

Roth, Alexander et al.

Article

Wärmepumpen statt Erdgasheizungen: Umstieg durch Ausbau der Solarenergie unterstützen

DIW Wochenbericht

Provided in Cooperation with:

German Institute for Economic Research (DIW Berlin)

Suggested Citation: Roth, Alexander et al. (2022) : Wärmepumpen statt Erdgasheizungen: Umstieg durch Ausbau der Solarenergie unterstützen, DIW Wochenbericht, ISSN 1860-8787, Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung (DIW), Berlin, Vol. 89, Iss. 22, pp. 311-320, https://doi.org/10.18723/diw_wb:2022-22-1

This Version is available at:

<https://hdl.handle.net/10419/260554>

Standard-Nutzungsbedingungen:

Die Dokumente auf EconStor dürfen zu eigenen wissenschaftlichen Zwecken und zum Privatgebrauch gespeichert und kopiert werden.

Sie dürfen die Dokumente nicht für öffentliche oder kommerzielle Zwecke vervielfältigen, öffentlich ausstellen, öffentlich zugänglich machen, vertreiben oder anderweitig nutzen.

Sofern die Verfasser die Dokumente unter Open-Content-Lizenzen (insbesondere CC-Lizenzen) zur Verfügung gestellt haben sollten, gelten abweichend von diesen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Terms of use:

Documents in EconStor may be saved and copied for your personal and scholarly purposes.

You are not to copy documents for public or commercial purposes, to exhibit the documents publicly, to make them publicly available on the internet, or to distribute or otherwise use the documents in public.

If the documents have been made available under an Open Content Licence (especially Creative Commons Licences), you may exercise further usage rights as specified in the indicated licence.

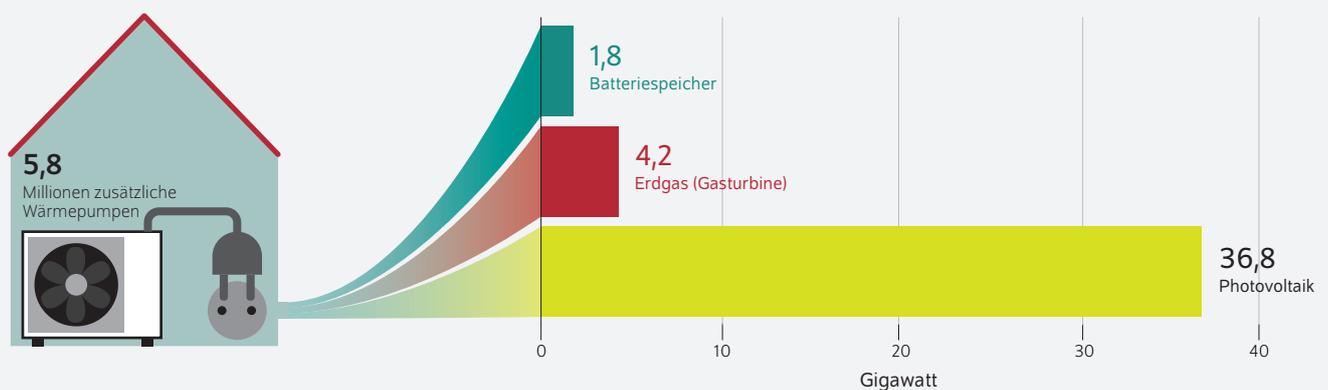
AUF EINEN BLICK

Wärmepumpen statt Erdgasheizungen: Umstieg durch Ausbau der Solarenergie unterstützen

Von Alexander Roth, Carlos Gaete-Morales, Adeline Guéret, Dana Kirchem, Martin Kittel und Wolf-Peter Schill

- Mit stärkerer Nutzung von Wärmepumpen können nicht nur CO₂-Emissionen reduziert, sondern auch Erdgasimporte eingespart werden
- Um den zusätzlichen Strombedarf nachhaltig zu decken, müssen allerdings die erneuerbaren Energien ausgebaut werden
- Modellrechnungen für das Jahr 2030 zeigen, was im Stromsektor passieren muss, um eine Umstellung auf Wärmepumpen zu bewerkstelligen
- Die mit der Umstellung verbundenen Kosten sind aus gesamtwirtschaftlicher Sicht gering, bei hohen Erdgaspreisen ergeben sich sogar Einsparungen
- Die Politik sollte den Umbau mit einem ambitionierten und koordinierten Programm vorantreiben

Erhöhung der Kraftwerksleistung zur Deckung des Strombedarfs von zusätzlichen Wärmepumpen im Jahr 2030¹



Quelle: Eigene Berechnungen mit dem quelloffenen Stromsektormodell DIETER. ¹ Im Vergleich zum Referenzszenario mit 1,7 Millionen Wärmepumpen. © DIW Berlin 2022

ZITAT

Wärmepumpen können nicht nur helfen, den CO₂-Ausstoß zu verringern und die Abhängigkeit von russischen Erdgasimporten zu reduzieren; bei anhaltend hohen Erdgaspreisen senken sie auch die volkswirtschaftlichen Kosten.

— Alexander Roth —

MEDIATHEK



Nachgeforscht mit Wolf-Peter Schill
www.diw.de/mediathek

Wärmepumpen statt Erdgasheizungen: Umstieg durch Ausbau der Solarenergie unterstützen

Von Alexander Roth, Carlos Gaete-Morales, Adeline Guéret, Dana Kirchem, Martin Kittel und Wolf-Peter Schill

ABSTRACT

Die verstärkte Nutzung von Wärmepumpen ist eine wichtige Maßnahme zur Senkung der CO₂-Emissionen im Wärmesektor. Zudem können Wärmepumpen dazu beitragen, die Importe von Erdgas zu reduzieren. Mit Hilfe eines Stromsektormodells werden die Auswirkungen eines beschleunigten Ausbaus von Wärmepumpen auf den deutschen Stromsektor untersucht. Knapp sechs Millionen zusätzliche Wärmepumpen würden den Strombedarf im Jahr 2030 um neun Prozent erhöhen. Um diesen mit Solarenergie zu decken, wäre eine Erweiterung der Photovoltaik-Kapazitäten um 23 Prozent notwendig. Die Erdgasimporte könnten dadurch um 15 Prozent gesenkt werden. Aus gesamtwirtschaftlicher Sicht wird eine deutlich stärkere Nutzung von Wärmepumpen immer vorteilhafter, je höher der Erdgaspreis ist. Ein schneller Umstieg auf Wärmepumpen erfordert allerdings die Unterstützung durch ein ambitioniertes und koordiniertes Programm der Politik, das auch den Ausbau von Produktionskapazitäten für Wärmepumpen und die Qualifizierung von Fachkräften im Blick hat – eine Art „Apollo-Programm“ für Wärmepumpen.

Infolge des russischen Angriffskriegs gegen die Ukraine streben sowohl Deutschland als auch die EU an, die Abhängigkeit von russischen Energieimporten schnell, aber auch nachhaltig zu reduzieren.¹ Dabei kommt dem Erdgas eine besondere Rolle zu. Zum einen sind die Pipeline-basierten Erdgasimporte kurzfristig schwerer zu ersetzen als andere, von dort importierte Energieträger.² Zum anderen ist die Bedeutung Russlands für die deutsche Gasversorgung enorm.³

Erdgas spielt eine zentrale Rolle in der deutschen Energieversorgung. Im Jahr 2021 hatte Erdgas einen Anteil am Primärenergieverbrauch von knapp 27 Prozent.⁴ Neben der Industrie (37 Prozent des deutschen Erdgasabsatzes im Jahr 2021) wird Erdgas vor allem von Privathaushalten zur Bereitstellung von Raumwärme genutzt (31 Prozent). Jeweils neun Prozent fließen in die Kälte- und Fernwärme- sowie in die Stromversorgung.⁵

Der Austausch von Gasheizungen durch Wärmepumpen – im Hinblick auf den Klimaschutz ohnehin sinnvoll – kann daher einen wichtigen Beitrag leisten, langfristig die Abhängigkeit von Erdgasimporten zu verringern. Jedoch geht dieser Umstieg mit einem höheren Stromverbrauch einher. Mit Hilfe eines am DIW Berlin entwickelten Open-Source-Stromsektormodells wird untersucht, welche Auswirkungen eine stärkere Nutzung von Wärmepumpen in Deutschland auf

¹ Vgl. Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (2022): Versorgungssicherheit stärken – Abhängigkeiten reduzieren. Aktualisierter Überblick, Berlin, 17.03.2022 (online verfügbar, abgerufen am 13. Mai 2022). Dies gilt auch für alle anderen Online-Quellen dieses Berichts, sofern nicht anders vermerkt.; Europäische Kommission (2022): REPowerEU: gemeinsames europäisches Vorgehen für erswinglichere, sichere und nachhaltige Energie, Straßburg, 08.03.2022, COM(2022) 108 final (online verfügbar).

² Vgl. Franziska Holz et al. (2022): Europa kann die Abhängigkeit von Russlands Gaslieferungen durch Diversifikation und Energiesparen senken. DIW aktuell 81 (online verfügbar); Franziska Holz et al. (2022): Energieversorgung in Deutschland auch ohne Erdgas aus Russland gesichert. DIW aktuell 83 (online verfügbar).

³ Deutschland ist ein Gas-Transitland; importiertes Erdgas wird teilweise in Nachbarländer weitergeleitet. Vgl. die laufend aktualisierte Darstellung im KoaVTracker des DIW Berlin (online verfügbar).

⁴ Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen (2022): Energieverbrauch in Deutschland im Jahr 2021. Stand: 22. Februar 2022 (online verfügbar).

⁵ Eigene Berechnung auf Basis von Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen (2022), a. a. O.

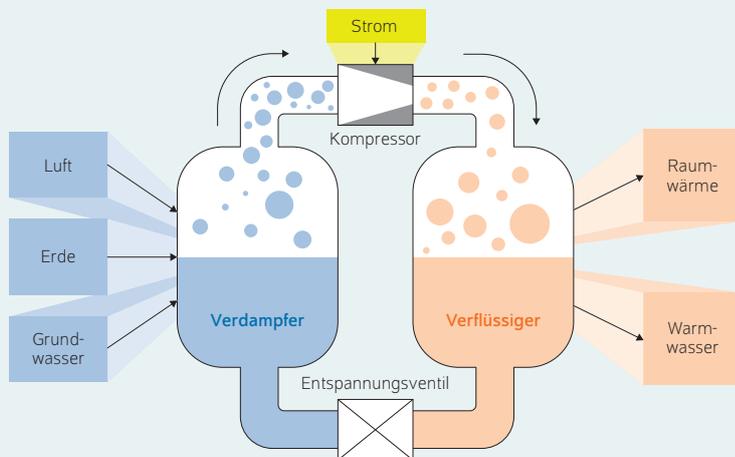
Kasten 1

Funktionsweise von Wärmepumpen

Eine Wärmepumpe entzieht Wärme aus der Umgebung eines Gebäudes und gibt diese im Gebäudeinneren auf einem höherem Temperaturniveau als Heizenergie wieder ab. Damit funktioniert sie im Grunde wie ein umgekehrter Kühlschrank, der seinem Inneren Wärme entzieht und diese an die Umgebung abgibt. Eine Wärmepumpe besteht aus vier Elementen (Abbildung): einem Kompressor, zwei Wärmetauschern (ein Verflüssiger und ein Verdampfer) und einem Entspannungsventil. Diese bilden einen Kreislauf, durch den ein Kühlmittel zirkuliert, das einen niedrigen Siedepunkt hat. Trifft Wärmeenergie von außen auf den Verdampfer, überträgt sich diese Energie auf das Kühlmittel und es verdampft. Der Kältemitteldampf gelangt zum Kompressor, der mit Strom betrieben wird. Durch die Verdichtung des Gases steigt dessen Temperatur auf ein für die Raumwärmebereitstellung nutzbares Niveau. Dem komprimierten, wärmeren Dampf wird dann in dem zweiten Wärmetauscher, dem Verflüssiger, durch Kondensation wieder Wärme entzogen. Sie kann dann im Gebäude über ein Leitungssystem verteilt werden. Zuletzt trifft das flüssige Kältemittel auf ein Entspannungsventil, in dem der Druck wieder verringert wird. Nun beginnt der Kreislauf von Neuem.

Abbildung

Schematische Darstellung



Anmerkung: Blau steht für ein niedrigeres, rot für ein höheres Temperaturniveau.

Quelle: Eigene Darstellung.

© DIW Berlin 2022

Wärmepumpen ermöglichen es, Umweltwärme auf ein für die Raumheizung nutzbares Temperaturniveau zu heben.

den Stromsektor im Jahr 2030 hat.⁶ Außerdem werden die durch Wärmepumpen bedingten Zusatzkosten im Stromsektor mit den eingesparten Kosten für Erdgasheizungen verglichen.

Derzeit kräftiges Wachstum bei Wärmepumpen, aber von niedrigem Niveau aus

Die Hälfte aller deutschen Wohnungen wird derzeit mit Erdgas beheizt, nur rund drei Prozent mit Wärmepumpen.⁷ Bei neugebauten Wohnungen verliert Erdgas allerdings zunehmend an Bedeutung: im Jahr 2021 wurden nur noch in knapp 27 Prozent Gasthermen eingebaut. Demgegenüber nahm die Bedeutung von Wärmepumpen in den vergangenen Jahren immer weiter zu; im Jahr 2021 wurden sie in knapp 44 Prozent der neugebauten Wohnungen installiert.⁸

Wärmepumpen stellen Raumwärme bereit, indem sie dem Erdreich, unterirdischen Wasservorkommen oder der Luft Umweltwärme entziehen und mit Hilfe von elektrischem Strom auf ein höheres, zum Heizen nutzbares Temperaturniveau bringen (Kasten 1). Ihre Nutzung gilt in Kombination mit der energetischen Gebäudesanierung in vielen Zukunftsszenarien als eine wesentliche Strategie, um den Erdgasverbrauch im Wärmesektor zu verringern und um

Treibhausgasemissionen in diesem Bereich zu reduzieren.⁹ Die Nutzungsmöglichkeiten anderer erneuerbarer Wärmeerzeuger wie der Bioenergie bleiben aufgrund von Ressourcenpotenzialen begrenzt, und reine Stromheizungen sind deutlich weniger energieeffizient als Wärmepumpen. In urbanen Räumen kann auch die Fernwärme aus erneuerbaren Energien eine wichtige Rolle spielen. In Fernwärmesystemen können auch Großwärmepumpen zum Einsatz kommen.

Die deutsche Politik hat die Wärmepumpe bereits als Schlüsseltechnologie für den Klimaschutz im Wärmesektor identifiziert. Im Jahr 2021 lag die Zahl der installierten Wärmepumpen in Deutschland bei rund 1,4 Millionen.¹⁰ In der „Eröffnungsbilanz Klimaschutz“ des Bundeswirtschaftsministeriums wird für das Jahr 2030 ein Korridor von 4,1 bis 6 Millionen installierter Wärmepumpen genannt. Diese Zahl leitet sich aus aktuellen Klimaschutzenszenarien ab (Abbildung 1). Gemeint sind dabei im Wesentlichen Wärmepumpen zur Bereitstellung von Raumwärme und Warmwasser in Ein- und Zweifamilienhäusern.¹¹

⁶ Die Analyse wurde im vom BMBF geförderten Forschungsprojekt Ariadne durchgeführt, FKZ 03SFK5N0.

⁷ Im Jahr 2020 wurden nach Angaben des BDEW in 49,5 Prozent aller Wohnungen in Gebäuden mit Wohnraum, in denen eine Heizung vorhanden ist, mit Erdgas geheizt. Vgl. Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen (2022): Erdgasdaten 2021 (online verfügbar).

⁸ Vgl. Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen (2022), a.a.O.

⁹ Stiftung Klimaneutralität et al. (2022): Vergleich der „Big 5“ Klimaneutralitätsszenarien. 16.3.2022. (online verfügbar).

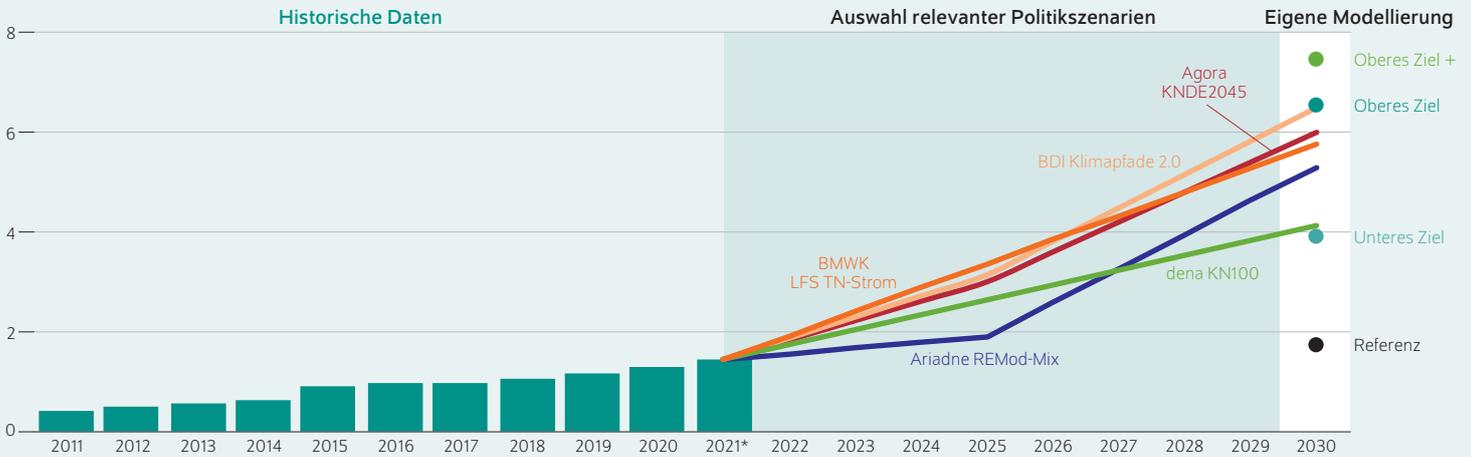
¹⁰ Vgl. die Darstellung im KoaVTracker des DIW Berlin (online verfügbar).

¹¹ Darüber hinaus können Hochtemperaturwärmepumpen auch für Prozesswärme in der Industrie genutzt werden. Vgl. Silvia Madeddu et al. (2020): The CO₂ reduction potential for the European industry via direct electrification of heat supply (power-to-heat). Environmental Research Letters 15 (online verfügbar).

Abbildung 1

Bestand an Wärmepumpen: historische Daten und verschiedene Szenarien bis 2030

In Millionen Geräten



Anmerkung: Dezentrale Wärmepumpen für die Raumwärme- und Warmwasserbereitstellung.

Quellen: EurObserv'ER (bis 2020) (online verfügbar); Bundesverband Wärmepumpe für die Abschätzung des Werts von 2021 (online verfügbar); Agora Energiewende (online verfügbar); Ariadne-Projekt (online verfügbar), BDI (online verfügbar); BMWK (online verfügbar); dena (online verfügbar); 2022 bis 2030 Modellierung.

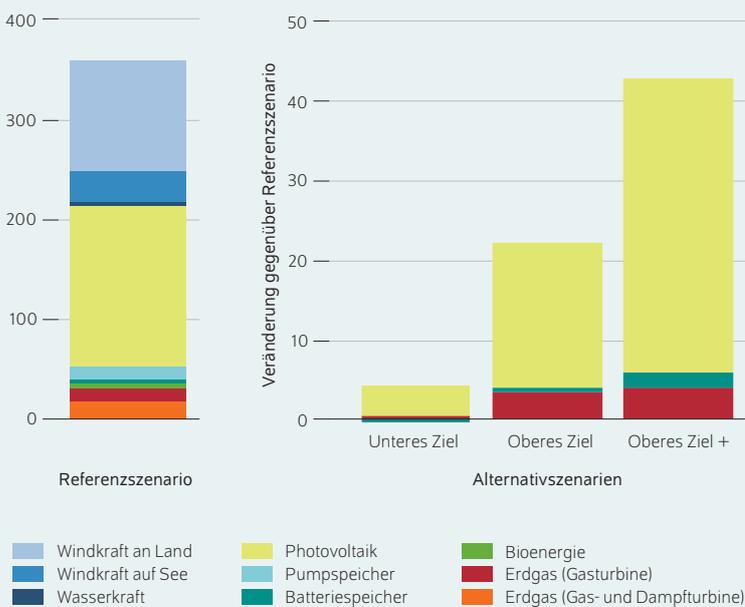
© DIW Berlin 2022

Die untersuchten Zielszenarien decken eine große Bandbreite ab.

Abbildung 2

Erhöhung der installierten Kraftwerksleistung durch zusätzliche Wärmepumpen

In Gigawatt



Anmerkung: Die linke Säule zeigt absolute Werte im Referenzszenario; die rechten Säulen zeigen die durch Wärmepumpen verursachten Änderungen.

Quelle: Eigene Berechnungen.

© DIW Berlin 2022

Die erforderliche Photovoltaik-Leistung steigt durch Wärmepumpen um bis zu 37 Gigawatt oder 23 Prozent gegenüber dem Referenzszenario.

Untersuchung verschiedener Wärmepumpen-Szenarien mit einem Stromsektormodell

Für die Analyse wird das am DIW Berlin entwickelte Open-Source-Stromsektormodell DIETER¹² eingesetzt. Mit ihm können für ein gegebenes Zieljahr die Kraftwerkseinsatz- und Investitionsentscheidungen bestimmt werden, mit denen die Stromnachfrage zu geringstmöglichen Kosten gedeckt werden kann. Die hier verwendete Modellversion enthält ein detailliertes Raumwärmemodul¹³ und berücksichtigt darüber hinaus weitere Optionen der Sektorenkopplung (Kasten 2).

Mit dem Modell werden verschiedene Szenarien für das Jahr 2030 berechnet, die sich vor allem in Hinblick auf den Bestand von Wärmepumpen unterscheiden. Im Referenzszenario werden die historischen Anteile von Wärmepumpen in verschiedenen Gebäudetypen fortgeschrieben (Abbildung 1).¹⁴ Unter diesen Annahmen sind im Jahr 2030 1,7 Millionen Wärmepumpen installiert, also nur wenig mehr als heute. Im Szenario „Unteres Ziel“ liegt die Zahl der verbauten Wärmepumpen bei 3,9 Millionen, wobei der Zubau ausschließlich in Ein- und Zweifamilienhäusern der beiden Gebäudeklassen mit den höchsten Energieeffizienzen

¹² Carlos Gaete et al. (2021): DIETERpy: A Python framework for The Dispatch and Investment Evaluation Tool with Endogenous Renewables. SoftwareX 15, 100784 (online verfügbar). Vgl. auch Modelldokumentation (online verfügbar).

¹³ Wolf-Peter Schill und Alexander Zerrahn (2020): Flexible electricity use for heating in markets with renewable energy. Applied Energy 266, 114571 (online verfügbar).

¹⁴ Vgl. Schill und Zerrahn (2020), a. a. O. Gegenüber dem zuletzt deutlich anziehenden Ausbautempo von Wärmepumpen in Deutschland erscheint diese Referenz vergleichsweise konservativ.

Kasten 2

Das Open-Source-Stromsektormodell DIETER

Das „Dispatch and Investment Evaluation Tool with Endogenous Renewables“ (DIETER) ist ein quelloffenes Stromsektormodell.¹ Im Modell werden die Stromsektorkosten sowie, je nach Anwendung, weitere Kosten von Flexibilitäts- und Sektorenkopplungsoptionen minimiert. Um Fluktuationen erneuerbarer Energien oder beispielsweise den Einsatz von Speichern realistisch abbilden zu können, werden alle Stunden eines Jahres modelliert.

Wesentliche Eingangsdaten des Modells sind Zeitreihen der Nachfrage nach Strom, Wärme und grünem Wasserstoff, Zeitreihen zur Verfügbarkeit fluktuierender erneuerbarer Energien, Kostenannahmen sowie Randbedingungen für Investitionen in verschiedene Technologien. Die im Modell ermittelten Größen sind die Stromsektorkosten, die optimalen Kapazitäten verschiedener Technologien sowie deren stündlicher Einsatz.

Für Erdgas wird für das Jahr 2030 ein Preis von 30 Euro je Megawattstunde (MWh) angenommen und ein Preis von 130 Euro je Tonne CO₂-Emission. Außerdem ist unterstellt, dass fossile Kraftwerke maximal in den Grenzen genutzt werden, die der Netzentwicklungsplan 2030² zulässt. Die Modellierung erfolgt für Deutschland im Verbund mit seinen Nachbarländern sowie Italien. Zur Reduktion der Modellkomplexität werden die Stromerzeugungskapazitäten nur in Deutschland optimiert, während der Kraftwerkspark im Ausland in Anlehnung an den Ten Year Network Development Plan³ der Europäischen Übertragungsnetzbetreiber fix vorgegeben ist.

Der Raumwärmebereich wird nur für Deutschland modelliert, mit zwölf verschiedenen Klassen von Wohngebäuden, die sich nach Größe (Ein- und Zweifamilienhäuser oder Mehrfamilienhäuser)

1 In der Online-Dokumentation (online verfügbar) gibt es eine Liste von Fachartikeln mit verschiedenen DIETER-Modellanwendungen. Der Code und alle für diese Analyse verwendeten Eingangsdaten stehen auf der Webseite in einem frei zugänglichen GitLab-Repositoryum (online verfügbar) zur Verfügung.

2 Hier wird das mittlere „Szenario B“ des Netzentwicklungsplans zugrunde gelegt. Vgl. Bundesnetzagentur (2019): Bestätigung des Netzentwicklungsplans 2030 (Version 2019; online verfügbar).

3 Dabei wird das Szenario „Distributed Energy“ des TYNDP 2020 genutzt (online verfügbar).

und nach Altersklassen unterscheiden, für die wiederum unterschiedliche Energieeffizienzen angenommen werden.⁴ Der Anteil der von Wärmepumpen zu deckenden Raumwärme wird für die verschiedenen Szenarien vorgegeben und der Einsatz der Wärmepumpen je Stunde wird optimiert. Der angenommene Anteil von Luftwärmepumpen an den installierten Wärmepumpen liegt in allen Gebäudeklassen bei 75 Prozent; 25 Prozent sind Erdwärmepumpen. Die Installation von Luftwärmepumpen ist einfacher und günstiger, wohingegen Erdwärmepumpen einen höheren Wirkungsgrad haben. Für eine kurzfristige Flexibilität der Wärmepumpen werden dezentrale Pufferspeicher für Wärmeenergie modelliert, deren Speicherkapazität ausreicht, um die maximale Wärmebereitstellung der Wärmepumpe für zwei Stunden aufzunehmen. Die Speicherkapazität wird dabei in Sensitivitätsanalysen variiert. Zentrale Wärmespeicher zur saisonalen Speicherung werden nicht abgebildet.⁵

Außerdem berücksichtigt das Modell eine Flotte von 15 Millionen Elektroautos, die einen Strombedarf von gut 34 Terrawattstunden (TWh) im Jahr haben. Diese werden mit einem nicht kostenoptimierten, aber relativ gleichmäßigen Zeitprofil aufgeladen, das mit dem ebenfalls quelloffenen Tool „emobpy“ hergeleitet wird.⁶ Zudem besteht im Jahr 2030 ein Bedarf von 28 TWh Wasserstoff, der durch Elektrolyse erzeugt werden muss, wodurch eine zusätzliche Stromnachfrage von gut 39 TWh entsteht. Dabei ist durch eine als kostenlos angenommene Wasserstoffspeicherung ein sehr flexibler Betrieb der Elektrolyseure möglich.

4 Es wurde auf Daten zum Gebäudebestand aus früheren Arbeiten zurückgegriffen. Vgl. Wolf-Peter Schill et al. (2018): Flexible Nutzung von Nachtspeicherheizungen kann ein kleiner Baustein für die Energiewende sein. DIW Wochenbericht 46, S. 987-995 (online verfügbar); Wolf-Peter Schill und Alexander Zerrahn (2020), a. a. O. Dabei wurde eine Sanierungsquote von rund zwei Prozent unterstellt.

5 Eine Abbildung zur Funktion der Wärmepumpen im Modell findet sich im GitLab-Repositoryum.

6 Carlos Gaete-Morales et al. (2021): An open tool for creating battery-electric vehicle time series from empirical data, emobpy. Scientific Data 8, 152 (online verfügbar).

erfolgt. Im Szenario „Oberes Ziel“ sind im Jahr 2030 6,5 Millionen Wärmepumpen installiert, wobei im Vergleich zum vorherigen Szenario ein Zubau auch in weniger effizienten Ein- und Zweifamilienhäusern unterstellt wird. Im Szenario „Oberes Ziel +“ werden darüber hinaus Anlagen in Mehrfamilienhäusern verschiedener Effizienzklassen installiert; die Gesamtzahl der Wärmepumpen im Jahr 2030 liegt dann bei 7,5 Millionen. In diesem Szenario stellen die Wärmepumpen knapp ein Viertel der gesamten Raumwärme und des Warmwassers zur Verfügung.

In allen Szenarien wird gemäß dem Ziel der Ampel-Koalition ein Anteil erneuerbarer Energien von 80 Prozent am

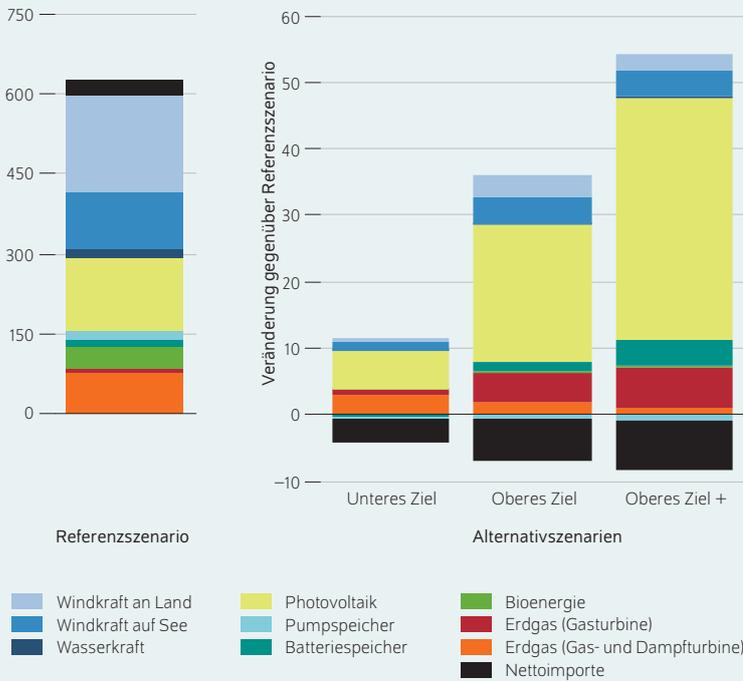
Stromverbrauch erreicht. Dies schließt den Stromverbrauch von Elektrofahrzeugen sowie Elektrolyse-Wasserstoff mit ein. Der zusätzliche Strombedarf der Wärmepumpen muss dabei in allen Szenarien im Verlauf eines Jahres vollständig durch ein zusätzliches Angebot an erneuerbaren Energien gedeckt werden.

Stromsektoreffekte unter Basisannahmen moderat

Die im Folgenden beschriebenen Modellergebnisse gelten unter den oben genannten Basisannahmen (Kasten 2) insbesondere bei den Erdgaspreisen und Wärmespeichern.

Abbildung 3

Änderung der jährlichen Stromerzeugung durch zusätzliche Wärmepumpen
In Terawattstunden



Anmerkung: Die linke Säule zeigt absolute Werte im Referenzszenario; die rechten Säulen zeigen die durch Wärmepumpen verursachten Änderungen.

Quelle: Eigene Berechnungen.

© DIW Berlin 2022

Neben der Photovoltaik steigt in geringerem Umfang auch die Stromerzeugung aus Windkraft, Gasturbinen und Batteriespeichern, und die Nettoimporte sinken.

können, die im Referenzszenario vorhanden sind. Im oberen Zielszenario sind diese Überschüsse weitgehend aufgebraucht und es wird mehr Erzeugungskapazität benötigt. Im Szenario „Oberes Ziel +“ liegt der zusätzliche Bedarf bei der Photovoltaik mit knapp 37 GW (6,3 Kilowatt je Wärmepumpe) noch einmal deutlich höher. Dies entspricht einer Erhöhung der Photovoltaik-Kapazität von rund 23 Prozent gegenüber dem Referenzszenario (Abbildung 2).¹⁶ Dies liegt nicht nur an der nochmals höheren Zahl von Wärmepumpen, sondern auch daran, dass in Mehrfamilienhäusern eingesetzte Wärmepumpen eine größere Fläche beheizen und daher einen höheren Energiebedarf haben als in Ein- und Zweifamilienhäusern. Zudem werden in diesem Szenario in gewissem Umfang Gasturbinen und Batteriespeicher zugebaut (gut vier beziehungsweise knapp zwei GW). Diese helfen, die von Wärmepumpen in der Heizperiode verursachten zusätzlichen Spitzenlasten zu decken.¹⁷ Das optimale Speichervolumen bei den Batteriespeichern steigt ebenfalls leicht, um etwa acht Gigawattstunden (GWh) im Szenario „Oberes Ziel“, beziehungsweise um gut 22 GWh im Szenario „Oberes Ziel +“.

Bei der Stromerzeugung zeigt sich ein ähnliches Bild (Abbildung 3). Die von zusätzlichen Wärmepumpen gegenüber dem Referenzszenario verursachte Stromnachfrage wird überwiegend mit Energie aus Photovoltaik gedeckt. Hinzu kommt in geringerem Umfang Strom aus Windkraft, der in Szenarien mit weniger installierten Wärmepumpen nicht genutzt wird. Daneben steigt in den beiden oberen Szenarien auch die Stromerzeugung aus offenen Gasturbinen an. Gleichzeitig sinken die Stromimporte aus dem Ausland, die im Referenzszenario bei rund 31 Terawattstunden (TWh) liegen, teils um über 20 Prozent. Im Szenario „Oberes Ziel +“ nimmt die Stromnachfrage durch Wärmepumpen mit 52 TWh gegenüber dem Referenzszenario um knapp neun Prozent zu.

Wärmepumpen erfordern Ausbau der Photovoltaik

Durch den verstärkten Einsatz von Wärmepumpen steigt die Nachfrage nach Strom in Deutschland, vor allem in der Heizperiode. Soll die zusätzliche Nachfrage vollständig aus erneuerbaren Energien gedeckt werden, müssen die Kraftwerkskapazitäten erweitert werden (Abbildung 2). Da die Windenergie bereits ohne Wärmepumpen an die für das Jahr 2030 angenommenen Ausbaugrenzen von 110 Gigawatt (GW, Windkraft an Land) beziehungsweise 30 GW (Windkraft auf See) stößt, muss vor allem Photovoltaik ausgebaut werden.¹⁵ Gegenüber dem Referenzszenario muss im unteren Zielszenario eine zusätzliche Kapazität von knapp vier GW, im oberen Zielszenario sogar von gut 18 GW geschaffen werden. Dies entspricht 1,7 beziehungsweise 3,8 Kilowatt je Wärmepumpe. Der höhere Bedarf im zweiten Szenario erklärt sich unter anderem daraus, dass die zusätzlichen Wärmepumpen im Szenario „Unteres Ziel“ noch teilweise mit Überschussstrom aus erneuerbaren Energien gespeist werden

¹⁵ Diese Grenzen orientieren sich an den aktuellen Ausbauzielen der Bundesregierung und berücksichtigen Ausbaubarrieren wie Akzeptanzprobleme oder Vorlaufzeiten bei der Flächen- und Projektentwicklung.

Stromerzeugungskosten steigen leicht

Aus der Modellierung ergeben sich die Stromerzeugungskosten, also die Summe der fixen und variablen Kosten aller Stromerzeugungs- und Speichertechnologien.¹⁸ Sie nehmen mit der Zahl der installierten Wärmepumpen zu (Abbildung 4). Im unteren beziehungsweise oberen Zielszenario steigen die Kosten unter Basisannahmen gegenüber der Referenz um etwa 0,6 beziehungsweise 2,6 Milliarden Euro je Jahr. Dies entspricht 295 Euro beziehungsweise 534 Euro je Wärmepumpe im Jahr. Der Kostenanstieg geht auf die höhere Nachfrage bei den erneuerbaren Stromerzeugungskapazitäten zurück. Im Szenario „Oberes Ziel +“ steigen die

¹⁶ Allerdings liegt die Photovoltaik-Kapazität im Referenzszenario mit rund 161 GW deutlich unter dem im „Osterpaket“ genannten Ziel der Bundesregierung von 215 GW. In vielen Klimaschutzszenarien steigt die Photovoltaik-Leistung nach dem Jahr 2030 noch deutlich stärker an, vgl. Stiftung Klimaneutralität et al. (2022) a.a.O.

¹⁷ Aufgrund des flexiblen Betriebs der Wärmepumpen steigt die stündliche Spitzen-Residuallast selbst im Szenario „Oberes Ziel +“ höchstens um knapp vier Gigawatt.

¹⁸ Ohne Investitionskosten für Wärmepumpen, da diese in den Szenarien fix vorgegeben sind (Kasten 2). Es handelt sich dabei um langfristige Kosten der Stromerzeugung, die auch als Stromsektorkosten bezeichnet werden.

jährlichen Stromsektorkosten um fast vier Milliarden Euro. Dies entspricht 684 Euro je Wärmepumpe. Der Anstieg hängt damit zusammen, dass die Wärmepumpen in Mehrfamilienhäusern deutlich mehr Raumwärme bereitstellen.

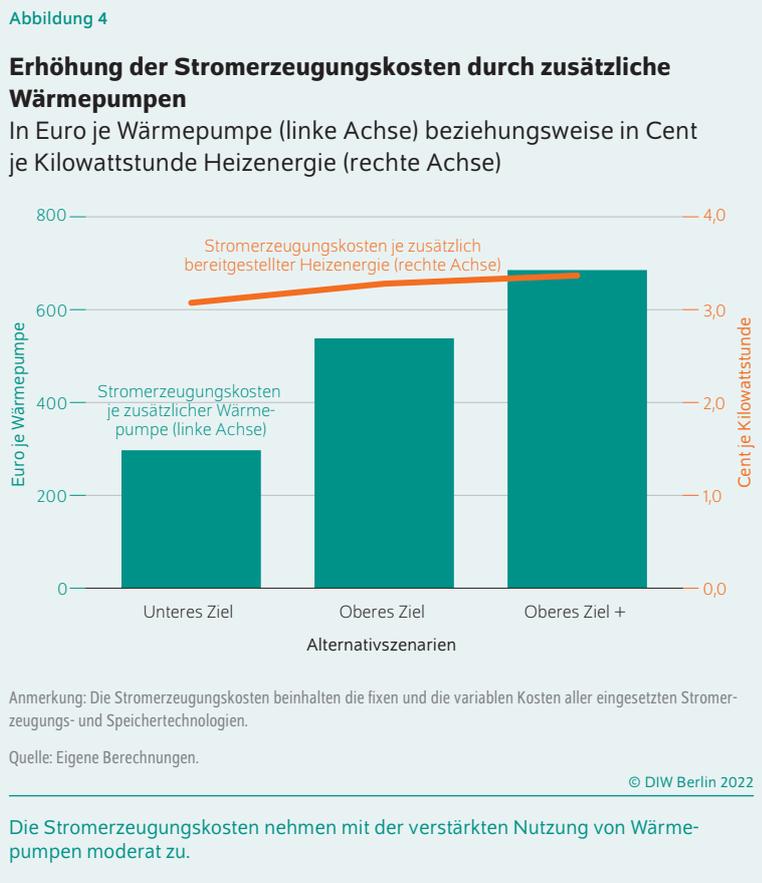
Bezieht man die zusätzlichen Stromsektorkosten auf die insgesamt erzeugte Raumwärme, ergeben sich in den drei Szenarien relativ ähnliche Werte. Im Szenario „Unteres Ziel“ sind sie mit etwa 3,07 Cent je Kilowattstunde (kWh) am geringsten, im Szenario „Oberes Ziel +“ mit 3,37 Cent je kWh am höchsten. Dass die Stromsektorkosten für die Bereitstellung von Wärme durch Wärmepumpen in allen Szenarien relativ niedrig sind, erklärt sich – neben der Tatsache, dass der größte Teil der Raumwärme aus kostenloser Umweltwärme gespeist wird – durch die Nutzung von günstigem Strom. Daten zu Stromerzeugung und -verbrauch zeigen exemplarisch für eine Winterwoche, dass Wärmepumpen bis zu einem gewissen Grad flexibel betrieben werden, das heißt, orientiert an den Großhandelspreisen. Selbst im Winter, wenn nur begrenzt Sonnenenergie zur Verfügung steht, werden somit die Angebotsspitzen der Mittagsstunden weitgehend genutzt (Abbildung 5).

Sensitivitätsanalysen: Stromsektoreffekte hängen stark von Szenarioannahmen ab

Die Auswirkungen zusätzlicher Wärmepumpen auf den Stromsektor ändern sich teils deutlich, wenn von den oben beschriebenen Basisannahmen abgewichen wird. Kann beispielsweise die Windenergie an Land auch über die für das Jahr 2030 angenommene Ausbaugrenze von 110 GW hinaus ausgebaut werden, wird sie auch deutlich stärker genutzt und der durch zusätzliche Wärmepumpen entstehende Strombedarf vor allem durch Windenergie gedeckt (Abbildung 6). Dies liegt daran, dass das saisonale Profil der Windenergie besser zur Stromnachfrage der Wärmepumpen passt als bei der Photovoltaik.¹⁹ Der durch Wärmepumpen verursachte Anstieg der Stromsektorkosten ist in diesem Szenario jedoch fast genauso hoch wie bei einem Zubau der Photovoltaikapazitäten. Wärmepumpen können also auch gut mit einem Ausbau der Solarenergie kombiniert werden, wenn die Ausbaumöglichkeiten der Windenergie begrenzt sind.

In einer weiteren Sensitivitätsanalyse wird ein extremes Schlechtwetterereignis berücksichtigt, bei dem im Februar (also in der Heizperiode) für eine ganze Woche keine Stromerzeugung aus Solar- oder Windenergie möglich ist. In einem solchen europäischen „Dunkelflauten“-Szenario ist ein höherer Ausbau der Photovoltaik als unter Basisannahmen erforderlich. Im Szenario „Oberes Ziel +“ geht damit ein stärkerer Ausbau bei den Batterie- und den Langfrist-Stromspeichern von jeweils rund vier GW (Ausspeicherleistung) sowie knapp 1,5 TWh (Speicherenergie bei den Langfrist-Stromspeichern) einher. Zudem wird zusätzlich rund vier GW Braunkohle-Leistung vorgehalten, die über das Jahr betrachtet jedoch nur sehr wenig genutzt wird.

¹⁹ Vgl. ähnliche Befunde in Oliver Ruhnau, Lion Hirth und Aaron Praktiknjo (2020): Heating with wind: Economics of heat pumps and variable renewables. Applied Energy 92 (online verfügbar).



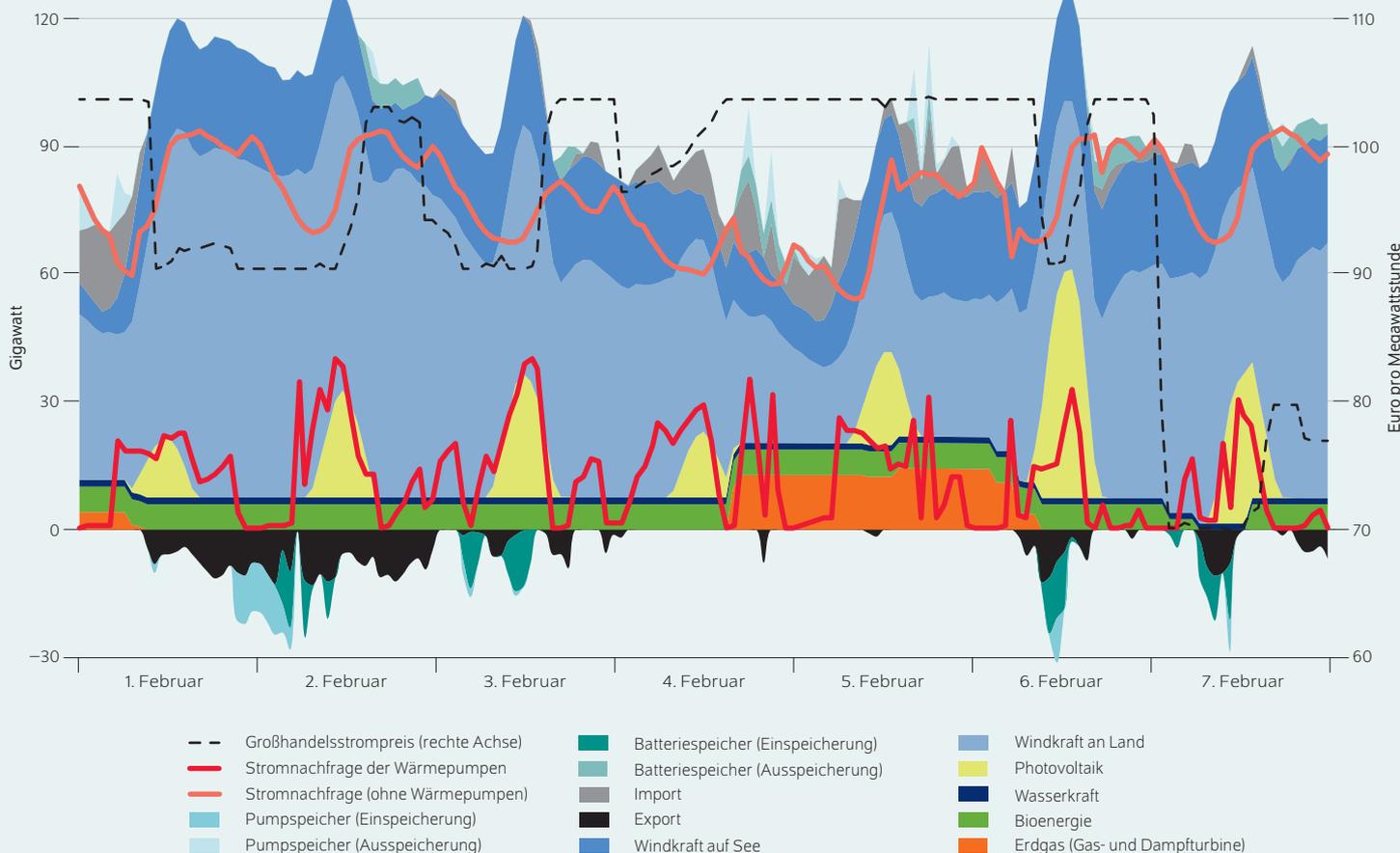
Aufgrund der zusätzlich erforderlichen Investitionen sind die durch Wärmepumpen verursachten zusätzlichen Stromsektorkosten gegenüber dem Szenario mit Basisannahmen etwas höher. Die Stromerzeugungskosten sind demnach aber selbst in einem Dunkelflauten-Szenario noch günstig, wobei Deutschland hier auch von Stromerzeugungskapazitäten in den europäischen Nachbarländern profitiert. Eine erweiterte Sensitivitätsrechnung zeigt darüber hinaus, dass der zusätzliche Stromspeicherbedarf nahe Null ist, wenn die an Wärmepumpen gekoppelte Wärmespeicher-Kapazität von zwei Stunden (Basisannahme) auf zwölf Stunden steigt.

In einem Szenario mit höheren Erdgaspreisen (60 statt 30 Euro je Megawattstunde, MWh) sind deutlich höhere Investitionen in Photovoltaik und – in geringerem Umfang – auch in stationäre Batteriespeicher optimal als unter den Basisannahmen. Dies gilt sowohl für den Fall, dass Kohlekraftwerke im Jahr 2030 noch genutzt werden können, als auch für den Fall, dass der Kohleausstieg bis dahin bereits vollzogen ist.

Wird Deutschland als Insel ohne jeglichen Stromaustausch mit seinen Nachbarländern modelliert, sind die für den stärkeren Einsatz von Wärmepumpen erforderlichen zusätzlichen Kapazitäten zur Erzeugung von Strom deutlich höher als unter den Basisannahmen. Vor allem die Investitionen in Photovoltaik und Batteriespeicher steigen. Dieser Befund verdeutlicht die Vorteilhaftigkeit eines europäischen Stromaustauschs.

Abbildung 5

Stromerzeugung und -nachfrage sowie Großhandelspreise für eine exemplarische Winterwoche
In Gigawatt (linke Achse) beziehungsweise in Euro pro Megawattstunde (rechte Achse)



Anmerkung: Dargestellt ist die erste Woche im Februar im Szenario „Oberes Ziel +“.

Quelle: Eigene Berechnungen.

© DIW Berlin 2022

Wärmepumpen, deren Betrieb sich an Großhandelspreisen orientiert, nutzen möglichst Erzeugungsspitzen erneuerbarer Energien und Stunden mit niedrigen Preisen.

Werden eingesparte Erdgasheizungen berücksichtigt, können die gesamtwirtschaftlichen Kosten sogar sinken

In der Modellierung stehen die Effekte eines Wärmepumpen-Ausbaus auf den Stromsektor und damit auch die Stromerzeugungskosten im Vordergrund. Ergänzt man diese um die erforderlichen Investitionskosten für die Wärmepumpen sowie um die eingesparten Kosten für Erdgas in den wegfallenden Gasheizungen, kann ein Gesamtkosten effekt abgeschätzt werden. Dabei wird vereinfachend angenommen, dass jede zusätzliche Wärmepumpe eine Gasheizung ersetzt. Die gegenüber Gasheizungen zusätzlichen Investitionskosten für Wärmepumpen sind mit Unsicherheit behaftet, sie hängen zudem von der Anlagengröße und dem Typ der Wärmepumpe ab.²⁰

²⁰ Dabei wurde angenommen, dass nur die Zusatzkosten von Wärmepumpen gegenüber Erdgasheizungen relevant sind. Zu den Investitionskosten vgl. Marta Victoria et al. (2020): Early

Gegenüber dem Referenzszenario ergeben sich in allen drei Szenarien geringfügig höhere jährliche Gesamtkosten zwischen 80 und 380 Millionen Euro. Dies gilt bei einem Importpreis für Erdgas von 30 Euro je MWh und einem CO₂-Preis von 130 Euro je Tonne.²¹ Wird ein höherer Gaspreis von 60 Euro je MWh unterstellt, sind die berechneten Gesamtkosten in allen betrachteten Szenarien niedriger, da die eingesparten Erdgas- und Emissionskosten die zusätzlichen Investitions- und Stromsektorkosten überwiegen. Im ambitioniertesten Ausbauszenario können unter diesen Annahmen knapp 3,6 Milliarden Euro im Jahr eingespart werden.

Somit erscheint ein forcierter Ausbau von Wärmepumpen aus gesamtwirtschaftlicher Sicht unproblematisch oder, bei

decarbonisation of the European energy system pays off. Nature Communications 11 (online verfügbar). Die Berechnungen zu den Gesamtkostenwirkungen stehen in Form einer Tabellenkalkulation im GitLab-Repositoryum dieser Analyse zur Verfügung.

²¹ Diese Annahmen werden auch im Stromsektor verwendet (Kasten 2).

längerfristig hohen Erdgaspreisen, sogar deutlich vorteilhaft. Dabei werden allerdings nur die reinen Kosten der Strom- und Wärmebereitstellung einbezogen und (außer CO₂-Kosten) keine Steuern, Abgaben oder Umlagen berücksichtigt. Da diese für Strom und Erdgas unterschiedlich hoch sind, kann sich aus Sicht eines einzelnen Haushalts der Kostenvergleich zwischen einer Wärmepumpe und einer Erdgasheizung anders darstellen.²²

Durch den stärkeren Einsatz von Wärmepumpen liegt der Verbrauch von Erdgas in den hier modellierten Szenarien im Jahr 2030 zwischen 16 TWh („Unteres Ziel“) und 113 TWh („Oberes Ziel +“) niedriger als im Referenzszenario. Dies entspricht zwei beziehungsweise 15 Prozent der deutschen Erdgasimporte aus Russland im Jahr 2021.

Fazit: Im Stromsektor steht dem Umstieg auf Wärmepumpen wenig entgegen

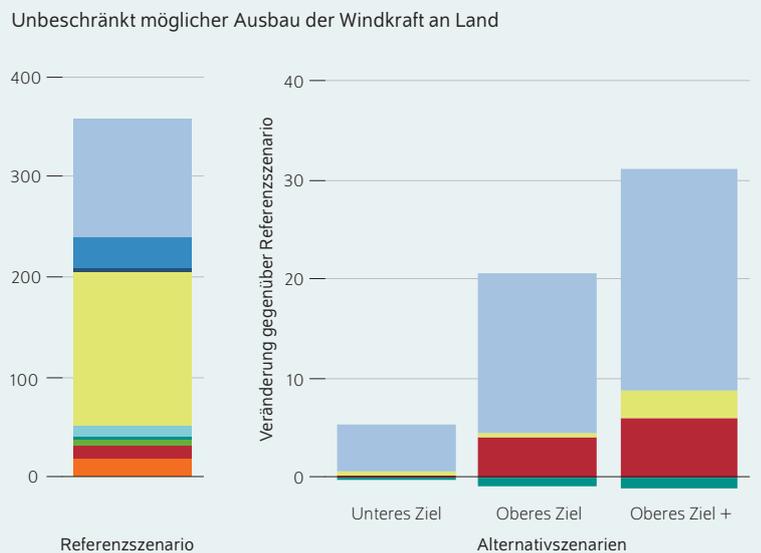
Eine verstärkte Nutzung von Wärmepumpen erhöht den Stromverbrauch. Im Jahr 2030 liegt er bei einem Zubau von knapp sechs Millionen Geräten um knapp neun Prozent höher. Daher ist eine Ausweitung der erneuerbaren Stromerzeugung notwendig. Dies kann durch eine Steigerung der Photovoltaikkapazität um bis zu 23 Prozent erfolgen. Die gesamtwirtschaftlichen Kosten erhöhen sich unter Berücksichtigung der eingesparten Kosten für Erdgasheizungen kaum, beziehungsweise sie sinken sogar deutlich, falls der Gaspreis dauerhaft hoch bleibt. Gleichzeitig wird Erdgas in Höhe von 15 Prozent der heutigen Importe aus Russland eingespart.

Noch etwas kostengünstiger wäre, wegen des gut zur Heizperiode passenden saisonalen Profils, eine Kombination des Ausbaus von Wärmepumpen und Windenergie. Grundsätzlich bleiben die modellierten Effekte auf andere Technologien im Stromsektor, insbesondere auf Stromspeicher, moderat. Dies gilt auch unter alternativen Annahmen, selbst wenn eine besondere Schlechtwetterperiode berücksichtigt wird. Die Gründe hierfür sind unter anderem der im Rahmen der Möglichkeiten flexible Einsatz der Wärmepumpen sowie ausgleichende Effekte im Stromverbund mit den Nachbarländern. Aus Sicht des Stromsektors gibt es somit keine wesentlichen Hindernisse für einen deutlich forcierten Ausbau von Wärmepumpen; mit Blick auf die Gesamtkosten kann er sogar deutlich vorteilhaft sein.

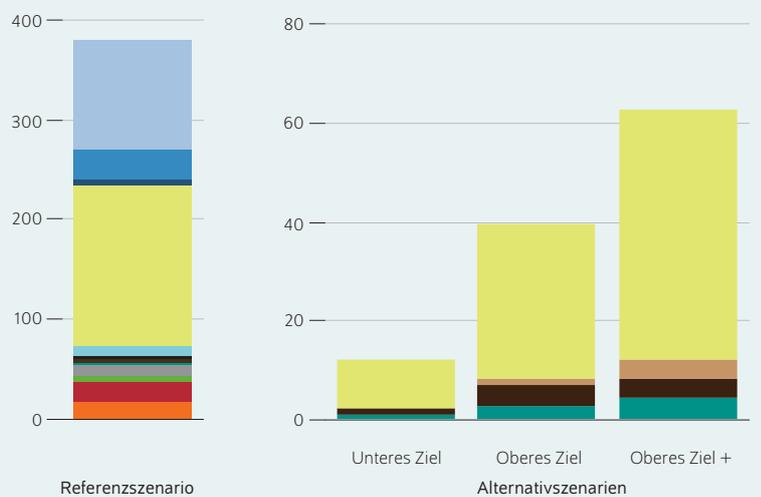
Der Fokus in dieser Untersuchung liegt auf den reinen Erzeugungskosten für Strom und Wärme. Die Stromtarife für EndkundInnen enthalten jedoch in erheblichem Umfang Steuern, Abgaben und Umlagen. Diese so zu gestalten, dass sie einem sinnvollen und zeitlich flexiblen Einsatz von Wärmepumpen nicht im Wege stehen, bleibt eine – alles andere als

Abbildung 6

Erhöhung der installierten Kraftwerksleistung durch zusätzliche Wärmepumpen unter alternativen Annahmen
In Gigawatt



Berücksichtigung einer Dunkelflauten-Woche



- Windkraft an Land
- Photovoltaik
- Bioenergie
- Windkraft auf See
- Pumpspeicher
- Erdgas (Gasturbine)
- Wasserkraft
- Batteriespeicher
- Erdgas (Gas- und Dampfturbine)
- Öl
- Braunkohle
- Steinkohle
- Langfrist-Stromspeicher

Anmerkung: Die linken Säulen zeigen absolute Werte im Referenzszenario, die rechten die durch Wärmepumpen verursachten Änderungen.

Quelle: Eigene Berechnungen.

© DIW Berlin 2022

Ist der Ausbau von Windkraft an Land uneingeschränkt möglich, führt der Strombedarf der zusätzlichen Wärmepumpen zu einem deutlichen Windkraft-Ausbau.

²² Für detailliertere Abschätzungen vgl. z. B. BDEW Heizkostenvergleich (online verfügbar); Jens Clausen und Simon Hinterholzer (2022): Wärmepumpenanlagen: Technologie, Wirtschaftlichkeit, Diffusionsfaktoren. Borderstep Institut (online verfügbar).

triviale – Aufgabe für die Politik.²³ Dazu können neben der bereits beschlossenen Abschaffung der EEG-Umlage weitere Umlagen beim Strom für Wärmepumpen gesenkt werden.²⁴

Die geplante Novelle des Gebäudeenergiegesetzes kann weitere positive Impulse für den Ausbau von Wärmepumpen geben. Insbesondere dürfte die geplante Neuerung, dass bereits ab dem Jahr 2024 bei neu installierten Heizungen 65 Prozent erneuerbare Wärme erreicht werden muss, in vielen Fällen auf ein faktisches Wärmepumpengebot hinaus laufen.²⁵ Darüber hinaus sollte die Politik unterstützende

Maßnahmen für einen deutlich beschleunigten Ausbau von Wärmepumpen ergreifen. Dies betrifft eine Erweiterung der Produktionskapazitäten für Wärmepumpen, die Qualifizierung von Fachkräften, ordnungsrechtliche Maßnahmen, die Bereitstellung von Informations- und Koordinationsangeboten für EigentümerInnen und MieterInnen sowie gegebenenfalls weitere finanzielle Fördermaßnahmen oder Finanzierungsmodelle. Hinzu kommen weitere Aspekte, die hier nicht vertieft untersucht werden, beispielsweise Übergangslösungen mit Hybrid-Wärmepumpentechnologien, die Integration von Großwärmepumpen in Nah- und Fernwärmenetze, sowie die Erhöhung der Energieeffizienz im Gebäudebestand. Mit einem koordinierten Bündel derartiger Maßnahmen könnte eine Art „Apollo-Programm“ für den Umstieg der Wärmeversorgung auf Wärmepumpen gestartet werden, mit dem mittel- und langfristig die Importabhängigkeit vom Erdgas erheblich reduziert, ein wesentlicher Beitrag zum Klimaschutz geleistet und nicht zuletzt auch wichtige industriepolitische Impulse gesetzt werden.

23 Vgl. beispielsweise Andrea Dertinger und Wolf-Peter Schill (2019): Ansätze zur Umgestaltung von Abgaben und Umlagen auf Strom sowie Heiz- und Kraftstoffe. DIW Roundup 127 (online verfügbar).

24 Vgl. Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (2022): Überblickspapier Osterpaket (online verfügbar).

25 Vgl. Formulierungshilfe zu dem Gesetzentwurf der Bundesregierung, Änderung des Gebäudeenergiegesetzes. Bearbeitungsstand 29.04.2022 (online verfügbar)

Carlos Gaete-Morales ist wissenschaftlicher Mitarbeiter der Abteilung Energie, Verkehr, Umwelt am DIW Berlin | cgaetemorales@diw.de

Adeline Guéret ist wissenschaftliche Mitarbeiterin der Abteilung Energie, Verkehr, Umwelt am DIW Berlin | agueret@diw.de

Dana Kirchem ist wissenschaftliche Mitarbeiterin der Abteilung Energie, Verkehr, Umwelt am DIW Berlin | dkirchem@diw.de

Martin Kittel ist wissenschaftlicher Mitarbeiter der Abteilung Energie, Verkehr, Umwelt am DIW Berlin | mkittel@diw.de

Alexander Roth ist wissenschaftlicher Mitarbeiter der Abteilung Energie, Verkehr, Umwelt am DIW Berlin | aroth@diw.de

Wolf-Peter Schill ist stellvertretender Leiter der Abteilung Energie, Verkehr, Umwelt am DIW Berlin | wpschill@diw.de

JEL: Q42, Q48

Keywords: heat pumps; natural gas; sector coupling; energy modeling

This report is also available in an English version as DIW Weekly Report 22/2022:

www.diw.de/diw_weekly



IMPRESSUM



DIW Berlin — Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung e.V.

Mohrenstraße 58, 10117 Berlin

www.diw.de

Telefon: +49 30 897 89-0 Fax: -200

89. Jahrgang 1. Juni 2022

Herausgeberinnen und Herausgeber

Prof. Dr. Tomaso Duso; Sabine Fiedler; Prof. Marcel Fratzscher, Ph.D.;
Prof. Dr. Peter Haan; Prof. Dr. Claudia Kemfert; Prof. Dr. Alexander S. Kritikos;
Prof. Dr. Alexander Kriwoluzky; Prof. Dr. Stefan Liebig; Prof. Dr. Lukas
Menkhoff; Prof. Karsten Neuhoff, Ph.D.; Prof. Dr. Carsten Schröder;
Prof. Dr. Katharina Wrohlich

Chefredaktion

Prof. Dr. Pio Baake; Claudia Cohnen-Beck; Sebastian Kollmann;
Kristina van Deuverden

Lektorat

Dr. Franziska Schütze

Redaktion

Marten Brehmer; Rebecca Buhner; Dr. Hella Engerer; Petra Jasper;
Kevin Kunze; Sandra Tubik

Vertrieb

DIW Berlin Leserservice, Postfach 74, 77649 Offenburg

leserservice@diw.de

Telefon: +49 1806 14 00 50 25 (20 Cent pro Anruf)

Gestaltung

Roman Wilhelm, Stefanie Reeg, Eva Kretschmer, DIW Berlin

Umschlagmotiv

© imageBROKER / Steffen Diemer

Satz

Satz-Rechen-Zentrum Hartmann + Heenemann GmbH & Co. KG, Berlin

Druck

USE gGmbH, Berlin

ISSN 0012-1304; ISSN 1860-8787 (online)

Nachdruck und sonstige Verbreitung – auch auszugsweise – nur mit
Quellenangabe und unter Zusendung eines Belegexemplars an den
Kundenservice des DIW Berlin zulässig (kundenservice@diw.de).

Abonnieren Sie auch unseren DIW- und/oder Wochenbericht-Newsletter
unter www.diw.de/newsletter