

Wärmewende beschleunigen, Gasverbrauch reduzieren. Ein Kurzimpuls



(Version 1.0, Deutsch, 17. März 2022)

Jens Clausen (Borderstep Institut für Innovation und Nachhaltigkeit), Heiko Brendel (S4F Bingen / Universität Passau), Christian Breyer (LUT University), Christoph Gerhards (S4F), Ulrike Jordan (Universität Kassel), Urban Weber (S4F Bingen/TH Bingen), Hartmut Ehmler (Helmholtz-Zentrum Berlin), Stefan Golla (S4F), Karl-Martin Hentschel (S4F), Rana Hoffmann (Universität Kassel), Gregor Hagedorn (Museum für Naturkunde, Berlin), Claudia Kemfert (DIW), Sven Linow (Hochschule Darmstadt), Pao-Yu Oei (Europa-Universität Flensburg), Michael Stöhr (S4F München), Lorena Valdivia (Hochschule Bochum)¹

Danksagungen: Wir danken Volker Stelzer, Mitgliedern des Fachkollegiums sowie Mitgliedern der Fachgruppe Energie der Scientists for Future für inhaltliche und sprachliche Verbesserungsvorschläge sowie Pietro P. Allematt von der Global Photovoltaic Simulation Group (Genf) für eine Modellierung der möglichen Einsparungen von Erdgas.

Dieser Text wurde von Mitgliedern der „Scientists for Future“ verfasst und durch Kollegen und Kolleginnen hinsichtlich der wissenschaftlichen Qualität (insbesondere der Belegbarkeit von Argumenten) ausführlich geprüft (peer reviewed). Endredaktion: Franz Ossing.

Scientists for Future (S4F) ist ein überparteilicher und überinstitutioneller Zusammenschluss von Wissenschaftler*innen, die sich für eine nachhaltige Zukunft engagieren. Scientists for Future bringt als Graswurzelbewegung den aktuellen Stand der Wissenschaft in wissenschaftlich fundierter und verständlicher Form aktiv in die gesellschaftliche Debatte um Nachhaltigkeit und Zukunftssicherung ein. Mehr Informationen unter de.scientists4future.org.

Veröffentlicht unter [CC BY-SA 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/)

Zitationsvorschlag / Suggested citation: Clausen, J., Brendel, H., Breyer, C., Gerhards, C., Jordan, U., Weber, U., Ehmler, H., Golla, S., Hentschel, K.-M., Hoffmann, R., Hagedorn, G., Kemfert, C., Linow, S., Oei, P.-Y., Stöhr, M., Valdivia, L. (2022). Wärmewende beschleunigen, Gasverbrauch reduzieren. Ein Kurzimpuls. Diskussionsbeiträge der Scientists for Future, 10, 17 Seiten. doi: [10.5281/zenodo.6363715](https://doi.org/10.5281/zenodo.6363715)

Zusammenfassung

Aktuell importiert Deutschland 500 TWh/a Erdgas aus der Russischen Föderation. Der Großteil dieses Gases wird zur Erzeugung von Prozess- und Raumwärme eingesetzt. Durch eine beschleunigte Umstellung der Wärmeversorgung auf von erneuerbarem Strom angetriebene Wärmepumpen, regenerative Wärme in Wärmenetzen und die Substitution von Erdgas in der Stromerzeugung durch erneuerbare Energie

¹ Rolle der Autor:innen: Clausen (korrespondierender Autor, <clausen@borderstep.de>) hat gemeinsam mit Brendel, Breyer, Gerhards, Jordan und Weber die Arbeit konzipiert, überwiegende Teile des Textes geschrieben und die Beiträge der übrigen Autor:innen koordiniert. Die übrigen in alphabetischer Reihenfolge aufgeführten Autor:innen haben themenspezifisch fachliche Beiträge geleistet sowie im gesamten Text Verbesserungen eingebracht.

sowie Energieeinsparung kann in wenigen Jahren so viel Erdgas eingespart werden, wie heute aus der Russischen Föderation importiert wird. Dazu bedarf es einer stark beschleunigten Verbreitung von Wärmenetzen und Wärmepumpen in Verbindung mit einer Ausbildungsoffensive im Handwerk. Auch Änderungen des regulativen Rahmens in Form eines Verbots von Öl- und Gasheizungen sowie finanzielle Anreize und gezielte Förderprogramme sind erforderlich. Mit solchen gezielten Anstrengungen kann Deutschland gleichzeitig einen deutlichen Beitrag im Kampf gegen die Klimakrise leisten.

Schlagwörter: Klimakrise, Klimaschutz, Klimapolitik, Energiepolitik, Sicherheitspolitik, Deutschland, Energiewende, Energieautarkie, Russland, Ukraine, Erdgas, Wärmewende, Wärmepumpen

Abstract

Germany currently imports 500 TWh/a of natural gas from the Russian Federation. Most of this gas is used to generate process and space heat. By accelerating the conversion of heat supply to heat pumps powered by renewable electricity, renewable heat in district heating networks, and the substitution of natural gas in electricity generation with renewable energy, as well as energy conservation, as much natural gas can be saved in a few years as is currently imported from the Russian Federation. This requires greatly accelerating the spread of district heating networks and heat pumps in conjunction with a training offensive in the skilled trades. Changes to the regulatory framework in the form of a ban on oil and gas heating systems, as well as financial incentives and targeted subsidy programs, are also required. With such targeted efforts, Germany can at the same time make a significant contribution in the fight against the climate crisis.

Key words: climate crisis, climate protection, climate policy, energy policy, security policy, Germany, energy transition, energy autarky, Russia, Ukraine, natural gas, heat transition, heat pumps

Inhaltsverzeichnis

Kurzimpuls	3
1. Einleitung: Abhängigkeit von russischen Energieimporten	3
2. Erforderlicher Strukturwandel	5
3. Kurzfristige Einspar- und Effizienzmaßnahmen	6
4. Notwendige Handlungsstränge	7
5. Planung und Regulatorik	8
6. Bereitstellung von Wärme aus regenerativen Energien	9
7. Ausbau der notwendigen Infrastruktur	11
8. Flankierende Maßnahmen	12
9. Quantitative Auswirkungen	13
Fazit	14
Literatur	14

Kurzimpuls

1. Einleitung: Abhängigkeit von russischen Energieimporten

Der Angriffskrieg der Russischen Föderation gegen die Ukraine rückt zurzeit mehrere Themenfelder in den Brennpunkt des öffentlichen Interesses. Ein solches Thema ist die sicherheits- und energiepolitisch problematische Abhängigkeit Deutschlands (und vieler Staaten der Europäischen Union) vom Import fossiler Energieträger aus der Russischen Föderation.

Zugleich ist der Export fossiler Energieträger eine wichtige Einnahmequelle für die Russische Föderation, deren Energieindustrie durch Staatskonzerne dominiert wird (Wissenschaftliche Dienste des Deutschen Bundestages, 2020). Die wirtschaftliche Elite Russlands ist eng mit der politischen Elite der Russischen Föderation verwoben (Kluge, 2021). Aufgrund der Bedeutung des fossilen Energiesektors für die Russische Föderation und ihre Eliten wird daher in der Europäischen Union diskutiert, Energie-sanktionen gegen Russland zu verhängen. Die Russische Föderation hat ihrerseits bereits mit einem Gaslieferstopp in die Europäische Union gedroht.

Die Wirksamkeit von Sanktionen ist wissenschaftlich umstritten (Jones, 2015; Peksen, 2019) und nicht Gegenstand dieses Kurzimpulses. Sollte die Versorgung durch russisches Erdgas jedoch unterbrochen oder auch nur stark gedrosselt werden – unabhängig davon, ob infolge von Entscheidungen der Europäischen Union oder der Russische Föderation –, wäre ein sehr schnelles energiepolitisches Handeln in den betroffenen Staaten erforderlich. Für Deutschland gilt, dass Pläne für die – als klimapolitische Maßnahme unerlässliche – Beendigung der Nutzung fossiler Brennstoffe seit Jahren vorhanden sind, aber oft nur den Zeithorizont 2050 im Blick hatten (BMU, 2016). Auch das 2019 eingeführte und 2021 nachgebesserte Klimaschutzgesetz (Deutscher Bundestag, 2019) sieht nur eine lineare Absenkung der Treibhausgasemissionen hin zur Treibhausgasneutralität im Jahr 2045 vor. Ein Ende der Erdgaslieferungen aus der Russischen Föderation könnte aber eine Stärkung der Resilienz des deutschen Energiesektors bereits im laufenden Jahr nötig machen.

Denn Deutschland deckte im Jahre 2020 mehr als 55 % seines Erdgasbedarfs durch Importe aus Russland (BP, 2021). Zudem kontrolliert die Russische Föderation über Konzernbeteiligungen einen erheblichen Teil der Erdgasspeicherkapazitäten in Deutschland, und im Unterschied zum Erdölsektor gibt es keine nationale strategische Erdgasreserve. Auch bei Steinkohle/Kokskohle ist die Abhängigkeit von Russland groß (46 %), ebenso bei Erdöl (34 %) (Verein der Kohlenimporteure, 2021; Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle, 2021). Die beiden letztgenannten Rohstoffe lassen sich jedoch einfacher durch Importe per Schiff aus anderen Regionen ersetzen. Daher fokussiert sich dieser Beitrag darauf, die dringend notwendigen Klimaschutzmaßnahmen so zu lenken, dass sie zusätzlich die strategisch hoch problematische Abhängigkeit Deutschlands von allen fossilen Energieträgern deutlich schneller reduzieren und dadurch die sicherheitspolitisch wünschenswerte Versorgungssicherheit verbessern. Neben kurzfristigen Maßnahmen beschreiben wir

Wege, wie der Einsatz von Erdgas durch gezielte Anstrengungen bei der Modernisierung der Wärmeinfrastruktur reduziert werden kann. Ein Schwerpunkt liegt dabei auf der Gebäudeheizung und der Prozesswärme in der Industrie, für die die Wärmewende erheblich beschleunigt werden kann.

Insgesamt betrachtet ist Erdgas derzeit mit 905 TWh/a (27% der Gesamt-Primärenergienachfrage von 3 387 TWh/a) der zweitwichtigste Energieträger Deutschlands (AG Energiebilanzen, 2022). Für die Erzeugung von Wärme werden 598 TWh/a Erdgas (66%) eingesetzt, davon entfallen 257 TWh/a (28%) auf die Raumwärmeversorgung der Haushalte, 236 TWh/a (26%) auf die Prozesswärmebereitstellung in der Industrie und 105 TWh/a (12%) auf die Wärmeversorgung des Dienstleistungssektors (AG Energiebilanzen, 2021a).

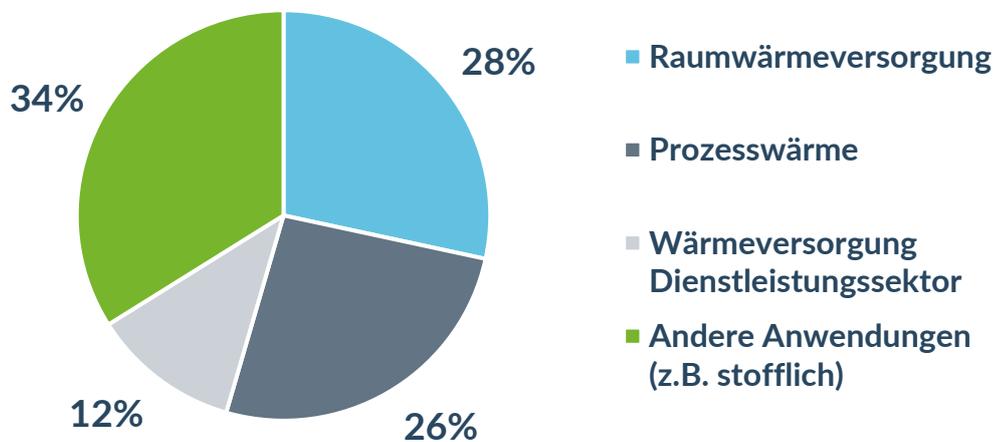


Abbildung 1: Anteil der Wärmeversorgung an der Erdgasnutzung: 66%, nach AG Energiebilanzen (2021a)

Die Transformation des Wärmesektors weg von fossilen Energien verlief in den letzten Jahren ausgesprochen langsam, aktuell werden aber zunehmend Konzepte zur Umgestaltung der Wärmeversorgung vorgelegt (Fell & Welteke-Fabrizius, 2022; German Zero, 2022; IEA, 2022; IRENA, 2022; Schug, 2022; Wuppertal Institut, 2022). Die Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina (2022) bezeichnet die Substitution von Erdgas im Wärmesektor als große Herausforderung, gibt aber primär Empfehlungen mit Fokus auf die Beschaffung von Energieträgern, einschließlich des Ausbaus der regenerativen Energien, und nicht für die Einsparung von Energie. Parallel zur konsequenten Umsetzung der Einsparmaßnahmen sollte eine ambitionierte Umstellung der Wärmeversorgungssysteme auf regenerative Energien vorangetrieben werden. Insbesondere mit steigendem Anteil von Strom aus Windkraft und Photovoltaikanlagen können Wärmepumpen sehr effizient in großem Umfang Wärme für die Raumheizung und für Niedertemperatur-Prozesswärme bereitstellen.

Durch Energieeinsparung, eine beschleunigte Umstellung der Wärmeversorgung auf erneuerbare Energien, vor allem durch Wärmepumpen, den Ausbau der Stromerzeu-

gung aus Wind- und PV-Anlagen, die gezielte Nutzung von Biogas als flexibel einsetzbarer Energieträger, Batteriespeicher und die bessere Nutzung von Abwärme ist in der Summe ein weitgehender Verzicht auf Erdgasimporte aus Russland innerhalb weniger Jahre machbar.

2. Erforderlicher Strukturwandel

Nicht nur auf Grund der aktuellen sicherheitspolitischen Bedrohung, sondern auch mit Blick auf das sehr beschränkte, verbleibende Budget für Treibhausgasemissionen (Baumann et al., 2020) ist es wichtig, Optionen zu entwickeln, die erlauben, den Verbrauch von Erdgas schnell und deutlich zu reduzieren. Dabei reichen die aktuellen Vorschläge von einem planlosen Umsortieren zwischen Erdgas, Kohle und Kernkraft unter der populistischen Überschrift „Der Klimaschutz muss jetzt warten“ (Wenzel, 2022) bis zu schnell erstellten, aber durchdachten Konzepten, wie dem von der Internationalen Energieagentur: Diese macht in einem Zehn-Punkte-Plan (IEA, 2022) Vorschläge zum Energiesparen, betont die Bedeutung des raschen Ausbaus von Windkraft und PV und weist auf die Chancen der hocheffizienten Elektrifizierung der Wärmeversorgung durch Wärmepumpen in Gebäuden und Industrie hin.

Durch die konsequente Nutzung erneuerbarer Energien in der Raumwärmeversorgung wie auch in der Versorgung der Industrie mit Niedertemperatur-Prozesswärme ist es möglich, den Verbrauch und infolgedessen auch den Import von Erdgas signifikant zu senken.

Die aktuelle politische Situation stellt eine bedrohliche Krise dar, bei der bisherige Strukturen und Abhängigkeiten sich als nicht mehr tragfähig herausstellen. Diese Krise bietet zugleich die Chance, Strukturen zu hinterfragen und schnell zu verändern, die unserer Energiewende im Wege stehen oder sie aktiv behindern. Dazu gehören starre Regularien, langsame Genehmigungsverfahren, Gesetze und Verordnungen, welche die fortgesetzte Nutzung fossiler Energieträger faktisch vorzeichnen. Wir empfehlen, diese Normen schnell zu modifizieren, um sowohl die Erderhitzung zu stoppen als auch eine krisenresiliente Energieversorgung zu sichern. Der Ausbau heimischer erneuerbarer Energien reduziert die Importabhängigkeit und das damit einhergehende Bedrohungs- und Erpressungspotenzial. Ein weiterer sicherheitspolitischer Vorteil heimischer erneuerbarer Energien ist, dass deren oft dezentrale Strukturen die Resilienz im Falle militärischer und terroristischer Angriffe erhöhen (American Council on Renewable Energy, 2021; Jasiūnas et al., 2021; Overland, 2019).

Gebäude und Anlagen zu ihrer Wärmeversorgung haben den Charakter von Infrastrukturen. Dies gilt auch für Erdgasheizungen, mit denen gegenwärtig 49,5%, und Ölheizungen, mit denen 24,8% des Wohnungsbestandes beheizt werden (AG Energiebilanzen 2022). Sie zu verändern ist aufwendig. Dennoch gibt es auch hier Ansatzmöglichkeiten für kurzfristige Einsparmaßnahmen und Effizienzverbesserungen. Darüber hinaus sind strukturelle Maßnahmen sofort einzuleiten, wie der Aus- und Neubau regenerativ versorgter Wärmenetze und die Elektrifizierung der Gebäudewärmeversorgung durch Wärmepumpen, womit das große Potenzial der in Erdreich, Gewässern und Luft enthaltenen Wärme genutzt werden kann. Diese strukturellen

Maßnahmen umfassen: Planung und Regulatorik, die Bereitstellung von Wärme aus regenerativen Energien und weiteren Energieträgern, den Ausbau von Wärmenetzen und flankierende Maßnahmen. Abschließend verweisen wir auf eine Modellrechnung (Altermatt, 2022), welche die quantitativen Auswirkungen einer beschleunigten Elektrifizierung der Wärmeversorgung mit Hilfe von Wärmepumpen abschätzt und zeigt, welche Möglichkeiten zur Reduktion des Erdgasverbrauchs sich für eine engagierte Wärmepolitik allein durch den Einsatz von Wärmepumpen eröffnen.

3. Kurzfristige Einspar- und Effizienzmaßnahmen

Konsequentes Sparen in der Wohnung: Im internationalen Vergleich wird in Deutschland sehr viel Wohnraum pro Person genutzt und beheizt. Von 1991 bis 2020 ist die Wohnfläche je Einwohner:in in Deutschland von 34,9 auf 47,4 Quadratmeter gestiegen (Statistisches Bundesamt, 2021). Dieser Anstieg hat die Effizienzsteigerung der letzten Dekaden im Gebäudesektor praktisch kompensiert und erschwert generell das Einsparen von Wärme (Kopatz, 2016). Oft wird die gesamte Wohnfläche beheizt, unabhängig davon, ob sie tatsächlich genutzt wird oder nicht. Die Raumtemperatur der Wohnungen und ihrer Teilbereiche ist in vielen Fällen vergleichsweise hoch und die Dämmung der Gebäude ist häufig unzureichend. Der private Wärmeverbrauch lässt sich kurzfristig durch Verhaltensänderungen reduzieren. Wird z. B. die Temperatur der Wohnungen in der ganzen Europäischen Union nur um ein Grad Celsius abgesenkt, so schätzt die IEA (2022) eine Reduktion des Erdgasverbrauchs in Höhe von 100 TWh/a.

Konsequentes Sparen in öffentlichen und betrieblichen Gebäuden: In vielen öffentlichen und betrieblichen Gebäuden kann die Raumtemperatur um ein oder zwei Grad abgesenkt werden, je nach Nutzungsart gegebenenfalls auch noch stärker. Auch hier ist kritisch zu prüfen, welche Räume wann und wie beheizt werden sollen, zum Beispiel Büroräume, die durch Home-Office zeitweise oder sogar permanent nicht mehr genutzt werden.

Konsequentes Sparen in industriellen Prozessen: Aktuell werden viele notwendige oder sinnvolle Maßnahmen zur Energie- oder Ressourceneinsparung in industriellen Prozessen nicht umgesetzt, da sie sich nicht innerhalb der (üblicherweise kurzen) Abschreibungszeiträume rechnen. Unternehmen sind hier gefordert, ihre Praxis strategisch zu überdenken. Seitens des Gesetzgebers sind geeignete Regularien zu entwickeln, mit denen Unternehmen bei der Umsetzung von Maßnahmen unterstützt werden, die erst mittel- bis langfristig rentabel sind, z. B. durch Reduzierung der gesetzlichen Abschreibungsfristen. Derzeit diskutierte Steuersenkungen oder andere Formen von Subventionen sind unbedingt zu vermeiden, da sie das klare Preissignal als jetzt notwendigen Handlungsimpuls für Industrie und Wirtschaft aufheben und so jede Veränderung und jeden Beitrag aus Industrie und Wirtschaft behindern.

Falsche und richtige Preisanreize: Die von Bundeswirtschaftsminister Habeck für kurzfristiges Handeln betonte Bedeutung der Versorgungssicherheit (ZDF, 2022) sollte nicht dazu verleiten, nur die Angebotsseite von Energie zu betrachten, sondern sie sollte politische Maßnahmen beinhalten, mit denen auch mittel- und langfristig

der Energieverbrauch gesenkt wird. Um die aufgrund von Verknappung und steigenden CO₂-Preisen zu erwartenden Preissteigerungen sozial verträglich abzufangen, sind alle Maßnahmen kontraproduktiv, die keinen Anreiz zum Energiesparen setzen. So wäre eine Absenkung der Mehrwertsteuer und anderer Abgaben auf fossile Energien sowohl für die Sicherstellung einer ausreichenden Erdgasversorgung („Versorgungssicherheit“) als auch für den Klimaschutz kontraproduktiv. Stattdessen würde die Einführung eines „Energiegeldes“ – gestaffelt nach sozialen Gesichtspunkten – entsprechende Belastungen abfedern und gleichzeitig einen Impuls zu den gewünschten Verhaltensänderungen in Richtung eines sparsamen Umgangs setzen (Gründinger et al., 2021).

Effizienter und intelligenter heizen: In Wohngebäuden lässt sich durch intelligente Heizungssteuerungen (Smart Building) bis zu 20% der Heizenergie sparen (Beucker & Hinterholzer, 2021). Vernetzte Thermostatventile und Heizungssteuerungen können sofort genutzt werden, um den Wärmebedarf in Gebäuden zu senken. Diese Techniken sind verfügbar und können bei geringen Investitionen große Mengen an Energie einsparen. Sie können außerdem in Verbindung mit Brennwert-Kesseln, Fernwärme und Wärmepumpen genutzt werden, sie erhöhen die Energieeffizienz und unterstützen den Übergang zu einer erneuerbaren Wärmeversorgung.

4. Notwendige Handlungsstränge

Eine zentrale Aufgabe der Energiepolitik ist es, die fossilen Gas- und Ölheizungen durch regenerative Heizungssysteme zu ersetzen (Gerhards et al., 2021; Wuppertal Institut, 2022). Dieser Umbau der Wärmeversorgung ist ein aufwendiges Vorhaben, welches fünf parallellaufende Handlungsstränge verfolgt. Dabei erfordert jeder Handlungsstrang zu seiner Umsetzung eine lange Zeit, weshalb eine weitestgehend gleichzeitige Umsetzung erforderlich ist, um insgesamt möglichst schnell von russischen Erdgaslieferungen unabhängig zu werden:

- 1) die systematische Erschließung einer wachsenden Vielfalt regenerativer Wärmequellen, die ohne Verbrennung von fossilen sowie möglichst auch von biogenen Stoffen auskommen;
- 2) der systematische Anschluss von Gebäuden, die nicht dezentral mit regenerativen Wärmequellen versorgt werden können, an Wärmenetze; denn einige regenerative Wärmequellen sind in Einzelgebäuden nicht nutzbar, wohl aber in Fernwärmenetzen sowie in bestehenden beziehungsweise neu zu errichtenden (kalten) Nahwärmenetzen;
- 3) die systematisch fortschreitende Sanierung des Gebäudebestandes, um eine möglichst rasche Absenkung der Vorlauftemperaturen zu ermöglichen. Dadurch können Wärmenetze Niedertemperatur-Wärmequellen wie Wärmepumpe, Abwärme, Geothermie- oder Solarthermieranlagen effizienter nutzen;
- 4) die Ausstattung der nicht an Wärmenetze angeschlossenen Gebäude sowie von Industrieanlagen, die Erdgas zur Versorgung mit Niedertemperaturwärme einsetzen, mit Wärmepumpen;

- 5) den massiven Ausbau von Windkraft und Photovoltaik zur regenerativen Stromerzeugung, um nicht zuletzt den steigenden Stromverbrauch der zahlreichen Wärmepumpen in Wärmenetzen und einzeln beheizten Gebäuden zu decken.

Der folgende Text fokussiert auf Aspekte der Planung und Regulatorik, der Bereitstellung von Wärme aus regenerativen Energien sowie auf die besondere Herausforderung, Wärme in großem Umfang durch Wärmepumpen bereit zu stellen.

5. Planung und Regulatorik

Kommunale Wärmeplanung: Für einen schnellen, flächendeckenden Ausstieg aus der Nutzung fossiler Energieträger ist ein koordinierter Planungsprozess unter Beteiligung aller relevanten Akteure unumgänglich (Seifert et al., 2021). Der Planungsprozess besteht aus einer Bilanzierung des Wärmeverbrauchs auf der Ebene einzelner Gebäude, der Ermittlung von Potentialen zur Bereitstellung erneuerbarer Energien sowie notwendiger Infrastrukturmaßnahmen und der Ausweisung von Gebieten zur Fernwärmenutzung (Clausen, Benne & Hinterholzer, 2021; Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg, 2021). Eine besondere Bedeutung im Planungsprozess kommt einem integrativen Ansatz von Stadt-, Energie-, und Wärmeplanung zu. Verdichtete Gebiete, in denen dezentrale Wärmepumpen nur begrenzt einsetzbar und daher Wärmenetze zu errichten sind, müssen möglichst rasch benannt werden. In allen anderen Gebieten herrscht daraus folgend Klarheit, dass dort die Umstellung auf individuelle Lösungen (Wärmepumpen) vorgezeichnet ist.

Förderung von Erdgasheizungen sofort beenden: Die Bundesförderung für effiziente Gebäude legt zwar bereits einen klaren Schwerpunkt auf erneuerbare Energien, fördert aber immer noch Gas-Brennwertheizungen in bestimmten Fällen (KfW, 2022). Die Einstellung dieser Förderprogramme wirkt einer Verbrauchssteigerung von Erdgas entgegen und setzt Mittel für andere Fördermaßnahmen frei. Zusätzlich ist es im Sinne des Verbraucherschutzes, Anreize für den Neukauf von Anlagen abzuschaffen, die dem Erreichen der Klimaneutralität im Wege stehen und die daher in absehbarer Zeit ihre Betriebsgenehmigung verlieren können.

Beseitigen regulatorischer Hindernisse: Für Kommunen und Energieversorger ist es heute im Bestand nahezu unmöglich, Veränderungen umzusetzen: Diverse Gesetze und Verordnungen erzwingen die heute oder rückwirkend billigste Lösung (z. B. darf eine Umstellung der Wärmeversorgung nach heutigen Vorschriften nicht zu Mehrkosten führen) oder machen ein Absenken der Vorlauftemperatur von bestehenden Wärmenetzen unmöglich, so lange ein Nutzer die Umstellung verweigert (z. B. AVB-FernwärmeV §4m BMWi, 2013). Eine Absenkung der Vorlauftemperatur führt zur Steigerung der Effizienz der Netze und kann den effizienten Einsatz von Wärmepumpen im System ermöglichen. Es ist daher dringend geboten, behindernde Regularien außer Kraft zu setzen und die Kommunen in die Lage zu versetzen, selbst geeignet handeln zu können (German Zero, 2022).

Die schnelle Umstellung auf Wärmepumpen benötigt zudem eine geeignete Umstellung im elektrischen Netz auf allen Ebenen. Netzbetreiber sollten in die Lage versetzt

werden, vorausschauend Netze umzubauen und schnell geeignete Infrastrukturen aufzustellen. Dies kann z. B. sofort durch das Beseitigen von Planungshindernissen und Kostenrisiken erfolgen.

6. Bereitstellung von Wärme aus regenerativen Energien

Nahezu die Hälfte des Strombedarfs wird bereits mit regenerativen Energien gedeckt. Windkraft- und Solarstromanlagen müssen weiterhin so schnell wie möglich weiter ausgebaut werden, um den Anteil erneuerbarer Energien im Stromsektor zu erhöhen. Zudem wird sich der Strombedarf wegen der Elektrifizierung des Verkehrssektors und des Betriebs von Wärmepumpen weiter erhöhen. Um die Wärmewende schnell und konsequent anzugehen, müssen weitere Maßnahmen ergriffen werden, die deutlich über den Ausbau der Stromerzeugung aus regenerativen Energien hinausgehen, insbesondere die Erschließung regenerativer Wärmepotenziale wie solare und geothermische Wärme.

Wind- und Solarstrom erzeugen und große Batteriespeicher errichten: Im Jahr 2020 wurden im Stromsektor 171 TWh Erdgas zur Elektrizitätserzeugung genutzt und damit 95 TWh Elektrizität bereitgestellt (AG Energiebilanzen, 2021b; 2021c). Dies ergibt einen Bruttowirkungsgrad für die Gaskraftwerke von 55,4%, welcher ungefähr einem Nettowirkungsgrad von 50% entspricht. Der Gasbedarf im Stromsektor entspricht damit knapp 40% der Erdgasimporte aus der Russischen Föderation. Durch die Errichtung von 1 GW Windkraft können 5,6 TWh Gas und durch 1 GW Photovoltaik 1,8 TWh Gas ersetzt werden. Bei neuen Windkraftanlagen wird hier von ca. 2800 Volllaststunden und bei Photovoltaik von ca. 920 Volllaststunden ausgegangen (Fraunhofer IEE, 2019; BMWi, 2021). Mit zusätzlichen großskaligen Batteriespeichern kann der Gasbedarf für die Stromerzeugung gezielt reduziert werden, da bei starker Stromerzeugung aus Photovoltaik und Windkraft Elektrizität gespeichert werden kann, die im Regelfall binnen eines Tages wieder ausgespeichert wird, wenn ansonsten Gaskraftwerke am Netz wären. Aufgrund ihrer extrem schnellen Regelbarkeit können Batteriespeicher zu einer hohen Systemstabilität und Netzfrequenzstabilität beitragen.

Ein massiv beschleunigter und der Notlage angepasster Kapazitätsaufbau von 5 GW Windkraft, welche gegenwärtig im Genehmigungsstau stecken, könnte bis zu 28 TWh Erdgas pro Jahr ersetzen. Wenn weiterhin 10 GW Photovoltaikanlagen als Notfallmaßnahme zusätzlich ans Netz angeschlossen würden, könnte dies weitere 18 TWh Erdgas pro Jahr ersetzen. Beide Notfallmaßnahmen zusammen ergäben bis zu 46 TWh Erdgas-Ersatz pro Jahr, was knapp 10% der Erdgasimporte aus der Russischen Föderation entspräche.

Aufgrund des erheblichen Substitutionspotentials von Erdgas durch eine massive Beschleunigung des Kapazitätsaufbaus von Windkraft und Photovoltaik sollten Notfallmaßnahmen dringend geprüft werden, welche zu einer umgehenden Projektrealisierung von zusätzlichen Kapazitäten in den kommenden 6 bis 18 Monaten führen könnte.

Solarthermie nutzen: Solarthermische Anlagen weisen eine hohe Flächeneffizienz und im Vergleich zu anderen Technologien die niedrigsten Treibhausgas-Vermeidungskosten auf (Prognos, 2018). Große Solarkollektorfelder können mit landwirtschaftlicher Nutzung (Agri-Solarthermie) kombiniert werden. Anwendungsgebiete der Solarthermie sind Privathaushalte, gewerbliche und industrielle Prozesse und die Einspeisung in Wärmenetze. Im Sommerhalbjahr kann ein Großteil des Wärmebedarfs zur Trinkwassererwärmung solarthermisch gedeckt werden. Das Anwendungspotential für gewerbliche und industrielle solare Prozesswärme liegt bei ca. 60 TWh pro Jahr (Schmitt, 2014). Große Solarkollektorfelder liefern in Dänemark schon heute in mehr als 100 Fernwärmenetze Wärme mit einem durchschnittlichen solaren Deckungsgrad am Gesamtwärmeverbrauch einer Kommune von rund 20%. Einige der Anlagen sind mit einem saisonalen Erdbecken-Wärmespeicher verbunden (Frey, 2018; Plan Energi, 2018; Solnet 4.0, 2019). Auch in „Solarenergiedörfern“ kann Solarwärme bis zu 70% der Heizwärme bereitstellen.

Solarthermische Anlagen sind kurzfristig verfügbar, Produktionskapazitäten sind in Europa vorhanden, sie brauchen keine aufwändige Infrastruktur und führen zu lokaler Wertschöpfung (BMW, 2021). 10 bis 20% der Niedertemperaturwärme lässt sich sinnvoll durch solarthermische Anlagen bereitstellen. In diesem Anwendungsbereich haben sie somit einen wichtigen Stellenwert, insbesondere für die kurz- und mittelfristige Perspektive der Wärmewende.

Geothermie erschließen: In weiten Teilen Deutschlands kann die tiefe Geothermie (>400 m Tiefe) einen Beitrag zur Wärmeversorgung in Höhe von mindestens 100 TWh (AGFW et al., 2019; Leibniz Institut für angewandte Geophysik, 2018a, 2018b) leisten. Bracke & Huenges (2021) sprechen sogar von 300 TWh und weisen auf die Möglichkeit hin, zusätzlich unterirdisch Wärme zu speichern. Zur Absicherung gegen Fündigkeitsrisiken sollte zügig ein Risikofonds eingeführt werden, wie es bereits in der Ampel-Koalitionsvereinbarung festgehalten wurde. In den Niederlanden wurden damit bereits gute Erfahrungen gemacht (Ministry of Economic Affairs and Climate Policy, 2019). Hier gilt: Es braucht eine Industrie, die Bohrtürme herstellt und hunderte Bohrungen abteuft. Dies erfordert klare Signale aus der Politik. Auch die oberflächennahe Geothermie (bis ca. 200 m Tiefe) bietet mit Blick auf kalte Nahwärmenetze und die Versorgung von Einzelgebäuden noch große Potenziale.

Abfallverbrennung: Für einen zügigen Ausstieg aus den Energieträgern Erdöl und Erdgas ist für eine Übergangsphase die Verbrennung von Müll-, Abfall-, Altholz- und gegebenenfalls auch Restholz notwendig, um die Wärmeversorgung in großen Städten zu gewährleisten. Recycling ist allerdings stets der Verbrennung vorzuziehen.

Biomassepotenziale sind begrenzt: In zahlreichen Studien ist ausgeführt, dass Biomassepotenziale zwar vorhanden, aber begrenzt sind (UBA 2019). Die Vergärung von Abfall und Reststoffen zu Biogas kann einen Beitrag zur Strom- und Wärmeversorgung leisten, aber die Verfügbarkeit von Holz ist zunehmend unsicher und wie auch der Einsatz von Energiepflanzen umstritten. Die Nutzung der nur begrenzt verfügbaren und heute primär als Grundlast verwendeten Biomasse sollte flexibilisiert werden und in Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) strom- und wärmenetzdienlich überwiegend zur Spitzenlastdeckung eingesetzt werden. Nachhaltig erzeugtes Biogas

kann kostengünstig zur elektrischen Spitzenleistung beitragen. Derzeit laufen Biogasanlagen in Deutschland allerdings überwiegend durchgehend mit ca. 5 GW Leistung. Wenn dieselbe Menge Biogas nur zur Deckung der Spitzenlast genutzt würde, ergibt sich – unter der Annahme, dass dieselbe Gasmenge in einem Drittel der bisherigen Zeit (also 2920 anstelle 8760 Stunden im Jahr) verfeuert wird – ein Beitrag zur Spitzenlastdeckung mit einer Leistung von 15 GW. Im Jahr 2021 liefen die deutschen Gaskraftwerke mit rund 2775 Volllaststunden. Durch Einsatz von Batterien, welche Strom aus Biogas, PV- und Windstrom zwischenspeichern, kann diese Zeit verkürzt werden und damit eine höhere Leistung bei gleichem Gasbedarf gesichert werden. Fell und Welteke-Fabricius (2022) wie auch Schug (2022) sehen hierzu vor, sowohl drucklose Pufferspeicher für Biogas als auch Wärmespeicher zu errichten und die Blockheizkraftwerke der vorhandenen Biogasanlagen auf die drei- bis fünf-fache Leistung zu repowern.

Wasserstoff ist für die dezentrale Heizung von Gebäuden keine Lösung: Die wissenschaftliche Studienlage zu Wasserstoff als Energieträger für die dezentrale Heizung von Gebäuden ist eindeutig: Wasserstoff ist auf absehbare Zeit zu knapp, zu teuer und zu ineffizient, als dass er als Brennstoff zur Wärmebereitstellung eingesetzt werden könnte. Die Verbrennung von Wasserstoff zur Raumwärmebereitstellung ist energetisch ineffizienter als eine Wärmepumpe oder selbst eine Direktstromheizung. (Agora Energiewende, 2019; Baldino et al., 2021; Bogdanov et al., 2021; Cassarino & Barrett, 2021; Energy Transitions Commission, 2021; Gerhardt et al., 2020, IEA, 2021; IRENA, 2022; Öko-Institut e. V., 2021; Rosenow et al., 2020; Ueckerdt et al., 2021).

7. Ausbau der notwendigen Infrastruktur

Planung und Realisierung von Wärmenetzen: In den durch die Wärmeplanung benannten Gebieten mit hoher Siedlungsdichte muss unverzüglich mit der Planung und Realisierung von Wärmenetzen begonnen und es müssen regenerative Wärmequellen hierfür erschlossen werden. Auch private Wärmenetze sollten möglich sein. Verschiedene Studien berechnen Szenarien mit einem Wachstum des durch Wärmenetze versorgten Anteils an Gebäuden von heute 14 % (AG Energiebilanzen, 2022) auf 25 % (Wuppertal Institut, 2022) oder gar 70 % für Großstädte (AGFW, 2015).

Wärmepumpen optimal einsetzen: Wärmepumpen werden langfristig 60–70 % des Wärmebedarfs decken (Dena, 2018; UBA, 2019). Da Luftwärmepumpen insbesondere bei Minustemperaturen nur mit geringen Wirkungsgraden (Arbeitszahl) arbeiten, sollten alle Möglichkeiten genutzt werden, vergleichsweise warme Wärmequellen wie Erdwärme, Abwasser, industrielle Prozesse, unterirdische Wasseradern und Gewässer zur Gewinnung der Umgebungswärme zu nutzen. 2021 wurden etwa 150000 Heizungswärmepumpen installiert, 18 % aller ausgetauschten und neugebauten Heizsysteme (Clausen & Hinterholzer, 2022). Dieser Anteil sollte möglichst rasch auf über 80 % aller ausgetauschten und neugebauten Heizsysteme gesteigert werden. Um eine solche Steigerung einfacher zu machen, ist der Ausbau des Angebots von Wärmepumpen mit höheren Vorlauftemperaturen für mäßig wärmegeämmte Altbauten genauso hilfreich wie das Angebot von Wärmepumpen, die ohne fluoridierte Treibhausgase (F-Gase) als Kältemittel auskommen. Darüber hinaus sollten

modernste Fabriken für Wärmepumpen entstehen (Clausen, 2021). Ziel sollte es sein, ab 2025 ca. 800 000 möglichst langlebige Wärmepumpen pro Jahr herzustellen und ihren Preis gegenüber dem heutigen Niveau zu halbieren. Hierzu ist für die Industrie Planungssicherheit zu schaffen.

8. Flankierende Maßnahmen

Fachkräfteinitiative: Der eklatante Mangel an Fachkräften ist eine Gefahr für die Wärmewende (Blazejczak & Edler, 2021). Daher ist eine Ausbildungsoffensive für Wärmepumpeninstallateure dringend notwendig. Diese sollte eine flächendeckende Berufsorientierung für Schüler:innen unter Einschluss von Gymnasiast:innen über die entsprechenden Ausbildungsberufe und die mit diesen verbundenen Karriere-möglichkeiten informieren und deren Relevanz für die Energiewende erläutern. Der Einsatz von Wärmepumpen mit den Kältemitteln Propan (R290) oder CO₂ würde den Engpass im Handwerk weiter reduzieren, weil Handwerksbetriebe sich für den Umgang mit diesen Kältemitteln nicht nach der F-Gase-Verordnung aufwändig zertifizieren lassen müssten. Auch um die Planung und Realisierung von Wärmenetzen mit ausreichender Geschwindigkeit voranzutreiben, ist die Ausbildung von Fachkräften mit entsprechenden Qualifikationen notwendig. Es sollte geprüft werden, ob Quereinsteigern durch geeignete Lehrgänge der Zugang ins Handwerk erleichtert werden kann. Zudem könnte die Kooperation der Handwerkskammern mit Hochschulen die Attraktivität der Berufe erhöhen und den Wissensaustausch stärken. Bei der Weiterbildung von Installateuren wären auch Lehrgänge hilfreich, mit denen ihnen der stromseitige Anschluss von Wärmepumpen und Photovoltaikanlagen durch einen Lehrgang zur „Elektrofachkraft für festgelegte Tätigkeiten“ ermöglicht wird. Zudem muss die Ausbildung von Energieberatern verstärkt werden und die Beratungsqualität durch eine anerkannte Zertifizierung von Energieberatern erhöht werden.

Verbot von Gas- und Ölheizungen: Die Installation von neuen Gas- und Ölheizungen sollte ab sofort bundesweit zumindest überall dort verboten werden, wo der Anschluss an ein Wärmenetz möglich ist. Außerdem sollte die Installation von neuen Gas- und Ölheizungen so schnell wie möglich mit Blick auf die Verfügbarkeit von Wärmepumpen in allen Gebäuden verboten werden und, in Verbindung mit dem Heizungstausch, eine qualifizierte und nachhaltige Dämmung der Gebäudehülle angestrebt werden. Seitens der Bundesregierung sollte die Vorgabe des Koalitionsvertrags zeitlich vorgezogen werden, wonach ab 2025 nur noch Heizungen eingebaut werden dürfen, die auf Basis von 65 % erneuerbaren Energien betrieben werden. Das würde einem vollständigen Verbot von Gas- und Ölheizungen gleichkommen. Ergänzend sollte ein Stufenplan erlassen werden, der auch den Betrieb von Öl- und Erdgasheizungen, zeitlich gestaffelt nach Alter der Kessel, verbietet (Wuppertal Institut, 2022). Mit steuerfinanzierten Fördermaßnahmen sollte dieser Umbau umfassend unterstützt werden. Diese Maßnahmen sollten nicht nach dem Gießkannenprinzip erfolgen, sondern gezielt bei der Sanierung von Altbauten helfen und zudem kleine Wohnflächen sowie im Ortsvergleich günstig vermieteten Wohnraum in strukturschwachen Gegenden und schlechten Wohnlagen bevorzugt fördern. Durch den Abbau von klimaschädlichen Subventionen, zum Beispiel Strompreisvergünstigungen für die Industrie, Dieselprievileg, Entfernungspauschale, Dienstwagenprivileg und

Steuerprivilegien der Luftfahrt (Forum Ökologisch-Soziale Marktwirtschaft, 2020), könnten zudem erhebliche zusätzliche Mittel für die sozialverträgliche Umsetzung der Wärmewende bereitgestellt werden.

9. Quantitative Auswirkungen

In einer zur Veröffentlichung anstehenden Studie haben Altermatt et al. (2022) abgeschätzt, wie hoch der Beitrag einer beschleunigten Verbreitung von Wärmepumpen zur Wärmeversorgung von Haushalten und Industrie sein kann. Darin werden Stromquellen gemäß dem neuen Ausbauplan von Wind- und PV-Anlagen zugrunde gelegt, der im Januar 2022 vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) in der „Eröffnungsbilanz“ der Öffentlichkeit vorgestellt wurde (BMWK, 2022). Dieser sieht vor, bis 2030 ca. 80 % des Stroms aus erneuerbaren Quellen zu erzeugen. Im Modell liefern sehr flexible Gaskraftwerke den dann noch fehlenden Strom. Diese Modellrechnungen basieren auf verschiedenen Szenarien für das Wachstum der Anzahl installierter Wärmepumpen in Deutschland (Roadmap des Bundesverbands Wärmepumpe/ beschleunigt/ schnell/ sehr schnell). Ausgangspunkt ist die „Roadmap Wärmepumpe“ des BWP (2021), die den Bestand bis 2030 auf 6 Millionen Wärmepumpen wachsen sieht. Ein beschleunigtes Szenario legt ein Wachstum der Zahl der Wärmepumpen auf 14 Millionen in 2030 zu Grunde.

Bis 2025 könnte allein die Verbreitung von Wärmepumpen auf dem BWP-Pfad mehr als 7 % des aus Russland importierten Erdgases dauerhaft einsparen helfen, bis 2030 mehr als ein Viertel. Das beschleunigte Szenario erbringt bis 2025 eine Einsparung von ca. 40 %, bis 2030 steigert es den Anteil des eingesparten, aus Russland importierten Erdgases auf 75 %.

Wärmepumpen sind damit ein zentraler Baustein der Wärmewende, der neben Energiesparen, Sanierung von Gebäuden sowie Auf- und Ausbau von Wärmenetzen eine dritte Säule der Wärmewende darstellt. Der Einsatz von Wärmepumpen ist sowohl aus Sicht des Klimaschutzes wie aus Sicht der Reduktion der Importabhängigkeit geboten. Dazu müssen allerdings Hemmnisse überwunden werden. Neben der Herausforderung, Kompetenzen bei Energieberatern und im Handwerk aufzubauen und mehr Handwerker:innen zu gewinnen, ist es auch von Bedeutung, Wärmepumpen auf den Markt zu bringen, die ohne F-Gase betrieben werden können, die preiswerter sind, und die mit weiter erhöhter Effizienz Strom in Wärme wandeln.

Fazit

Die sehr schnelle Transformation der Strom- und Wärmeversorgung hin zu regenerativen Wärmequellen in Verbindung mit Energieeinsparung und -effizienz ist für eine sicherheitspolitisch wünschenswerte, weitreichende Importunabhängigkeit der Europäischen Union und gleichzeitig als Beitrag zur Lösung der Klimakrise notwendig. Die erforderlichen technischen, regulatorischen und finanziellen Maßnahmen, die ergriffen werden müssen, sind bekannt und können sofort umgesetzt werden. Politisch wie klimatologisch ist schnelles Handeln erforderlich.

© J. Clausen, H. Brendel, C. Breyer, C. Gerhards, U. Jordan, U. Weber, H. Ehmler, S. Golla, K.-M. Hentschel, R. Hoffmann, G. Hagedorn, C. Kemfert, S. Linow, P.-Y. Oei, M. Stöhr, L. Valdivia; CC BY-SA 4.0

Literatur

- AG Energiebilanzen. (2021a). *Anwendungsbilanzen zur Energiebilanz Deutschland. Detaillierte Anwendungsbilanzen der Endenergiesektoren für 2019 und 2020*. Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V. https://ag-energiebilanzen.de/wp-content/uploads/2020/10/ageb_20v_v1.pdf
- AG Energiebilanzen. (2021b). *Auswertungstabellen zur Energiebilanz für die Bundesrepublik Deutschland 1990 bis 2010 (Stand September 2021)*. Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V. https://ag-energiebilanzen.de/wp-content/uploads/2020/09/awt_2020_d.pdf
- AG Energiebilanzen. (2021c). *Strommix Dezember 2021*. <https://ag-energiebilanzen.de/wp-content/uploads/2021/02/Strommix-Dezember2021.pdf>
- AG Energiebilanzen. (2022). *Energieverbrauch in Deutschland Daten für das 1. bis 4. Quartal 2021*. https://ag-energiebilanzen.de/wp-content/uploads/2022/01/quartalsbericht_q4_2021.pdf
- AGFW e.V., Bundesverband Erneuerbare Energien (BEE), Verband kommunaler Unternehmen, & Bundesverband Geothermie. (2019). *Voraussetzungen für eine Beschleunigung der Wärmewende und effizienten Klimaschutz durch die Nutzung von Geothermie in Fernwärmenetzen*. https://www.vku.de/fileadmin/user_upload/Verbandsseite/Landingpages/Geothermie/Impulsanbieter_Geothermie_AGFV_VKU_BEE_BVG.pdf
- AGFW e.V., Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e.V., IFAM & IER. (2015). *Die 70/70-Strategie: Konzept und Ergebnisse*. <https://www.agfw.de/strategien-der-waermewende/perspektive-der-fw-7070-4040/>
- Agora Energiewende. (2019). *Building sector efficiency: A crucial component of the energy transition. Final report*. Zugriff am 31.1.2022. <https://www.agora-energiewende.de/en/publications/building-sector-efficiency-a-crucial-component-of-the-energy-transition/>
- American Council on Renewable Energy. (2018). *The Role of Renewable Energy in National Security (ACORE Issue Brief, 16.10.2018)*. https://acore.org/wp-content/uploads/2018/10/ACORE_Issue-Brief_The-Role-of-Renewable-Energy-in-National-Security.pdf
- Altermatt, P. P., et al. (2022). unveröffentlichtes Manuskript
- Baldino, C., O'Malley, J., Searle, S., & Christensen, A. (2021). *Hydrogen for heating? Decarbonization options for households in the European Union in 2050*. ICCT. Zugriff am 31.1.2022. <https://theicct.org/publication/hydrogen-for-heating-decarbonization-options-for-households-in-the-european-union-in-2050/>
- Baumann, F., Bijma, J., Breyer, C., Daub, C., Ekardt, F., Fensterle, J., Hagedorn, G., Hardt, J., Heiland, S., Hennicke, H., Herold, A., Kloke-Lesch, A., Krause, H., Kromp-Kolb, H., Lakner, S., Latif, M., Leinfelder, R., Lemke, P., Lucht, W., ..., Wulfmeyer, V. (2020). *Stellungnahme der Scientists for Future zu den „Forderungen von Fridays for Future Deutschland an die deutschen Vertreter*innen auf EU-Ebene“*. Scientists4Future. <https://info.scientists4future.org/stellungnahme-der-scientists-for-future-zu-den-forderungen-von-fridays-for-future-deutschland-an-die-deutschen-vertreterinnen-auf-eu-ebene/>
- Beucker, S., & Hinterholzer, S. (2021). *Klimaschutz und Energieeffizienz durch digitale Gebäudetechnologien*. Borderstep Institut. <https://www.borderstep.de/publikation/beucker-s-hinterholzer-s-2021-klimaschutz-und->

- energieeffizienz-durch-digitale-gebäudetechnologien-berlin-borderstep-institut/
- Blazejczak, J., & Edler, D. (2021). *Arbeitskräftebedarf nach Sektoren, Qualifikationen und Berufen zur Umsetzung der Investitionen für ein klimaneutrales Deutschland*. Kurzstudie im Auftrag der Bundestagsfraktion Bündnis 90/Die Grünen. https://www.gruene-bundestag.de/fileadmin/media/gruenebundestag_de/themen_az/klimaschutz/pdf/2105_Kurzstudie_Arbeitskra_ftebedarf_Klimaneutralitaet.pdf
- BMU (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit). (2016). *Klimaschutzplan 2050. Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung*. (S. 1–92). Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB). https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaschutz/klimaschutzplan_2050_bf.pdf
- BMW. (2013). *Verordnung über Allgemeine Bedingungen für die Versorgung mit Fernwärme (AVBFernwärmeV)*. https://www.gesetze-im-internet.de/avbfernw_rmev/
- BMWi (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie). (2021). *Zeitreihen zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland*. <https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Downloads/zeitreihen-zur-entwicklung-der-erneuerbaren-energien-in-deutschland-1990-2020.pdf>
- BMWK (Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz). (2022). *Eröffnungsbilanz Klimaschutz*. https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/Energie/220111_eroeffnungsbilanz_klimaschutz.pdf?__blob=publicationFile&v=22
- Bogdanov, D., Ram, M., Aghahosseini, A., Gulagi, A., Oyewo, A. S., Child, M., Caldera, U., Sadovskaia, K., Farfan, J., De Souza Noel Simas Barbosa, L., Fasihi, M., Khalili, S., Traber, T., & Breyer, C. (2021). Low-cost renewable electricity as the key driver of the global energy transition towards sustainability. *Energy*, 227, 120467. doi:10.1016/j.energy.2021.120467
- BP (2021). *Statistical review of world energy*. BP p.l.c. <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2021-full-report.pdf>
- Bracke, R., Huenges, E. (2022). *Roadmap Tiefe Geothermie für Deutschland. Handlungsempfehlungen für Politik, Wirtschaft und Wissenschaft für eine erfolgreiche Wärmewende*. Strategiepapier von sechs Einrichtungen der Fraunhofer-Gesellschaft und der Helmholtz-Gemeinschaft. doi:10.24406/ieg-n-645792
- Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle. (2021). *Rohöl INFO Dezember 2020 (Rohölimporte)*. Zugriff am 7.3.2022. https://www.bafa.de/SharedDocs/Kurzmeldung/en/DE/Energie/Rohoel/2020_12_rohloelinfo.html
- BWP (Bundesverband Wärmepumpe e.V.). (2021). *Roadmap Wärmepumpe. Der Weg zur Dekarbonisierung des Gebäudesektors*. Zugriff am 9. 3.2022. <https://www.waermepumpe.de/politik/waermarkt/>
- Cassarino, T. G., & Barrett, M. (2021). *Meeting UK heat demands in zero emission renewable energy systems using storage and interconnectors*. Preprint. In Review. doi:10.21203/rs.3.rs-629226/v1
- Clausen, J. (2021). *Digitalisierung der Produktion. Elektroautos und serielles Sanieren*. CliDiTrans Werkstattbericht. Borderstep Institut.
- Clausen, J., Benne, M., & Hinterholzer, S. (2021). *Wärmeplanung als Instrument der Wärmewende. Digitale Unterstützung als Schlüssel zur Verbreitung in der Verwaltung*. CliDiTrans Werkstattbericht. Borderstep Institut.
- Clausen, J., & Hinterholzer, S. (2022). *Wärmepumpenanlagen: Technologie – Wirtschaftlichkeit – Diffusionsfaktoren*. Borderstep. Institut.
- Dena. (2018). *Dena-Leitstudie Integrierte Energiewende*. Deutsche Energie-Agentur GmbH. https://www.dena.de/fileadmin/dena/Dokumente/Pdf/9261_dena-Leitstudie_Integrierte_Energiewende
- Deutscher Bundestag. (2019). *Gesetz zur Einführung eines Bundes-Klimaschutzgesetzes und zur Änderung weiterer Vorschriften*.
- Energy Transitions Commission (ETC). (2021). *Making the hydrogen economy possible: Accelerating clean hydrogen in an electrified economy*. <https://www.energy-transitions.org/publications/making-clean-hydrogen-possible/>
- Fell, H.-J., & Welteke-Fabricius, U. (2022). *Energiewende sichern. Mit lokalen Speicherkraftwerken und nachhaltiger Biomasse für Strukturwandel und Klimaschutz in der Landwirtschaft*. <https://www.energywatchgroup.org/publications/>
- Forum Ökologisch-Soziale Marktwirtschaft (FÖS) (2020). *Zehn klimaschädliche Subventionen im Fokus. Wie ein Subventionsabbau den Klimaschutz voranbringt und den Bundeshaushalt entlastet*. Eine Studie des Forums Ökologisch-Soziale Marktwirtschaft im Auftrag von Greenpeace. https://foes.de/publikationen/2020/2020-11_FOES_10_klimaschaedliche_Subventionen_im_Fokus.pdf

- Fraunhofer IEE. (2019). *Windenergie Report Deutschland 2018*.
http://windmonitor.iee.fraunhofer.de/opencms/export/sites/windmonitor/img/Windmonitor-2018/WERD_2018.pdf
- Frey, J. (2018). *Dronninglund Fjernvarme*. Vortrag gehalten auf dem deutsch-dänischen Dialog Wärmenetze, am 12.6.2018 in Stuttgart.
- Gerhards, C., Weber, U., Klafka, P., Golla, S., Hagedorn, G., Baumann, F., Brendel, H., Breyer, C., Clausen, J., Creutzig, F., Daub, C.-H., Helgenberger, S., Hentschel, K.-M., Hirschhausen, C. von, Jordan, U., Kemfert, C., Krause, H., Linow, S., Oei, P.-Y., ..., Weinsziehr, T. (2021). Klimaverträgliche Energieversorgung für Deutschland – 16 Orientierungspunkte / Climate-friendly energy supply for Germany – 16 points of orientation. *Diskussionsbeiträge der Scientists for Future* 7, 1–55. doi:10.5281/zenodo.4409334
- Gerhardt, N., Bard, J., Schmitz, R., Beil, M., Pfennig, M., Kneiske, T. (2020). *Wasserstoff im zukünftigen Energiesystem: Fokus Gebäudewärme. Studie zum Einsatz von H₂ im zukünftigen Energiesystem unter besonderer Berücksichtigung der Gebäudewärmeversorgung*.
https://www.iee.fraunhofer.de/content/dam/iee/energiesystemtechnik/de/Dokumente/Studien-Reports/FraunhoferIEE_Kurzstudie_H2_Gebaeudewaerme_Final_20200529.pdf
- German Zero. (2022). *1,5-Grad-Gesetzespaket Maßnahmenkatalog mit Gesetzesentwürfen*.
https://germanzero.de/media/pages/assets/110b2934ae-1646221023/220228_gz-gesetzespaket.pdf
- Gründiger, W., Bendlin, L., Creutzig, F., Hagedorn, G., Kemfert, C., Neumärker, B., Praetorius, B., & Tvrtković, M. (2021). CO₂-Bepreisung und soziale Ungleichheit in Deutschland. *Momentum Quarterly* 10, 176–187.
doi:10.15203/momentumquarterly.vol10.no3.p176-187
- IEA (International Energy Agency). (2021). *Net zero by 2050 – A roadmap for the global energy sector*. Paris.
- IEA (International Energy Agency). (2022). *A 10-point plan to reduce the European Union's reliance on Russian natural gas*. Paris.
<https://www.iea.org/reports/a-10-point-plan-to-reduce-the-european-unions-reliance-on-russian-natural-gas>
- IRENA (International Renewable Energy Agency). (2022). *Geopolitics of the energy transformation. The hydrogen factor*. Bonn. Zugriff am 31.1.2022.
<https://www.irena.org/publications/2022/Jan/Geopolitics-of-the-Energy-Transformation-Hydrogen>
- Jasiūnas, J., Lund, P.D., Mikkola, J. (2021). Energy system resilience – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 150, 111476.
doi:10.1016/j.rser.2021.111476
- Jones, L. (2015). *Societies under siege. Exploring how international economic sanctions (do not) work*. 253 S., Oxford University Press.
- KfW. (2022). *Mit staatlicher Förderung umsteigen und Heizkosten sparen*. KfW.
<https://www.kfw.de/inlandsfoerderung/Privatpersonen/Bestehende-Immobilie/Energieeffizient-sanieren/Heizung/>
- Kluge, J. (2021). *Dokumentation: Stellungnahme: „Entwicklung der deutsch-russischen Wirtschaftsbeziehungen“*. Bundeszentrale für politische Bildung.
<https://www.bpb.de/themen/europa/rusland-analysen/328937/dokumentation-stellungnahme-entwicklung-der-deutsch-russischen-wirtschaftsbeziehungen/>
- Kopatz, M. (2016). *Kommunale Suffizienzpolitik Strategische Perspektiven für Städte, Länder und Bund*. Kurzstudie des Wuppertal Instituts für Klima, Umwelt, Energie, Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland e.V. (BUND) Friends of the Earth Germany,
<https://www.bund.net/service/publikationen/detail/publication/kommunale-suffizienzpolitik-strategische-perspektiven-fuer-staedte-laender-und-bund/>
- Leibniz-Institut für angewandte Geophysik. (2018a). *Hydrothermisches Potenzial ab 60°C*. Hannover. Zugriff am 31.1.2020.
<https://www.windkraft-journal.de/2018/09/13/geothermie-statt-kohle-erdwaerme-kann-einen-bedeutenden-beitrag-zum-kohleausstieg-leisten/127426>
- Leibniz-Institut für angewandte Geophysik. (2018b). *Positionspapier: Die Rolle der tiefen Geothermie bei der Wärmewende. Wie Deutschland 60% erneuerbare Wärme bis 2050 schaffen könnte*. Hannover. https://www.leibniz-liag.de/fileadmin/user_upload/s4/downloads/positionspapier_waermewende.pdf
- Leopoldina. (2022). *Wie sich russisches Erdgas in der deutschen und europäischen Energieversorgung ersetzen lässt (2022)*.
<https://www.leopoldina.org/publikationen/details/publication/wie-sich-russisches-erdgas-in-der-deutschen-und-europaeischen-energieversorgung-ersetzen-laesst-2022/>
- Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg. (2021). *Kommunale Wärmeplanung. Handlungsleitfaden*.
<https://www.baden-wuerttemberg.de/de/service/publikation/did/handlungsleitfaden-kommunale-waermeplanung/>
- Ministry of Economic Affairs and Climate Policy. (2019). *Natural resources and geothermal energy*

- in the Netherlands 2018. Annual review. Den Haag. Zugriff am 12.3.2020.
<https://www.nlog.nl/en/annual-reports>
- Öko-Institut e. V. (2021). *Die Wasserstoffstrategie 2.0 für Deutschland*. Öko-Institut e. V.
<https://www.stiftung-klima.de/app/uploads/2021/05/Oeko-Institut-2021-Die-Wasserstoffstrategie-2.0-fuer-Deutschland.pdf>
- Overland, I. (2019). The geopolitics of renewable energy: Debunking four emerging myths. *Energy Research & Social Science* 49, 36–40.
doi:10.1016/j.erss.2018.10.018
- PlanEnergi., Trier, D., Bava, F., Skov, C.K., Sørensen, S.S. (2018). *Solar district heating trends and possibilities—Characteristics of ground-mounted systems for screening of land use requirements and feasibility*. Kopenhagen.
<http://iea-shc.org/Data/Sites/1/publications/SDH-Trends-and-Possibilities-IEA-SHC-Task52-PlanEnergi-20180619.pdf>
- Peksen, D. (2019). When do imposed economic sanctions work? A critical review of the sanctions effectiveness literature. *Defence and Peace Economics*, 30, 635–647.
doi:10.1080/10242694.2019.1625250
- Prognos, Boston Consulting Group, BCG. (2018). *Klimapfade für Deutschland*.
<https://bdi.eu/publikation/news/klimapfade-fuer-deutschland/>
- Rosenow, J., Lowes, R., Broad, O., Hawker, G., Wu, J., Qadrdan, M., & Gross, R. (2020). *The pathway to net zero heating in the UK*. UK Energy Research Centre Energy Data Centre (UKERC EDC). doi:10.5286/UKERC.EDC.000941
- Schmitt, B. (2014). *Integration thermischer Solaranlagen zur Bereitstellung von Prozesswärme in Industriebetrieben*. Dissertation, Universität Kassel, Shaker Verlag.
- Schug, A. (2022-02-25). Der ungenutzte Gasspeicher. *energiezukunft*.
<https://www.energiezukunft.eu/erneuerbare-energien/biomasse/der-ungenutzte-gasspeicher/>
- Seifert, T., West, C., Tvrtković, M., Huber, M., Schweer, Rüdiger, Kranich, K., Boecker, R., Herhardt, H., Weber, U. (2021). *Was das Leben ausmachen wird: Perspektiven Paris-kompatibler kommunaler Zukunftsplanung*. Positionen aus der S4F-Fachgruppe „Kommunaler Klimaschutz“, doi:10.5281/zenodo.5752014
- Solnet 4.0. (2019). *Solare Wärmenetze. Marktstatus 2018 für Deutschland und Europa*.
https://www.solar-district-heating.eu/wp-content/uploads/2019/05/Infoblatt_Solnet_Nr2.pdf
- Statistisches Bundesamt. (2021). *Gebäude und Wohnungen. Bestand an Wohnungen und Wohngebäuden Bauabgang von Wohnungen und Wohngebäuden Lange Reihen ab 1969–2020*. Statistisches Bundesamt.
www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Wohnen/Publikationen/Downloads-Wohnen/fortschreibung-wohnungsbestand-pdf-5312301.pdf
- UBA (Umweltbundesamt). (2019). *Wege in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität. RESCUE-Studie*.
https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/rescue_studie_cc_36-2019_wegen_in_eine_ressourcenschonende_treibhausgasneutralitaet.pdf
- Ueckerdt, F., Bauer, C., Dirnreichner, A., Everall, J., Sacchi, R., & Luderer, G. (2021). Potential and risks of hydrogen-based e-fuels in climate change mitigation. *Nature Climate Change*, 11, 384–393. doi:10.1038/s41558-021-01032-7
- Verein der Kohlenimporteure e. V. (2021). *Jahresbericht 2021. Fakten und Trends 2020/21*. Zugriff am 6.3.2022.
<https://www.kohlenimporteure.de/publikationen/jahresbericht-2021.html>
- Wenzel, F.-T. (2022-03-05). Klimaschutz muss nun warten. *Hannoversche Allgemeine Zeitung*, S. 9.
- Wissenschaftliche Dienste des Deutschen Bundestages. (2020). *Außenhandel der Russischen Föderation mit fossilen Energieträgern*. WD 5: Wirtschaft und Verkehr, Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz, 3000-069/20.
<https://www.bundestag.de/resource/blob/794024/dcecee2d94350a3d30f3cd9a7aed7791/WD-5-069-20-pdf-data.pdf>
- Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH. (2022). *Heizen ohne Öl und Gas bis 2035. Ein Sofortprogramm für erneuerbare Wärme und effiziente Gebäude*.
https://www.greenpeace.de/publikationen/Heizen%20ohne%20%25C3%2596%2520und%20Gas.pdf&sa=D&source=docs&ust=1646566619655774&usg=AOvVaw3tFZtCLJ54DBuuYoT6FT_m
- ZDF. (2022-03-08). *Bundeswirtschaftsminister Habeck erteilt längeren AKW-Laufzeiten Absage*. ZDF.
<https://www.zdf.de/nachrichten/wirtschaft/habeck-energie-importstopp-ukraine-krieg-russland-100.html>