWK-Anlagen werden im Modell immer in Kombination mit Solarthermie ausgeprägt (Abbildung 28). Dezentrale Wärmepumpen haben einen Anteil von knapp 16 Prozent am Wärmemarkt. Hierbei dominieren im Modell Erdwärmepumpen mit 47 Terawattstunden und bivalente Luftwärmepumpen in Kombination mit Gaskesseln mit 38 Terawattstunden. Monovalente Luftwärmepumpen machen dagegen nur zwei Terawattstunden aus.

Im Niedertemperaturbereich der Industrie gibt es vor allem Wärmepumpen zur Hallenbeheizung und mittels Abwärmenutzung auch zur Prozesswärmebereitstellung (Abbildung 29). Zu geringen Anteilen werden auch KWK-Systeme in Kombination mit Solarthermie zugebaut. Im Temperaturbereich von 100 bis 500 Grad Celsius sind KWK-Systeme mit *Power-to-Heat* vorherrschend.

93 Inklusive Biomasse-KWK erhöht sich der Wert auf knapp 21 Prozent.

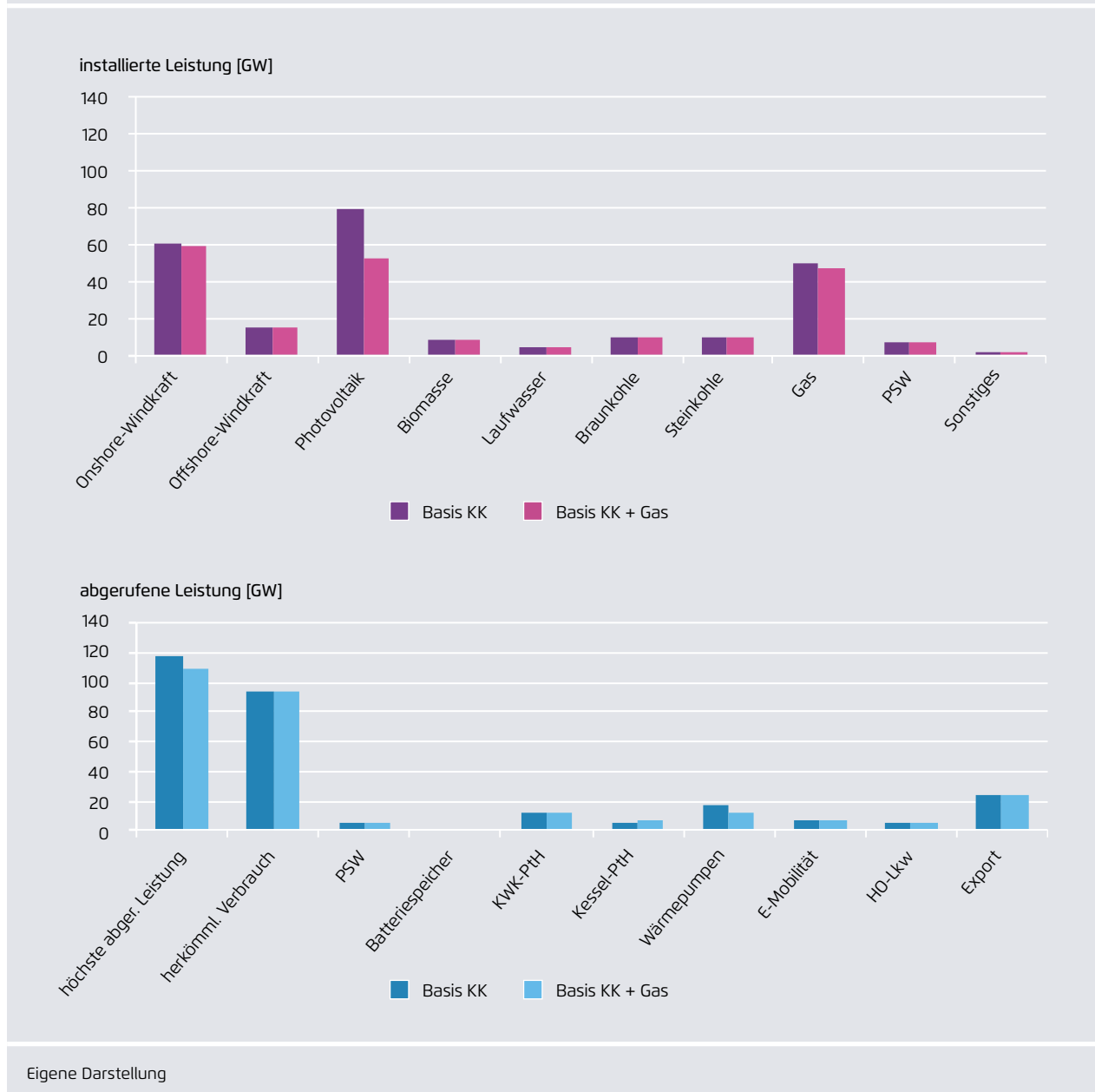
5.4 Basisszenario mit Berücksichtigung von Brennstoffwechsel (Basis KK + Gas)

Die installierten Leistungen unterscheiden sich zwischen den einzelnen Szenarien im Wesentlichen in den Kategorien Windkraft, Photovoltaik

und Gaskraftwerke (Abbildung 30). Im abgewandelten Basisszenario mit niedrigerem Gaspreis (Basis KWK + Gas) werden in der Konsequenz mehr effiziente Gaskraftwerke – vor allem die effizienten Gas- und-Dampf-Kondensations-Kraftwerke (plus 3,9 Gigawatt), aber auch KWK (plus 1,2 Gigawatt) – installiert und mit hohen Volllaststunden betrieben.

Installierte Erzeugungsleistungen (oben) und maximal abgerufene Verbrauchsleistungen (unten) für das Basisszenario mit und ohne Fuel-Switch

Abbildung 30



Da aber Kohlekraftwerke eher für die Spitzenlast eingesetzt werden, müssen nur noch wenige Gas-turbinen zugebaut werden (minus 7 Gigawatt). Die daraus resultierenden CO₂-Einsparungen (Gas verdrängt Kohle) wirken sich auf die installierten Windkraft- und Solarkapazitäten aus, die in diesem Fall nur in geringerem Umfang als im Basisszenario zur

CO₂-Vermeidung benötigt und deswegen geringer ausgebaut werden.

In Summe ist eine um 28 Terawattstunden geringere Erneuerbare-Energien-Stromerzeugung notwendig. Dies betrifft insbesondere die Photovoltaik (Abbildung 31). Die Kohlestromerzeugung wird um 32 Tera-

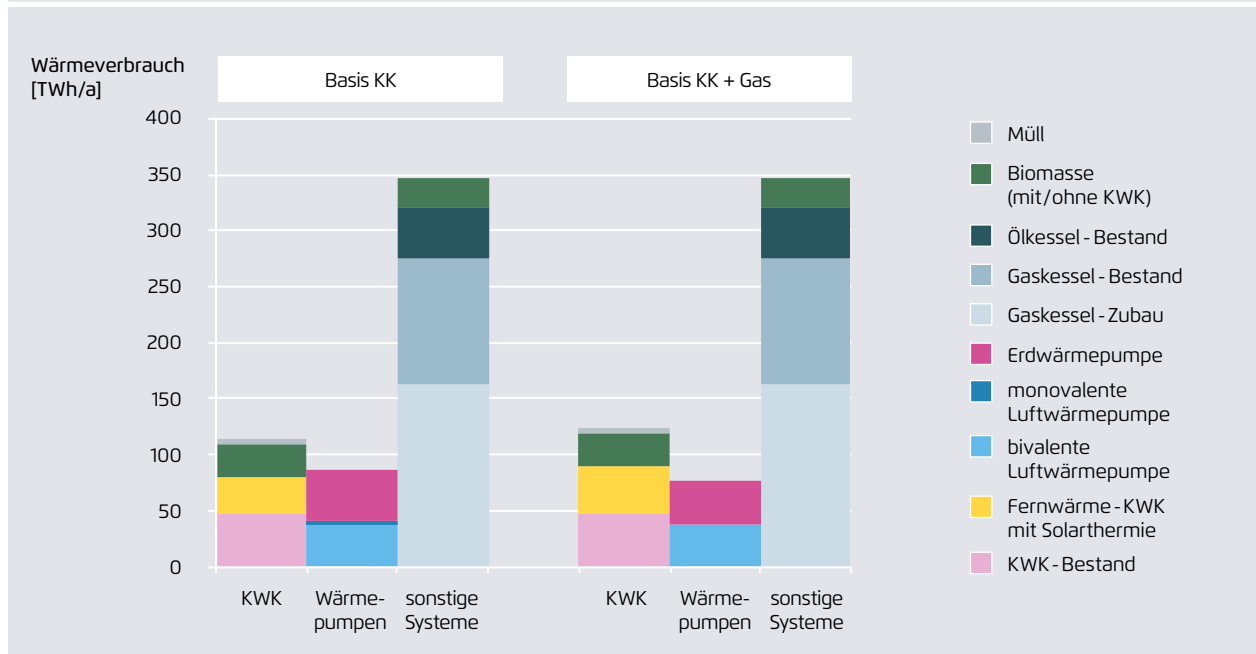
Erzeugte und verbrauchte Energiemengen im Basisszenario ohne und mit Brennstoffwechsel Abbildung 31



Eigene Darstellung

Zusammensetzung der Wärmeerzeugung in Haushalten und GHD-Gebäuden (Gewerbe, Handel, Dienstleistungen) im Basisszenario ohne und mit Brennstoffwechsel

Abbildung 32



Eigene Darstellung

wattstunden (minus 41 Prozent) stark reduziert, und die Stromerzeugung aus Gas um 47 Terawattstunden erhöht. Durch das in Summe leichter zu erfüllende CO₂-Ziel und die gesteigerte Stromerzeugung aus neuen KWK-Anlagen ist auch für den Nicht-ETS-Bereich das Ziel indirekt leichter zu erreichen. Dadurch sinkt der Anteil von Wärmepumpen am Stromverbrauch um 14 Terawattstunden ebenso wie der gesamte Stromverbrauch. Der Erneuerbare-Energien-Anteil sinkt auf 57,8 Prozent am Bruttostromverbrauch⁹⁴.

Die Verschiebungen in der Wärmeerzeugung sind zwischen den beiden Szenarien eher gering (Abbildung 32). Beim Vergleich zwischen den Varianten Basisszenario mit und ohne Brennstoffwechsel fällt eine leichte Verschiebung von Wärmepumpen (ohne Brennstoffwechsel) hin zu den – durch die niedri-

geren Gaspreise kostengünstigeren – Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen auf, insbesondere zu neu gebauten Fernwärmekraftwerken, die neben der Abwärme aus der Stromerzeugung auch Solarthermie nutzen. Bei den dezentralen Kesseln – die ohnehin größtenteils durch den Bestand vorgegeben sind – ändert sich dagegen fast nichts. Der Wärmemarkt im Gebäudebereich (Haushalte und Gewerbe) wird hier zu rund 17 Prozent von KWK-Systemen gedeckt (ohne Biomasse-KWK)⁹⁵.

94 beziehungsweise 55,9 Prozent an der Nettostromerzeugung

95 Inklusive Biomasse-KWK erhöht sich der Wert auf knapp 23 Prozent.

5.5 Defizitvariante mit geringerer Dämmung (Dämm(-))

Im Szenario mit geringerer Dämmung steigt der Gesamtenergieverbrauch gegenüber dem Basisszenario an, sodass zur Kompensation der Emissionen sowohl mehr Photovoltaik (plus rund 7 Gigawatt) als auch

mehr KWK-Kraftwerke (plus 6,8 Gigawatt) installiert werden (Abbildung 33). Dies resultiert wiederum in einer höheren abgerufenen Leistung – insbesondere im Fall von *Power-to-Heat* von plus 7,1 Gigawatt. Die Leistung von Wärmepumpen nimmt um 2,9 Gigawatt zu. Die installierte Leistung an thermischen Kraftwerken als Indikator für die Jahreshöchstlast beträgt

Installierte Erzeugungsleistungen (oben) und maximal abgerufene Verbrauchsleistungen (unten) für die Defizitvariante mit geringerer Dämmung im Vergleich zum Basisszenario

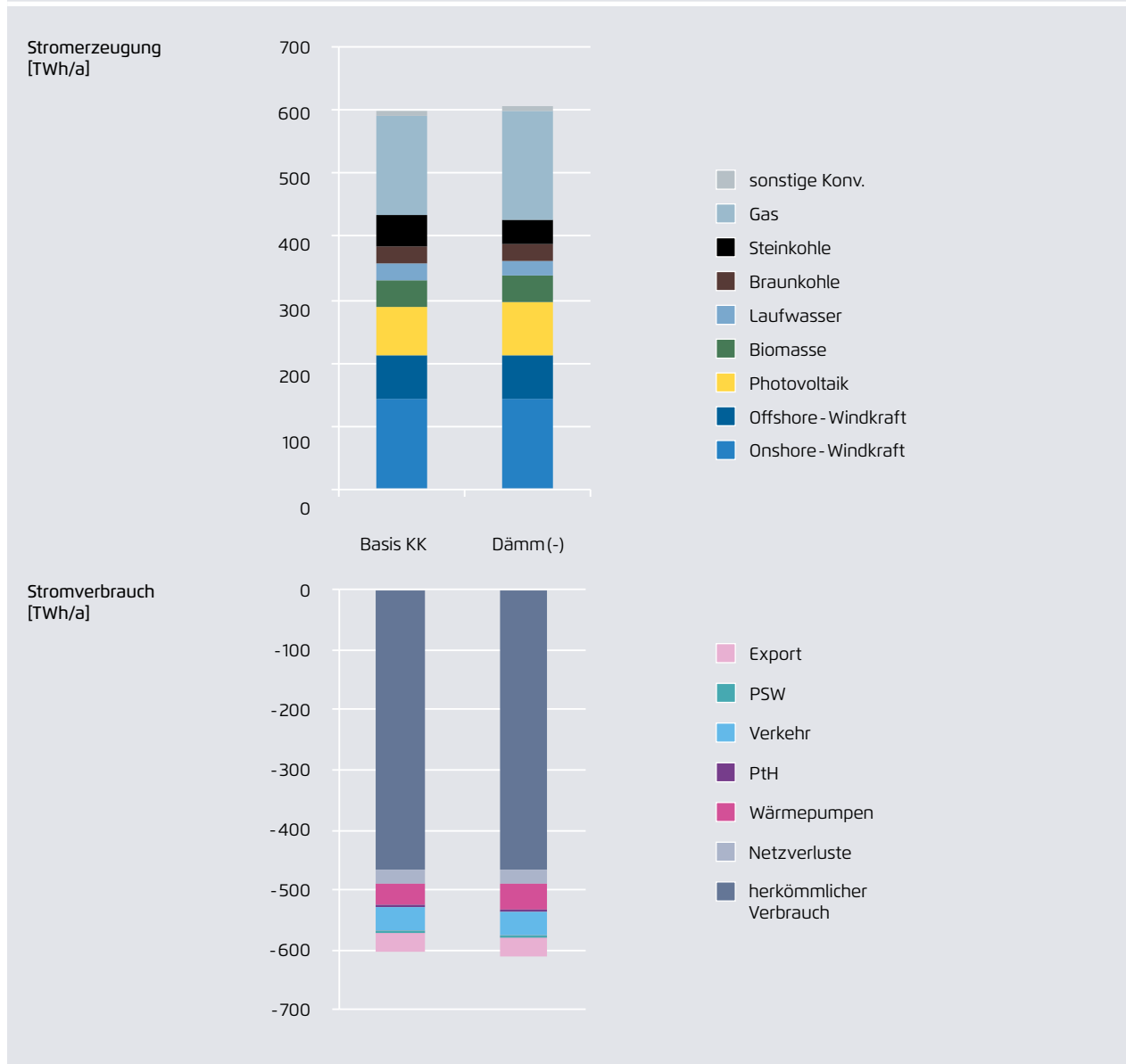
Abbildung 33



Eigene Darstellung

Erzeugte (oben) und verbrauchte (unten) Energiemengen in der Defizitvariante mit geringerer Dämmung im Vergleich zum Basisszenario

Abbildung 34



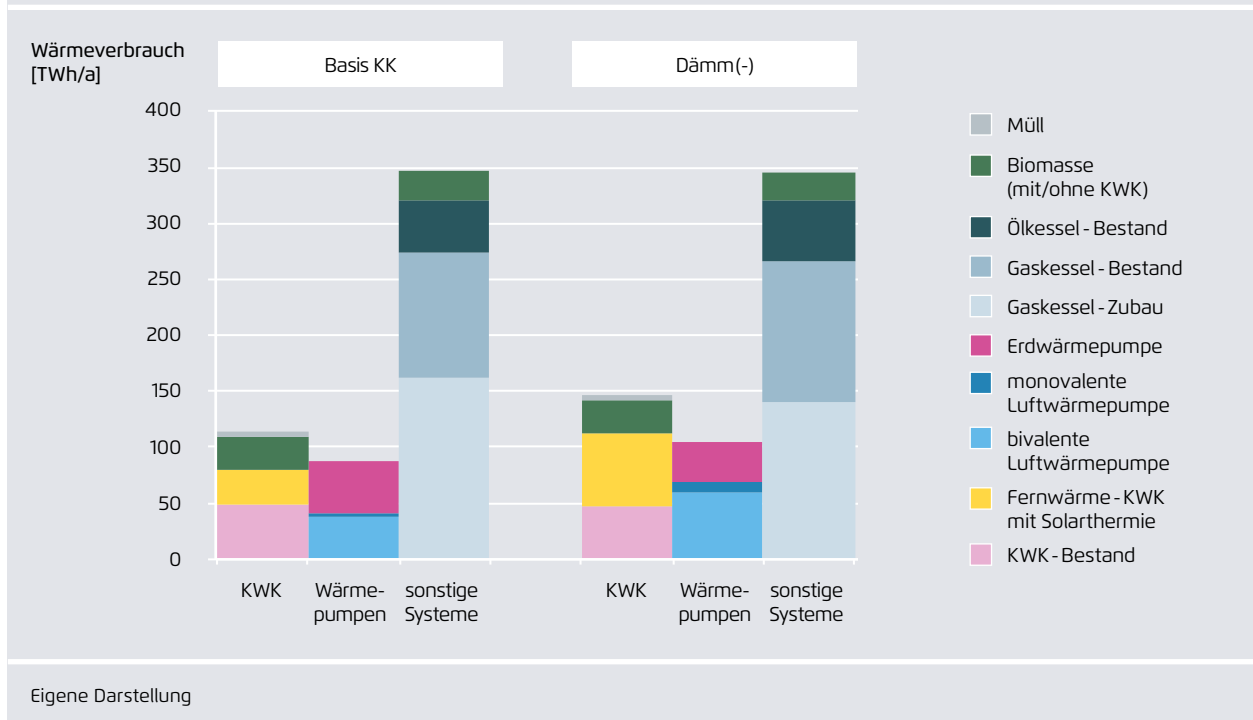
Eigene Darstellung

87,5 Gigawatt (plus 9,8 Gigawatt). Der Erneuerbare-Energien-Anteil steigt geringfügig auf 61,3 Prozent am Bruttostromverbrauch⁹⁶.

Die Stromerzeugung aus Photovoltaik und Gaskraftwerken steigt an, während die Stromerzeugung aus Kohlekraft zurückgeht (minus 16 Prozent). Der Stromverbrauch steigt um acht Terawattstunden bestehend aus plus sechs Terawattstunden für Wärmepumpen und plus zwei Terawattstunden für Power-to-Heat (Abbildung 34).

96 beziehungsweise 59,7 Prozent an der Nettostromerzeugung

Zusammensetzung der Wärmeerzeugung in Haushalten und GHD-Gebäuden (Gewerbe, Handel, Dienstleitungen) in der Defizitvariante mit geringerer Dämmung im Vergleich zum Basisszenario **Abbildung 35**



Die Dekarbonisierung der dezentralen Wärmeversorgung ist in diesem Szenario eine besondere Herausforderung: Bestandskessel, deren Emissionen gesetzt sind, schränken das verfügbare CO₂-Budget (insbesondere im Nicht-ETS-Bereich) ein, während eine höhere Wärmenachfrage durch Zubau zu decken ist. Durch diesen Druck werden zum einen verstärkt Fernwärmelösungen eingesetzt, die die Emissionen aus dem Nicht-ETS-Bereich der dezentralen Anlagen in den ETS-Bereich verschieben, zum anderen wird stärker über Wärmepumpen dekarbonisiert (Abbildung 35). Insbesondere wird dies durch bivalente Luftwärmepumpen (in Kombination mit Gasspitzenlastkesseln) erreicht. Im Ausgleich dazu sinkt die Anzahl der neu installierten Gaskessel. Der Wärmemarkt im Gebäudebereich (Haushalte und Gewerbe) wird hier zu knapp 20 Prozent von KWK-Systemen gedeckt (ohne Biomasse-KWK).⁹⁷

97 Inklusive Biomasse-KWK erhöht sich der Wert auf knapp 25 Prozent.

5.6 Defizitvariante mit weniger E-Mobilität (EMob(-))

Eine geringere Durchdringung der E-Mobilität senkt zunächst den Strombedarf in diesem Bereich, führt aber durch die zusätzlichen Emissionen nicht elektrifizierter Fahrzeuge indirekt zu einem höheren

CO₂-Vermeidungsdruck im Nicht-ETS-Bereich: Während die Stromerzeugung größtenteils im ETS-Sektor stattfindet und somit Elektromobilität unter dieses CO₂-Ziel fällt, gehören die Emissionen aus Verbrennungsmotoren zum Nicht-ETS-Sektor. Dort findet sich auch der größte Teil des privaten Wärmesektors, der dementsprechend mehr CO₂ einsparen muss, um

Installierte Erzeugungsleistungen (oben) und maximal abgerufene Verbrauchsleistungen (unten) für die Defizitvariante mit weniger E-Mobilität im Vergleich zum Basisszenario

Abbildung 36



das Nicht-ETS-Ziel zu erreichen. Das führt zur Installation von mehr und/oder effizienteren Wärmepumpen in diesem Bereich (Abbildung 36).

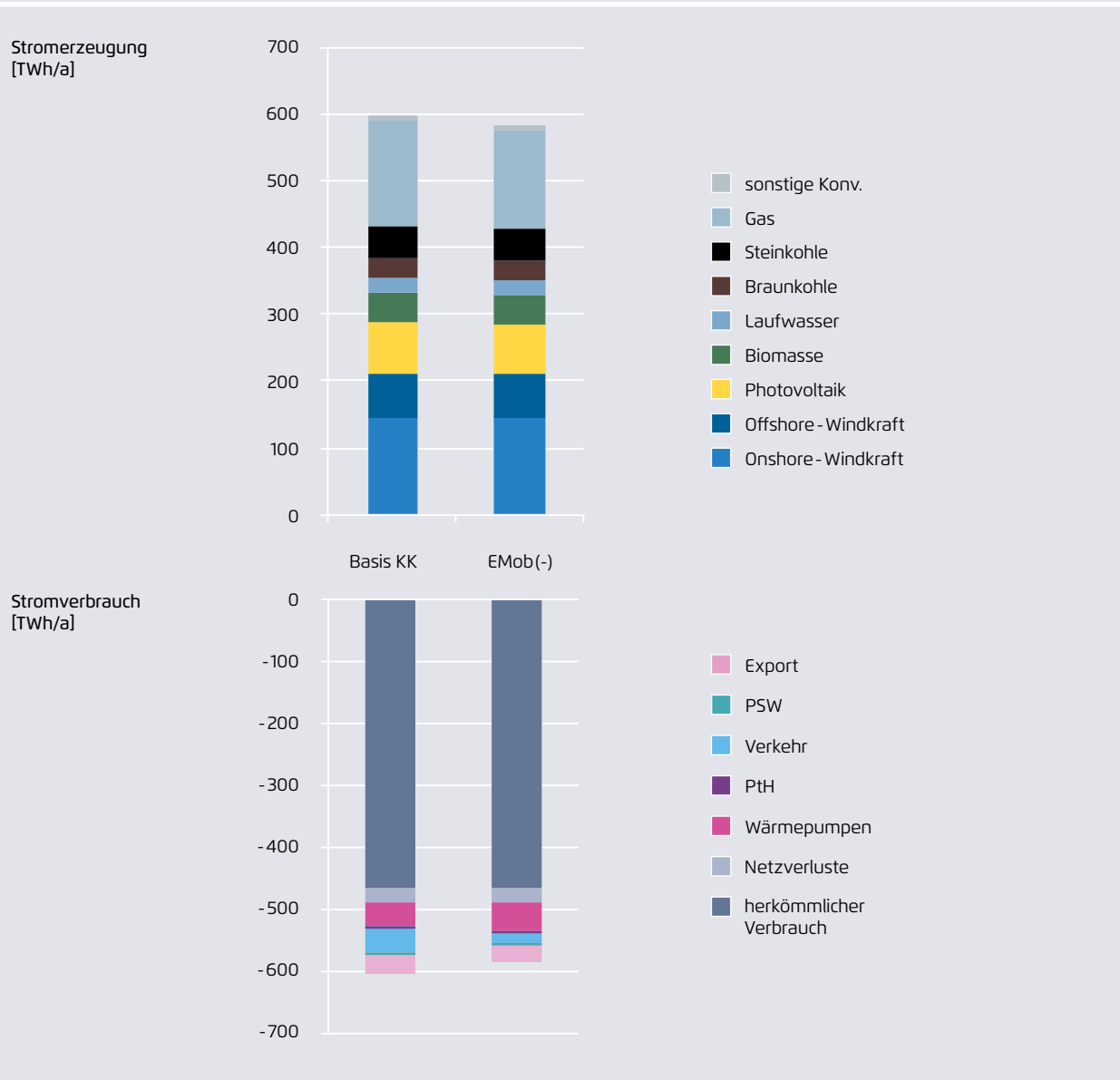
Da im Stromsektor der Stromverbrauch aus E-Mobilität um 24,7 Terawattstunden zurückgeht und durch Wärmepumpen (plus 8 Terawattstunden) unter an-

derem zumindest anteilig kompensiert wird, ändert sich wenig an der Stromerzeugung. Insbesondere die Erzeugung aus Gaskraftwerken ist rückläufig (Abbildung 36).

Die installierte Leistung an thermischen Kraftwerken als Indikator für die Jahreshöchstlast beträgt 85,2 Gi-

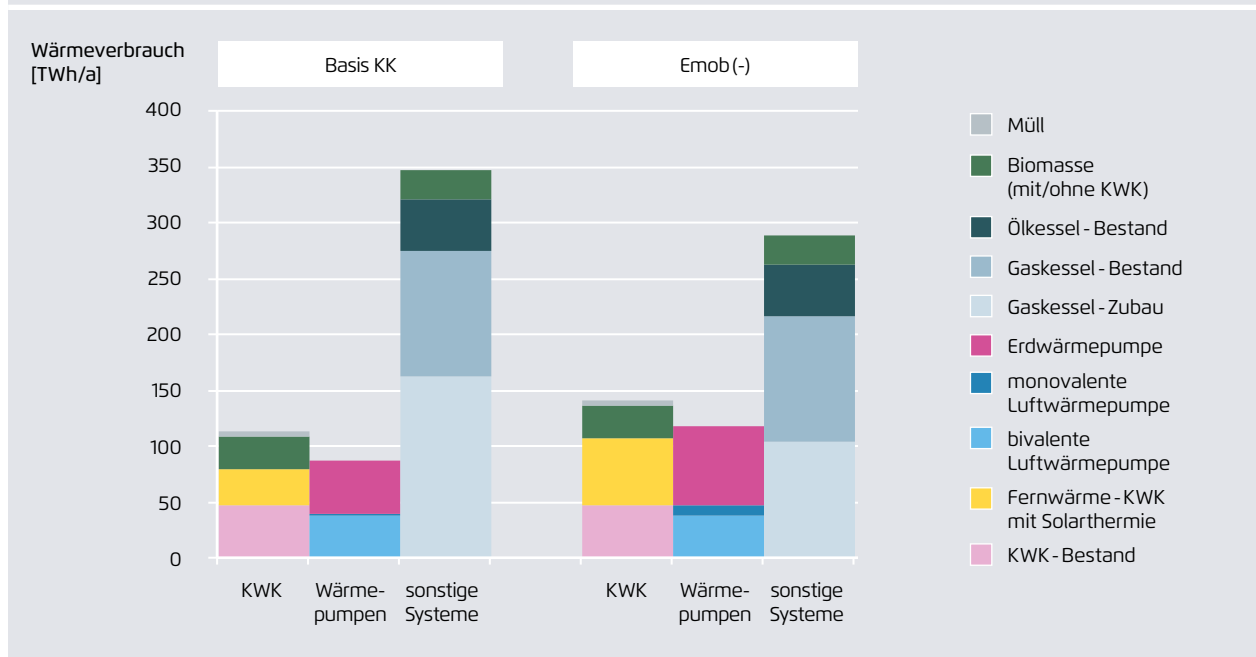
Erzeugte (oben) und verbrauchte (unten) Energiemengen in der Defizitvariante mit weniger E-Mobilität im Vergleich zum Basisszenario

Abbildung 37



Eigene Darstellung

Zusammensetzung der Wärmeerzeugung in Haushalten und GHD-Gebäuden (Gewerbe, Handel, Dienstleitungen) in der Defizitvariante mit weniger E-Mobilität im Vergleich zum Basisszenario Abbildung 38



Eigene Darstellung

gawatt (plus 9,8 Gigawatt). Der Erneuerbare-Ener-
gien-Anteil steigt geringfügig auf 62,2 Prozent am
Bruttostromverbrauch⁹⁸.

Unter den hier getroffenen Annahmen schränkt ein
geringerer Einsatz der E-Mobilität das CO₂-Bud-
get im Nicht-ETS-Bereich noch stärker ein als eine
geringere Sanierungstiefe. Im Ergebnis wird bei der
Wärmeversorgung von Gebäuden noch stärker de-
karbonisiert: Gaskessel werden deutlich weniger
zugebaut, dafür kommen mehr Fernwärme und mehr
und effizientere Wärmepumpen zum Einsatz (das
heißt, der Anteil der Erdwärmepumpen erhöht sich).
Der Wärmemarkt im Gebäudebereich (Haushalte und
Gewerbe) wird zu rund 20 Prozent von KWK-Syste-
men gedeckt (ohne Biomasse-KWK).⁹⁹

98 beziehungsweise 60,4 Prozent an der Nettostromerzeugung

99 Inklusive Biomasse-KWK erhöht sich der Wert auf knapp 26 Prozent.

5.7 Defizitvariante mit weniger dezentraler Flexibilität (Flex(-))

Eine wichtige Frage im Zuge der Elektrifizierung des Wärme- und Verkehrssektors ist, ob sich nicht durch die zusätzlichen Verbraucher die Spitzenlast deutlich erhöht. Gerade im Heizungsbereich ist es vorstellbar, dass eine Kaltfront ganz Deutschland relativ gleich-

zeitig erreicht, sodass Wärmepumpen gleichzeitig betrieben werden. Und auch bei der Elektromobilität, bei welcher der Lastgang stark vom Konsumentenverhalten abhängt, tritt in der Abendspitze ein höherer Gleichzeitigkeitsfaktor bei ungesteuertem Laden auf. In dieser Sensitivitätsbetrachtung wurde deshalb ein Szenario geringerer Flexibilität untersucht, bei dem Elektroautos nicht systemdienlich ge-

Installierte Erzeugungsleistungen (oben) und maximal abgerufene Verbrauchsleistungen (unten) für die Defizitvariante mit weniger dezentraler Flexibilität im Vergleich zum Basisszenario

Abbildung 39



Erzeugte (oben) und verbrauchte (unten) Energiemengen in der Defizitvariante mit weniger dezentraler Flexibilität im Vergleich zum Basisszenario

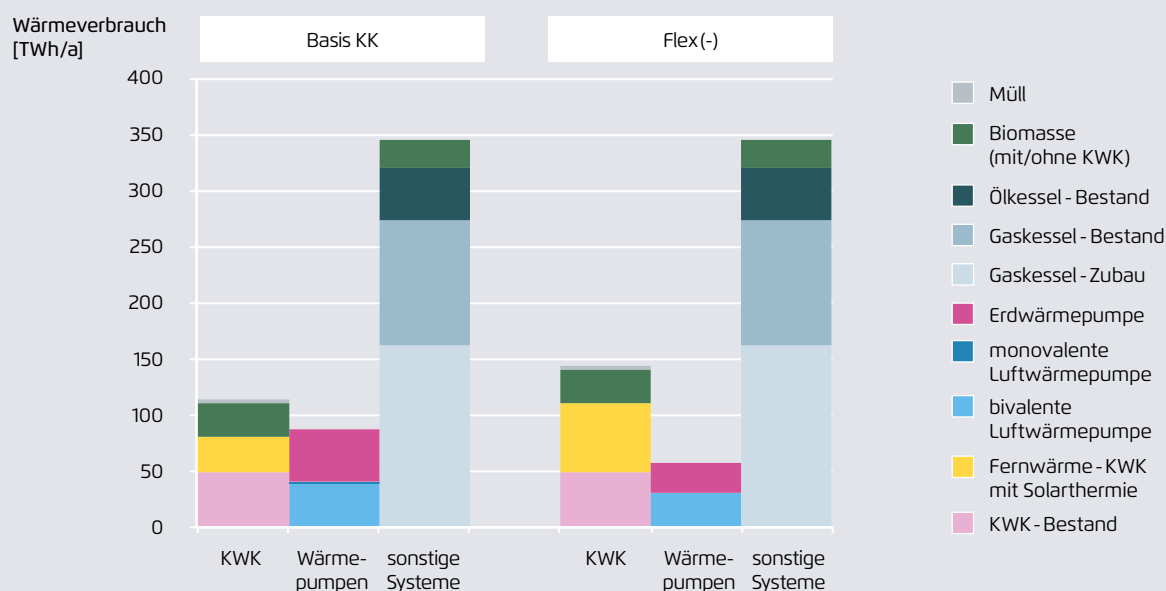
Abbildung 40



Eigene Darstellung

Zusammensetzung der Wärmeerzeugung in Haushalten und GHD-Gebäuden (Gewerbe, Handel, Dienstleitungen) in der Defizitvariante mit weniger dezentraler Flexibilität im Vergleich zum Basisszenario

Abbildung 41



Eigene Darstellung

laden werden (das heißt keine Flexibilität aus Batteriespeichern), Oberleitungs-Hybrid-Lkws nicht auf Hybridbetrieb umschalten und Wärmepumpen ohne Wärmespeicher installiert werden, sodass sie keine Flexibilität aufweisen.

Es ist zu beobachten, dass in diesem Szenario keine nennenswerte Erhöhung der Spitzenlast auftritt. Entscheidend ist aber auch, dass es ganzjährig an Flexibilität im System mangelt, um fluktuierende Erneuerbare Energien zu integrieren. Dies wird um den Preis erreicht, dass insgesamt weniger Wärmepumpen ausgebaut werden und die Dekarbonisierung im Nicht-ETS-Bereich verstärkt durch andere, teurere Maßnahmen erreicht wird (Abbildung 39). Aufgrund der geringeren Flexibilität nimmt die Photovoltaikerzeugung ab, während die Power-to-Heat-Leistungen deutlich zunehmen (plus 8 Gigawatt). Der Stromverbrauch nimmt um 16 Terawattstunden ab, während bei der Stromerzeugung der Anteil der Kohleverstromung sinkt und der Anteil der Gaskraftwerke steigt

(Abbildung 40). Auch der Speichereinsatz der bestehenden Pumpspeicher verdoppelt sich gegenüber dem Basisszenario.

Die installierte Leistung an thermischen Kraftwerken als Indikator für die Jahreshöchstlast beträgt 81,7 Gigawatt (plus 4,1 Gigawatt). Der Erneuerbare-Energien-Anteil steigt geringfügig auf 61,6 Prozent am Bruttostromverbrauch¹⁰⁰.

Bei der Wärmeversorgung fällt hier aus Gesamtsystemsicht auf, dass die nun unflexiblen Wärmepumpen deutlich weniger ausgebaut werden (Abbildung 41). Stattdessen verschieben Fernwärmelösungen die Emissionen aus dem Nicht-ETS- in den ETS-Bereich, wo sie durch einen verstärkten Einsatz von Gaskraftwerken leichter kompensiert werden können, was sich auch auf die erzeugten Energiemengen auswirkt. Dabei steigen die Gesamtkosten des Systems gegen-

¹⁰⁰ beziehungsweise 60,2 Prozent an der Nettostromerzeugung

über dem Basisszenario. Der Wärmemarkt im Gebäudebereich (Haushalte und Gewerbe) wird hier zu knapp 21 Prozent von KWK-Systemen gedeckt (ohne Biomasse-KWK).¹⁰¹

Insgesamt weicht der Optimierungsalgorithmus des Energiesystemmodells dem Einsatz von Wärmepumpen und Elektromobilität gewissermaßen aus. Um langfristig noch ambitioniertere Ziele der Dekarbonisierung zu erreichen, ist die Elektrifizierung auch der dezentralen Verbraucher unerlässlich – die Ausweichmöglichkeiten sind dann mehr und mehr ausgeschöpft.

Eine geringere Flexibilität im Wärme- und Mobilitätsbereich (weniger Wärmepumpen mit Wärmespeichern, weniger netzdienliches Laden der Elektrofahr-

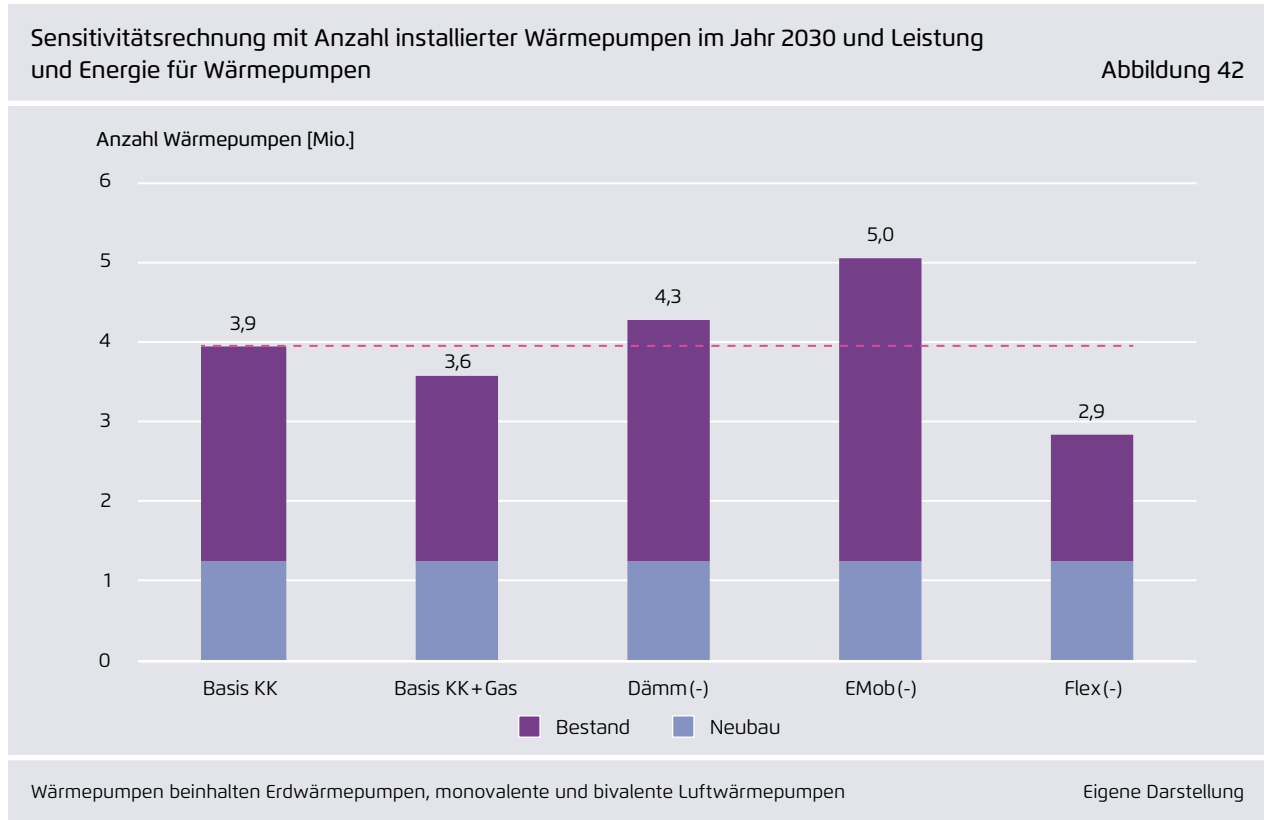
101 Inklusive Biomasse-KWK erhöht sich der Wert auf rund 26 Prozent.

zeuge) erschwert die Integration der Erneuerbaren. In der letzten betrachteten Sensitivität beobachtet man daher wieder eine Verschiebung weg von Windkraft- und Photovoltaikinstallationen hin zu Gaskraftwerken, die die hier fehlende Flexibilität ersetzen. Das Gesamtsystem wird dabei teurer.

5.8 Zusammenfassung: Wärmepumpen und Spitzenlast

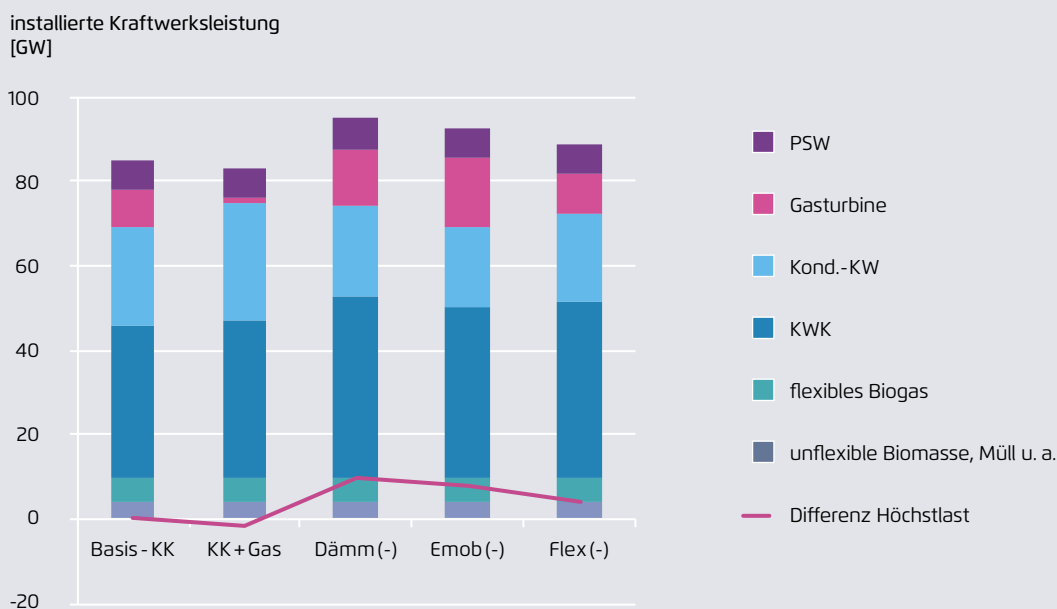
In der Basisrechnung (Basis KK) werden 2030 knapp vier Millionen installierte Wärmepumpen benötigt, um die Emissionsziele zu erreichen (Abbildung 42).

Unterstellt man eine geringere Sanierungstiefe (Dämm(-)), steigt der Wärmeverbrauch. Die Dekarbonisierung der dezentralen Wärmeversorgung ist in diesem Szenario eine besondere Herausforderung: Bestandskessel, deren Emissionen gesetzt sind, schränken das verfügbare CO₂-Budget (insbesondere im Nicht-



Notwendige installierte Leistung an thermischen Kraftwerken in den Szenariovarianten für das Jahr 2030

Abbildung 43



Eigene Berechnung

ETS-Bereich) ein, während eine höhere Wärmenachfrage durch Zubau zu decken ist. Durch diesen Druck werden zum einen verstärkt Fernwärmelösungen eingesetzt, die die Emissionen aus dem Nicht-ETS-Bereich der dezentralen Anlagen in den ETS-Bereich verschieben, zum anderen wird stärker über Wärmepumpen dekarbonisiert. Insbesondere wird dies durch bivalente Luftwärmepumpen (in Kombination mit Gasspitzenlastkesseln) erreicht. Die Zahl der Wärmepumpen steigt damit auf über vier Millionen. Im Ausgleich dazu sinkt die Anzahl der neu installierten Gaskessel.

Bei einer geringeren Durchdringung an Elektromobilität (EMob(-)) wird das CO₂-Budget im Nicht-ETS-Bereich noch stärker eingeschränkt. Im Ergebnis wird bei der Wärmeversorgung von Gebäuden noch stärker dekarbonisiert: Gaskessel werden deutlich weniger zugebaut, dafür kommen mehr Fernwärme und mehr und effizientere Wärmepumpen zum Einsatz (das heißt, der Anteil der Erdwärmepumpen erhöht sich). Die Zahl der Wärmepumpen steigt auf

fünf Millionen im Jahr 2030, um die Einhaltung des Nicht-ETS-Ziels zu gewährleisten.

Bei fehlender Flexibilität (Flex(-)) von Wärmepumpen und Elektroautos verringert sich die Zahl der Wärmepumpen auf knapp drei Millionen. Damit weicht das Optimierungsmodell diesen unflexiblen Verbrauchern aus. Stattdessen verschieben die im Modell neu zugebauten Fernwärmelösungen die Emissionen aus dem Nicht-ETS- in den ETS-Bereich, wo sie durch einen verstärkten Einsatz von Gaskraftwerken leichter kompensiert werden können. Diese kurzfristige Kostenoptimierung zahlt sich aber langfristig nicht aus, wenn noch ambitioniertere Emissionsziele erreicht werden sollen und die Elektrifizierung dieser Verbraucher unerlässlich wird. Auf lange Sicht ist die Flexibilität neuer Stromverbraucher wie Wärmepumpen oder Elektromobilität wesentlich, um fluktuierende Erneuerbare Energien effizient einzubinden. Flexibilität und die Nutzung von bivalenten Wärme-

pumpensystemen und Hybrid-Oberleitungs-Lkws können beide helfen, die Höchstlast zu reduzieren. Durch Wärmepumpen kommt es grundsätzlich zu einer Erhöhung der Spitzenlast. In den hier betrachteten Sensitivitäten liegt die höchste abgerufene Leistung der Wärmepumpen bei 10 bis 21 Gigawatt. Die dafür notwendige installierte Leistung an thermischen Kraftwerken ist in Abbildung 43 dargestellt. Angesichts der heute circa 35 Gigawatt benötigten Leistung für Direktstrom (insbesondere Durchlauferhitzer und Nachtspeicherheizungen) hilft ein Rückbau von Nachtspeicherheizungen der Integration einer zunehmenden Zahl von Wärmepumpen in das Stromsystem.

Insgesamt zeigen die Sensitivitätsrechnungen, unter welchen Bedingungen die Klimaziele 2030 noch erreicht werden können. Vor dem Hintergrund einer unsicheren weiteren Entwicklung bei der Gebäudedämmung und der Elektromobilität sollte auf ein robustes Mindestniveau an Wärmepumpen für das Jahr 2030 abgezielt werden, mit dem auch mögliche Defizite in den beiden genannten anderen Bereichen kompensiert werden können. Ein solches Niveau liegt bei 5 Millionen Wärmepumpen.

6 Kritische Weichenstellungen vor 2030

Für die kritischen Weichenstellungen vor 2030 werden in diesem Kapitel mögliche Pfadabhängigkeiten in den Bereichen Effizienz, Fernwärme, Einzelheizungen und Nahwärme, Strom- und Gassystem benannt und wichtige noch offene Frage angesprochen.

6.1 Pfadabhängigkeiten 2030 für Gebäudewärme in Hinblick auf langfristige Klimaziele und offene Fragen

Gebäudeeffizienz

Eine Verringerung des Energieverbrauchs der Gebäude ist in allen der hier betrachteten Zielszenarien zentral. Wird eine solche Verbrauchsreduktion nicht erreicht, sind die technischen Voraussetzungen für den massiven Ausbau an Wärmepumpen, der in dieser Analyse beschrieben wird, nicht hinreichend gegeben. Für das Erreichen des Klimaziels 2030¹⁰² kann eine unzureichende Gebäudesanierung nur schwer durch den Ausbau von mehr KWK-Systemen und mehr Wärmepumpen kompensiert werden. Die dann ineffizienteren Wärmepumpen führen aber zum stärksten Anstieg der Höchstlast in den Sensitivitäten und zu einem höheren Stromverbrauch und Ausbaubedarf an Erneuerbaren Energien. Die notwendige installierte thermische Kraftwerksleistung fällt am höchsten aus. Auch in Hinblick auf die Erreichbarkeit eines langfristig ambitionierten Klimazieles wurde die Wichtigkeit einer hohen Effizienz in den verglichenen Szenarien deutlich. Offen bleibt die Frage, wie sich der langfristig kostenminimale Mix aus nachfrageseitigen Effizienzmaßnahmen und dem Einsatz Erneuerbarer Energien im Wärmebereich zusammensetzt.¹⁰³

102 minus 55 Prozent Treibhausgasemissionen gegenüber 1990 bis 2030 sowie im Rahmen des europäischen Lastenausgleichs minus 38 Prozent gegenüber 2005 für den deutschen Nicht-ETS-Bereich

103 Agora Energiewende lässt hierzu gegenwärtig gemeinsam mit der *European Climate Foundation* und dem *Regulatory*

Fernwärmenetze

Grundsätzlich stellt der **Ausbau der Wärmenetze** ein wichtiges Element zur Erreichbarkeit der Klimaziele dar. Dies beinhaltet die Erhöhung des Anschlussgrades in den bestehenden Netzen und den Bau zusätzlicher Leitungstrassen. Eine wesentliche Technologie im Bereich der Fernwärme ist dabei die KWK. Aber auch ohne KWK können (Nah-)Wärmenetze für Quartierskonzepte – die im Rahmen dieser Studie nicht untersucht wurden – in Zukunft wichtig werden¹⁰⁴.

Fernwärme-KWK erscheint im Szenarienvergleich insbesondere in den Minus-95-Prozent-Szenarien langfristig stark limitiert, aber auch schon in Minus-80-Prozent-Szenarien eingeschränkt aufgrund der selteneren Zeitfenster, in denen eine Stromerzeugung aus thermischen Kraftwerken dann noch benötigt wird. In Hinblick auf eine Dekarbonisierung der Wärmenetze steht zudem nur begrenzt Biomasse zur Verfügung. Für die Treibhausgasemissionen, die bis 2050 aber in der Stromerzeugung einzusparen sind, stellt die erdgasbetriebene KWK eine zentrale Brückentechnologie dar, die wesentlich dazu beiträgt, die 2030er ETS- und Nicht-ETS-Ziele zu erreichen. Andererseits darf die KWK aus langfristiger Sicht die jetzt notwendigen Maßnahmen in den Nicht-ETS-Bereichen Elektromobilität, Gebäudedämmung oder Wärmepumpen nicht ersetzen. Für eine nachhaltige Dekarbonisierung ist eine starke Temperaturabsenkung und die Einbindung von großer Solarthermie, Tiefengeothermie, Niedertemperaturwärme durch Großwärmepumpen oder die direkte Industrieabwärmennutzung wesentlich und reduziert die Verluste. Grundsätzlich bieten Wärmenetze die Möglichkeit, über die Zeit durch Technologiewechsel flexibel auf geänderte Rahmenbedingungen zu

Assistance Project eine Analyse erstellen.

104 siehe dazu auch der Abschnitt weiter unten zu dezentralen Einzelanlagen und kleinen Nahwärmenetzen

reagieren, was im Bereich der Einzelversorgungsanlagen nur mit sehr langjähriger Verzögerung erfolgen kann.

Große Solarthermie ergänzt sich heute und im Jahr 2030 sehr gut mit KWK, kann aber in bestehenden Wärmenetzen in Konkurrenz zur Müll-HKW oder Abwärmenutzung stehen. Einschränkend für große Solarthermie wirkt sich auch die Flächenverfügbarkeit in Ballungsgebieten aus. Zudem besteht Forschungsbedarf, wie Solarthermie in der Transformation der Wärmenetze langfristig mit saisonalen Speichern zu sehr hohen Arbeitsanteilen an der Wärmelast genutzt werden kann, gegebenenfalls in Verbindung mit Großwärmepumpen unter Einbindung zusätzlicher Umweltwärme.

Tiefengeothermie kann langfristig eine große Bedeutung zukommen, da sie grundsätzlich die vollständig CO₂-freie Versorgung eines Netzes ermöglicht. Bei einer weitgehend monovalenten Auslegung kann eine Bohrung sehr lange und nachhaltig genutzt werden. Beim technischen Potenzial bestehen Unsicherheiten bezüglich der räumlichen Nähe beziehungsweise des notwendigen Einzugsbereichs zu Ballungsräumen und der Kosten bei Ressourcen mit geringerem Temperaturgradient. Außerdem besteht ein hoher Entwicklungsbedarf für petrothermale Technologie¹⁰⁵, die erst langfristig verfügbar wird. Nachteile für Geothermie ergeben sich aus Defiziten bei Versicherungen für nicht fündige Bohrungen, Konkurrenz zu bestehenden fossilen KWK-Kraftwerken beziehungsweise keinem Netzzugang zu bestehenden Netzen, Schwierigkeiten bei Kosten und Umsetzung neuer Fernwärmenetze und der Tatsache, dass Stockwerksnutzung noch nicht erlaubt wird. Andererseits existieren heute an guten Standorten schon reine Tiefengeothermie-Wärmeprojekte ohne EEG-Förderung.

105 das heißt die Nutzung von tief liegenden Wärmereservoirs ohne oder mit nur sehr geringer Wasserführung

Großwärmepumpen haben grundsätzlich ein hohes Potenzial, sind aber auch mit Unsicherheiten verbunden. So ist das technische Potenzial stark von den individuellen Gegebenheiten und Restriktionen vor Ort abhängig. Wirtschaftlich werden Anwendungen umso attraktiver, je höher das Temperaturniveau der Wärmequelle oder je niedriger das Temperaturniveau des Wärmenetzes ist. Neben der Möglichkeit, Ab- und Umweltwärme einzubinden (Kombination mit Kältenetzen, Industrieabwärme, Abwasserkanälen, Klärwasser, Brunnen, Flüsse und anderen), bieten sie zudem das Potenzial zur Effizienzsteigerung von KWK-Anlagen oder Wärmespeichern.

Dezentrale Einzelanlagen und kleine Nahwärmenetze

Das Potenzial zum Ausbau der Wärmenetze ist dennoch begrenzt aufgrund der hohen Dominanz von Einfamilienhäusern und Siedlungen mit geringen Wärmedichten. Im Bereich der Einzelanlagen ist die **Wärmepumpe** zur effizienten Einbindung von Umweltwärme die zentrale Technologie.¹⁰⁶ Auch wenn Erdwärmepumpen (sowohl mit Erdsonden als auch mit Erdkollektor) sich im Szenarienvergleich und in den zusätzlichen Analysen aus Gesamtsystemsicht als wichtigste Technologie herausstellen, kann es in der Praxis auch infolge von beispielsweise Platzmangel, Akzeptanzproblemen oder nicht erteilten Genehmigungen für Bohrungen in einigen Regionen zu Umsetzungshemmnissen kommen. Sofern Letztere nicht technisch-fachlich bedingt sind, sollten diese abgebaut werden, um der Potenzialausnutzung für Erdwärmepumpen nicht im Wege zu stehen. Vor dem Hintergrund solcher Hemmnisse wurden technische Alternativen entwickelt, die auch in Bestandsgebäuden einen übergreifenden Einsatz von Wärmepumpen ermöglichen. Drehzahlvariable Luftwärmepumpen können auf eine größere Leistung ausgelegt werden und ohne Heizstab auch bei sehr kalten Temperaturen die Last decken. Im Bereich der dezentralen Wärmepumpe stellt die Kombination von

106 Zu den Potenzialen von Biomasse, Solarthermie und Wärmepumpen für Einzelanlagen siehe Kapitel 3.1.

Eisspeichern mit einfachen Solar-Luftabsorber-Matten eine effiziente Alternative zur Luftwärmepumpe dar. Kombiniert werden kann der Speicher auch mit der Abwärmenutzung aus Serverräumen und Raumklimatisierung.

Als **bivalente Wärmepumpensysteme** können Luftwärmepumpen in Kombination mit Gas- oder Ölkesseln eine Brückentechnologie darstellen, um der Herausforderung iterativer Sanierung zu begegnen. Um hier *Lock-in*-Effekte zu vermeiden, müsste in der Anlagenauslegung gewährleistet werden, dass die Leistung der Wärmepumpen ausreicht, um das Gebäude nach umfassender Gebäudesanierung alleine zu versorgen.

Für effiziente Systeme in Bestandsgebäuden ist eine Radiatorumstellung auf Niedertemperatur (mit größeren Volumina beziehungsweise Heizflächen) zentral, und der Unterschied im Stromverbrauch zur teureren beziehungsweise oft praktisch nicht umsetzbaren Fußbodenheizung ist gering.¹⁰⁷ Auch große Mehrfamilienhäuser können prinzipiell durch Großwärmepumpen versorgt werden. Um Legionellen-Probleme in Mehrfamilienhäusern zu umgehen, können Frischwasserstationen auf einzelnen Etagen installiert werden oder es kann Gas für die Trinkwarmwasserbereitung eingesetzt werden.

Lock-in-Effekte entstehen unter anderem infolge von Entscheidungsunfähigkeit – wenn die Komplexität bei der Wahl der Alternativen groß ist und die zukünftige Preisentwicklung ungewiss. Solche nicht getroffenen Entscheidungen führen zum Investitionsaufschub. Fällt dann später die Heizung aus, wird sie oft ein zu eins durch den gleichen Kessel ersetzt, der dann weitere 25 bis 35 Jahre genutzt wird. Im Vergleich dazu ist gerade aufgrund der Langlebigkeit des Bestandes der Absatzmarkt für Wärmepumpen zu steigern, um bis zum Jahr 2025 keine rein fossil

¹⁰⁷ Detailliertere Überlegungen zu bivalenten Wärmepumpensystemen, Niedertemperaturradiatoren und Gaswärmepumpen finden sich in Anhang 7.2.

betriebenen Einzelfeuerungen mehr neu ins Feld zu bringen.¹⁰⁸

Auf der anderen Seite können neben dezentralen Wärmepumpen auch **Großwärmepumpen in kleinen Nahwärmenetzen** zur Quartiersversorgung eine deutlich stärkere Rolle gewinnen. In Kassel wurde für das Neubaugebiet „Zum Feldlager“ zum Beispiel ein sehr innovatives Konzept entwickelt, welches prinzipiell auch auf Bestandsgebäude übertragbar sein kann.¹⁰⁹ Grundsätzlich sind die Übergänge zwischen dezentralen Wärmepumpen und Quartierskonzepten fließend, sodass die im Szenarienvergleich ermittelten dezentralen Wärmepumpenanteile auch durch Quartierslösungen umgesetzt werden können.

Stromsystem und Flexibilität

Diskutiert wird bei einer hohen Durchdringung mit Wärmepumpen, inwiefern dies negative Implikationen für das Stromsystem haben könnte. Durch Wärmepumpen kommt es grundsätzlich zu einer Erhöhung der **Spitzenlast**. Dieser Effekt ist bereits in den Analysen für 2030 erkennbar.¹¹⁰ Im Vergleich zu heutigen circa 35 Gigawatt aus Direktstrom (insbesondere Nachtspeicher und Durchlauferhitzer)¹¹¹ ist dies aber eher als ein Austausch zu verstehen. Zudem bestehen bereits Flexibilitäten und rechtliche

¹⁰⁸ Eine Diskussion des Einsatzes von bivalenten Wärmepumpen ohne *Lock-In*-Effekte und der möglichen Dekarbonisierung von Erdgas findet sich in der Kurzfassung zu diesem Bericht.

¹⁰⁹ Zentrale Wärmequelle ist hier ein Erdwärmesondenfeld unter Nutzung eines Nahwärmenetzes mit einer Vorlauftemperatur von circa 40 Grad Celsius. Einfache Solarabsorber-Matten werden zur Regeneration der Erdsonden und als zusätzliche Wärmequelle eingesetzt. Im Sommer erfolgt die Warmwasserbereitung dezentral, um die Wärmenetzverluste zu begrenzen. Dies kann entweder über Solardachanlagen oder Warmwasserwärmepumpen in Verbindung mit Photovoltaik-Eigenstromerzeugung erfolgen. In Summe resultieren sehr geringe Wärmenetzverluste von circa 2,5 Prozent und eine hohe Jahresarbeitszahl von circa 4,9 (Fh-IBP et al. 2015).

¹¹⁰ siehe Kapitel 5.8

¹¹¹ Prognos, ifeu, IWU (2015)

Vorgaben durch Netzbetreiber für unterbrechbare Verbraucher von drei mal zwei Stunden pro Tag nach § 14 a EnWG, wofür im Gegenzug reduzierte Netzentgelte und reduzierte Konzessionsabgaben gewährt werden. Volkswirtschaftlich betrachtet sind die Kosten zusätzlicher Kraftwerksleistungen jedoch nicht entscheidend, da die Investitionen in anteilig notwendige zusätzliche Gasturbinen mit circa 400 Euro pro Kilowatt im Vergleich zu den Kosten für dezentrale Wärmepumpen sehr gering sind.

Grundsätzlich ist die **Flexibilität** beim Einsatz von dezentralen Wärmepumpen eine Voraussetzung für ein effizientes Gesamtsystem. Wie die Analysen für 2030 in der Defizitvariante ohne Flexibilität der neuen dezentralen Sektorkopplungs-Stromverbraucher zeigen, ist bei Erneuerbaren-Energien-Anteilen von 60 Prozent am Stromverbrauch der Flexibilitätsbedarf so groß, dass unflexible Wärmepumpen nur eingeschränkt ausgebaut werden könnten. Um langfristig noch ambitioniertere Ziele der Dekarbonisierung zu erreichen, ist die Elektrifizierung auch der dezentralen Verbraucher unerlässlich – die Ausweichmöglichkeiten sind dann mehr und mehr ausgeschöpft. Das macht eine Flexibilisierung von Wärmepumpen und Elektrofahrzeugen unumgänglich. Angesichts der langen Lebensdauern gerade im Heizungsbereich sollte damit schon heute begonnen werden. Andererseits sind für die flexible Einbindung von Wärmepumpen mit dem Gesetz zur Digitalisierung der Energiewende die Voraussetzungen geschaffen worden (verpflichtende *Smart Meter* mit 15 Minuten Zählerstandgangsmessung für unterbrechbare Verbraucher nach §14a EnWG statt TLP¹¹²-Arbeitszähler). Technisch sind Wärmepumpen mit dem SG-Ready-Label mit entsprechend definierten Schnittstellen gut steuerbar. Wirtschaftlich besteht mit Ansätzen wie der indirekten Spotmarktoptimierung eine kostengünstige Alternative zur Einbindung des Flexibilitätspotenzials in die Bilanzkreise der Vertriebe. Inwiefern sich dies in den nächsten Jahren durchsetzt, ist aber auch von der Entwicklung der Preisdifferenzen am Strommarkt abhängig.

112 temperaturabhängiges Lastprofil

Offene Fragen zu möglichen **Verteilnetz**-Problemen bei hoher Gleichzeitigkeit im Einsatz von Wärmepumpen und Elektrofahrzeugen, die über das Börsenspreissignal gesteuert werden, können und sollten von einem zukünftigen und noch konkret auszugestaltenden Smart Market adressiert werden.¹¹³

Gas

Weiter zu diskutieren sind die wirtschaftlichen Implikationen für das Gasnetz bei einer stärkeren Durchdringung von Wärmepumpen. Bei den angesprochenen Technologiekombinationen (zum Beispiel in Wärmenetzen oder bivalenten Wärmepumpensystemen) und für Bestandsgaskessel bedarf es weiterhin eines Gasverteilnetzes, insbesondere bei schrittweiser Umsetzung von Sanierung im Quartier oder im Gebäude im Zeitraum bis 2050. Bei einem rückgängigen Verbrauch steigen aber die Kosten für die verbleibenden Gasnutzer. Hier stellt sich die Frage, wie wirtschaftlich Gasnetze in Zukunft angesichts von energiepolitischen Dekarbonisierungszielen und einem Rückgang des Gasbedarfs zu betreiben sein werden.¹¹⁴ Um *Lock-in*-Effekte und die Kosten für den Endverbraucher zu reduzieren, bedarf es deshalb einer kommunalen Infrastrukturplanung für Quartiere mit Fernwärme, Quartiere mit Gas und Quartiere mit ausschließlich Strom. Instrumente hierfür können verpflichtende kommunale Wärmebedarfspläne¹¹⁵ sowie Flächennutzungspläne für die Nutzung von Erneuerbaren Energien sein. Angesichts langfristig begrenzter Flächenpotenziale Erneuerbarer Energien in Deutschland und absehbaren Akzeptanzproblemen dürfte die Dekarbonisierung des Energieträgers Gas ausschließlich in Deutschland schwerlich

113 siehe dazu Ecofys et al. (in Arbeit, 2017)

114 Beispielsweise heißt es dazu im rot-rot-grünen Koalitionsvertrag für das Land Berlin vom November 2016: „Die Koalition strebt eine vollständige Rekommunalisierung des Gasnetzes an. Voraussetzung ist, dass der Kaufpreis nicht über dem Ertragswert liegt, den das Gasnetz im Falle einer konsequenten Klimaschutzpolitik, die Berlin bis 2050 klimaneutral macht, noch hätte.“ (SPD et al. 2016)

115 siehe auch AEE (2016)

möglich sein. Unklar ist bislang allerdings, zu welchen Kosten zukünftig synthetische Brennstoffe aus Erneuerbare-Energien-Strom im Ausland erzeugt und nach Deutschland importiert werden können.

6.2 Schlussfolgerungen für den Stromsektor

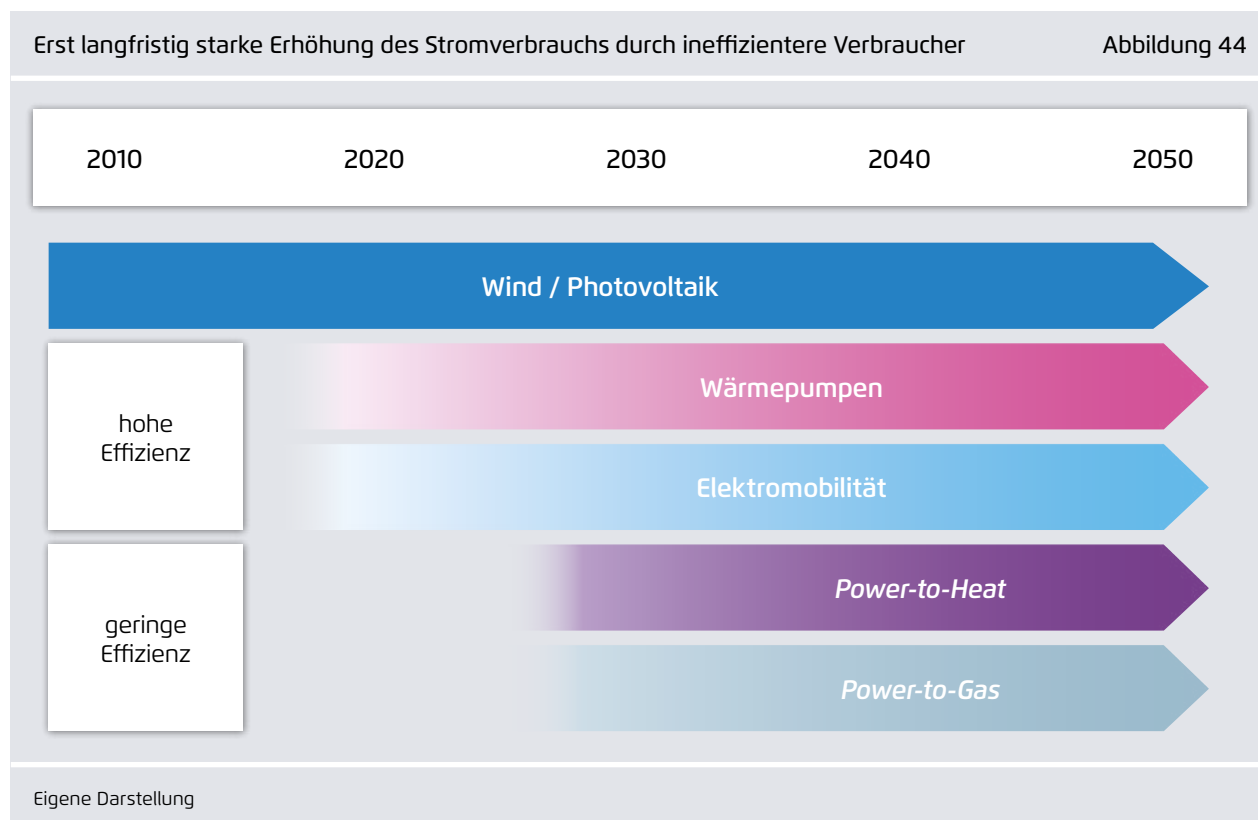
Die Transformation der Gebäudewärme durch neue Stromverbraucher bringt zusätzliche Herausforderungen für den Stromsektor mit sich: in der Bereitstellung von Kraftwerkleistung, in der Berücksichtigung in der Netzausbauplanung, im Anreiz von Flexibilität durch das Strommarktdesign und im Ausbau zusätzlicher Erneuerbare-Energien-Anlagen für den gestiegenen Stromverbrauch.

Insbesondere beim Erneuerbare-Energien-Ausbau bedarf kommen zwei Punkte zum Tragen. Einerseits wird die Infrastruktur für den Erneuerbare-Energien-Ausbau – wie Fabriken, Kräne, Schiffe, Installa-

teure – zunehmend durch den Ersatz von Altanlagen gebunden.¹¹⁶ Dadurch wird es langfristig schwerer, noch große Nettozuwächse im absoluten Erneuerbare-Energien-Ausbau zu erreichen.

Andererseits ist es gerade die lange Frist, die für die Zunahme des Stromverbrauchs von Bedeutung sein wird. Denn gegenwärtig zeigt sich in Deutschland ein Rückgang des Bruttostromverbrauchs aufgrund von Effizienzsteigerungen, dem Rückbau von Nachtspeichern und dem sinkenden Kraftwerkseigenverbrauch. Diese Abnahme wird mittelfristig nur in geringem Maße durch den Zuwachs neuer Stromverbraucher kompensiert, da effiziente Verbraucher – Elektromobilität und Wärmepumpen – in das System

¹¹⁶ So werden ab 2050 Windkraftanlagen in einer Größenordnung von vier bis sieben Gigawatt und Photovoltaikanlagen in einer Größenordnung von drei bis acht Gigawatt alleine zur Bestandserhaltung installiert werden müssen (Fh-IWES 2015a).



kommen, welche beim durchschnittlichen deutschen Strommix CO₂-Emissionen einsparen¹¹⁷, aber noch nicht viel Strom verbrauchen. Erst langfristig kommt es durch die Verfügbarkeit von „Überschussstrom“ beziehungsweise häufige Stunden mit 100 Prozent Wind-, Photovoltaik- und Wasserkrafterzeugung zu einem exponentiellen Anstieg des Stromverbrauchs durch ineffizientere Verbraucher wie Elektrodenkessel und *Power-to-Gas* (Abbildung 44).

Deutschland hat sich für 2030 ein Treibhausgas-minderungsziel von insgesamt minus 55 Prozent gegenüber 1990 gesetzt. Außerdem muss im Rahmen des europäischen Klimaschutzbeschlusses bis 2030 das Reduktionsziel von minus 38 Prozent (Basisjahr 2005) für den deutschen Nicht-Emissions-handels-Sektor eingehalten werden. Diese beiden Restriktionen wurden in der hier durchgeführten Modellierung berücksichtigt. Daneben gibt es weitere

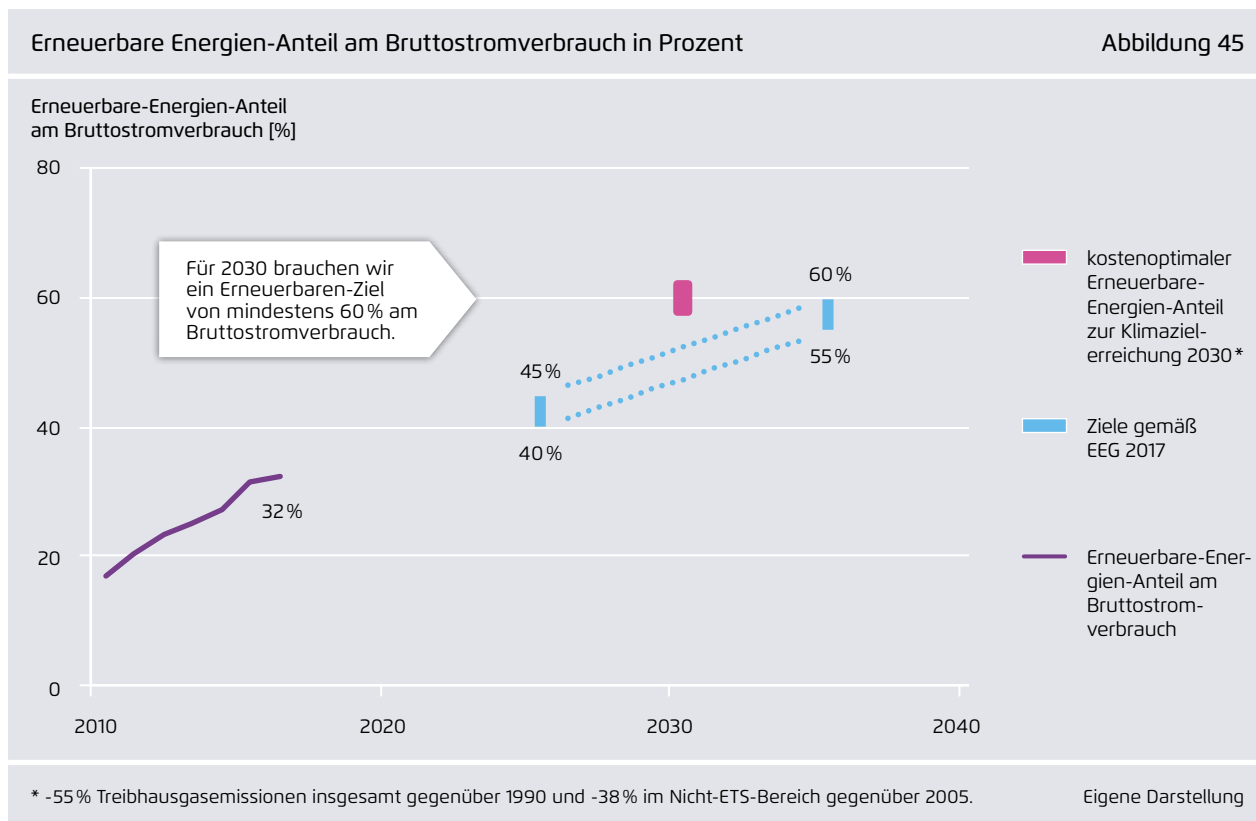
117 VDE (2015)

Eingangsgrößen, die einen relevanten Einfluss auf das Ergebnis für 2030 haben. Hierzu zählen auf der Erzeugungsseite insbesondere Vorgaben zur Kohlekraftwerksleistung¹¹⁸, die angenommenen Brennstoffpreise und Erneuerbare-Energien-Kosten. Nachfrageseitig geht es vor allem um den Nettostromexport von 32 TWh¹¹⁹ sowie neue Stromverbraucher in den Sektoren Wärme und Verkehr mit den oben genannten Annahmen zur Gebäudeeffizienz und Elektromobilität.

Um die auferlegte Emissionsbeschränkung einzuhalten, können im Modell verschiedenen Dekarbonisierungsoptionen genutzt werden, wie der Zubau von Gaskraftwerken und Erneuerbaren Energien. Ausgehend von diesen Optionen wird der günstigste Mix

118 auf Basis des von Agora Energiewende vorgeschlagenen Kohlekonsens-Pfades.

119 Dieser ergibt sich aus der europäischen Strommarktsimulation für 2030.



ermittelt. Aus den Sensitivitätsrechnungen für 2030 ergibt sich damit unter den dargestellten Annahmen ein kostenoptimaler Erneuerbare Energien-Anteil am Bruttostromverbrauch im Bereich von knapp 58 bis 62 Prozent (Abbildung 45).

Im Ergebnis zeigt sich, dass der aktuelle Erneuerbare-Energien-Korridor – von 40 bis 45 Prozent bis 2025 und 55 bis 60 Prozent bis 2035 – nicht ausreicht, um die übergeordneten Klimaschutzziele zu minimalen Kosten zu erfüllen. Daher sollte der EEG-Zielkorridor entsprechend auf mindestens 60 Prozent bis zum Jahr 2030 angehoben werden.

7 Anhang

7.1 Vergleich zur Energieeffizienzstrategie Gebäude

In Kapitel 4.3 wurden Bandbreiten des Gebäudewärmeverbrauchs für 2050 aus den Gesamtsystem-Zielszenarien für 80 Prozent und 95 Prozent Treibhausgasminde rung abgeleitet. Hier werden diese mit den entsprechenden Werten der *Energieeffizienzstrategie Gebäude* des BMWi verglichen. Methodisch besteht dabei insofern ein Unterschied, als dass die *Energieeffizienzstrategie Gebäude* sich auf das energiepolitische 80-Prozent-Primärenergie-Reduktionsziel für fossile Energien bezieht und dabei nicht nur den Wärmeverbrauch betrachtet.¹²⁰

120 Neben Raumwärme und Warmwasser geht es in der *Energieeffizienzstrategie Gebäude* auch um Kühlen, Lüften, Haustechnik für Haushalte, Gewerbe, Industrie und Beleuchtung für Gewerbe und Industrie auf Basis von

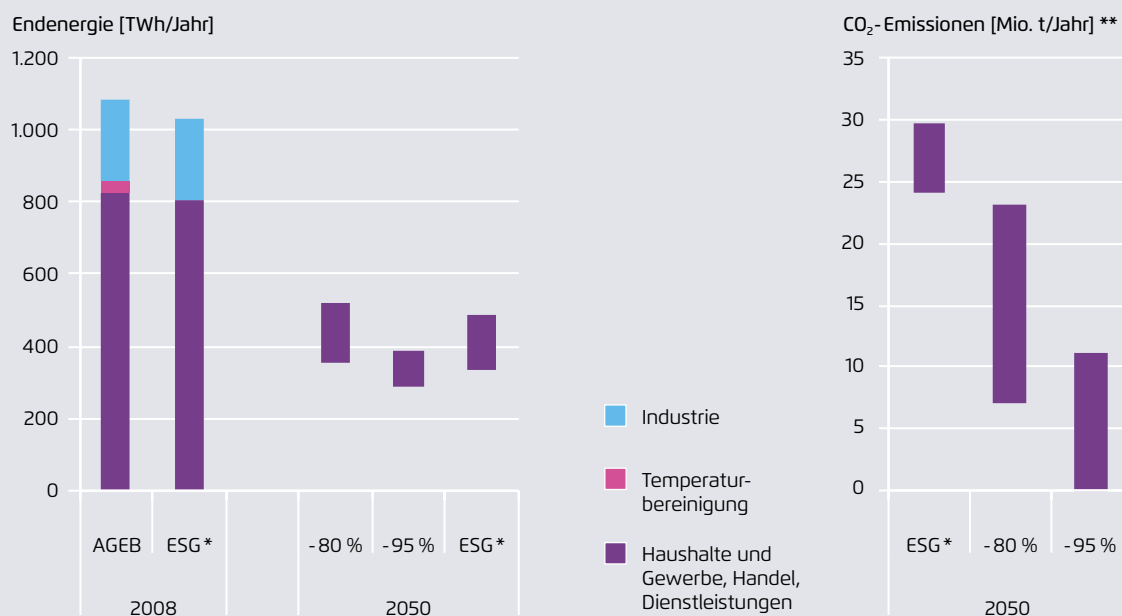
Wenn man dagegen nur den Endenergieverbrauch für Raumwärme und Warmwasser auf Ebene von Haushalten und Gewerbe vergleicht (also ohne Industrie und weiteren Nicht-Heizungs-Stromverbrauch), wird deutlich, dass der Ausgangswert für 2008 in der *Energieeffizienzstrategie Gebäude* relativ niedrig liegt (Abbildung 46). Dies ist auf bestehende statistische Differenzen und damit auf einen anderen Ausgangswert gegenüber der Anwendungsbilanz¹²¹ sowie die nicht berücksichtigte Temperaturbereinigung für das warme Wetterjahr zurückzuführen. Entsprechend wirkt der verwendete Ausgangswert in Bezug auf ein 80-Prozent-Reduktionsziel tendenziell ambitioniert.

fossilen Primärenergiefaktoren inklusive Vorketten für direkte Brennstoffe sowie Fernwärme und Stromerzeugung (Prognos, ifeu, IWU 2015).

121 AGEB (2013)

Wärmeverbrauch und CO₂-Emissionen – Vergleich von Zielszenarien und *Energieeffizienzstrategie Gebäude*

Abbildung 46



* *Energieeffizienzstrategie Gebäude*

** ohne Vorketten und ohne Strom

Die Bandbreite der Energieverbrauchsentwicklung der in Kapitel 4.3 betrachteten Zielszenarien deckt sich dabei für 2050 gut mit der in der *Energieeffizienzstrategie Gebäude* angegebenen Bandbreite¹²². Wenn man die Stromerzeugung als separat zu dekarbonisierenden Sektor ausklammert, resultieren aus einem fossilen Primärenergieverbrauch von minus 80 Prozent noch Emissionen von circa 30 bis 24 Millionen Tonnen CO₂ ohne Vorketten für die Gebäudewärme (Haushalte und Gewerbe, Handel, Dienstleistungen).¹²³ Treibhausgasemissionen in einer solchen Höhe würden aber im Zielszenarienvergleich selbst für das schwächere Minus-80-Prozent-Ziel noch zu viele Emissionen bedeuten und ein ambitioniertes Ziel von minus 95 Prozent weit verfehlen (Abbildung 46, rechts).¹²⁴ Dies kann als ein Indikator dafür verstanden werden, dass der Gebäudebereich aus Gesamtsystemsicht überproportional mehr CO₂ einsparen muss. Neben einer hohen Sanierungsrate und -tiefe ist also auch eine weitgehende Dekarbonisierung der Gebäudewärmeversorgung durch Erneuerbare Energien essenziell.

7.2 Luftwärmepumpen, bivalente Wärmepumpensysteme, Erdwärmepumpen, Gaswärmepumpen und Ölheizungen

Luftwärmepumpen in Bestandsgebäuden

Inwieweit Luftwärmepumpen für Bestandsgebäude geeignet sind, ist in der energiepolitischen Diskussion umstritten. Oftmals wird unterstellt, dass diese Anlagen im Winter fast reine Stromheizungen darstellen würden. Dabei muss aber zum einen berücksichtigt werden, dass neue Anlagen mittels Wechselrichter drehzahlvariabel ausgeführt sind, mit höheren Leistungen monovalent ausgelegt und ohne Heizstab

betrieben werden können. Zum anderen hängt die Effizienz stark von den benötigten Vorlauftemperaturen der Heizflächen ab. Während herkömmliche Heizkörper je nach Gebäudedämmung Temperaturen von circa 65 Grad Celsius erfordern, reichen für Niedertemperaturheizkörper Temperaturen von 45 Grad Celsius aus. Die Auswirkung dieses Temperatureffekts kann beispielhaft für ein Einfamilienhaus mit 160 m² Wohnfläche simuliert werden (Abbildung 47): Als Bestandsgebäude mit einem Baualter vor 1978 hat dieses Gebäude im unsanierten Zustand einen Heizwärmebedarf von 188 Kilowattstunden pro Quadratmeter und Jahr (kWh/(m²*a)), herkömmliche Heizkörper und im Fall der Luftwärmepumpe eine Jahresarbeitszahl von 2,1. Werden dann im Zuge einer Teilsanierung Fenster und Dach saniert, verringert sich der Heizwärmebedarf auf 145 kWh/(m²*a) und die Jahresarbeitszahl steigt auf 2,2. Werden zusätzlich die Heizkörper durch Niedertemperaturradiatoren ersetzt, erhöht sie sich auf 3,4. Die Dämmung der Fassade (das heißt Sanierung nach EnEV 2009) reduziert dann zwar den Heizwärmebedarf weiter auf 89 kWh/(m²*a), erhöht die Effizienz der Wärmepumpe aber nur noch geringfügig auf 3,6.

Auch für den Neubaubereich muss die Effizienz von Wärmepumpen differenziert betrachtet werden. Natürlich weist eine Erdwärmepumpe im Winter eine höhere Effizienz (COP) als eine Luftwärmepumpe auf und kann auf eine geringere elektrische Leistung ausgelegt werden. Aber bei zunehmender Bedeutung des ganzjährigen Warmwasserbedarfs nähern sich die Jahresarbeitszahlen beider Wärmepumpentypen an.¹²⁵ Diese Entwicklung lässt sich anhand des oben beschriebenen sanierten Gebäudes mit Niedertemperaturradiator illustrieren: Darin liegt die Jahresarbeitszahl der Luftwärmepumpe bei 3,6. Würde hier stattdessen eine Erdwärmepumpe eingesetzt, läge die Jahresarbeitszahl bei 3,8. Ein solcher Wert ergibt sich auch für ein entsprechendes Neubaeinfamilien-

122 Diese ergibt sich aus den beiden Szenarien „Effizienz“ und „Erneuerbare Energien“ der *Energieeffizienzstrategie Gebäude*.

123 Dies entspricht 39 bis 32 Millionen Tonnen CO₂ mit Vorketten.

124 siehe dazu auch Abbildung 17

125 In Abbildung 47 erhöht sich der Warmwasseranteil beim Bestandsgebäude von 12 Prozent im unsanierten Zustand auf 23 Prozent im sanierten Zustand nach EnEV 2009.

haus, welches gemäß EnEV 2009 mit Niedertemperaturradiator simuliert wurde. Wird stattdessen eine Fußbodenheizung mit circa 38 Grad Celsius Vorlauftemperatur unterstellt, steigt die Jahresarbeitszahl zwar auf 4,2 – allerdings erhöht sich gleichzeitig der Wärmebedarf. Dies ist dadurch bedingt, dass eine Fußbodenheizung nicht wie ein Niedertemperaturradiator öfter an und aus geschaltet wird, sondern aufgrund ihrer Trägheit durchläuft. Andernfalls würde die Aufwärmphase zu lange dauern, um das Gebäude aufzuheizen. Das führt aber dazu, dass der Wärmeverbrauch insgesamt etwas höher liegt, sodass der Stromverbrauch – trotz höherer Jahresarbeitszahl – hier nur geringfügig von 2.502 Kilowattstunden pro Jahr auf 2.389 Kilowattstunden pro Jahr sinkt.

Damit sind Niedertemperaturradiatoren unter ansonsten gleichen Bedingungen hinsichtlich des Stromverbrauchs nur unwesentlich schlechter als Fußbodenheizungen. Für Bestandsgebäude sollte daher geprüft werden, inwieweit die Umstellung von Heizkörpern

auf Niedertemperaturradiatoren auf eine höhere Akzeptanz trifft als der Einbau von Fußbodenheizungen, um effiziente Wärmepumpensysteme zu ermöglichen.

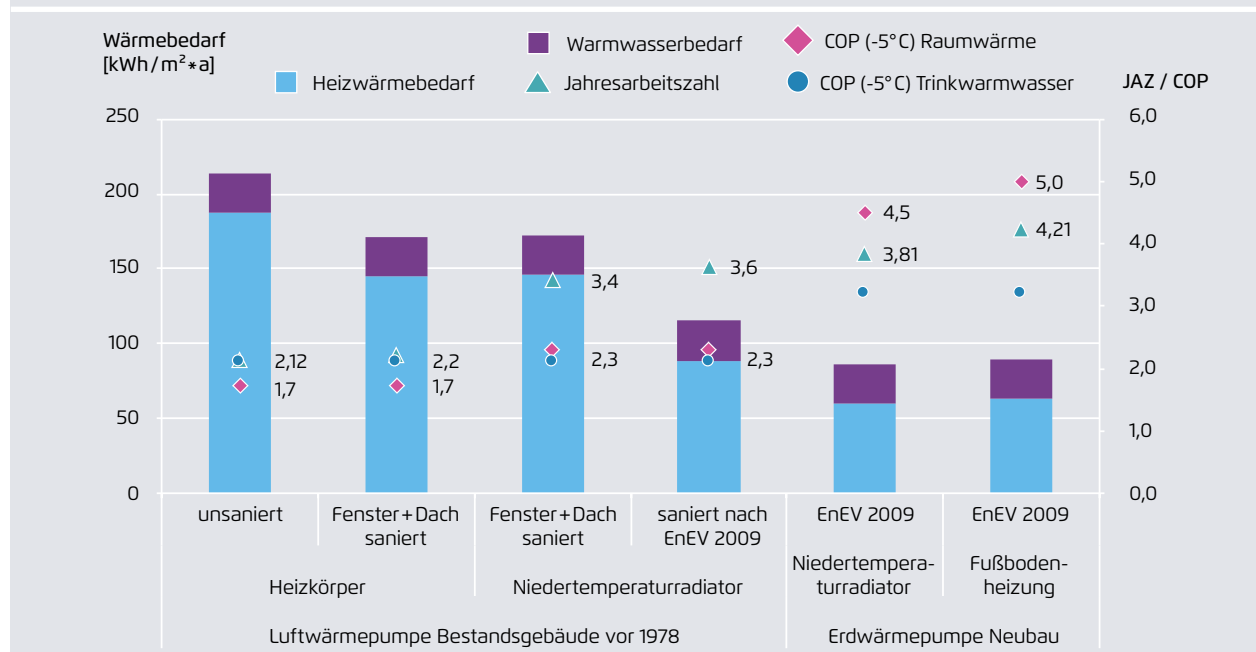
Weitere technische Alternativen zur reinen Luftwärmepumpe sind Kombinationen mit Eisspeichern, einfachen Solarabsorbern oder – im Gewerbebereich – mit Serverkühlung als Umweltwärmequelle sowie bivalente Wärmepumpensysteme.

Bivalente Wärmepumpensysteme

Bivalente Wärmepumpensysteme sind elektrisch betriebene Wärmepumpen in Kombination mit mindestens einem fossilen Wärmeerzeuger wie einem Gas- oder Ölkessel. Diese bieten den Vorteil, dass in Bestandsgebäuden effiziente und kostengünstige Systeme installiert werden können, welche für das Stromsystem den Vorteil aufweisen, dass sie die Höchstlast nicht erhöhen müssen. Bei Nachrüstlösungen werden bereits vorhandene fossile Wärmeer-

Effizienz von Luft- und Erd-Wärmepumpen im Einfamilienhaus im Vergleich für Bestandsgebäude und Neubau sowie der Art der Heizflächen

Abbildung 47



JAZ: Jahresarbeitszahl; COP: Coefficient of Performance

Fh-IBP – Simulationsergebnisse TRNSYS, eigene Darstellung

zeuger durch eine Wärmepumpe ergänzt.¹²⁶ Die Leistungsauslegung bei bivalenten Systemen ist derzeit abhängig von statischen Strom- und Gaspreisen. Im Anlageneinsatz wird normalerweise Strom bevorzugt. Moderne Regelsysteme können aber auch grenzkostenbasiert unter Berücksichtigung der Außentemperaturabhängigen Leistungszahl (COP) oder (zukünftig auch variabler Stromtarife) den Betriebspunkt anpassen. Hier sind Fragen der Anreize des Strommarktdesigns mit zukünftig hohen Preisspitzen in Zeiten sehr geringer Erneuerbare-Energien-Einspeisung und die Einbindung unterbrechbarer Verbraucher mit *Smart-Meter*-Verpflichtung nach §14a EnWG zu diskutieren. Wärmepumpen sind regelungstechnisch dazu in der Lage und entsprechend mit dem *Smart-Grid-(SG)-Ready*-Label gekennzeichnet. Wirtschaftlich betrachtet sind bivalente Wärmepumpensysteme auf Luft als Wärmequelle beschränkt, weil bei Erdwärmepumpen hohe Investitionen anfallen und die Sonde später bei einer Sanierung des Bestandsgebäudes überdimensioniert wäre. Grundsätzlich ist auch zu diskutieren, wie sich bei der Einführung von bivalenten Wärmepumpen *Lock-in*-Effekte vermeiden lassen. Als Brückentechnologie könnte eine Option hierfür sein, im Sinne eines Sanierungsfahrplans für das Gebäude die Maßnahmen der nächsten Dekaden zur Sanierung (Heizflächen, Fenster, Dach, Kellerdecke, Außenfassade) zu bilanzieren. Entsprechend könnte die Wärmepumpenleistung von vornherein verpflichtend so ausgelegt werden, dass im Sanierungsendzustand die Heizleistung dafür ausreicht, das Gebäude auch ohne Kessel zu versorgen. Dies gilt es in zukünftigen Arbeiten weiter zu untersuchen.

Erdwärmepumpen

Auch wenn es technische Optionen für effiziente Luftwärmepumpen gibt, unterstreicht der Szenarienvergleich die hohe Bedeutung der Erdwärmepumpe (siehe Abbildung 21). Dabei ist das theoretische Poten-

zial für Erdwärmepumpen im Wohngebäudebereich von der Gebäudedämmung und damit der Reduktion des Endenergieverbrauchs abhängig. Die tatsächliche Umsetzbarkeit ist an Wirtschaftlichkeit und Akzeptanz gebunden. Zudem bestehen heute wesentliche genehmigungsrechtliche Hemmnisse für Sondenbohrungen, die das Potenzial unnötig einschränken. Diese Hemmnisse sind stark vom jeweiligen Bundesland abhängig. So sind in manchen Bundesländern nur wassergeführte Bohrungen zulässig. Eine Beaufsichtigung der Bohrung muss stattfinden, und das Verfahren dauert bis zu einem halben Jahr, was vor allem für Unternehmen oft prohibitiv ist. Zudem bestehen oft individuelle Probleme mit der grundsätzlichen Genehmigung je nach regionaler Behörde.

Gaswärmepumpen

Gaswärmepumpen haben sich im Szenarienvergleich nicht oder kaum durchgesetzt.¹²⁷ Die Begründung ergibt sich aus den verfügbaren Alternativen¹²⁸: Gaswärmepumpen konkurrieren im Neubau – wo sie selbst effizient sind – mit hocheffizienten elektrischen Wärmepumpen. In Bestandsgebäuden – wo sie selbst ineffizient sind – konkurrieren sie mit Brennwärtekesseln. Des Weiteren können durch die im Vergleich zu Sondenwärmepumpen niedrigeren Bohrtiefen für Gaswärmepumpen *Lock-in*-Effekte auftreten. Da die Bohrung nach Ende der Lebenszeit einer Gaswärmepumpe nicht durch eine Stromerdwärmepumpe weitergenutzt werden kann, legt man sich langfristig auf Gas als Energieträger für den Wärmepumpenantrieb fest.

Ölheizungen

In den hier durchgeführten Sensitivitätsrechnungen für 2030 wurde zur Komplexitätsreduktion in der Modellierung des Zubaus neuer Heizungen die Option „Ölheizung“ nicht angeboten. Der Grund hierfür war eine Vorab-Prüfung, in deren Verlauf sich die Ölhei-

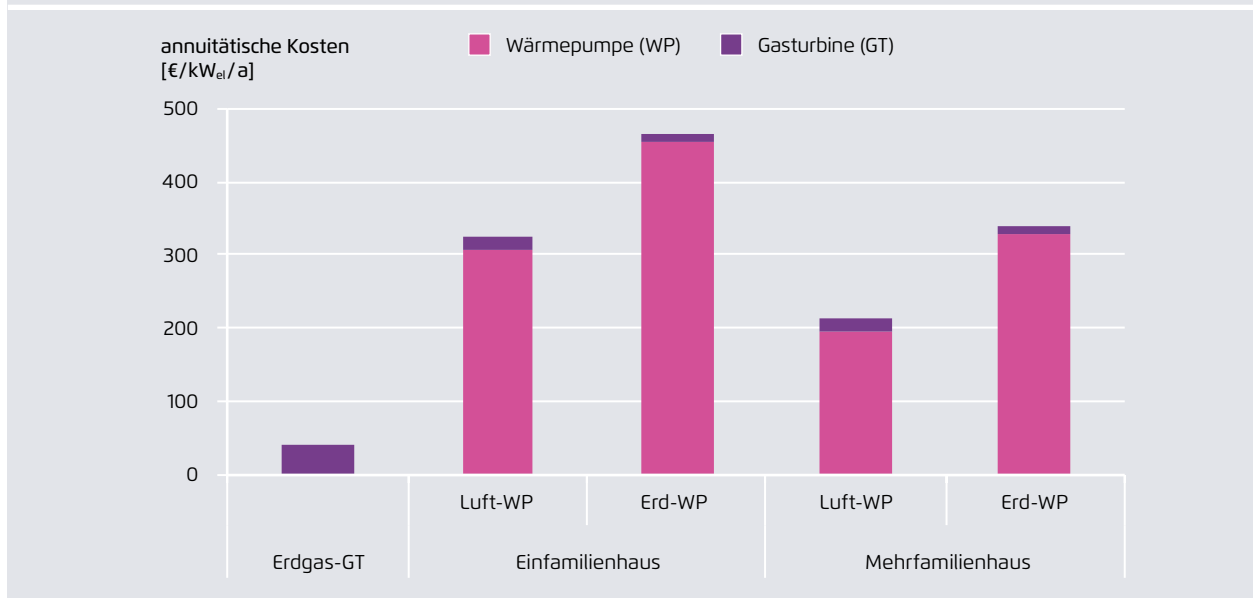
126 Alternativ dazu sind auch sogenannte Hybridgeräte erhältlich: Komplettlösungen, die beide Wärmerzeuger, den Regler und die hydraulischen Komponenten enthalten (BDH 2014).

127 Eine Ausnahme stellt das Szenario ISE 85 dar, in welchem der Anteil der Gaswärmepumpen an allen Anlagen bei mehr als 20 Prozent liegt (Fh-ISE 2015).

128 Fh-IWES et al. (2015)

Anteilig notwendige zusätzliche Gasturbinen zur Deckung der Spitzenlast in Euro pro Kilowatt_{elektrisch} und Jahr

Abbildung 48



Eigene Darstellung

zung als relativ chancenlos herausgestellt hatte. So haben Ölheizungen rund 30 Prozent höhere spezifische CO₂-Emissionen als Gasheizungen (DUH 2017). Unter den angesetzten CO₂-Restriktionen für das Gesamtsystem (55 Prozent Treibhausgasminderung insgesamt und 38 Prozent Treibhausgasminderung im Nicht-Emissionshandels-Sektor) wirkt sich dieser

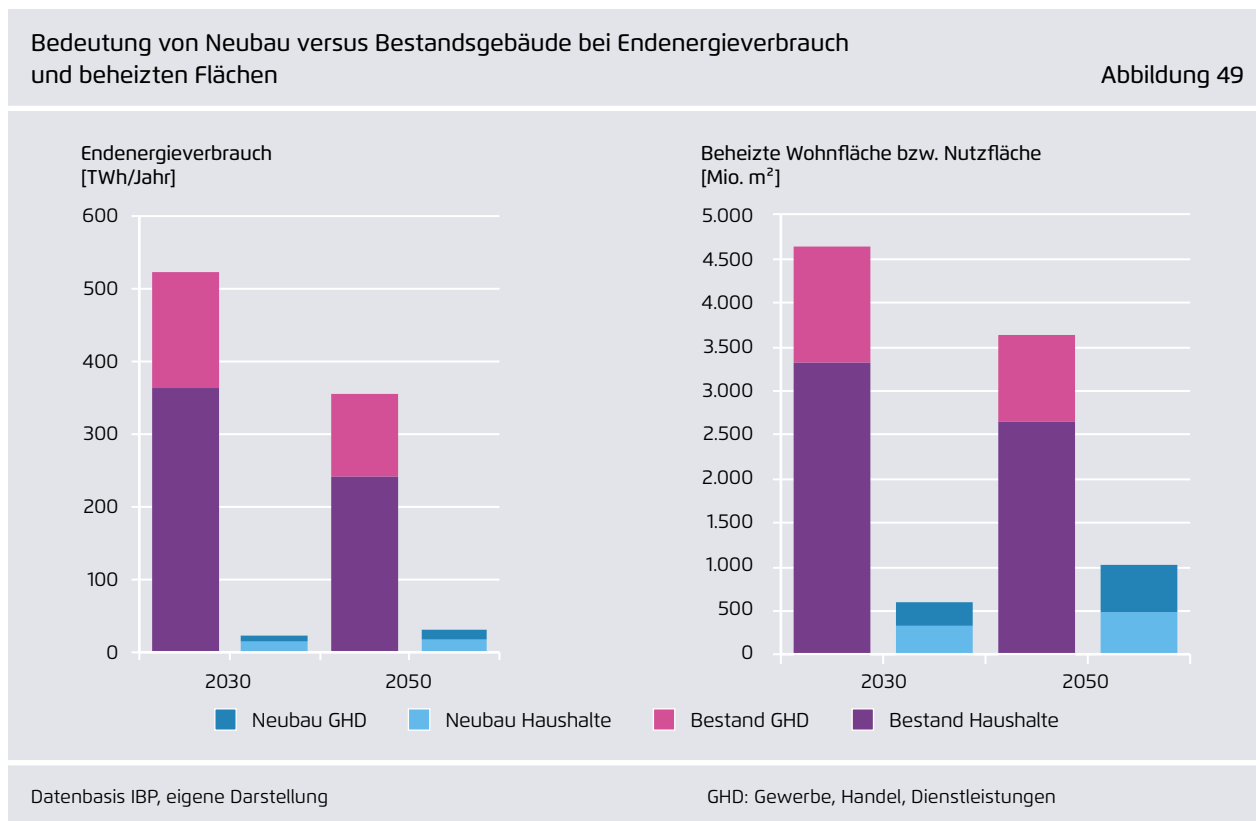
CO₂-Nachteil größtenteils prohibitiv aus. Die einzige diesbezügliche Unschärfe in den Modellergebnissen ergibt sich daraus, dass Ölheizungen in bivalenten Wärmepumpensystemen in gering sanierten Bestandgebäuden zum Einsatz kommen könnten. Diese Option wurde nicht vertieft untersucht. Angesichts der geringen Arbeitsanteile der fossilen Spitzenlast-

Gebäudeklassen in der Modellierung

Tabelle 5

Bezeichnung	Neubau	Einfamilienhäuser Bestand			Mehrfamilienhäuser Bestand			Gewerbe, Handel, Dienstleistungen				
	EFH0	EFH1	EFH2	EFH3	MFH1	MFH2	MFH3	GHD0	GHD1	GHD2	GHD3	GHD4
Klasse	Neubau (EFH/MFH)	EFH bis 1979	EFH 1979–1994	EFH 1995–2009	MFH bis 1979	MFH 1979–1994	MFH 1995–2009	Neubau GHD	Büro-ähnliche Betriebe	Handel, Textil, Bekleidung, Spedition	Beherbergung, Gaststätten, Heime	Krankenhäuser, Schulen, Bäder
Sanierung	EnEV 2009/ KfW 70/ KfW 55	ganz saniert + Einsatz NH	ganz saniert + Einsatz NH	EnEV 2009 Standard + FBH	ganz saniert + Einsatz NH	ganz saniert + Einsatz NH	EnEV 2009 Standard + FBH	EnEV 2009/ KfW 70/ KfW 55	tiefere energ. Sanierung Mind. EnEV 2009 + NH / Teils FBH + Sanierungsquote 2 Prozent			

Eigene Darstellung



kessel in bivalenten Wärmepumpensystemen kann dieser Effekt aber vernachlässigt werden.

7.3 Kosten zusätzlicher Gasturbinen zur Deckung der Spitzenlast

Die Investitionen in anteilig notwendige zusätzliche Gasturbinen zur Deckung der Spitzenlast sind gering im Vergleich zu den Investitionskosten für die dezentralen Wärmepumpen, wie Abbildung 48 zeigt.

7.4 Szenarioannahmen und Detailergebnisse zu Gebäuden

Die eigenen Modellrechnungen des Fraunhofer IWES basieren hauptsächlich auf den Eingangsdaten und Annahmen des Projektes „Interaktion EE-Strom, Wärme und Verkehr“ (Fh-IWES et al. 2015). Die modellierten Gebäude in den Bereichen Haushalte und Gewerbe lassen sich in zwölf Klassen unterteilen (Tabelle 5).

Die begrenzte Bedeutung des Neubaubereichs zur Erreichung der Klimaziele wird im Vergleich der beheizten Flächen deutlich (Abbildung 49). Langfristig ist hier insbesondere im Gewerbebereich aufgrund der hohen Abrissrate mit einem stärkeren Anteil von Neubau zu rechnen (circa 35 Prozent im GHD-Sektor gegenüber 16 Prozent bei den Haushalten), bei gleichbleibenden oder sogar ansteigenden Flächen, während im Wohngebäudebereich aufgrund von demografischem Wandel und Urbanisierung auch Szenarien mit rückläufigem Flächenbedarf denkbar sind.

Literaturverzeichnis

- AEE (2016): *Die kommunale Wärmeplanung. Ein wichtiger Treiber der Energiewende*. Renew's Spezial, Nr. 79, November 2016, Agentur für Erneuerbare Energien, www.unendlich-viel-energie.de/media/file/531.79_Renews_Spezial_Waermeplanung_Nov2016.pdf
- AGEB (2013): *Anwendungsbilanzen für die Endenergiesektoren in Deutschland in den Jahren 2011 und 2012 mit Zeitreihen von 2008 bis 2012*. AG Energiebilanzen e.V.
- BDEW (2015): *Primärenergiefaktoren. Der Zusammenhang von Primärenergie und Endenergie in der energetischen Bewertung*
- BDEW et al. (2016): *Dekarbonisierung mit Gas – Gas kann grün*. Gemeinsamer Appell der Gaswirtschaft zum Klimaschutzplan 2050: 31. Oktober 2016, Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V., [www.bdew.de/internet.nsf/id/A53C36647CA2AB63C125805D0031ADDA/\\$file/161028_KSP_AppellProzent20derProzent20Gaswirtschaft_final.pdf](http://www.bdew.de/internet.nsf/id/A53C36647CA2AB63C125805D0031ADDA/$file/161028_KSP_AppellProzent20derProzent20Gaswirtschaft_final.pdf)
- BDH (2014): *Bivalente Wärmepumpen-Systeme*. Informationsblatt Nr. 57. März 2014. Bundesindustrieverband Deutschland Haus-, Energie- und Umwelttechnik e. V. www.bdh-koeln.de/fileadmin/user_upload/Publicationen/Infoblaetter/Infoblatt_Nr_57_Bivalente_Waermepumpensysteme.pdf
- BMWi (2015): *Energieeffizienzstrategie Gebäude. Wege zu einem nahezu klimaneutralen Gebäudebestand*
- BMWi (2016): *Energiedaten*. Nationale und Internationale Entwicklung, Endenergieverbrauch nach Anwendungsbereichen I und II, Deutschland, AG Energiebilanzen, Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
- Bundesregierung (2016): *Klimaschutzplan 2050. Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung*, November 2016
- BVU et al. (2014): *Verkehrsverflechtungsprognose 2030*. Schlussbericht. 11. Juni 2014, BVU, Intraplan, IVV, Planco, im Auftrag des Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur
- BWP (2016): *BWP-Branchenstudie 2015*. Szenarien und politische Handlungsempfehlungen. www.waermepumpe.de/presse/pressemitteilungen/details/details/bwp-branchenprognose-2030-die-waermewende-zwischen-klimazielen-modernisierungsstau-und-oelpreisschock/
- COM (2016): *European Commission – Fact Sheet. Factsheet on the Commission's proposal on binding greenhouse gas emission reductions for Member States (2021-2030)*, Brussels, 20 July 2016, http://europa.eu/rapid/press-release_MEMO-16-2499_en.htm
- Deinhardt, A. (2016): *Tiefengeothermie – Vortrag des Bundesverband Geothermie e.V. im Rahmen des Expertenworkshops zum Projekt Sektorübergreifende Energiewende (04.07.2016)*
- dena (2016): *Potenzialatlas Power to Gas. Klimaschutz umsetzen, erneuerbare Energien integrieren, regionale Wertschöpfung ermöglichen*. Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), Juni 2016
- DIW (2015): *Elektromobilität in Deutschland: CO₂-Bilanz hängt vom Ladestrom ab*, in: DIW Wochenbericht 10.2015. Speicher und Elektrofahrzeuge im Stromsystem
- DUH (2017): *Sektorenkopplung. Klimaschutz mit Strom für Wärme und Verkehr*. Hintergrundpapier. Stand 10.1.2017. Deutsche Umwelthilfe.
- E-Bridge et al. (2014): *Moderne Verteilernetze für Deutschland (Verteilernetzstudie)*, Abschlussbericht, im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi)

Ecofys et al. (in Arbeit, 2017): *Smart Market Design in deutschen Verteilnetzen*, Ecofys, Fh- IWES, im Auftrag von Agora Energiewende, www.agora-energiewende.de/de/projekte/-agothem-/Projekt/projektdetail/132/Konzepte+und+Roadmap+f+ProzentC3+ProzentBCr+Smart+Markets/

enervis energy advisors (2015): *Der Klimaschutzbeitrag des Stromsektors bis 2040. Entwicklungspfade für die deutschen Kohlekraftwerke und deren wirtschaftliche Auswirkungen*. Studie im Auftrag von Agora Energiewende

FENES et al. (2014): *Stromspeicher in der Energiewende. Untersuchung zum Bedarf an neuen Stromspeichern in Deutschland für den Erzeugungsausgleich, Systemdienstleistungen und im Verteilnetz*, im Auftrag von Agora Energiewende, www.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2013/speicher-in-der-energiewende/Agora_Speicherstudie_Web.pdf

FENES et al. (2015): *Bedeutung und Notwendigkeit von Windgas für die Energiewende in Deutschland*, Forschungsstelle Energienetze und Energiespeicher (FENES) OTH Regensburg, Energy Brainpool, Studie im Auftrag von Greenpeace Energy, Regensburg/Hamburg/Berlin, www.greenpeace-energy.de/fileadmin/docs/pressematerial/Windgas-Studie_2015_FENES_GPE_lang.pdf

Fh-IBP et al. (2015): *Wärmewende im Quartier*. In: *Forschung für die Wärmewende*. Tagungsband zur FVEE-Jahrestagung 2015, www.fvee.de/fileadmin/publikationen/Themenhefte/th2015/th2015_05_04.pdf

Fh-ISE (2015): *Was kostet die Energiewende? Wege zur Transformation des deutschen Energiesystems bis 2050*. www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Fraunhofer-ISE-Studie-Was-kostet-die-Energiewende.pdf

Fh-ISI et al. (2016): *Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland. Zusammenfassung bisheriger Ergebnisse*. Präsentation vom 20. September 2016, Berlin. Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung, Consentec, ifeu, www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/P-R/presentation_strom_2030_03.pdf?__blob=publicationFile&v=3

Fh-IWES (2015a): *Wie hoch ist der Stromverbrauch in der Energiewende? Energiepolitische Zielszenarien 2050 – Rückwirkungen auf den Ausbaubedarf von Windenergie und Photovoltaik*. Fraunhofer IWES, im Auftrag von Agora Energiewende. www.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2015/Stromverbrauch_in_der_Energiewende/086_IWES_Szenarienvergl_dt_WEB.pdf

Fh-IWES (2015b): *The European Power System in 2030: Flexibility Challenges and Integration Benefits*. Im Auftrag von Agora Energiewende. www.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2014/Ein-flexibler-Strommarkt-2030/Agora_European_Flexibility_Challenges_Integration_Benefits_WEB_Rev1.pdf

Fh-IWES (2016): *SCOPE. Sektorübergreifende Einsatz- und Ausbauoptimierung für Analysen des zukünftigen Energiesystems*. www.energiesystemtechnik.iwes.fraunhofer.de/content/dam/iwes-neu/energiesystemtechnik/de/Dokumente/Broschueren/2015_F_SCOPE_web.pdf

Fh-IWES et al. (2015): *Interaktion EE-Strom, Wärme und Verkehr*. Analyse der Interaktion zwischen den Sektoren Strom, Wärme/Kälte und Verkehr in Deutschland in Hinblick auf steigende Anteile fluktuierender Erneuerbarer Energien im Strombereich unter Berücksichtigung der europäischen Entwicklung. www.energiesystemtechnik.iwes.fraunhofer.de/de/presse-infothek/Presse-Medien/Pressemitteilungen/2015/presseinfo_interaktion-eestrom-waerme-verkehr.html

- IEA (2015): *World Energy Outlook 2015*, International Energy Agency, Paris
- ifeu (2012): *Nutzung von Strom aus erneuerbaren Energien in Wärmeanwendungen Strategie- und Diskussionspapier*, Institut für Energie- und Umweltforschung. Im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
- ifeu (2015): *Wärmewende in Kommunen. Leitfaden für den klimafreundlichen Umbau der Wärmeversorgung*. Im Auftrag der Heinrich-Böll-Stiftung, www.boell.de/de/2015/09/30/waermewende-kommunen
- ifeu (2016): *Wie sieht der Wärmemix der Zukunft aus? Optionspfade und Abhängigkeiten*. Präsentation von Peter Mellwig, Berliner Energietage 2016, www.energietage.de/fileadmin/user_upload/2016/Vortragsfolien/312_Mellwig_Waermemix_Zukunft_Energietage2016.pdf
- LBD Beratungsgesellschaft mbH (2015): *Die Rolle der Kraft-Wärme-Kopplung in der Energiewende*. Studie im Auftrag von Agora Energiewende, www.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2014/perspektiven-der-kwk/Agora_KWK_web.pdf
- Nymoen, ifeu (2014): *Stromheizungen als EE-Heizung und Flexibilitätsoption?* Analysepapier zur Beurteilung von Power to Heat im privaten Heizungsmarkt, 06. Februar 2014, Im Auftrag der Gas-Union GmbH und des Zukunft Erdgas e.V., nymoen Strategieberatung, Institut für Energie- und Umweltforschung (ifeu)
- Öko-Institut et al. (2015): *Klimaschutzszenario 2050*, 2. Modellierungsrunde, www.oeko.de/oekodoc/2451/2015-608-de.pdf
- Öko-Institut et al. (2016a): *Assessing the status of electrification of the road transport passenger vehicles and potential future implications for the environment and European energy system*. Im Auftrag der European Environment Agency
- Öko-Institut et al. (2016b): *Überblick über vorliegende Szenarienarbeiten für den Klimaschutz in Deutschland bis 2050*. Überarbeitete Fassung vom Juni 2016. Siehe auch: *Sektorale Emissionspfade in Deutschland bis 2050 – Gebäudesektor und Stromverbrauch Privathaushalte*. 15.06.2016
- Prognos et al. (2014): *Entwicklung der Energiemärkte – Energiereferenzprognose* www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Studien/entwicklung-der-energiemaerkte-energiereferenzprognose-endbericht.pdf?__blob=publication-File&v=7
- Prognos et al. (2015a): *Potenzial- und Kosten-Nutzen-Analyse zu den Einsatzmöglichkeiten von Kraft-Wärme-Kopplung (Umsetzung der EU-Energieeffizienzrichtlinie) sowie Evaluierung des KWKG im Jahr 2014*. Prognos, IFAM, IREES
- Prognos et al. (2015b): *Datenbasis Endenergieverbrauch Energieeffizienz in der Zeitreihe: Ergebnistabellen für die Jahre 2005–2013, 2015* (unveröffentlicht), Prognos AG, Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung, (ISI), TU München, zitiert in BMWi (2015): *Zweiter Erfahrungsbericht zum Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz*. Die Entwicklung des Wärme- und Kältemarktes in Deutschland, www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/Publikationen/zweiter-erfahrungsbericht-erneuerbare-energien-waermegesetz,property=pdf,bereich=bmwi2012,sprache=de,rwb=true.pdf
- Prognos, ifeu, IWU (2015): *Hintergrundpapier zur Energieeffizienzstrategie Gebäude*, erstellt im Rahmen der Wissenschaftlichen Begleitforschung zur Erarbeitung einer Energieeffizienzstrategie Gebäude, im Auftrag der Bundesstelle für Energieeffizienz
- SPD et al. (2016): *Koalitionsvereinbarung zwischen Sozialdemokratische Partei Deutschlands (SPD),*

Landesverband Berlin, und DIE LINKE, Landesverband Berlin, und BÜNDNIS 90/ Die Grünen, Landesverband Berlin, für die Legislaturperiode 2016-2021

UBA (2014): *Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger, Bestimmung der vermiedenen Emissionen im Jahr 2013*, Climate Change 29/2014, Umweltbundesamt

UBA (2015): *Projektionsbericht 2015 gemäß Verordnung 525/2013/EU (Emissions-Projektionsbericht)*. [www.bmub.bund.de/themen/klima-energie/klimaschutz/klima-klimaschutz-download/artikel/projektionsbericht-der-bundesregierung-2015/?tx_ttnews\[backPid\]=933](http://www.bmub.bund.de/themen/klima-energie/klimaschutz/klima-klimaschutz-download/artikel/projektionsbericht-der-bundesregierung-2015/?tx_ttnews[backPid]=933)

UBA (2016a): *Nationaler Inventarbericht National Inventory Report (NIR) / Nationale Trendtabellen für die deutsche Berichterstattung atmosphärischer Emissionen*. Umweltbundesamt.

UBA (2016b): *Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 bis 2015*, Climate Change 26/2016, Umweltbundesamt

VDE (2015): *Potenziale für Strom im Wärmemarkt bis 2050. Wärmeversorgung in flexiblen Energieversorgungssystemen mit hohen Anteilen an erneuerbaren Energien*. ETG Task Force Wärmemarkt. Juni 2015.

von Oehsen et al. (2015): *Benötigt man zeitlich aufgelöste Stromprimärenergiefaktoren in der Energiesparverordnung?* Energiewirtschaftliche Tagesfragen 64. Jg (2014) Heft 11

Publikationen von Agora Energiewende

AUF DEUTSCH

FAQ EEG – Energiewende: Was bedeuten die neuen Gesetze?

Zehn Fragen und Antworten zu EEG 2017, Strommarkt- und Digitalisierungsgesetz

Eigenversorgung aus Solaranlagen

Das Potenzial für Photovoltaik-Speicher-Systeme in Ein- und Zweifamilienhäusern, Landwirtschaft sowie im Lebensmittelhandel

Elf Eckpunkte für einen Kohlekonsens

Konzept zur schrittweisen Dekarbonisierung des deutschen Stromsektors
(Lang- und Kurzfassung)

Der Klimaschutzbeitrag der Stromsektors bis 2040

Entwicklungspfade für die deutschen Kohlekraftwerke und deren wirtschaftliche Auswirkungen

Wie hoch ist der Stromverbrauch in der Energiewende?

Energiepolitische Zielszenarien 2050 - Rückwirkungen auf den Ausbaubedarf von Windenergie und Photovoltaik

Ein Kraftwerkspark im Einklang mit den Klimazielen

Handlungslücke, Maßnahmen und Verteilungseffekte bis 2020

Transparenzdefizite der Netzregulierung

Bestandsaufnahme und Handlungsoptionen

Die Entwicklung der EEG-Kosten bis 2035

Wie der Erneuerbaren-Ausbau entlang der langfristigen Ziele der Energiewende wirkt

Aktionsplan Lastmanagement

Endbericht einer Studie von Connect Energy Economics

Die Sonnenfinsternis 2015: Vorschau auf das Stromsystem 2030

Herausforderungen für die Stromversorgung in Systemen mit hohen Anteilen an Wind- und Solarenergie

Die Rolle des Emissionshandels in der Energiewende

Perspektiven und Grenzen der aktuellen Reformvorschläge

Netzentgelte in Deutschland

Herausforderungen und Handlungsoptionen

Erneuerbare-Energien-Gesetz 3.0

Konzept einer strukturellen EEG-Reform auf dem Weg zu einem neuen Strommarktdesign

Publikationen von Agora Energiewende

Stromspeicher in der Energiewende

Untersuchung zum Bedarf an neuen Stromspeichern in Deutschland für den Erzeugungsausgleich, Systemdienstleistungen und im Verteilnetz

Energieeffizienz als Geschäftsmodell

Ein Umsetzungsmodell für Artikel 7 der europäischen Effizienzrichtlinie

Power-to-Heat zur Integration von ansonsten abgeregeltem Strom aus Erneuerbaren Energien

Handlungsvorschläge basierend auf einer Analyse von Potenzialen und energiewirtschaftlichen Effekten

Positive Effekte von Energieeffizienz auf den deutschen Stromsektor

Endbericht einer Studie von der Prognos AG und dem Institut für Elektrische Anlagen und Energiewirtschaft (IEAW)

12 Thesen zur Energiewende

Ein Diskussionsbeitrag zu den wichtigsten Herausforderungen im Strommarkt, (Lang- und Kurzfassung)

AUF ENGLISCH

FAQ EEG - Energiewende: What do the new laws mean?

Ten questions and answers about EEG 2017, the Electricity Market Act, and the Digitisation Act

Reducing the cost of financing renewables in Europe

A proposal for an EU Renewable Energy Cost Reduction Facility („RES-CRF“)

Refining Short-Term Electricity Markets to Enhance Flexibility

Stocktaking as well as Options for Reform in the Pentalateral Energy Forum Region

Energy Transition in the Power Sector in Europe: State of Affairs in 2015

Review on the developments in 2015 and outlook on 2016

A Pragmatic Power Market Design for Europe's Energy Transition

The Power Market Pentagon

Eleven Principles for a Consensus on Coal

Concept for a stepwise decarbonisation of the German power sector (Short Version)

The Integration Costs of Wind and Solar Power

An Overview of the Debate of the Effects of Adding Wind and Solar Photovoltaics into Power Systems

Alle Publikationen finden Sie auf unserer Internetseite: www.agora-energiewende.de

Wie gelingt uns die Energiewende?

Welche konkreten Gesetze, Vorgaben und Maßnahmen sind notwendig, um die Energiewende zum Erfolg zu führen? Agora Energiewende will helfen, den Boden zu bereiten, damit Deutschland in den kommenden Jahren die Weichen richtig stellt. Wir verstehen uns als Denk- und Politiklabor, in dessen Mittelpunkt der Dialog mit den relevanten energiepolitischen Akteuren steht.



Agora Energiewende

Anna-Louisa-Karsch-Straße 2 | 10178 Berlin

T +49 (0)30 700 14 35-000

F +49 (0)30 700 14 35-129

www.agora-energiewende.de

info@agora-energiewende.de

