

Wärmewende in der Stadt

Summary

Wärmewende bedeutet Klimaneutralität bei der Erzeugung und Nutzung von Wärme bis spätestens 2045 – idealerweise früher. Und das erfordert große, neue Anstrengungen. Denn die bisherigen Erfolge auf diesem Weg – eine Reduzierung der THG-Emissionen¹ im Gebäudesektor seit 1990 von 210 auf rd. 120 Mt heute (Jahr 2020²) - sind nicht Ergebnisse gezielter Politik, sondern vor allem der Begleitumstand der Wende im Osten der Bundesrepublik. Schnell wandelte sich damals die Wärmeversorgung. Man heizte nicht mehr mit Braunkohle-Briketts, sondern stellte zunächst auf Öl um und dann auf Gas.

Heute gelten Wärmenetze, Wärmepumpen, energetische Sanierung und grüne Gase als wichtigste Lösungsoptionen. Doch bislang haben sie noch bei weitem nicht genug zur Minderung der THG-Emissionen beitragen. Energetische Sanierung ist – ganz gleich, welche Technologie am Ende für die Wärmeerzeugung selbst eingesetzt wird – notwendig, um die Wärmelast bis spätestens 2045 mit klimaneutralen Erzeugungstechnologien preisgünstig decken zu können.

Nachfolgend wird dargestellt, wie sich das Ziel der Wärmewende – eine klimaneutrale Wärmeversorgung spätestens 2045 - am besten erreichen lässt. Es ist von elementarer Bedeutung, die Wärmewende von den Kundinnen und Kunden und ihren Bedürfnissen aus zu strukturieren und zu gestalten. In den Ballungsräumen bedeutet das vor allem, die Situation von Mieterinnen und Mietern aber auch von industriellen Wärmekunden zu betrachten. Und es geht darum, die Wärmewende im Rahmen eines möglichst ganzheitlichen Kostenoptimierungsansatzes anzugehen.

Der Vielgestaltigkeit der konkreten Situation vor Ort muss Rechnung getragen werden. Es gibt nicht die *eine einzig richtige* Technologie für die Wärmewende. Derlei angebotsorientierte Vorfestlegungen führen in die Irre. Allerdings können robuste Hauptpfade identifiziert werden:

Je stärker ein gegebenes Wärmeversorgungsgebiet geprägt ist durch den Charakter eines Ballungsraums oder durch Geschosswohnungsbau mit zumeist hohem Mietwohnungsbestand, umso vorteilhafter ist die Nutzung von (klimaneutral gespeisten) Wärmenetzen.

Je geringer umgekehrt die Wärmedichte und je höher der Anteil vergleichsweise neuer, voll sanierter oder noch zu errichtender Gebäude ausfallen, umso eher sind Wärmepumpen vorteilhaft. Denn ihre technologische Vorteilhaftigkeit setzt eine sehr tief gehende Sanierung oder jedenfalls einen sehr guten energetischen Grundzustand geradezu elementar voraus.

Auch die Versorgung mit klimaneutralen Gasen kann vorteilhaft sein, nämlich dann, wenn die Wärmedichte zu gering ist, um den Anschluss an ein Wärmenetzsystem zu rechtfertigen und der Einsatz von Wärmepumpen (inkl. der Kosten einer eventuellen Verstärkung des Stromnetzes, des Aufbaus zusätzlicher gesicherter elektrischer Leistung und der nötigen Sanierung) teurer wäre oder eine dezentrale Wärmepumpe baulich bzw. räumlich nicht errichtet werden kann. Dies gilt auch für Objekte, die selbst bei einer vollständigen Sanierung nicht allein durch Wärmepumpen

¹ Im Folgenden werden alle klimarelevanten Emissionen von Treibhausgasen (=THG) berücksichtigt und genannt, neben dem dominierenden CO₂ auch CH₄, N₂O usw.

² [Statista 2021]

ZUR DISKUSSION

ausreichend versorgt werden können. Klimaneutrale Gase wären hier eine wichtige Option am Rande von Städten und Industriegebieten.

Der Prozesswärme-Bedarf der Industrie ist aus technisch-ökonomischen Gründen vielfach nur durch klimaneutrale Gase auch im Verteilnetz zu bewerkstelligen. Gleiches gilt für Prozessgase beim Handel und Gewerbe, welche durch klimaneutrale Gase ersetzt werden könnten.

Eine Verbesserung der Endenergieeffizienz durch Sanierung ist für alle Anwendungsfälle wesentlich; je weniger Wärmeenergie und Wärmeleistung gebraucht wird, umso geringer sind die Kosten für die klimaneutralen Energien.

Bei der ökonomischen Bewertung der Optionen der Wärmewende sind die Kosten der Infrastrukturen (Aus- und Umbau der Wärme- und Gasnetze, Stromnetzverstärkungen und Erhöhung gesicherter elektrischer Leistung) mitzubeachten.

Fünf Thesen zur Wärmewende in der Stadt:

1. Eine erfolgreiche Wärmewendestrategie muss von den Kundenbedürfnissen ausgehen. Im Ballungsraum sind das ganz besonders die von Mieterinnen und Mietern wie auch die der Industrie.
2. Die Kundenbedürfnisse und die Mittel, diese Bedürfnisse zu decken (Energieträger, Infrastrukturen usw.), fallen regional und sektoral höchst unterschiedlich aus. Entsprechend differenziert muss auch die Wärmewende vorgehen.
3. Klimaneutralität bis spätestens 2045 ist das Ziel der Wärmewende. Unterhalb dieses Ziels sind die regionalen Wärmewendestrategien nach den Vollkosten zu bewerten. Zu diesen Kosten zählen die Energie- und Infrastrukturkosten ebenso wie indirekte Kosten, etwa Sanierung oder die Besicherung der Wärmelieferung.
4. Grundlegende Entscheidungen bei der Wärmewende sind abhängig von der Energie-, Industrie- und Bevölkerungsdichte. In hochverdichteten Ballungsräumen empfehlen sich idealtypisch leitungsgebundene Wärmewende-Strategien, also Wärmenetze, die klimaneutrale Wärme einsammeln und kosteneffizient verteilen. Je geringer die Einwohner-, Industrie und Energiedichte ausgeprägt ist, umso mehr können Wärmepumpen ihre Vorteile ausspielen. Nicht zu vergessen ist aber die Gasnetzinfrastruktur. Sie bleibt nötig, wenn im Vollkostenvergleich die Nutzung von klimaneutralem Gas günstiger ist als jeweils klimaneutral betriebene Wärmepumpen oder Wärmenetze.
5. Auch kostenoptimierte Bündel von Wärmetechnologien weisen im Verhältnis zu den herkömmlichen Anwendungen Wirtschaftlichkeitslücken auf. Diese sind entschlossen, und auf der Basis der hier vorgeschlagenen Vollkostenbetrachtung auch kosteneffizient, durch Förderung und durch Beseitigung von Fehlansätzen zu beheben (BEW, BEG, KWKG, H2 im EnWG, Reform von Abgaben und Umlagen, Wärmelieferverordnung, kommunale Wärmepläne).

ZUR DISKUSSION

Inhaltsverzeichnis

1. Vorbemerkung	4
2. Der Wärmemarkt in den Ballungsräumen Deutschlands.....	8
a. Der Wärmebedarf privater Haushalte	8
b. Der Wärmebedarf des GHD-Sektors	15
c. Gebäudeenergie	17
d. Der Wärmebedarf der Industrie	18
e. Schlussfolgerungen	21
3. Technologien der Wärmewende im Ballungsraum.....	22
a. Wärmenetze	22
b. Wärmepumpen	25
c. Klimaneutrale Gase/Wasserstoff	26
d. Sanierung	28
4. Ökonomische Bewertung.....	30
a. Transformationskosten.....	30
b. Vollkostenvergleich der technologischen Optionen	30
5. Politische Ableitungen.....	34
a. Wirtschaftlichkeitslücke und Förderbedarf.....	34
b. Politische Positionierung	36
c. Kommunale Wärmeplanung.....	40
6. Zum Abschluss: Eine Politik für die Wärmewende.....	45
Anhang: Klimaneutrale Gase und Wasserstoff	46
a. Infrastrukturen als Grundlage der Wärmewende	46
b. Biomethan/synthetisches Methan	47
c. Wasserstoff	47
Literaturverzeichnis.....	58

ZUR DISKUSSION

1. Vorbemerkung

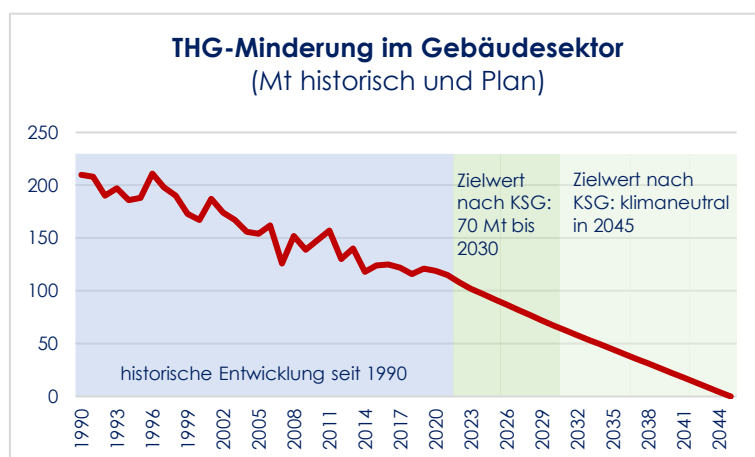
Hiermit wird eine überarbeitete Ausgabe der gleichnamigen 8KU-Wärmestudie aus dem Jahr 2021 vorgelegt. Die Überarbeitung ist aus drei Gründen angezeigt:

Erstens hat das Bundesverfassungsgericht in seiner Entscheidung vom 24. März 2021 neue Maßstäbe für den Klimaschutz geschaffen. Der Deutsche Bundestag hat dies mit Gesetzesbeschluss vom 24. Juni 2021 umgesetzt. Im Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG) sind nun im Gebäudesektor THG-Minderungen um rund 50 Mt auf 70 Mt bis 2030 vorgesehen und mit dem längerfristigen Ziel der Klimaneutralität bis spätestens 2045 verbunden.

Zweitens hat der russische Angriffskrieg auf die Ukraine und der damit verbundene Stopp russischer Gaslieferungen die energie- und klimapolitische Strategie Deutschlands unter erheblichen Druck gesetzt. Denn der schnelle Ausstieg aus der Kernenergie, aus Stein- und Braunkohle wie auch aus Mineralöl, kann auf dem Weg in eine erneuerbare Welt nicht mehr in gleichem Maße durch das relativ klimaschonende und zugleich preisgünstige Erdgas abgesichert werden. Dies ist für die Wärmewende von ganz besonderer Bedeutung.

Drittens macht dieser Umstand eine sehr viel präzisere Klärung der Rolle grüner Gase, insbesondere der von grünem Wasserstoff, erforderlich. Aufgrund der stark wachsenden Bedeutung kapitalintensiver neuer oder umgebauter Infrastrukturen auf dem Weg der Wärmewende, namentlich in Bezug auf die Rolle von Gas- bzw. Wasserstoff- wie auch von Wärme- und Stromnetzen, wird auch der Abschnitt zur kommunalen Wärmeplanung neu fokussiert.

Unbeschadet dieser Akzentsetzungen wird die zu senkende Emissionslast des Gebäudesektors weiterhin verstanden als Summe der Emissionen aus den Sektoren 1.A.4.a (Feuerungsanlagen in den Bereich Gewerbe, Handel und Dienstleistungen [GHD]), 1.A.4.b. (Feuerungsanlagen in Haushalten [HH]) und 1.A.5. (Militär).³



[KSG 2021]

Die Umsetzung des Ziels einer klimaneutralen Wärmeversorgung geht aber in vielfältiger Weise über die hier genannten Bereiche hinaus. Insbesondere ist sie nicht ohne Betrachtung der Bedarfe und Bedarfsstrukturen der Anwender zu leisten. Für

³ Der militärische Sektor spielt mit zuletzt rd. 0,94 Mt THG keine große Rolle mehr. [UBA 2022]

ZUR DISKUSSION

das hier betrachtete Feld, der Energiewende in der Stadt, schließt das auch die Industrie ein – unabhängig von der formellen Bilanzierung ihrer Emissionen.⁴

Wir Unternehmen im Kreis der 8KU sind ein Zusammenschluss großer kommunaler Energieversorgungsunternehmen. Unsere Aktivitäten liegen in großen und wachstumsstarken Ballungsräumen, in München, Nürnberg, Mannheim, Darmstadt, Frankfurt, Köln, Hannover und Leipzig. Mit Umsatzgrößen zwischen zwei und acht Milliarden Euro und über 35.000 Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern bilden wir den Mittelstand der deutschen Energiewirtschaft.

Unsere Netzinfrastruktur bringt sicher, kostengünstig und sozialverträglich klimaschonende Energie in die Ballungsräume. Energie- und Klimawende verstehen wir als Herausforderung und unternehmerische Chance, die wir aktiv nutzen. Wir investieren in Erneuerbare Energien im Strom- und Wärmesektor, beliefern private, gewerbliche und industrielle Kunden aus flexiblen und hocheffizienten KWK/Wärmenetzsystemen, die sukzessive klimaneutral betrieben werden. Mit mehr als 18 TWh stellen wir den Löwenanteil der leitungsgebundenen Wärmeversorgung in Deutschland. Das hier vorliegende Diskussionspapier konzentriert sich auf unsere Perspektive als große Energieversorger in Ballungsräumen.

Die Herausforderungen, aber auch die Chancen dieser besonderen Situation sind groß: Die Herausforderungen, weil die Emissions- und die Energiedichte in diesen Ballungsräumen unvergleichlich hoch sind. Gleichzeitig sind viele übliche Lösungsstrategien begrenzt. Dies gilt vor allem, weil Flächen knapp und teuer und folglich die Einsatzmöglichkeiten vieler klimaneutraler Energien (z.B. Solarthermie oder Grundwasser für Wärmepumpen) begrenzt sind.

Aber auch die Chancen sind groß. Urbane Ballungsräume erlauben die Kopplung verschiedenster Energie-Technologien durch vernetzte Infrastrukturen und vor allem durch den Ausgleich von Verbrauch und Erzeugung (anders gesagt: Last und Leistung), was bekanntlich bei der volatilen Einspeisung von Wind und PV ins Stromsystem von besonderem Wert ist. Gerade ein Wärmenetzsystem kann hier als gleichsam natürlicher Kurzfrist-Energiespeicher fungieren.

Erfolgskritisch für die Wärmewende in der Stadt ist aber auch die Beachtung sozialstruktureller Fragen. Großstädte sind signifikant von Mietwohnungen in großen Mehrfamilienhäusern geprägt. Der Wohnungsmarkt ist eng, ganz besonders in den Städten der 8KU-Unternehmen. Gleichzeitig gehören Mieterhaushalte eher zu den Normal- bis Geringverdienern. All dies prägt die Umsetzung einer klimaneutralen Wärmeversorgung im urbanen Raum.

Überdies ist Deutschland mit einem Anteil von gut 50% Mieterland Nr. 1 in der EU⁵. Die zuletzt in den Ballungsräumen deutlich gestiegenen Mieten haben mit dazu beigetragen, dass der politisch heikle Sachverhalt der Wohnkostenüberbelastung deutscher Haushalte im Jahr 2020 nur in drei EU-Staaten übertroffen wurde.⁶

Es ist kaum übertrieben zu sagen, dass die Wärmewende noch am Anfang steht. Die in der Vergangenheit erzielten THG-Minderungen im Gebäudesektor (GHD und

⁴ Für den Emissionssektor Industrie ist im Klimaschutzgesetz ein eigener Minderungspfad von 177 Mt im Jahr 2022 auf 118 Mt im Jahr 2030 definiert, der Emissionen aus industriellen Verbrennungsprozessen (1.A.2), der Güterproduktion (2) und - zumindest theoretisch – aus CCS-bedingten Transport- und Lagervorgängen von CO₂ umfasst (1.C). [KSG 2021]

⁵ [Eurostat 2022a]

⁶ [Eurostat 2022b]

ZUR DISKUSSION

HH) von 210 Mt (1990) auf 115 Mt (2021)⁷ sind bei genauer Betrachtung ganz wesentlich Folge der Wende, als im Osten der Bundesrepublik in seither auch nicht mehr ansatzweise erreichter Intensität Gebäude saniert oder gleich neu errichtet wurden und insbesondere die Wärmeversorgung auf Basis von Braunkohlebriketts durch Öl- und später Erdgasheizungen ersetzt wurde. Der Endenergiebedarf für die Wärmeversorgung der Haushalte sank dagegen im Vergleich der Jahre 1990 und 2020 nicht (vgl. u.), was auch daran liegt, dass die Bevölkerungszahl ebenso wie die insgesamt zur Verfügung stehende Wohnfläche signifikant gestiegen sind.

Es bleibt der jetzigen Wahlperiode vorbehalten, die in den vergangenen Jahren in Wirtschaft und Gesellschaft geführten Diskussionen zur Ausgestaltung der Wärmewende in politisches Handeln umzusetzen. Dass Wirtschaft und Gesellschaft bereit sind, die Wärmewende beherzt anzugehen und dass allerdings auch der russische Angriffskrieg auf die Ukraine die Wärmewende umso dringlicher gemacht haben, darf vorausgesetzt werden. Aber die Bereitschaft zum Wandel findet ihre Grenzen dort, wo die gewählten Maßnahmen kurzfristig orientiert, von Partialinteressen dominiert oder wenig robust, zukunftsfest und kosteneffizient erscheinen.

Konventionelle Wärmeenergieträger (Erdgas und Heizöl) waren in Deutschland bis vor kurzem relativ preisgünstig und haben kaum einen Anreiz dazu gegeben, auf eine klimaneutrale Wärmeversorgung umzusteigen. Aufgrund der Energiekrise in Folge des Ukraine-Konfliktes kam es unterdessen zu schmerzhaften Preiserhöhungen bei Strom und Gas. Hierdurch wird sich die Wirtschaftlichkeitslücke zu den erneuerbaren Energieträgern verkleinern. Damit Kundinnen und Kunden aber auch dauerhaft zu einer umweltfreundlichen Wärmeversorgung wechseln, müssen die Kostenhürden langfristig wirksam überwunden werden.

Die nachfolgenden Überlegungen dienen der Diskussion über möglichst vorteilhafte Wege zu einer klimaneutralen Wärmeversorgung im urbanen Raum, kurz: Der Wärmewende in der Stadt.

Denn die ist mit den gegenwärtigen Strategien nicht zu erreichen. Nicht zuletzt angesichts der Vielfalt der Wärmebedarfe gehen angebotsseitige Strategien fehl, die einzelne Instrumente technologieorientiert priorisieren und dabei Nachfragestrukturen übersehen. Weder ist eine exklusive Wärmepumpenstrategie sinnvoll (, die ihrerseits eine sehr weitgehende Sanierung des Bestands und einen erheblichen Ausbau der Stromnetze in der Stadt zur Voraussetzung hat) noch eine rein leitungsgebundene Wärmeversorgung oder das mehr oder minder vollständige Beibehalten von Gasnetzen, die dann klimaneutral befüllt werden. Überraschen sollte eine solche Differenzierung nicht. Und nachteilig ist die Notwendigkeit zu differenzieren genauso wenig.

Nach einer Strukturanalyse und Bestandsaufnahme des Wärmemarkts insbesondere des urbanen Raums werden in diesem Papier die bestehenden technischen Optionen für die Wärmewende in der Stadt dargestellt und auf ihre Eignung für die Nachfragestrukturen (und ihre Grenzen) hin analysiert. Eine ökonomische Abschätzung schließt sich an; Ableitungen zu erforderlichen politischen Weichenstellungen folgen.

Im Unterschied zu vielen anderen Ausarbeitungen zur Wärmewende wird an dieser Stelle keine Analyse von Szenarien vorgenommen, die ihrerseits oft ja nur die Folgen eigener Annahmen beschreiben und dabei die Mittel der Wärmewende zu ihren

⁷ [UBA 2022]

ZUR DISKUSSION

Zielen machen.⁸ Im Mittelpunkt steht hier vielmehr die Frage, für welche Marktsegmente welche Technologiebündel am vorteilhaftesten sind. Unter der Vorgabe der Klimaneutralität bis spätestens 2045 können so die energiewirtschaftlichen und ökonomischen Konsequenzen bestimmter Optionen in bestimmten Marktsegmenten gegeneinander abgewogen werden. Das Klima-Urteil des Bundesverfassungsgerichts hat Klimaneutralität in einen de-facto Verfassungsrang erhoben. Das „Ob“ von Klimaneutralität steht nicht mehr zur Debatte. Versorgungssicherheit auch nicht. Es bleibt damit die Kosteneffizienz der Wärme- und Energiewende als Gestaltungselement. Dies prägt die nachfolgend abgeleiteten Vorschläge für möglichst robuste, kosteneffiziente und damit übrigens auch sozialverträgliche Strategien. Angesichts der langfristigen Kapitalbindung aller Anlagen zur Erzeugung, zum Transport und zur Nutzung von Wärme ist das unerlässlich.

⁸ Eine der wenigen Ausnahmen bildet hier die BDI-Klimapfade-Studie, die auf einer Reihe angenommener Pfade eine Merit-Order der Wärmewende-Optionen errechnet.

ZUR DISKUSSION

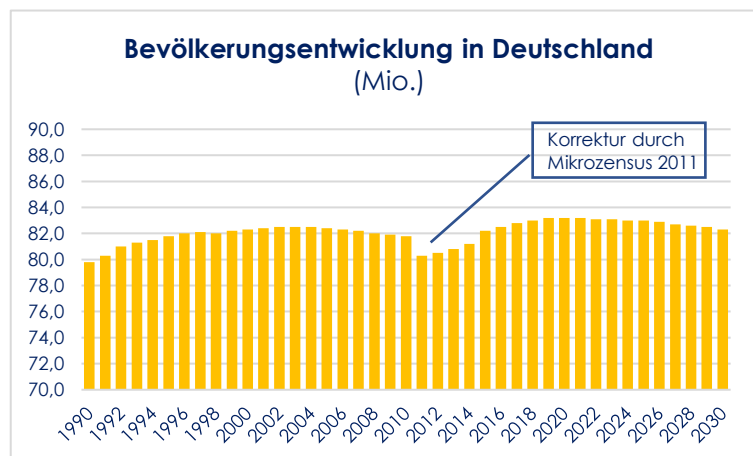
2. Der Wärmemarkt in den Ballungsräumen Deutschlands

a. Der Wärmebedarf privater Haushalte

Der Wärmebedarf privater Haushalte ist die entscheidende Größe bei der Wärmewende. Das gilt in Bezug auf die Wärmemenge, aber auch in Bezug auf die politische Sensibilität dieses Bereichs. Abgesehen von der Lebensmittel- und Wasserversorgung berührt die Menschen nichts so elementar wie die Wärme. Wenn die Wärmewende gelingen soll, müssen die Strategien zur Umsetzung die Lebensbedingungen und nicht zuletzt die ökonomische Situation der Menschen in Rechnung stellen.

➤ Bevölkerung

Die für den Wärmebedarf einer Gesellschaft einschlägige Bevölkerungsanzahl ist in der Bundesrepublik Deutschland seit 1990 von gut 80 Mio. um etwas mehr als 4% auf 83 Mio. im Jahr 2020 gestiegen. Erst ab Mitte der 2020er Jahre wird wieder mit einem leichten Rückgang gerechnet; allerdings dürfte erst ab Mitte der 2050er Jahre die Grenze von 80 Mio. Einwohnern wieder nach unten durchbrochen werden.⁹



[BIB 2022a], [Destatis 2021a]

➤ Wohnfläche und Haushalte

Ende 2020 gab es nach der Zählung des Statistischen Bundesamtes in Deutschland 42,8 Mio. Wohnungen mit einer Gesamtwohnfläche von 3,9 Mrd. m². Die durchschnittliche Wohnfläche je Wohnung ist von 2014 bis 2020 nur geringfügig von 91,4 auf 92,0 m² gestiegen; gleiches gilt für die durchschnittliche Wohnfläche je Einwohner, die von 46,5 m² im Jahr 2014 auf 47,4 m² im Jahr 2020 gestiegen ist.¹⁰

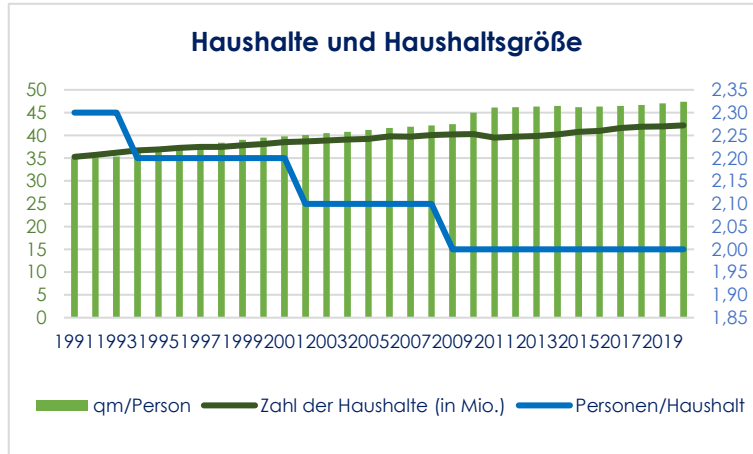
Für den privaten Energie- und insbesondere Wärmebedarf haben sich bedeutsame Veränderungen in der Anzahl der Haushalte und der Haushaltsgröße ergeben. Die Haushaltsgröße hat sich von 1991 bis 2020 von 2,3 auf 2,0 vermindert, so dass die Anzahl der Haushalte gegenüber dem

⁹ Im Ergebnis des Mikrozensus 2011 musste die Bevölkerungsanzahl um gut 1 Mio. nach unten korrigiert werden.

¹⁰ [Destatis 2021b]

ZUR DISKUSSION

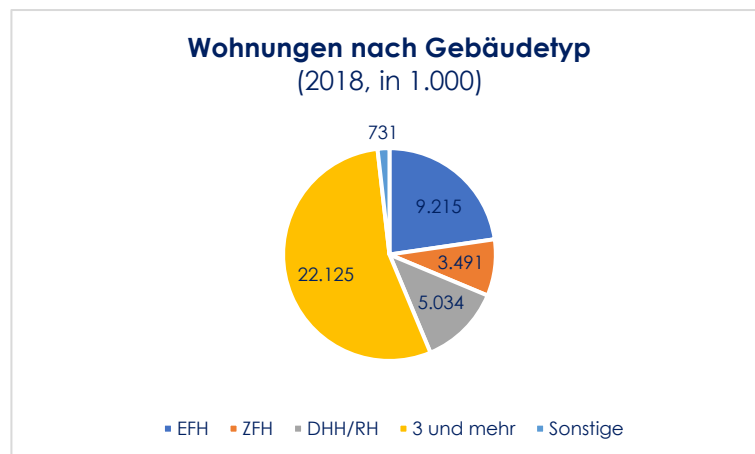
Bevölkerungswachstum sogar überproportional von 35,3 auf 42,2 Mio. gestiegen ist. Da der Trend zu Einpersonen-Haushalten ungebrochen ist, wird die Anzahl der Haushalte in absehbarer Zeit eher weiter steigen als sinken.



[BIB 2022b], [Destatis 2004], [Destatis 2020], [Destatis 2021c]

➤ Wohnungstypologie

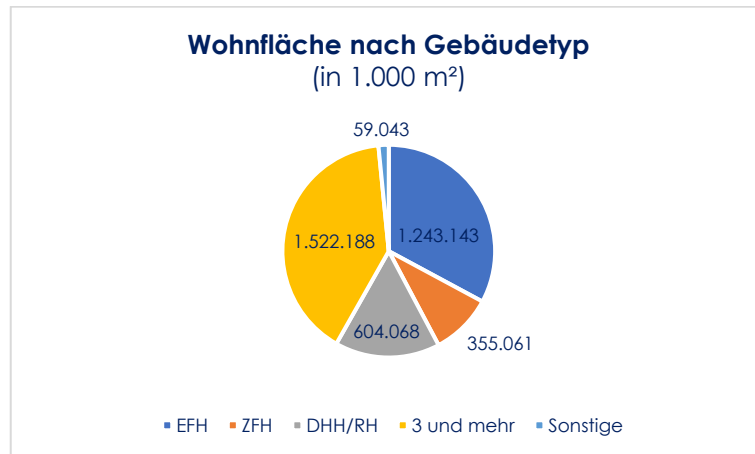
Über 22 Mio. Wohnungen befinden sich in 3- und mehr-Familienhäusern. Der zweitgrößte Anteil entfällt auf Einfamilienhäuser, gefolgt von Reihenhäusern und Doppelhaushälften wie auch Zweifamilienhäusern.



[Destatis 2019]

Eine deutlich andere Verteilung ergibt sich in Bezug auf die Wohnfläche, die bei Einfamilienhäusern rd. 135 m² beträgt, bei Doppelhaushälften und Reihenhäusern 120, bei Zweifamilienhäusern gut 100 und bei Mehrfamilienhäusern nur rd. 70 m². Während also Mehrfamilienhäuser 55% aller Wohnungen darstellen, entfällt nur 40% der Wohnfläche auf sie; bei Einfamilienhäusern ist das Verhältnis umgekehrt. Sie stellen ein Drittel der Wohnfläche aber nur 23% der Wohnungen.

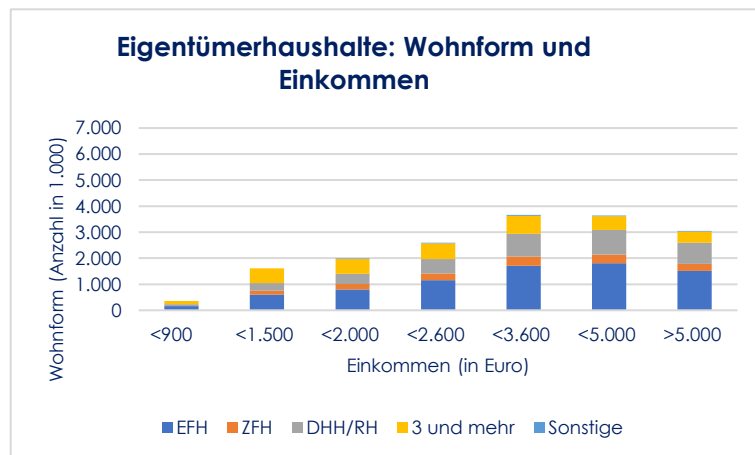
ZUR DISKUSSION



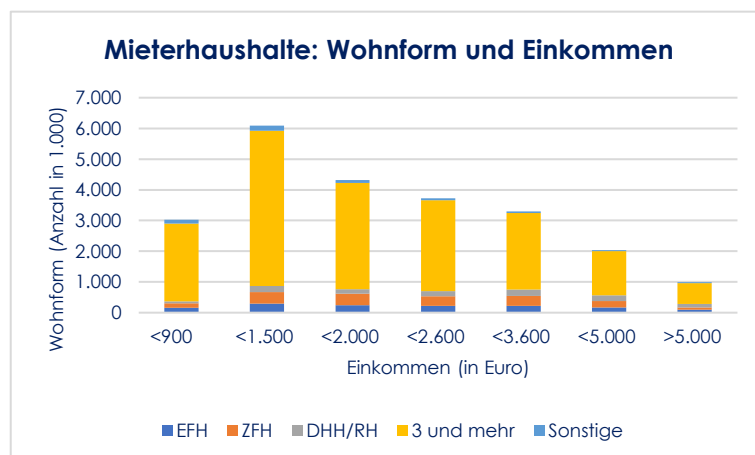
[Destatis 2019]

➤ Einkommen und Wohnform: Miete oder Eigentum?

Zwischen Wohnungstypologie, Wohnform und überdies dem jeweiligen Haushaltseinkommen bestehen sehr eindeutige Korrelationen.



[Destatis 2019]



[Destatis 2019]

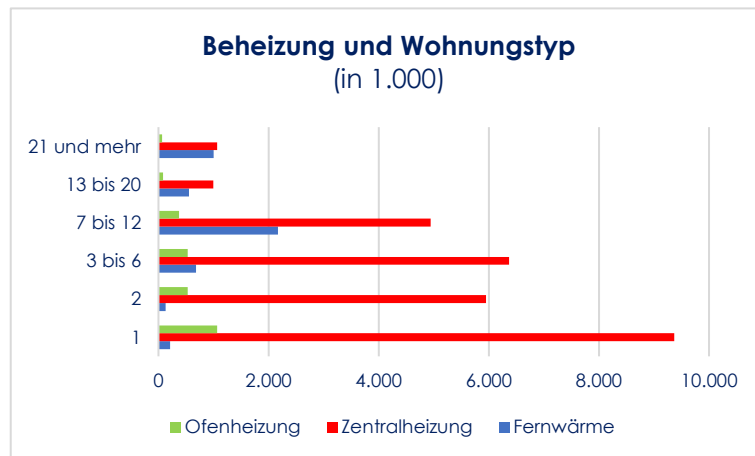
ZUR DISKUSSION

Während bei den Eigentümerhaushalten eindeutig die überdurchschnittlichen Nettohaushaltseinkommen dominieren und Einfamilienhäuser die bevorzugte Wohnform darstellen, sind Mieterhaushalte geprägt von unterdurchschnittlichem Einkommen. Mieterhaushalte sind zudem ganz eindeutig dem Mehrfamilienhaus zugeordnet.

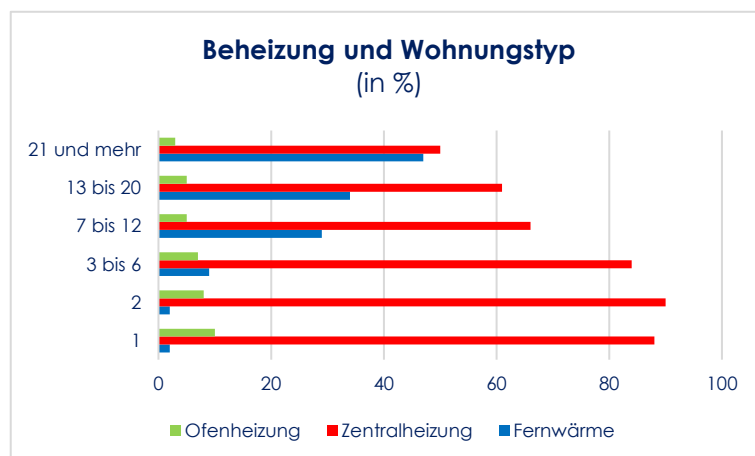
Die relativ geringen Einkünfte vieler Mieterinnen und Mieter bedingen in Deutschland auch eine überraschend hohe Zahl von Menschen, die von ihren Wohnkosten überbelastet sind.¹¹

➤ Beheizung und Wohnungstyp

Die Statistik zeigt sehr deutlich, dass in großen und sehr großen Mehrfamilienhäusern ein hoher Anteil an Fernwärme für die Wärmeversorgung eingesetzt wird.



Eigene Darstellung nach [Oschatz 2016]



Eigene Darstellung nach [Oschatz et al. 2016], [Destatis 2012]

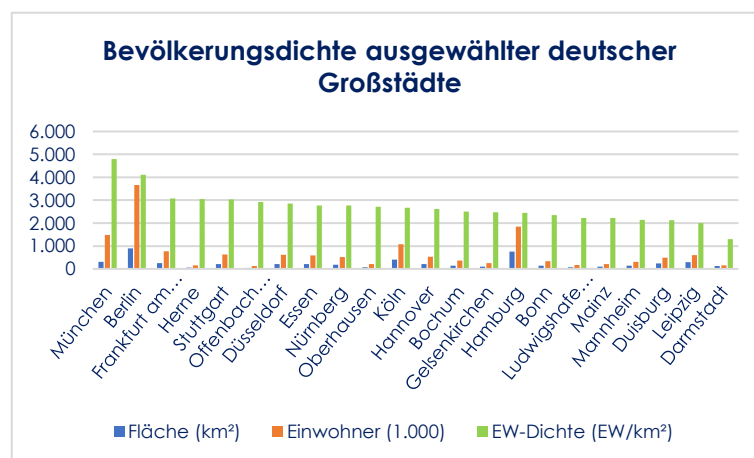
¹¹ Als wohnkostenüberlastet gelten Haushalte, die mehr als 40% ihres verfügbaren Einkommens für ihre Wohnkosten aufwenden. Nach Angaben des Statistischen Bundesamts waren 2020 nur in Griechenland (33,3%), Bulgarien (14,4%) und Dänemark (14,1%) mehr Menschen von ihren Wohnkosten überbelastet als in Deutschland (9,0%). [Eurostat 2022b]

ZUR DISKUSSION

Dies korrespondiert mit der Wohn- und Energiedichte der Ballungsräume. Fernwärme kann neben Gas also charakterisiert werden als eine zentrale Säule der Wärmeversorgung von Mieterinnen und Mietern mit normalem oder geringem Einkommen in großstädtischen Mehrfamilienhäusern. Dies ist auch bestimmend für die Unternehmen im Kreis der 8KU.

➤ Urbane Ballungsräume

Die 8KU-Unternehmen sind allesamt in wachstumsstarken, urbanen Ballungsräumen angesiedelt. Am einfachsten erschließt sich der Ballungsraumcharakter über die Bevölkerungsdichte. Sechs der acht Städte gehören zu den am dichtesten besiedelten 20 Gemeinden Deutschlands, die beiden anderen gehören zu den Top 30 bzw. Top 60. Während die Bevölkerungsdichte in Großstädten durchschnittlich etwa bei 2.000 EW/m² liegt, beläuft sie sich in Mittelstädten auf 400, in Kleinstädten auf 150 und in Landgemeinden auf rd. 70 Einwohner/m². Der Reziprokwert der Bevölkerungsdichte macht den Charakter von Ballungsräumen nochmals deutlicher: In Deutschlands dichtest besiedelter Stadt, München, stehen einem Einwohner durchschnittlich 209 m² Stadtraum zur Verfügung, die er/sie sich mit Straßen, Sportplätzen und Gewerbe, Handel, Industrie, Energieinfrastruktur und vielem anderen teilt.



[Destatis 2022]

Die Bruttowertschöpfung in den Ballungsräumen, in denen die Unternehmen im Kreis der 8KU tätig sind, betrug 2019 über 360 Mrd. Euro bzw. 67 TEUR/Einwohner im Vergleich zu deutschlandweit 3.100 Mrd. Euro bzw. 37 TEUR/Einwohner.¹² Zwar können Auto- und Chemiestandorte wie Wolfsburg, Ingolstadt, Leverkusen oder Ludwigshafen stärker industrialisiert sein, obwohl sie in eher kleineren Städten liegen; deutlich wird aber eines: Industrie, Gewerbe, Handel und Bevölkerung sind in Ballungsräumen extrem dicht gedrängt. 14 Städte Deutschlands mit rd. 14 Mio. Einwohnern fallen in die Kategorie der großen Großstädte, weitere 66 in die der mittleren Großstädte mit 12,5 Mio.

¹² [Statistikportal 2022]

ZUR DISKUSSION

Einwohnern.¹³ Diese Ballungsraumeigenschaft muss bei allen Strategien der Energie- und der Wärmewende berücksichtigt werden.

➤ **Endenergieverbrauch**

Ziel der Wärmewende ist es, die THG-Emissionen aus der Erzeugung und Nutzung von Wärme bis spätestens 2045 – im Idealfall früher – klimaneutral zu machen. Diese Zielsetzung kann drei einander ergänzende Ansatzpunkte nutzen: Die Verringerung des Bedarfs, die Effizienz der Umwandlung und die Nutzung klimaneutraler Energieträger.¹⁴ Es ist einigermaßen selbsterklärend, dass die drei Perspektiven Hand in Hand gehen müssen.

Um kosteneffiziente und differenzierte Strategien entwerfen zu können, wird hier zunächst ein Blick auf die Strukturen des Wärmeverbrauchs bzw. Wärmebedarfs geworfen. Denn ohne die Nutzungsstrukturen zu kennen, kann man sie kaum im Sinne der Klimaneutralität weiterentwickeln und modernisieren. Spezifische und energieträgerscharfe Anwendungsbilanzen bestehen seit 2008. Um eine etwas weiter reichende Einordnung zu ermöglichen, wird hier zunächst ein Blick auf den Endenergiebedarf der Haushalte geworfen, der seit 1990 erfasst ist. Grob verallgemeinernd kann man sagen, dass der Endenergieverbrauch der Haushalte (ohne Strom) den Wärmebedarf relativ gut abbildet.¹⁵

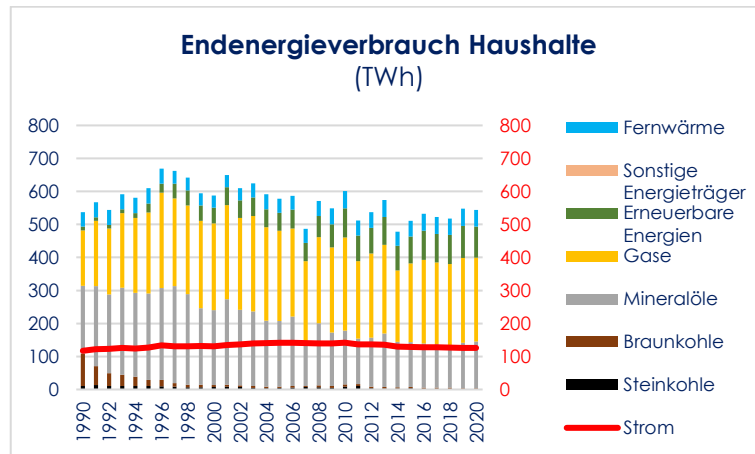
Der Endenergiebedarf der Haushalte hat sich seit 1990 in Summe nicht verändert, wohl aber zwischenzeitlich stark, meist sozialstrukturell bedingt, verändert. Zunächst ist nach der Wende der private Energiebedarf angestiegen, was im Wesentlichen mit Komfortgewinnen zu tun hatte. Zeitgleich ist im Osten der Bundesrepublik zunächst der Einsatz von Braunkohle in Heizungen fast auf null gesunken und gegenläufig der Einsatz von Öl- und zeitversetzt von Gasheizungen gestiegen wie seit etwa 2000 im gesamten Bundesgebiet. Der Öl-Anteil ist mittlerweile wieder gesunken. Diese Modernisierungen haben vor allem eine Steigerung der Umwandlungseffizienz bewirkt mit dem Ergebnis sinkender Energieverbräuche bis etwa 2007. Seit etwa dem Jahr 2000 ist auch der Anteil von Erneuerbaren Energien gestiegen. Seit 2010 ist nur noch ein ganz geringfügig sinkender Verbrauch zu erkennen. Es ist anzunehmen, dass der Trend zu kleineren Haushalten auf mehr Wohnfläche hierfür entscheidend ist.

¹³ Große Großstädte ab 500.000 Einwohner, mittlere Großstädte ab 100.000.

¹⁴ Eine Verringerung des Komfortniveaus ist nicht Gegenstand der Überlegungen.

¹⁵ Für landwirtschaftliche Anwendungen und für den Verkehr besteht eine eigene Zählung. Strom macht nur einen geringen Teil der Wärmeanwendungen aus.

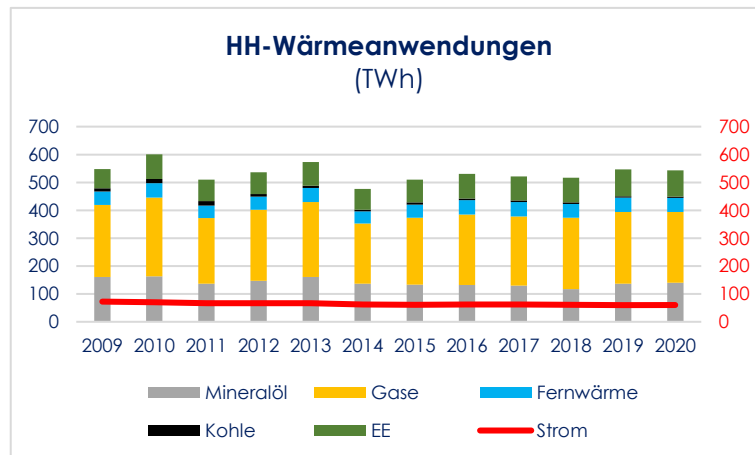
ZUR DISKUSSION



[AGEB 2021 a]

➤ Wärmeanwendungen

Seit 2008 werden die Wärmeanwendungen der einzelnen Sektoren differenziert betrachtet.¹⁶ Im Falle der Haushalte zeigt das Bild eine allenfalls ganz langsame und ab 2014 nicht mehr sichtbare Reduzierung des Energiebedarfs bei geringfügigem Wachstum des EE-Anteils und leicht zurückgehendem Einsatz von Heizöl.



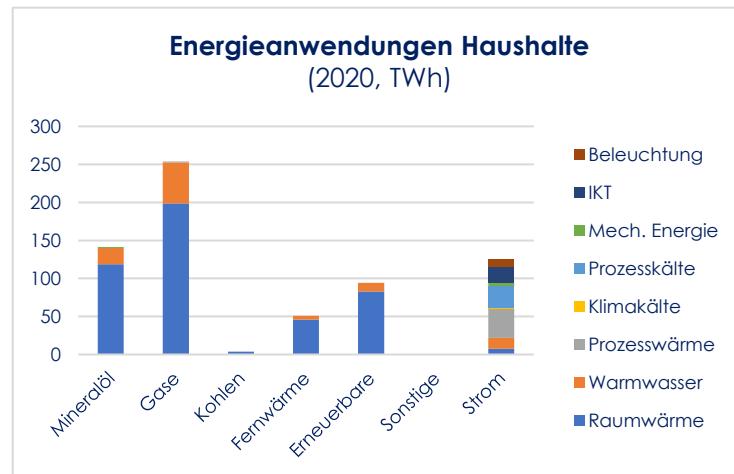
[AGEB 2021 a]

➤ Energieanwendungen

Für die Frage möglichst effektiver THG-Minderungsstrategien ist überdies die konkrete Anwendung der Energieträger entscheidend. Bei den Haushalten dominiert die Anwendung von fossilen Energieträgern ganz eindeutig die Bereiche Raumwärme und Warmwasser. Unter Beachtung bestimmter Mindesttemperaturen für Warmwasser sind also rein anwendungsseitig durchaus die Voraussetzungen gegeben, insbesondere Kohle und Öl zu ersetzen. Anwendungsrestriktionen bestehen beim Ersatz von fossilem Gas nicht; vielmehr geht es hier rein um die Frage der ökonomischen und infrastrukturellen Vorteile der einzelnen Technologiepfade bei den Wärmewendestrategien.

¹⁶ Die drei Grafiken zu den Wärmeanwendungen (Haushalte, GHD, Industrie) beinhalten nur Raumwärme, Warmwasser und Prozesswärme. Der Anteil Raum- und Prozesskälte ist vernachlässigbar gering.

ZUR DISKUSSION

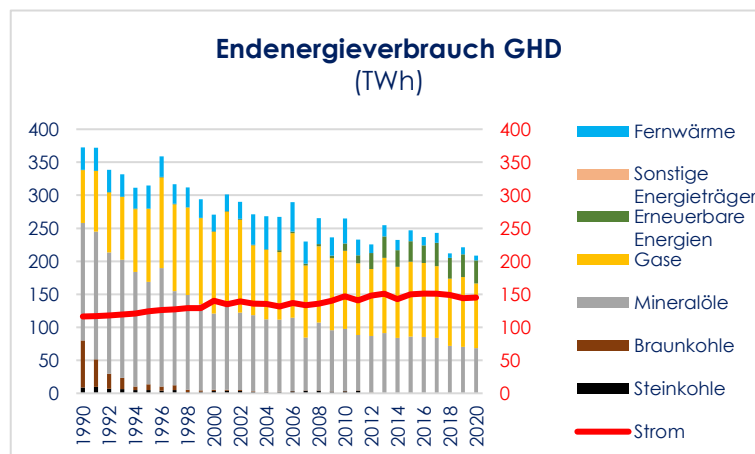


[AGEB 2021b]

b. Der Wärmebedarf des GHD-Sektors

➤ Endenergieverbrauch

Der Wärmebedarf des Sektors GHD (ohne Strom) wird durch dessen Endenergieverbrauch relativ gut wiedergegeben.¹⁷ Im Bereich GHD ist seit 1990 insbesondere die Bedeutung der THG-intensiven Energieträger Kohle und Mineralöl signifikant von über 250 auf 70 TWh gesunken. Auch insgesamt ist der Energiebedarf im Bereich GHD deutlich zurückgegangen; der Gasanteil ist bis 2005 in diesem Bereich zunächst deutlich gestiegen und seither leicht rückläufig. Der Anteil an Erneuerbaren Energien hat sich zuletzt erhöht; insgesamt scheint sich der Trend zur Verbrauchsminderung seit 2010 aber verlangsamt zu haben.



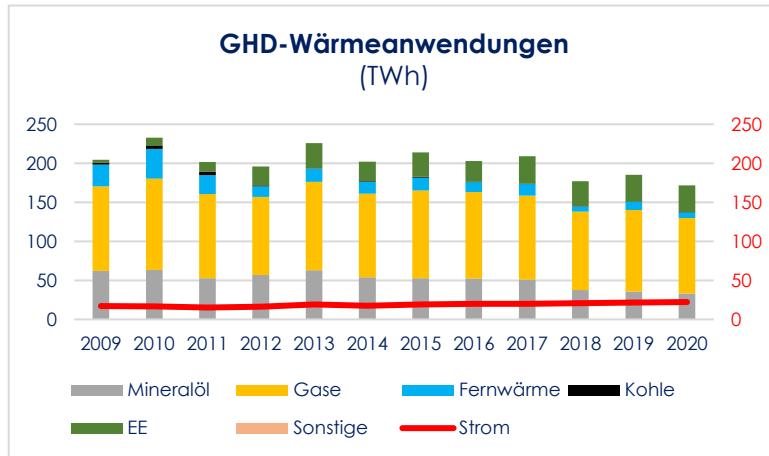
[AGEB 2021a]

¹⁷ Für landwirtschaftliche Anwendungen und für den Verkehr besteht eine eigene Zählung. Strom macht nur einen geringen Teil der Wärmeanwendungen aus.

ZUR DISKUSSION

➤ Wärmeeanwendungen

Im Bereich GHD hat sich, ähnlich wie bei den Industrie-Wärmeeanwendungen (siehe 2.d), die Bedeutung von Mineralöl verringert; auffällig ist ferner ein Bedeutungsschwund von Fernwärme und ein gegenläufiger Anstieg von Erneuerbaren Energien. Der Gas-Anteil ist zwar leicht von 109 TWh im Jahr 2009 auf 97 TWh im Jahr 2020 gesunken, dennoch stellt er weiterhin den Hauptenergieträger für die GHD-Wärmeeanwendungen dar.

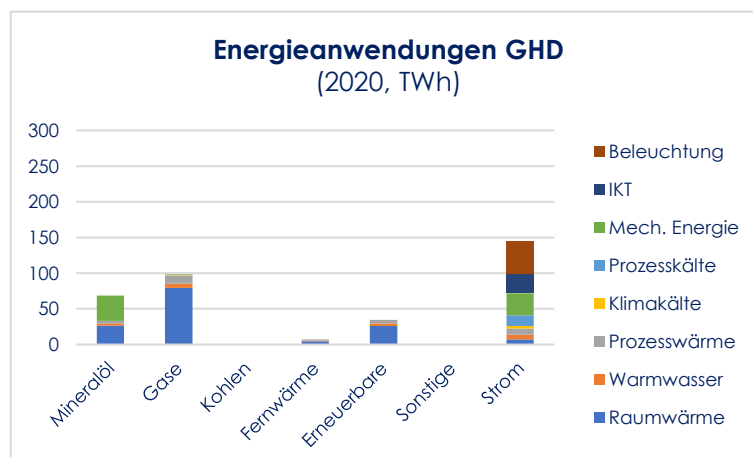


[AGEB 2021 a]

➤ Energieanwendungen

Im GHD-Sektor werden, ähnlich wie im Sektor Haushalte, fossile Energieträger vor allem für die Bereiche Raumwärme und Warmwasser eingesetzt, zusätzlich werden diese aber auch noch für mechanische Energie verwendet. Nur eine geringe Menge Gas wird im gewerblichen Bereich für Prozesswärme genutzt.

Berücksichtigt man die Mindestanforderung für die Warmwassertemperaturen, ist es von der Anwendungsseite her möglich Kohle, Öl und Gas zu substituieren. Bei dem Ersatz von Gas durch erneuerbare Technologien werden ökonomische und infrastrukturelle Aspekte den Ausschlag geben.

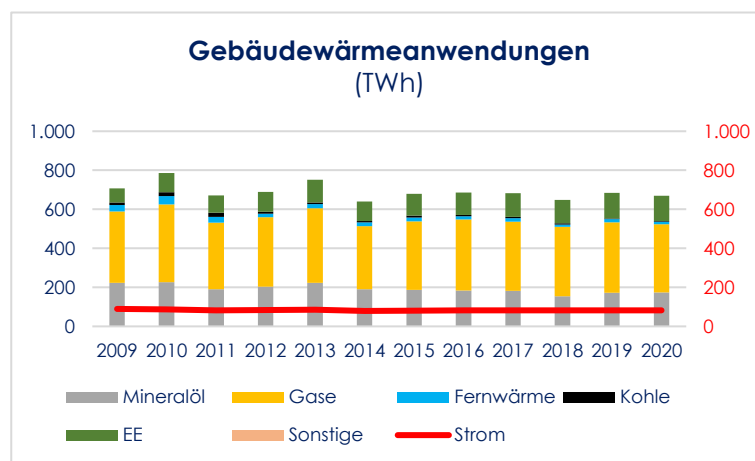


[AGEB 2021 a]

ZUR DISKUSSION

c. Gebäudeenergie

Abschließend sei noch ein Blick auf die im Rahmen des Klimaschutzgesetzes einschlägigen Wärmeanwendungen im Bereich der Gebäudeenergie insgesamt geworfen¹⁸. Das folgende Diagramm zeigt eine leichte Abnahme des Einsatzes von Mineralöl und Fernwärme. Letzteres bedingt durch die schwindende Bedeutung von Fernwärme im GHD-Sektor. Die Nutzung von Kohle hat sich in den Gebäudewärmeanwendungen um zwei Drittel auf 4 TWh reduziert, während die Nutzung von Erneuerbaren Energien angestiegen ist.



[AGEB 2021 a]

Die THG-Emissionen im Gebäudesektor sind im Bereich GHD von 42 (2008) über 34 (2014) auf 28 Mt (2020) gesunken, in den Haushalten sind diese im gleichen Zeitraum zunächst von 108 auf 84 Mt gesunken und dann wieder auf 91 Mt angestiegen.

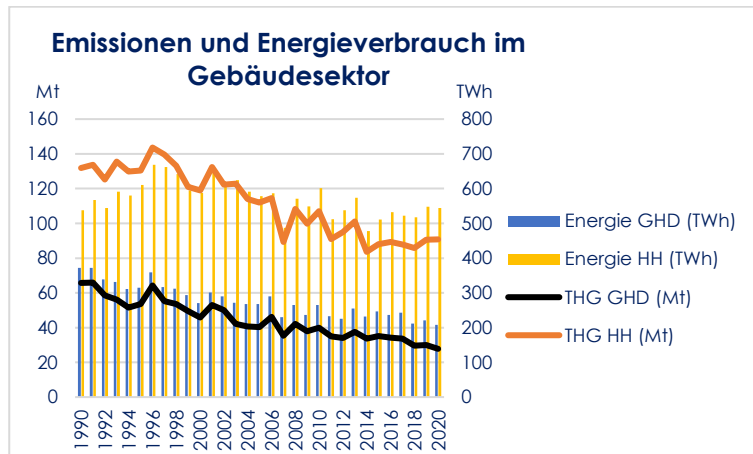
In Summe lässt sich festhalten, dass die reale THG-Minderung in den privaten Haushalten ganz wesentlich durch den Wechsel auf klimafreundlichere Energieträger und effizientere Heizsysteme vonstattengegangen ist. Die Endenergieeffizienz hat dies zwar begünstigt; jedoch sind durch Wohnflächenausweitung und zunehmenden Warmwasserverbrauch¹⁹ diese Effekte weitgehend aufgezehrt worden. In der Vergangenheit war also der Einsatz effizienter Umwandlungstechnologien auf Basis klimafreundlicherer Energieträger deutlich erfolgreicher als die Fortschritte bei der Sanierung.

Der – allerdings bei weitem kleinere – Bereich GHD hat womöglich aufgrund einer höheren Kostensensitivität sowohl in Bezug auf die Effizienz wie auch die THG-Minderung einen sehr stetigen Minderungspfad hinter sich gebracht. Die nachfolgende Grafik zeigt das sehr eindeutig.

¹⁸ Die Gebäudeenergie umfasst die Energieanwendungen Warmwasser und Raumwärme für die Sektoren Haushalte und GHD.

¹⁹ Der Anteil von Warmwasser am Endenergieverbrauch der Haushalte ist von 13,9% im Jahr 2010 auf 15,9% im Jahr 2020 gestiegen (Anwendungsbilanzen 2010 – 2020; AG Energiebilanzen)

ZUR DISKUSSION

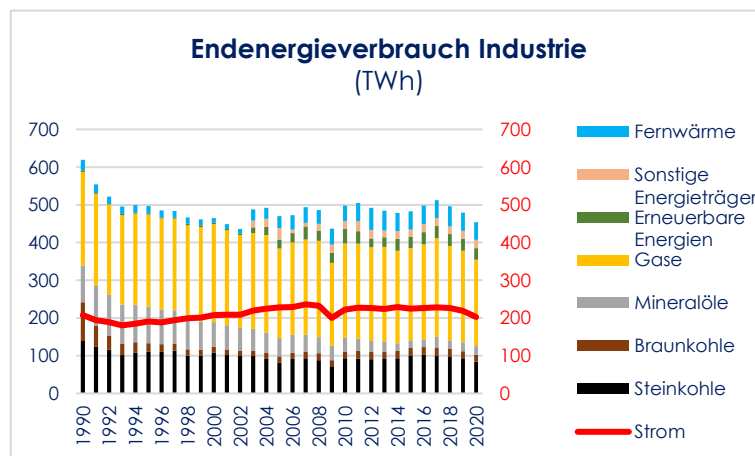


[AGEB 2021a], [UBA 2022a]

d. Der Wärmebedarf der Industrie

➤ Endenergieverbrauch

Beim Endenergieverbrauch in der Industrie sieht man als wesentliche Entwicklung eine deutliche Reduzierung des Braunkohle- und Mineralöleinsatzes als Folge des Umbaus der ostdeutschen Industrie zwischen 1990 und 2000/2005, die Ausweitung des Gaseinsatzes über den gesamten Zeitablauf, den gegenläufigen und bis heute anhaltenden Bedeutungsrückgang von Öl und – wenn auch von etwas geringerem Umfang – die wachsende Bedeutung von leitungsgebundener Wärme und Erneuerbaren Energieträgern. Nach den Effizienzsteigerungen der Nachwendezeit ist der Endenergiebedarf der Industrie seit dem Jahr 2000 weitgehend unverändert.

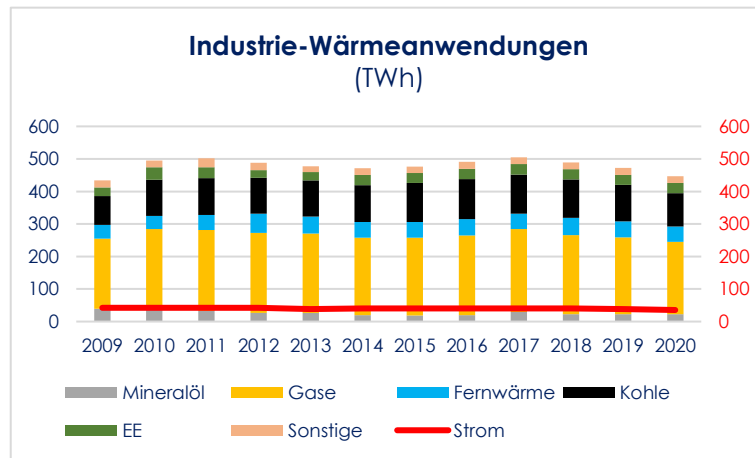


[AGEB 2021a]

➤ Wärmeanwendungen

Im Industriebereich sind – abgesehen von dem deutlich erkennbaren Effekt der Finanz- und Wirtschaftskrise 2009 - nur sehr geringe Veränderungen erkennbar, v.a. die sinkende Bedeutung von Mineralöl. Unverändert auf Platz zwei liegt die Kohle – ganz wesentlich wegen ihrer Rolle als Prozessenergieträger.

ZUR DISKUSSION

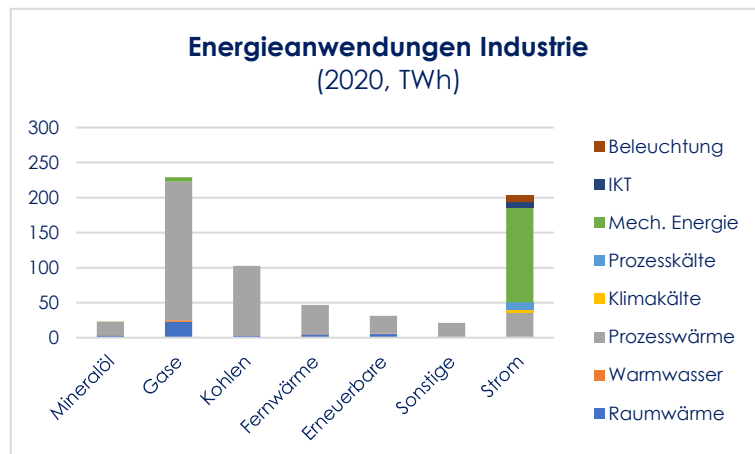


[AGEB 2021a]

➤ Energieanwendungen

Die wesentlichen industriellen Einsatzfelder von Energie sind mechanische Energie (Bewegung) und Prozessenergie, insbesondere teils hoch wärmeintensive Anwendungen von der Erzeugung und Umformung von Metallen über das Schmelzen von Kunststoffen usw.

Die vergleichsweise einfach – z.B. über Wärmepumpen oder Niedrigtemperatur-Fernwärme – klimaneutral darstellbaren Anwendungen wie etwa Raumwärme und Warmwasser sind demgegenüber vom Volumen her sehr gering.

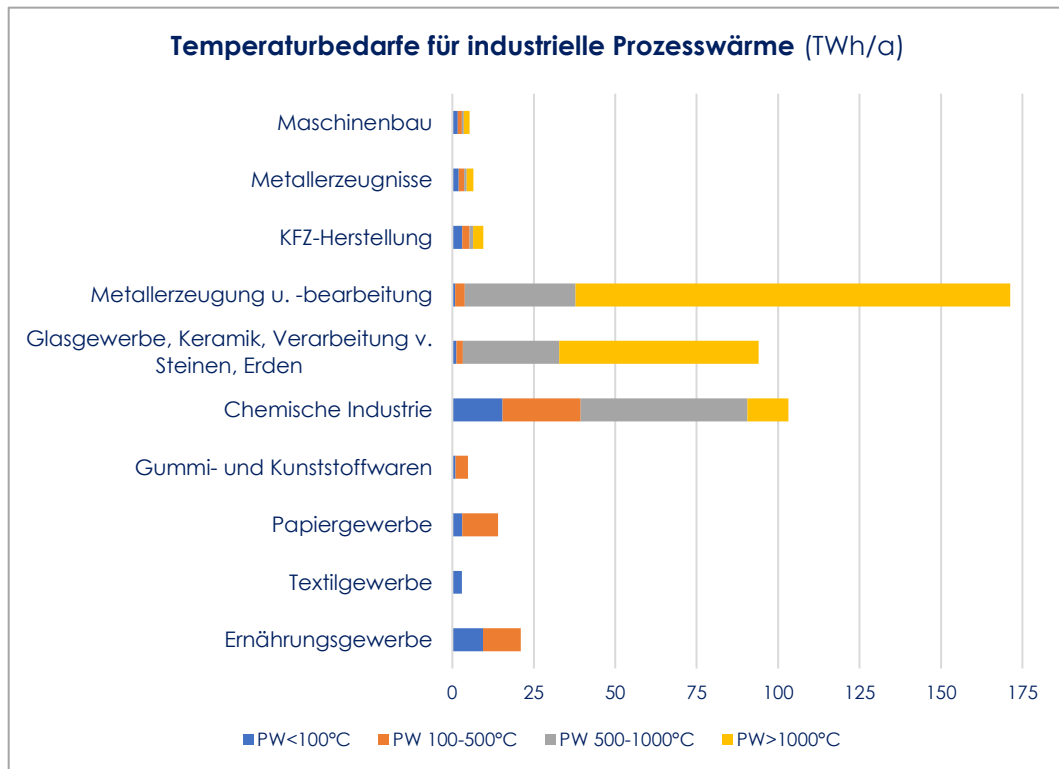


[AGEB 2021b]

➤ Klimaneutrale Prozesswärme – vielfältig erzeugbar?

Die Industrie hat einen jährlichen Bedarf an Prozesswärme in Höhe von rd. 440 TWh (Stand 2020). Die unterschiedlichen Industriebranchen und -prozesse erfordern unterschiedliche Temperaturniveaus, wie die folgende Abbildung verdeutlicht:

ZUR DISKUSSION



[Frisch et al. 2010]

Insbesondere die Branche der Metallerzeugung und -bearbeitung ist mit ca. 170 TWh/a ein großer Nachfrager von Prozesswärme, knapp 75% davon entfallen auf Prozesswärme mit einem Temperaturniveau über 1000°C und 20% auf ein Temperaturniveau zwischen 500 und 1000°C. Die Glas- und Keramikindustrie betreibt ebenfalls temperaturintensive Prozesse, welche Prozesswärme mit Temperaturen zwischen 500 und 1000°C (30 TWh/a) und über 1000°C (61 TWh/a) bedürfen. Ein wichtiger Abnehmer von Hochtemperatur-Prozesswärme ist ebenfalls die chemische Industrie (rd. 100 TWh/a), die vor allem einen Bedarf an Prozesswärme mit Temperaturniveaus zwischen 500 und 1000°C hat. Aktuelle Optionen zur Erzeugung grüner Prozesswärme:

Technologie	Mögliches Temperaturniveau
Wärmepumpe	120°C (Forschung bis 150°C)
Solarthermie	250°C
tiefe Geothermie	160°C
Alternative Brennstoffe (biogen, synthetisch, Abfälle) ²⁰	>1000°C
Direkter elektr. Energieeintrag ²¹	>1000°C

[Seitz/Estelmann 2017]

²⁰ Biogene Reststoffe (z.B. Biogas, Biomethan), strombasierte Brennstoffe (synth. Kohlenwasserstoffe), Brennstoffe aus Abfällen (z.B. Industrieabfälle, Klärschlamm)

²¹ Vollelektrische oder hybride Prozessaggregate (z.B. Elektrolichtbogenofen, Induktionsheizung für Nicht-eisen-Metalle). Der Einsatz ist jedoch von den physikalischen Stoffeigenschaften des zu erwärmenden Materials abhängig.

ZUR DISKUSSION

Erneuerbare Niedrigtemperatur-Prozesswärme kann durch Wärmepumpen, Solar- und Geothermie erzeugt werden. Für grüne Hochtemperatur-Prozesswärme muss jedoch auf alternative Brenngase und Brennstoffe zurückgegriffen werden. Auch eine Elektrifizierung der Prozesse kann sinnvoll sein. Jedoch können große zusätzliche Strommengen (ohne den Ausbau weiterer Stromnetzkapazitäten) das Stromnetz überlasten. Dort, wo eine Elektrifizierung nicht möglich oder unverhältnismäßig teuer ist und zugleich ausreichend Abnehmer einer alternativen Transport- und Verteilinfrastruktur bestehen, können alternative Brennstoffe wie Wasserstoff unter wettbewerbsfähigen Preisen zur Erzeugung von klimaneutraler Prozesswärme genutzt werden.

e. Schlussfolgerungen

Die Betrachtung der Nachfrageseite führt zu wesentlichen Weichenstellungen in Bezug auf die Auswahl der technologischen Optionen bei der Wärmewende in der Stadt:

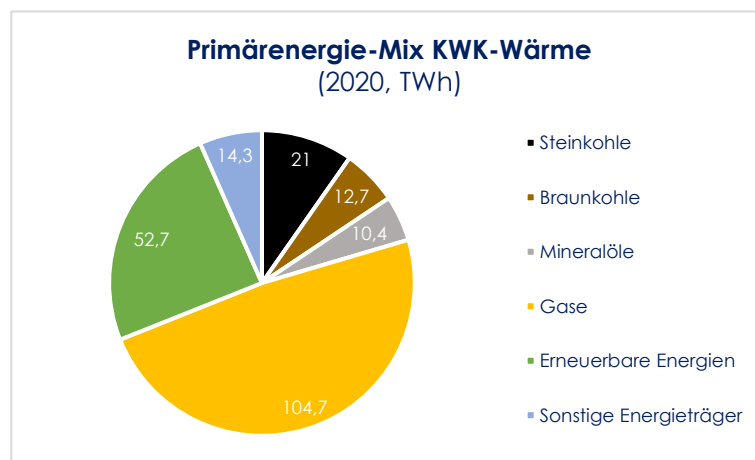
- Bei der Wärmewende in Ballungsräumen sind auf der Seite der privaten Haushalte soziale und finanzielle Aspekte unbedingt zu berücksichtigen. Der Mieteranteil ist überdurchschnittlich hoch. Gerade in den großen Städten sind die Mieten zuletzt stark gestiegen; gleichzeitig gehören Mieterinnen und Mieter eher zu den mittleren und unteren Einkommensgruppen, die von der Wohnraumkosten-Überbelastung bereits heute besonders betroffen sind.
- Auch ist die Besiedlungs- und folglich Wärmedichte ein signifikanter Faktor, der die technologischen Wahlmöglichkeiten mitbestimmt.
- Insbesondere in Ballungsräumen besteht ein signifikanter Bedarf der Industrie an Prozesswärme. Dieser Prozesswärmebedarf ist der wesentliche Bestimmungsfaktor bei der Auswahl von Technologien und Infrastrukturen.
- Eine erfolgreiche Wärmewendestrategie muss von den Kundenbedürfnissen ausgehen. Im Ballungsraum sind das ganz besonders die von Mieterinnen und Mietern wie auch die der Industrie.
- Die Kundenbedürfnisse und die Mittel, diese Bedürfnisse zu decken (also Energieträger, Infrastrukturen usw.), fallen regional und sektoral höchst unterschiedlich aus.

ZUR DISKUSSION

3. Technologien der Wärmewende im Ballungsraum²²

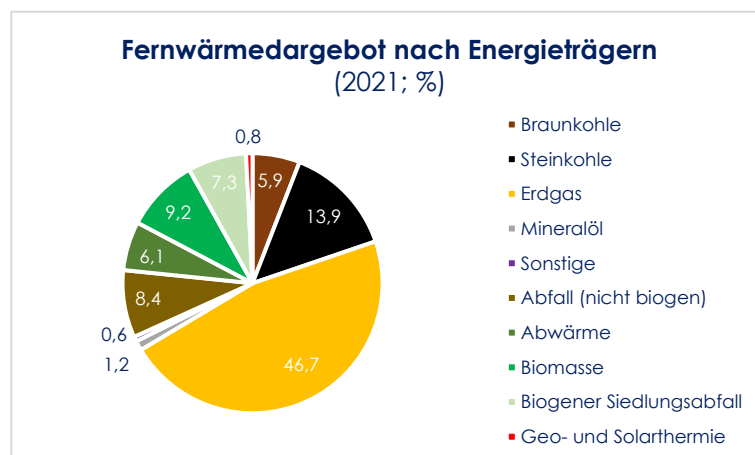
a. Wärmenetze

Vor allem im Ballungsraum stellt leistungsgebundene Wärme heute ein wesentliches Element in der Versorgung von Haushalten sowie Gewerbe, Handel und Dienstleistungen mit Raumwärme und Warmwasser wie auch der Industrie mit Prozesswärme dar. Fernwärme wird heute im Wesentlichen in KWK-Anlagen erzeugt. Gas ist der wichtigste Energieträger. Erneuerbare Energieträger machen inzwischen ein Viertel der Primärenergiebasis der KWK-Wärme aus, von der ein Teil unmittelbar in der Industrie verbraucht wird.



[AGEB 2021a]

Im Mix der leitungsgebundenen Wärmeversorgung finden sich auch und zuletzt wachsend Energieträger, die nicht in Heizwerken oder auch KWK-Anlagen erzeugt werden, darunter insbesondere Tiefengeothermie und Abwärme. Solarthermie kann fallweise eine Ergänzungsoption sein - insbesondere in Ballungsräumen aber nicht zentral.



[BDEW 2022]

²² Die Nutzung von Erneuerbaren Energien in Individuallösungen in der Wärmeversorgung im Ballungsraum (z.B. Holzpellets) ist zwar möglich, wird aber wegen Flächenrestriktionen nur in geringem Umfang angewendet; daher werden sie in diesem Aufriss der wesentlichen Technologien nicht weiter aufgeführt.

ZUR DISKUSSION

Die künftige Bedeutung der Wärmenetzsysteme ist entscheidend geprägt durch ihre Eigenschaft, verschiedene klimaneutrale Energiequellen zu bündeln und zu den Nutzern zu transportieren. Dies gilt umso mehr, je höher die jeweilige Abnahmedichte ausgeprägt ist. Je höher diese ist, umso teurer wären Einzellösungen. Zudem ermöglicht der Einsatz einer Wärmeinfrastruktur auch die Optimierung der Wärmequellen, die regional und saisonal ganz unterschiedlich ausfallen.

So könnte etwa in Zeiten von EE-Überschussstrom (und entsprechend geringen Strompreisen) ein KWK-Wärmenetzsystem mit Wärmespeicher und elektrischen Wärmeerzeugern (Großwärmepumpe oder Power-to-Heat) in Verbindung mit der Einkopplung von Abwärme (sofern in Netznähe vorhanden) und fallweise auch Solarthermie im Sommer bei geringer Wärmelast auf die Nutzung der KWK vollständig verzichten (sofern nicht etwa andere EE-Optionen verdrängt würden). Der elektrische Erzeuger könnte auf der Basis von ansonsten abgeregeltem EE-Strom entweder zusätzlich Wärme für die Kundinnen und Kunden zur Verfügung stellen oder im Wärmespeicher aufbewahren. KWK-Anlagen – insbesondere, wenn sie (auf mittlere Sicht) mit klimaneutralem Gas befeuert werden - entwickeln sich weiter zu einer wichtigen Stütze strombasierter dezentraler Wärmepumpen wie auch für die Fernwärmenetze.

KWK-Anlagen spielen bei geringen EE-Anteilen im Stromnetz eine tragende Rolle und sollten in dieser Zeit möglichst auch die Wärmenetze mitversorgen (stromgeführte Wärmeversorger wären in dieser Zeit unwirtschaftlich). Dieser Systemansatz wird gestützt durch neuere Studien, die für die Zeit bis 2035 im Bereich der Stromerzeugung einen Back-up-Bedarf von rd. 60 GW H₂-ready-Gaskraftwerken berechnen. Hierbei entfällt gut die Hälfte auf Anlagen mit 1.500 bis 4.000 Benutzungsstunden, die für die zeitgleiche Besicherung der Strom- und Wärmelast (hauptsächlich in den Wintermonaten) bevorzugt als KWK-Anlagen ausgelegt werden und zum anderen Teil auf Gasturbinen mit allenfalls 150 bis 200 Benutzungsstunden.²³

Je nach regionaler Struktur sind in solchen Wärmekonzepten ganz unterschiedliche Technologien miteinander zu kombinieren, von der Geothermie in entsprechenden Gebieten über die Nutzung von unvermeidlicher Abwärme in Industrie-Regionen und Power-to-Heat-Anlagen bis hin zur Abfallverwertung und zum Einsatz von Großwärmepumpen etwa bei der Nutzung von Flusswärme.

Die energiewirtschaftlich zentrale Eigenschaft solcher Systeme ist ihre Variabilität. Das Wärmenetz bündelt verschiedenste Energieträger und nutzt dabei sowohl bekannte Sektorkopplungsstrategien (etwa KWK) wie auch neuere (Power-to-Heat).

Verschiedene neuere Studien bekräftigen, dass der Übergang zu einer klimaneutralen Wärmeversorgung in den Ballungsräumen ganz wesentlich über Wärmenetzsysteme erfolgen sollte. Der Anteil der Fernwärme am gesamten Endenergieverbrauch steigt etwa im Ergebnis der Studie „Klimaneutrales Deutschland 2045“²⁴ von 110 TWh (= 4,4%) im Jahr 2018 auf 149 TWh (= 9,3%) im Jahr 2045.

Dies impliziert den starken Ausbau von Wärmenetzen als zentrale Infrastruktur. Wärmenetzverdichtung und die Neuanschlüsse von Abnehmern an die Wärmeinfrastruktur überkompensieren (im Modellfall) dann den Absatzrückgang durch die gleichzeitig stattfindende Gebäudesanierung. Des Weiteren wird eine zusätzliche

²³ [Agora Energiewende et al. 2022]

²⁴ [Prognos et al. 2021a]

ZUR DISKUSSION

Umstellung der Betriebsführung der Wärmenetze auch mit entsprechenden baulichen Anpassungsmaßnahmen zur Integration neuer Wärmequellen erforderlich werden.

Weitgehend analoge Ergebnisse finden sich in den Studien des Fraunhofer IEE, BDI oder des AGFW.²⁵ Stets ist zentraler Ansatz, die Wärmeinfrastruktur zu erweitern, stets gleichen Neuanschlüsse und Verdichtung sanierungsbedingte Wärmeabatzminderungen aus und stets wird durch Kombination verschiedener Energieträger sukzessive klimaneutrale Wärme zu den Kundinnen und Kunden gebracht.

Vorteilhaft sind Wärmenetze durch ihre Ballungsraumeignung und die Möglichkeit, unterschiedliche klimaneutrale Energieträger zentral zu bündeln und zu Kundinnen und Kunden zu bringen, nicht zuletzt solche, die von Einzelkunden niemals nutzbar gemacht werden könnten: von der Geothermie über Abwärme bis hin zu Großwärmepumpen. Fernwärmekunden haben im Vergleich zu individuellen Optionen ausgesprochen wenig Aufwand; die administrative Vorbereitung und die Durchführung von Baumaßnahmen liegen beim Wärmeunternehmen.

Überdies ist für die Zeit bis 2030/35, in der zumindest zwischenzeitlich der Anteil von gasbetriebener KWK steigen dürfte²⁶, eine erhebliche Entlastung des Bundeshaushalts im Effort-Sharing zu erwarten. Der Ersatz von individuellen Heizungen (in Ballungsräumen sind dies häufig Ölheizungen) durch KWK-Wärme verlagert die entsprechenden Emissionen aus dem Anwendungsbereich des Effort-Sharing in den Emissionshandel. Hierdurch lassen sich ansonsten fällige Strafzahlungen (in dreistelliger Mio. Euro-Höhe pro Jahr) vermeiden.²⁷ In urbanen Gebieten, in denen Wärmenetze und Zentral-Einzelheizungen (hauptsächlich sind dies Ölheizungen) nebeneinander bestehen, lassen sich durch deren Ersatz auf der Basis leitungsgebundener KWK-Wärme mehr als 20 Mt THG adressieren.²⁸

Im Sinne der Wärmewende ergeben sich eine Reihe von Standardverfahren für den urbanen Raum:

Der Ersatz fossiler Einzelheizungen durch leitungsgebundene Wärme (entweder direkt aus klimaneutraler Wärme oder durch KWK) entlastet den Gebäudesektor.

Die Umrüstung von KWK-Anlagen auf immer klimaneutralere Energieträger (von Kohle-KWK über Gas-KWK in Richtung KWK auf Basis klimaneutraler Gase) entlastet hauptsächlich die THG-Emissionen des Energiesektors (bei Anlagen größer 20 MW). Der Gebäudesektor wird bei kleineren Anlagen entlastet.

Und schließlich wird mithilfe der Flexibilität aus KWK/FW-Systemen mit Wärmespeicher und PtH-Option ein indirekter Minderungseffekt erzielt, weil die gewonnene Systemflexibilität das Potenzial des Stromsystems zur Integration zusätzlicher EEMengen erhöht.

Zu den Nachteilen solcher Systeme gehört naturgemäß ihre Komplexität und Kapitalintensität. Die Wirtschaftlichkeit von Koppelprodukten wie PtG ist aufgrund des derzeit bestehenden dysfunktionalen Systems aus Steuern, Abgaben und Umlagen beeinträchtigt. Überdies verhindern das Mietrecht bzw. die Wärmelieferverordnung derzeit de facto die Wärmenetzverdichtung. Wie für die Wärmewende

²⁵ Vgl. [Fraunhofer IEE 2019], [BCG/Prognos 2018], [Hamburg Institut/Prognos 2020], [AGFW 2018], [AGFW 2015].

²⁶ Vgl. [Prognos et al. 2021a], [BMW 2017], [BMW 2019].

²⁷ Vgl. [AGFW et al 2020]

²⁸ Ebda.

ZUR DISKUSSION

im Allgemeinen gilt auch in Bezug auf die leitungsgebundene Wärme, dass eine signifikante Wirtschaftlichkeitslücke zwischen herkömmlichen und klimaneutralen Wärmeversorgungssystemen klafft.

b. Wärmepumpen

Seit einigen Jahren sind Wärmepumpen in neuen Wohngebäuden die am häufigsten eingesetzte Wärmeversorgungstechnologie. In neuen Gebäuden sind sie deshalb ohne weiteres vorzugswürdig, weil sie im Idealfall mithilfe von Strom ein Mehrfaches an Umweltwärme nutzbar machen. Dieser Idealfall ist auf Bestandsgebäude übertragbar, jedoch dann von einer Reihe von Voraussetzungen abhängig, insbesondere davon, dass die entsprechenden Gebäude so ausgestattet sind oder werden, dass ein relativ geringer Temperaturhub ermöglicht wird. Diese Differenz zwischen der Temperatur der Wärmequelle und der Vorlauftemperatur des Heizwassers ist das entscheidende physikalische Kriterium. Je größer der Temperaturhub, desto mehr Strom benötigt die Wärmepumpe. Dies ist in der Regel auch der Grund für die zusätzliche Nutzung eines elektrischen Heizstabs oder auch eines Gas-Spitzenkessels, zumindest in älteren Gebäuden, deren Sanierungszustand noch nicht optimal ist.

Nicht vergessen darf man dabei, dass die Warmwasserversorgung aus Komfort- und Hygienegründen (Legionellen) sich nicht auf beliebig niedrige Temperaturen umstellen lässt.

Bei einer 100 m² großen Wohnung ist heute im Durchschnitt von einer Wärmelast von 7 bis 8 kW auszugehen. Die zur Beheizung benötigte Wärmemenge sinkt zwar bei steigendem Sanierungsgrad; jedoch sinkt die Wärmelast nicht in gleichem Maße, da bei länger anhaltenden Kälteperioden der Niedrigtemperaturstandard an seine Grenzen stößt und gleichzeitig die Effizienz der Wärmepumpe bei niedrigeren Temperaturen der Wärmequelle sinkt. Schon aus Kostengründen empfiehlt sich daher die Kombination mit einem Besicherungsinstrument (Wärmespeicher, Heizstab, Spitzenkessel), was dann allerdings die Kosten steigert oder den (fossilen) Energieverbrauch nicht sinken lässt.

Unbeschadet der unbedingten Vorzüge von Wärmepumpen in Bezug auf die Effizienz der Energienutzung muss beachtet werden, dass selbst bei signifikant vorangetriebener energetischer Sanierung des Gebäudebestands in ganz erheblichem Umfang Heizlast erhalten bleibt, die bei Nutzung von Wärmepumpen (auch in Verbindung mit Heizstäben) auf Seiten des Stromsystems abgesichert werden muss und das zu diesem Zweck in Teilen neu errichtet oder verstärkt werden müsste. Diese gleichzeitigkeitsbedingte Belastung des Stromsystems ließe sich zwar durch Nutzung von Wärmespeichern reduzieren, nicht aber vollständig vermeiden.

Ausgehend von einem aktuellen Gebäudewärmebedarf (private Haushalte und GHD) von rd. 700 TWh und rund 1.700 Benutzungsstunden ergibt sich eine Bestandswärmelast von rund 400 GW. Würde ein Viertel der Gebäude so saniert, dass sich die Wärmelast halbiert, dann entstünde immer noch ein zusätzlicher Bedarf an wohlgerneht gesicherter Leistung in Höhe von etwa 50 GW im Stromsystem. Sofern nicht die entsprechenden erheblichen Reserven im Verteilnetz verfügbar sind (beispielsweise in Gebieten, in denen ein sehr hohen Anteil älterer Nachtspeicherheizungen ersetzt werden soll), wären also teils erhebliche Netzverstärkungen (Trafos, Umspannstationen usw.) und eine klimaneutral gespeiste

ZUR DISKUSSION

Spitzenabdeckung durch thermische Kraftwerke (z.B. mit klimaneutralem Wasserstoff betriebene KWK-Anlagen) erforderlich²⁹, die eine auf Wärmepumpen basierende Wärmewende im Ballungsraum nur schwer oder gar nicht umsetzbar erscheinen lässt.

Begrenzt sind derlei Szenarien auch durch die Preisbildungssystematik im Strombereich. Zwar ist die Umfinanzierung der EEG-Kosten inzwischen beschlossen; dennoch würde sich durch den nötigen Ausbau der Stromnetzinfrasturktur eine Preissteigerung bei den Netzentgelten ergeben. Und auch bei den Arbeitspreisen würde stromseitig zwingend eine neue Dynamik entstehen, da zu Zeiten der Wärmehöchstlast zumindest die Einspeisung von PV marginal ist und also hohe Spitzenpreise entstünden.

c. Klimaneutrale Gase/Wasserstoff

Ohne Frage ist Erdgas mit einem Primärenergieeinsatz von knapp 700 TWh³⁰ aktuell der bedeutendste Energieträger im Wärmebereich. Zwar ist klar, dass Erdgas im Vergleich zu Mineralöl oder Kohle der bei weitem klimaschonendste fossile Energieträger ist. Genauso klar ist jedoch auch, dass das Erreichen von Klimaneutralität bis spätestens 2045 nur bei Beendigung des Einsatzes von Erdgas möglich ist.

Der Weg dorthin wurde durch den russischen Angriffskrieg auf die Ukraine und den nachfolgenden Lieferstopp durch Russland signifikant verändert. Erdgas galt als zentrale, weil eben relativ klimaschonende Übergangsstrategie. Diese Strategie ist inzwischen fragwürdig geworden. Allerdings ist einstweilen – abgesehen vom beschleunigten EE-Ausbau - noch keine Alternativkonzeption für die Zeit bis 2045 entwickelt worden.

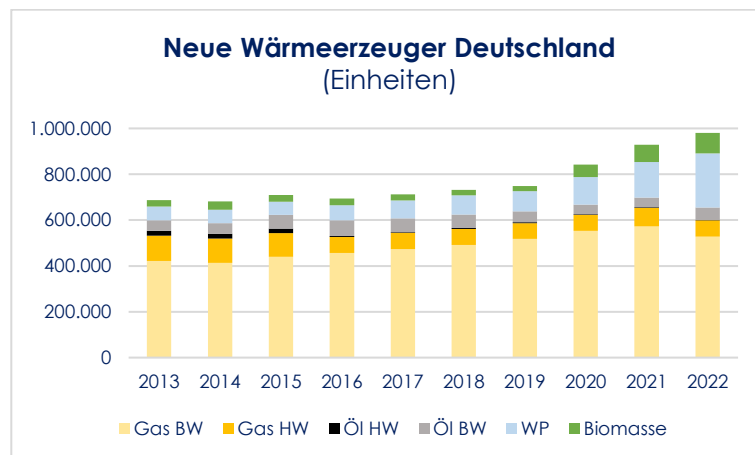
Entlang der erdgasbasierten Übergangsstrategie sind in den vergangenen zehn Jahren weit über 5,6 Mio. neue (und damit höchst effiziente) Erdgasheizungen installiert worden. Hierdurch wurden die spezifischen Emissionen im Wärmesektor deutlich reduziert, nicht zuletzt durch Verdrängung von Ölheizungen. Und auch wenn in Folge des Ukraine-Krieges der Absatz an Gasheizungen zugunsten von Wärmepumpen stark eingebrochen ist: 2022 dominierten Gasheizungen mit knapp 600.000 Stück den Absatzmarkt der Heizungsindustrie trotz leicht rückläufiger Zahlen gegenüber dem um 53% auf 236.000 Stück gestiegenen Wärmepumpenabsatz.³¹ Gasheizungen bleiben schlicht aufgrund ihres Bestandes für die nächsten Jahre die wichtigsten Wärmeerzeuger.

²⁹ Die Gesamtmenge der strombasierten Wärmeanwendungen belief sich zwischen 2009 und 2020 auf Werte zwischen 118 und 131 TWh; strombasierte Wärmeanwendungen in den Haushalten (in Summe mehrheitlich Nachtspeicher) auf 60 bis 72 TWh. Hieraus ist ganz grob eine Heizlast bis maximal 36 GW (bei 2.000 Vollbenutzungsstunden [Vbh]) abzuleiten.

³⁰ Haushalte, GHD, Industrie und Einsatz in KWK-Anlagen; darüber hinaus werden noch rd. 250 TWh stofflich, z.B. in industriellen Prozessen eingesetzt.

³¹ [BDH 2023a]

ZUR DISKUSSION



[BDH 2023b]

Zum anderen wird im Bereich KWK/Fernwärme in der Folge des vorrangigen Ausstiegs aus kohlebasierter Stromerzeugung der Einsatz von Erdgas in KWK-Anlagen vorübergehend auch absolut steigen.³² Der für den Stromsektor unverzichtbare thermische Erzeugungssockel wird dann in der Folge durch Einsatz von grünen Gasen, etwa von Wasserstoff, klimaneutral ausgestaltet werden.

Damit ist ein erhebliches Spannungsfeld der Wärme- und Energiewende insgesamt beschrieben. Denn zum einen ist die Gasverfügbarkeit ja erheblich gesunken, während gegenläufig die Preise gestiegen sind. Zum anderen ist zumindest der dauerhafte Weg zurück zu Kohle aus Klimagründen nicht gangbar. Und zum dritten ist trotz aller Potenziale und trotz prinzipiell verfügbarer Technologien der Weg zu ausreichenden Mengen an grünem Gas oder Wasserstoff weit, zumindest bislang noch nicht hinreichend strukturiert und auch angesichts der Pfadabhängigkeiten bei hohen und langlebigen Investitionen in Infrastrukturen ökonomisch hoch riskant.

Relevante Mengen an (grünem) Wasserstoff, mit denen der heutige Einsatz fossiler Energieträger im Wärmemarkt ansatzweise kompensiert werden könnte, stehen auch als Importe nicht kurzfristig zur Verfügung, und die Infrastrukturentwicklung steht noch am Anfang.

Aus diesem zunächst qualitativ beschriebenen Spannungsfeld sind jedoch durchaus bereits einige strategische Schwerpunkte abzuleiten, die auch politisch in der jüngeren Vergangenheit intensiver diskutiert wurden. Im Anhang dieses Papiers findet sich eine vertiefte Analyse zur Frage grüner Gase bzw. Wasserstoff. Hier soll zunächst thesehaft festgehalten werden:

- Aufgrund der beschränkten Substitutionschancen für hochkalorischen Anwendungen in der Grundstoffindustrie ist insbesondere in naher Zukunft von einem Nutzungsschwerpunkt von Wasserstoff in diesem Bereich auszugehen.
- Unverzichtbar sind grüne Gase/Wasserstoff auch im Bereich der Besicherung von Strom- und Wärmeproduktion in KWK-Systemen und in Gasturbinen.
- Ein Einsatz von Wasserstoff im Wärmemarkt ist mitnichten ausgeschlossen, sondern insbesondere in regionaler Nähe zu industriellen Verbrauchsklustern (insbesondere entlang des Rheins, im mitteldeutschen Chemiedreieck und an der Küste) und deren Infrastrukturen u.U. der kosteneffizienteste Weg der

³² Vgl. [Prognos et al. 2021a] S. 41, ähnlich [BCG 2021] S.167.

ZUR DISKUSSION

Wärmewende. Der Wasserstoffeinsatz im Wärmemarkt ist jedoch auch aus Gründen der Verfügbarkeit nicht der zeitlich erste Schritt.

- Der Infrastrukturausbau sollte den Einsatzschwerpunkten in Industrie und bei den Residualkraftwerken folgen. Aus Auslastungs-, Finanzierungs- und Verfügbarkeitsgründen sollte (anfangs) auch blauer Wasserstoff vorgesehen werden.
- Wo immer möglich sollte bestehende Infrastruktur schon aus Kostengründen genutzt werden. Wasserstoffinfrastruktur und bestehende Gasinfrastrukturen sind gleichartig zu regulieren, weil bereits der Einsatz im Kraftwerkssektor un- zweifelhaft ein Element allgemeiner Versorgung ist.

d. Sanierung

Wärmewende-Technologien sind aus unterschiedlichen Gründen limitiert. Entweder sind sie zumindest zum heutigen Zeitpunkt deutlich teurer als die aktuell angewendeten, allerdings unter Klimagesichtspunkten auch nicht zukunftsfähigen Strategien der Wärmeversorgung. Oder aber das Angebot ist (noch) limitiert, wie etwa im Fall von Erneuerbaren Energien im Wärmemarkt. Dies wird sich im Zeitablauf, etwa bei Anstieg der CO₂-Preise ändern. Dennoch ist die energetische Gebäudesanierung sicher eine *no-regret*-Strategie; und für die Nutzung der technologischen Vorteile der Wärmepumpe ist sie nicht nur eine lohnende Zusatzeigenschaft, sondern wichtige Voraussetzung.

Allerdings bestehen einige wesentliche Einschränkungen in Bezug auf die Sanierung:

Zunächst einmal entstehen bei der energetischen Gebäudesanierung sehr hohe Investitionskosten, die vor allem für Mieterinnen und Mieter mit geringem Einkommen problematisch hohe Zusatzbelastungen nach sich ziehen können. Tiefe Sanierungen bei durchschnittlichen Bestandswohnungen können mit vorzufinanzierenden Sanierungskosten (bei Einsatz von Wärmepumpen) von inzwischen deutlich über 1.000 Euro/m² angesetzt werden.

Bei einer durchschnittlichen Nutzungsdauer von 45 bis 50 Jahren³³ entstehen kalkulatorisch Kaltmietsteigerungen von bis zu 2 Euro/m². Auf der Basis des derzeit geltenden Mietrechts, bei dem nach § 559 BGB 8% der energetischen Modernisierungskosten auf die Miete umgelegt werden können, kann diese Regel jedoch zu einer Kaltmietsteigerung bis zur Kappungsgrenze von 3 Euro/m² führen. Auch wenn eine solche Maßnahme zu einer geringeren Belastung auf der Seite des Verbrauchers von kWh beitragen würde, verlagern sich die vorzufinanzierenden Kosten auf die Seite des Mieters.

Umgekehrt tritt das Mieter/Vermieter-Dilemma ein, wenn nur der Mieter Vorteile z.B. aus geringeren Wärmekosten generiert, der Vermieter aber Sanierungskosten trägt.

Zwar könnte der Sanierungsaufwand staatlich kofinanziert werden; an den Kosten ändert dies jedoch nichts. Der Investitionsbedarf für Sanierungen kann

³³ Vgl. z.B. [FIW 2015] S. 8

ZUR DISKUSSION

Überschlägig auf 20-30 Mrd. Euro pro Jahr bei einer Sanierungsrate von 1% angesetzt werden.³⁴

Ferner ist zu beachten, dass die Gebäudesanierungsrate in der Vergangenheit regelmäßig 1% nicht überschritten hat. Nur in den Jahren unmittelbar nach der Wende wurde im Osten der Bundesrepublik über ein Jahrzehnt eine Quote von 4% erreicht. Zwar hat in den letzten Jahren eine offensive Förderpolitik zu vermehrten Investitionen geführt, jedoch bleibt abzuwarten, ob dies zu einer dauerhaft erhöhten Quote führt. Um einen ernsthaften Wärmewendebeitrag zu leisten, wären hingegen Sanierungsraten von 2,0 bis 2,5% nötig.

Überdies ist fraglich, ob (je nach Konjunktorentwicklung) im Handwerk in angemessener Geschwindigkeit geschultes Personal aufgebaut werden kann. Nur so kann gewährleistet werden, dass die Wirksamkeit von Fördermitteln im Gebäudereich, über den aktuell nicht zufrieden stellenden Grad hinaus, gesteigert werden kann.³⁵

³⁴ Von den derzeit rd. 3,8 Mrd. m² Wohnfläche sind rd. 3 Mrd. m² mehr als 20 Jahre alt. Bei Sanierungskosten von niedrig angesetzten 300 bis 500 Euro/m² für eine tiefe Sanierung, die den Wärmebedarf halbiert, ergeben sich kalkulatorisch jährliche Investitionen in Höhe von 20 bis 30 Mrd. Euro. Zu Wert und auch Grenzen der Effizienz vgl. [Ifeu et al. 2018].

³⁵ Vgl. die entsprechende Anfrage der Bundestagsfraktion von Bündnis 90/Die Grünen [Bundestag 2021].

ZUR DISKUSSION

4. Ökonomische Bewertung

a. Transformationskosten

Wie oben ausgeführt unterscheidet sich der Wärmemarkt vom Strommarkt durch seine außerordentliche Heterogenität. Dies gilt naturgemäß für die Angebots- und die Nachfrageseite wie auch für die Infrastruktur. Wärmewende bedeutet, diese heterogenen Ausgangsstrukturen des jeweiligen Ist-Zustands klimaneutral zu transformieren. Hierbei ist ganz entscheidend, dass die Erfolgsfaktoren der Transformation oft nicht organisch aus den bestehenden Strukturen abgeleitet werden können. Es entstehen – in lokal höchst unterschiedlichen Zusammensetzungen - Transformationskosten bei etablierten Wärmeanbietern (oder – bei Neuanbietern – Markteintrittskosten). Es sind Aufwendungen für neue Infrastrukturen zu tragen, oft für die Verdichtung von bestehenden oder auch für die Wertberichtigung nicht mehr benötigter Infrastruktur einschließlich ihres Rückbaus. Und, drittens entstehen möglicherweise auch auf Seiten der Kunden teils erhebliche Anpassungskosten.

Die Transformationskosten sind ein wichtiger Wegweiser bei der Wahl der lokal unterschiedlich ausfallenden Wärmewendestrategien. Hierbei ist elementar, den Aufwand bestimmter künftiger Wärmeversorgungsstrategien mit anderen potenziellen Strategien ins Verhältnis zu setzen, um vorzugswürdige Wege zu bestimmen. Es ist also für die Wahl der richtigen Strategie nicht der Kostenunterschied zur aktuellen Wärmeversorgung von Belang³⁶, sondern ob die künftige Strategie nachhaltig günstiger ist als andere *künftige* Strategien.

b. Vollkostenvergleich der technologischen Optionen

Auf Basis der unter den Kapitel 2 und 3 skizzierten Nachfragebedingungen, der technischen Einordnungen und des oben skizzierten Transformationsansatzes wird nun vorgeschlagen, vorzugswürdige Wege der Wärmewende auf Grundlage eines generalisierten Kosten- und Eignungsvergleiches von Markt-Technologie-Kombinationen zu finden.

Ein solcher Vergleich muss zwei Randbedingungen erfüllen: Zum einen muss bis spätestens 2045 eine klimaneutrale Wärmeversorgung gewährleistet werden. Und zum zweiten muss der entsprechende Kundennutzen erreicht werden, ggf. auch unter Restrukturierung von Nachfrageverhalten³⁷. Damit ergibt sich ein Vollkostenvergleich von „Wärmebündeln“, also Lösungssträngen, untereinander. Zu vergleichen sind die jeweilig mit einem solchen Lösungsstrang verbundenen Vollkosten:

- der Erzeugungstechnologie und der klimaneutralen Brennstoffe (etwa die Kosten einer großen Wasser-Wärmepumpe und ihrer Strom- und weiteren Betriebskosten oder die Kosten für die Erzeugung und Beschaffung von klimaneutralem Gas) zuzüglich
- der Kosten der hierfür ggf. zu errichtenden, um- oder rückzubauenden bzw. wertzuberichtigenden Infrastruktur,

³⁶ Wie dies aktuell etwa noch in der Wärmelieferverordnung der Fall ist, die den Anschluss von Bestandsgebäuden auch an ein klimaneutrales Fernwärmesystem davon abhängig macht, dass die Lieferung billiger ist als der Durchschnitt der vergangenen drei Jahre mit der bestehenden Wärmelieferung.

³⁷ Hierzu könnte etwa die Umstellung eines Industrieprozesses auf niedrigere Temperaturen gehören.

ZUR DISKUSSION

- der Besicherung (also etwa einer Temperaturumstellung im Wärmenetz oder eines Ausbaus der Verteilnetzinfrastuktur für den Strom von Wärmepumpen) und
- der indirekten Kosten (etwa für die energetische Sanierung, die Voraussetzung für die klimaeffiziente Nutzung von Wärmepumpen ist).

Es ergeben sich vor diesem Hintergrund robust unterscheidbare Idealtypen von Versorgungsstrukturen für den Ballungsraum, von deren ökonomischer Vorteilhaftigkeit man ausgehen kann. Diese müssen – z.B. im Rahmen kommunaler Wärmeplanungen – anhand der lokalen Bedingungen überprüfbar sein:

- **Fernwärme:** Je stärker ein gegebenes Wärmeversorgungsgebiet geprägt ist durch den Charakter eines Ballungsraums, durch Geschosswohnungsbau mit hohem Mietwohnungsbestand, umso vorteilhafter ist die Nutzung von Fernwärme, die aus lokalen und klimaneutralen Quellen - von der Geothermie bis zur Großwärmepumpe – gespeist wird.

Dies sollte selbstverständlich ergänzt werden durch sukzessive energetische Sanierung, weil in aller Regel klimaneutrale Energieträger für den Einsatz im Wärmenetzsystem begrenzt verfügbar sind. Die Verdichtung der Fernwärmeanschlüsse sorgt jedoch dafür, dass diese Sanierungen nicht auf einmal erfolgen müssen; vielmehr können sie sich in den gewöhnlichen Sanierungszyklus der Vermieter einfügen.

Je nach Abnahmestruktur und den Bedarfen der Kundinnen und Kunden in Privathaushalten (aber auch in Gewerbe und Industrie) kann bei einer solchen gesamthaften Strategie die Umstellung des Fernwärmesystems auf immer klimaneutralere Energieträger kundenorientiert abgestimmt werden, was nicht zuletzt bei der Frage der Temperaturabsenkung von Belang ist. Denn die macht es zwar möglich, z.B. die begrenzten Mengen Solarthermie oder Niedrigtemperaturabwärme einzubinden. Voraussetzung hierfür ist aber wiederum, dass die kundenseitigen Bedarfe dies ermöglichen. Eine Anpassung der Kundenanlagen kann in einem solchen Ansatz ebenso notwendig werden wie ein – teilweiser – Rückbau von Gasinfrastruktur unvermeidbar ist.

Je mehr es – je nach regionaler Verfügbarkeit - gelingt, Erneuerbare Wärme unmittelbar in das Wärmenetzsystem einzubinden, umso geringer kann die Einlastung gegebener KWK-Anlagen ausfallen. Diese übernehmen in einer solchen Strategie zunehmend back-up-Funktionen mit deutlich weniger Benutzungsstunden. Sie sind jedoch die Rückfallposition einer urbanen, sicheren und zugleich klimaneutralen Energieversorgung, insbesondere wenn die KWK mit klimaneutralem Wasserstoff betrieben wird.

- **Wärmepumpen:** Bei relativ geringer Wärmedichte und gleichzeitig relativ hohem Anteil neuer, voll sanierter oder noch zu errichtender Gebäude sind Wärmepumpen vorteilhaft. Für die technologische Vorteilhaftigkeit dezentraler Wärmepumpen in Bestandsgebäuden ist eine sehr tief gehende Sanierung wichtige Voraussetzung.

Sobald diese Voraussetzungen aber gegeben sind, überdies EE-Strom zu den Betriebszeiten der Wärmepumpe verfügbar ist, sind Wärmepumpen absolut vorteilhaft. Das gilt umso mehr, wenn in Quartieren systemische Ansätze realisiert und Speicher bzw. PV-Anlagen eingebunden werden können.

ZUR DISKUSSION

Sind diese Voraussetzungen gegeben, sind derlei Systeme trotz hoher Investitionen vorteilhaft, v.a. aus Sicht der Kundinnen und Kunden bei Neubauten mit Niedrigenergiestandard. Sehr viel höher können die Kosten bei Umstellung von Bestandsgebäuden auf Niedrigenergiestandard ausfallen. Hier gehen je nach Gebäudezustand die Sanierungskosten inzwischen deutlich über die noch vor wenigen Jahren angesetzten 500 Euro/m² hinaus; aufgrund drastisch gestiegener Baustoffkosten und aufgrund des aktuellen Fachkräftemangels sind inzwischen mehr als 1.000 Euro/m² einzukalkulieren. Überdies sind die Anschaffungskosten der Wärmepumpen ebenso zu berücksichtigen wie die Stromkosten. Solange Strom um den Faktor zwei bis drei teurer ist als der entsprechende Preis von Öl oder Gas, ist eine Jahresarbeitszahl von 3 Voraussetzung, um (ungeachtet der Investitionskosten) wenigstens auf der Seite der Arbeitspreise Vorteile zu generieren.

Ökonomische Grenzen sind auch auf der energiewirtschaftlichen Seite gegeben. Denn solange nicht ein echter Niedrigenergiestandard erreicht ist, besteht ein hoher Gleichzeitigkeitsgrad mit der stromseitigen Last. Dies erzeugt (bei breitem Ausrollen einer Wärmepumpenumstellung) Netzverdichtungsbedarf und erhöht die Netzkosten. Klimapolitisch sinnvoll ist ein solches breites Ausrollen von Wärmepumpen vor allem dann, wenn beschleunigt Erneuerbare Energien ausgebaut werden; ansonsten würde ja schlicht die Spitzenlast im Stromsystem erhöht, was zum Einsatz der nächsten Erzeugungskohorte in der Merit-Order des Strommarktes führen würde – in der Regel wenig effiziente, ältere Kraftwerke mit höherem THG-Ausstoß.

- **Klimaneutrale Gase:** Die Versorgung mit klimaneutralen Gasen ist dann vorteilhaft, wenn die Wärmedichte vor Ort in einem bestimmten Stadtteil oder Quartier zu gering ist, um den Anschluss an ein Fernwärmesystem zu rechtfertigen und der Einsatz von Wärmepumpen teurer wäre.

In einem solchen Fall würden also die Kosten verglichen für den Ausbau der Wärmenetze und die Erzeugung oder Gewinnung klimaneutraler Wärme einerseits und andererseits die (privat zu tragenden oder öffentlich zu fördernden) Kosten von Wärmepumpen, des klimaneutralen Stroms, der ggf. nötigen Besicherung, der eventuellen Verteilnetzverstärkung und der privat oder per Förderung zu finanzierenden Sanierung der Gebäude. Je nach dem Ergebnis dieser Vollkostenermittlung kann es sinnvoll sein, trotz hoher Erzeugungs- oder Importpreise klimaneutrale Gase einzusetzen. Wenn die vorhandene Erdgasinfrastruktur vergleichsweise günstig umgerüstet werden kann und dies durch eine entsprechende Zahl an Netznutzern gestützt wird, dann ist selbst bei relativ hohen Preisen für klimaneutrale Gase eine Vorteilhaftigkeit genau dieser Option dauerhaft gegeben. Dies gilt umso mehr, als in einem solchen Fall selbst eine erst im Laufe der Zeit durchführbare energetische Sanierung unmittelbar kostensenkend wirkt.

Analoges gilt für den Prozesswärme-Bedarf der Industrie und mitunter auch im Gewerbe. Dieser ist aus technisch-ökonomischen Gründen vielfach nur durch (sukzessive klimaneutrale) Gase aus dem Verteilnetz zu bewerkstelligen. Zwar ist es denkbar, den Hochtemperatur-Bedarf einzelner Unternehmen durch technische Vorrichtungen so zu differenzieren, dass der Bedarf an hohen Temperaturen von gewöhnlichen Bedarfen abgetrennt und u.U. beträchtlich reduziert wird.

ZUR DISKUSSION

Dennoch bleibt – je nach lokaler Gegebenheit – u.U. ein signifikanter Bedarf an Hochtemperaturwärme übrig, der gedeckt werden muss. Dies setzt voraus, dass die entsprechende Infrastruktur verfügbar ist oder verfügbar gemacht wird. Zu vergleichen sind dann Kosten der Umrüstung des bestehenden Gasnetzes in ein Wasserstoffnetz bzw. dessen Neubau und die Kosten einer potenziellen Stromnetzverstärkung.

Damit ist ein Kosten-Benchmark skizziert, das auf dem Ausgleich von lokalen Gegebenheiten, Kundenbedürfnisse und Infrastrukturen aufbaut. Das oben entwickelte „Drei-Schalen-Modell“ mit seinen idealtypischen Ausprägungen ist selbstverständlich kein starres Gerüst. Vielmehr folgt es in seiner Ausprägung einer möglichst robust durchgeführten lokalen oder regionalen Optimierung der Wärmewende. Dies kann in bestimmten Ballungsräumen natürlich dazu führen, dass relativ viel Fernwärme im urbanen Zentrum mit einer weitgehend dezentralen Wärmepumpenversorgung kombiniert ist und die Gasinfrastruktur allenfalls kleine Marktnischen erreicht.

Genauso denkbar sind jedoch auch Strukturen, bei denen Wärmenetze nur eine überschaubare Rolle in einem hoch verdichteten Innenstadtbereich spielt und ein relativ hoher Anteil an klimaneutraler Gasversorgung tief sanierte und neue, mit Wärmepumpen beheizte Wohnflächen ergänzt.

ZUR DISKUSSION

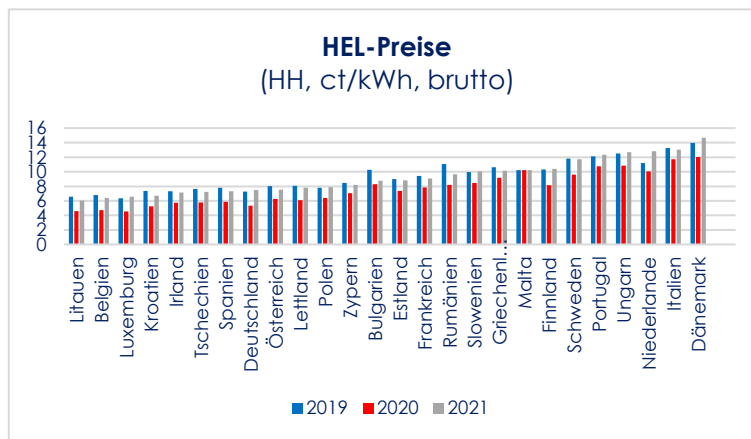
5. Politische Ableitungen

a. Wirtschaftlichkeitslücke und Förderbedarf

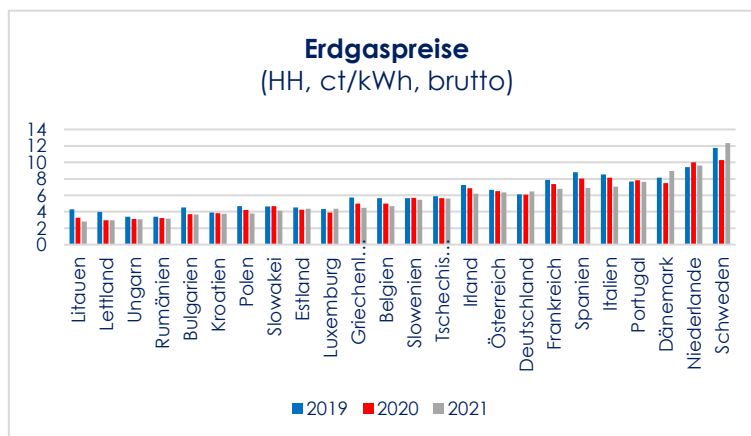
Die Notwendigkeit der Energiewende und - als Bestandteil hiervon – der Wärmewende ist aus Klimaschutzgründen unstrittig. Aus klimapolitischen, aber auch wirtschafts- und industriepolitischen Erwägungen ist der „Takeoff Wärmewende“³⁸ vorteilhaft und unverzichtbar. Dieser volkswirtschaftlich nicht ernsthaft zu bestreitenden These stehen erhebliche betriebswirtschaftliche Hürden im Weg, die es möglichst kosteneffizient zu überwinden gilt.

Hierbei ist zwischen drei Perspektiven zu unterscheiden:

- Zunächst zu den Energieträgern: In den letzten Jahren war zu beobachten, dass THG-freie Energieträger teurer als konventionelle waren. Bei genauer Betrachtung zeigt sich, dass insbesondere Heizöl in Deutschland im EU-Vergleich überaus preisgünstig war, während Gas einen Mittelfeldplatz und Strom den EU-Spitzenwert einnahm.



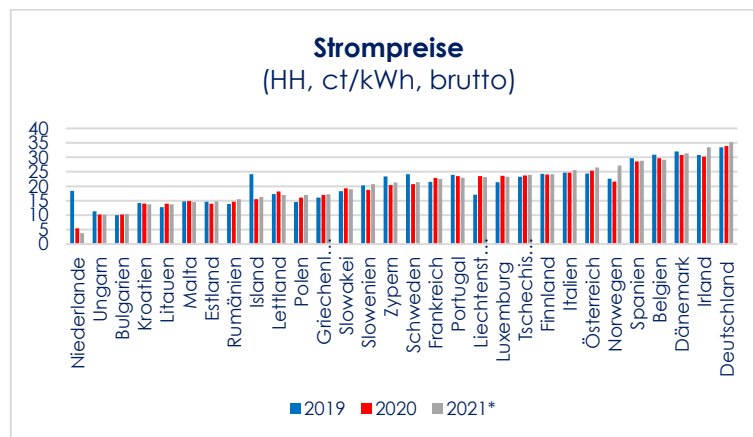
[BMWK 2022a]



[BMWK 2022a]

³⁸ Vgl. [MVV 2018]

ZUR DISKUSSION



[BMWK 2022a]

Derlei Preisunterschiede sind meist begründet darin, dass externe Kosten (THG) nicht mit abgebildet sind, neue Erzeugungstechnologien die Kapitalkosten hoher Anfangsinvestitionen zu verdienen haben und gegenüber abgeschrieben Anlagen im Nachteil sind oder Abgaben und Umlagen je nach Energieträger unterschiedlichen Strukturen und Motiven folgen. Im Ergebnis stellt sich eine Wirtschaftlichkeitslücke zwischen alt und neu ein.

Aufgrund des Ukraine-Krieges und der damit einhergehenden Gasmangel-lage haben sich die Gas- und Strompreise 2022 teils drastisch erhöht. Das ermöglicht zwar Erneuerbarem Strom als kostengünstigere Option im Wettbewerb inzwischen gut zu bestehen. Das schließt aber nur einen Teil der Wirtschaftlichkeitslücke. Insbesondere wächst nun zunächst die Nachfrage nach Alternativen, was zumindest vorübergehend für Knappheitspreise sorgt.

- In der Regel ist es nicht ausreichend, die reinen Erzeugungskosten zu beachten. Vielmehr sind in der Energieversorgung zumeist zu den Erzeugungskosten zusätzlich die Infrastrukturkosten zu addieren. Wenn das unterbleibt, kann es zu teuren Fehleinschätzungen und -entscheidungen kommen. So sind zwar heute die (relativ wenigen) Wärmepumpen selbst bei hoher Leistungsaufnahme im Verteilnetz und in Bezug auf die gesicherte Leistung darstellbar; beim Ausrollen zu einem durchgängigen Lösungsansatz wird ein signifikanter Ausbau an Infrastruktur und ein Zubau an gesicherter thermischer Leistung erforderlich.³⁹ Auch hier ist eine Wirtschaftlichkeitslücke zu unterstellen.
- Last but not least sind regulatorische Wirtschaftlichkeitslücken zu nennen. Sie können aber in der Regel zumindest im Sinne des Ziels der Wärmewende relativ leicht aufgehoben werden. Hierzu gehören Fehlsteuerungen durch das System der Abgaben und Umlagen. Besonders nachteilig wirkt sich ein dysfunktionaler Doppeleffekt aus Wärmelieferverordnung und Mietrecht aus. Der bewirkt zwar, dass die Betriebskosten in der Miete im Vorjahresvergleich selbst bei besserer THG-Bilanz nicht steigen dürfen. Der Modernisierungskostenanteil von durch Vermieter durchgeführte Eigensanierungen darf hingegen dauerhaft in einer Größenordnung von 8% auf die Miete umgelegt werden – und zwar ohne Qualitätskontrolle.

³⁹ So geht etwa [Ifeu et al. 2018] S. 70 im Szenario Effizienz plus Wärmepumpe von einem gegenüber dem PtG-Szenario um 30 GW höheren Last im Stromverteilnetz aus.

ZUR DISKUSSION

b. Politische Positionierung

Klimaneutrale Wärmeversorgung ist also im aktuellen politischen und regulatorischen Umfeld aus vielerlei Gründen noch immer teurer als die bestehende. Hieraus entsteht eine Wirtschaftlichkeitslücke für die Wärmewende, die durch gezielte Förderung der neuen Formen der Wärmeversorgung, durch Belastung klimaschädlicher alter Formen, durch Beseitigung von Fehlanreizen und durch flankierende, zum Beispiel informierende Maßnahmen überwunden werden kann.

Das BMWi hat im Jahr 2017 eine systematische Förderstruktur für den Wärmebereich erstellt, die sowohl auf Einzeltechnologien und -anwendungen (z.B. Effizienzhäuser) wie auch auf kleine (Wärmenetze 4.0) und große Infrastrukturen (Wärmenetze, EE-Großanlagen) abzielte. Während die kleinteiligeren Vorhaben weitgehend und schnell umgesetzt wurden, zog sich der infrastrukturelle Förderteil für große Anlagen außerordentlich in die Länge.

- **BEW:** Die für Großanlagen einschlägige Förderkulisse, die bereits 2017 (seinerzeit unter dem Titel „Basisprogramm“) angekündigte Bundesförderung effiziente Wärmenetze (BEW), ist am 15.09.2022 in Kraft getreten und zentral für die Flankierung klimaneutraler, leitungsgebundener Wärme. Das Programm wurde mit 2,98 Mrd. Euro bis zum Jahr 2026 ausgestattet und soll helfen, die Fernwärme auf Erneuerbare Energien wie Geothermie, Solarthermie und Großwärmepumpen umzustellen, sowie den Bau neuer Wärmenetze mit mindestens 75% EE-Anteil und die Dekarbonisierung bestehender Wärmenetze zu unterstützen.

Förderanträge können Energieversorgungsunternehmen, Kommunen, Stadtwerke und eingetragene Vereine/Genossenschaften stellen, die Zuschüsse für Investitionen in Wärmenetze benötigen. Gefördert werden Machbarkeitsstudien für neue Wärmenetze und Transformationspläne für bestehende Netze, sowie in einem weiteren Schritt bis zu 40% der Investitionskosten und Betriebskosten für strombasierte Wärmepumpen und Solarthermieanlagen. Durch die BEW sollen bis 2030 bis zu 681 MW/a erneuerbare Wärmeenergieleistung installiert werden.⁴⁰ Eine relativ kleine Menge im Vergleich zu den rd. 670 TWh/a an Wärmeanwendungen im Gebäudebereich.

Im Vergleich zum ursprünglichen Entwurf wurde die Begrenzung der maximalen Förderhöhe pro Netz und Empfänger von 50 Mio. Euro auf 100 Mio. Euro für die Umsetzung von identifizierten Maßnahmen und die Förderung darüberhinausgehender Einzelmaßnahmen angehoben. Des Weiteren entfällt die Anrechnung der Einzelmaßnahmen- oder Betriebskostenförderung auf die Förderhöchstgrenze eines Antrages. Die Idee einer projektgrößenabhängigen Deckelung wurde leider nicht aufgegriffen. Insbesondere Projekte im urbanen Raum sind aufgrund ihrer Größe und Komplexität mit besonders hohen Kosten verbunden. Es ist ein erheblicher Aufwand für die benötigten Infrastrukturmaßnahmen an Strom- und Fernwärmenetzen nicht zu vermeiden. Diese Kosten übersteigen die definierten Obergrenzen schnell um ein Vielfaches und lassen sich nur unzureichend in die zu definierenden Zeitscheiben und Maßnahmenpakete einteilen. Projekte über die Höchstgrenze hinaus können auch nicht mittels beihilferechtlicher Einzelnotifizierung der EU-Kommissionen unterstützt werden.⁴¹

⁴⁰ [BMWK 2022b]

⁴¹ [AGFW 2022]

ZUR DISKUSSION

Weitere Hürden bestehen durch die erhebliche Unsicherheit bei der Gewährung der Betriebskostenförderung von Großwärmepumpen, welche im momentanen Marktumfeld ohne erhebliche Förderanreize kaum wirtschaftlich zu betreiben sind.

Auch wenn also die 2022 erfolgte Umsetzung der BEW höchst erfreulich ist, verblüfft dem gegenüber der geringe Elan, mit dem die leitungsgebundene Wärmewende vorangebracht werden soll – und dies, obwohl auf der Hand liegt, dass in hochverdichteten Räumen andere Strategien klar unterlegen sind. Damit ist nicht einmal in erster Linie die anfangs überschaubare finanzielle Ausstattung gemeint, sondern sehr viel mehr die sehr geringe Erwartung, die an die Emissionsreduzierung durch Fernwärme gestellt wird: So sieht das Klimaschutz-Sofortprogramm von BMWK und BMWSB vom 13.07.2022 einen kumulierten Minderungsbeitrag von 3,2 Mt THG bis 2030 im Bereich Fernwärme, während im gleichen Zeitraum vom Gebäudeenergiegesetz (GEG) und der Bundesförderung Effiziente Gebäude (BEG) ein Minderungsbeitrag von 43,8 bzw. 39,7 Mt erwartet wird – und zwar obwohl wesentliche Programmelemente den Neubau betreffen, mit dem bekanntlich nur der Emissionsanstieg begrenzt werden kann, nicht aber eine effektive Minderung erzielt wird.⁴² Und ob die beiden letztgenannten Programme die in diesem Frühjahr vom Bundesrechnungshof monierte und methodisch abzusichernde Fördereffizienz und -effektivität erreichen, ist mehr als fraglich.⁴³

- **KWKG:** Das KWKG ist derzeit das einzige bestehende Förderinstrument, das (neben dem aktuellen Hauptzweck, der KWK-Förderung) insbesondere die Errichtung großer Wärmenetze, Power-to-Heat-Einrichtungen und große Wärmespeicher fördert. Neben Anpassungsbedarf im Detail (zum Beispiel bei Kriterien für PTH-Einrichtungen) besteht das Haupthindernis in den durch sehr langsame Gesetzgebungsverfahren und durch langwierige beihilferechtliche Notwendigkeiten entstehenden Investitionsunsicherheiten.

Dass sich der Anteil in der KWK (auf Basis grüner/synthetischer Brennstoffe) an der leitungsgebundenen Wärmeversorgung (sowie im Strommarkt) reduziert (gem. BEW bis 2045 auf unter 50%) und sich die Rolle und Bedeutung der KWK in den nächsten Jahren stärker in Richtung der Gewährleistung von Versorgungssicherheit sowohl für Strom als auch für Wärme verschieben werden, sollte in der anstehenden Evaluierung des Gesetzes nach § 34 (2) im Mittelpunkt stehen. Ein wirtschaftlicher Einsatz von synthetischen Brennstoffen, sowie eine generelle Berücksichtigung der KWK-Branche in Zeiten von hochlaufenden synthetischen Brennstoffquoten mit entsprechenden knappen Mengen sollte dabei ebenfalls seitens der Politik berücksichtigt werden. Die von der Bundesregierung angekündigte Novellierung des KWKG wie auch die zuvor durchzuführende Evaluierung stehen aus. In der letzten Novelle im Rahmen des sogenannten Osterpakets wurden vor allem einige neue Restriktionen bzw. Anforderungen für KWK-Anlagen eingeführt. Ab 2024 soll beispielsweise der Einsatz von Biomethan in KWK-Anlagen verboten werden. Des Weiteren müssen neue KWK-Anlagen ab 10 MW wasserstofffähig und auf den ausschließlichen Betrieb mit Wasserstoff umrüstbar sein. Wie dieses „H2-ready“ genau aussehen soll, ist aber noch unklar. Die Novellierung des KWKG wird für 2023 erwartet. Zwingend erforderlich ist die Anpassung der Fördersätze an die

⁴² [BMWK/BMWSB 2022]

⁴³ [BRH 2022]

ZUR DISKUSSION

Kostensteigerungen in nahezu jedem Bereich des Anlagenbaus, nicht zuletzt auch um den erforderlichen Beitrag zur Versorgungssicherheit zu leisten. Unterstützend nötig sind die Klärung der Rolle, die KWK für die Versorgungssicherheit spielt wie auch der Zugang dieser Anlagen zu klimaneutralem Wasserstoff.

- **BEG:** Die BEG (Bundesförderung effiziente Gebäude) ist ein gutes Beispiel dafür, dass mitunter Details den positiven Grundansatz konterkarieren: So war ein Fernwärmeanschluss in der gültigen Fassung vom 21. Mai 2021 nur förderfähig, wenn mindestens 25% der Wärme aus Erneuerbaren Quellen stammte. Diese Vorgabe wäre für große Wärmenetze aber nur sukzessive zu erfüllen. Mit der aktuellen BEG-Version ist ein Anschluss nun förderfähig, wenn das Gebäude- oder Wärmenetz mindestens eine der folgenden Anforderungen erfüllt:
 - Anteil von mindestens 25 Prozent erneuerbarer Energien und/oder unvermeidbarer Abwärme
 - nur bei Wärmenetzen: ein Primärenergiefaktor von maximal 0,6
 - nur bei Wärmenetzen: ein durch die Bundesförderung für effiziente Wärmenetze (BEW) anerkannter Transformationsplan

Damit sind Anschlüsse bereits dann förderfähig, wenn noch kein Anteil Erneuerbarer Energie und/oder Abwärme verwendet wird, aber eine Dekarbonisierung des Wärmenetzes mit Sicherheit erwartet werden kann (Vorlage eines anerkannten Transformationsplanes).

Positiv zu bewerten ist ebenfalls, dass das Programm nun die Förderung in die Gebäudesanierung stärker fokussiert. Es fließen rd. 50% mehr Fördergelder (12-13 Mrd. Euro) in die Sanierung des Gebäudebestands.

Die BEG soll noch einmal überarbeitet und verbessert werden. Die Entwürfe für Änderungen ab dem Jahr 2023 enthalten auch neue Pläne für Gebäude- und Wärmenetze. Angedacht ist zum Beispiel, den Fördersatz für den Bau von Gebäudenetzen und den Anschluss an ein Wärmenetz anzuheben. Neue Gebäudenetze sollen zudem aus mindestens 65% Erneuerbaren Energien oder unvermeidbarer Abwärme gespeist werden (vorher 55%). Für den Anschluss an ein bestehendes Wärmenetz sollen dagegen keine technischen Vorgaben mehr für einen Anteil an EE oder den Primärenergiefaktor gelten.

- **Mietrecht/Wärmelieferverordnung:** Die Kombination aus bestehendem Mietrecht und bestehender Wärmelieferverordnung behindert eklatant eine nachhaltige Verdichtung der in Ballungsräumen wichtigen Wärmeinfrastruktur. Mögliche Emissionsminderungen im Wärmesektor werden hierdurch nachhaltig eingeschränkt. In der Kombination von WärmeLV und § 555b BGB werden die Voraussetzungen geregelt, unter denen die Wärmeversorgung von Mieterinnen und Mietern in der Eigenversorgung (z. B. Öl-/Gaskessel) auf eine gewerbliche Wärmelieferung (z. B. Fernwärme) umgestellt werden kann. Dabei sind die Kosten der Umstellung vom Mieter nur insoweit zu tragen, wie eine sogenannte "Kostenneutralität" vorliegt, d. h. es darf bei der Umstellung aus Mieterschutzinteressen zu keiner Kostensteigerung für den Mieter kommen. Der Kostenvergleich wird zwischen den Durchschnittskosten (zum Beispiel einer Ölheizung) der letzten drei Jahre und gewerblicher Wärmelieferung vorgenommen – es wird also eine historische Versorgung mit billigem Brennstoff und eine künftige nachhaltige verglichen, was zumeist zu Lasten des Klimaschutzes geht. Die Kosten energetischer Eigensanierungen können hingegen (ohne

ZUR DISKUSSION

Qualitätskontrolle!) nach § 559 BGB in Höhe von bis zu 8% jährlich auf die Mieter umgelegt werden.⁴⁴

Im Ergebnis wird hierdurch in den Bestandsgebäuden der Ballungsräume die mögliche Umstellung auf klimafreundliche oder -neutrale Fernwärme und eine für alle Seiten kosteneffiziente Verdichtung der leitungsgebundenen Wärmeversorgung verhindert. Die Wärmewende wird hierdurch de facto auf die vielfach deutlich teureren Eigensanierungsmaßnahmen gelenkt, was teils drastische Mietpreissteigerungen bewirkt oder aber den Einstieg in die Wärmewende insgesamt verhindert.

Dieser Missstand sollte in der geplanten Novellierung der WärmeLV behoben werden, nicht zuletzt, um für Mietwohnungen im Ballungsraum die Chance auf ebenso preisgünstigen wie wirksamen Klimaschutz zu geben.

- **Gasinfrastruktur und klimaneutrale Gase:** Selbst, wenn es gelingen sollte, das zentrale Technologiebündel aus klimaneutraler Fernwärme und Wärmepumpen (auf Basis von klimaneutralem Strom) schnell und kosteneffizient zu entwickeln, ist es nicht ausgeschlossen, dass der alternative Einsatz von klimaneutralem Gas – insbesondere von Wasserstoff – bei entsprechendem Markthochlauf, einer vorhandenen Abnehmerstruktur und auf mittlere bis längere Sicht eine kostengünstigere Lösung wäre. Dies gilt je nach regionaler Marktlage auch über den Einsatz in KWK-Anlagen hinaus und vor allem in Bezug auf den industriellen Prozesswärmebedarf. Derlei Kostenvorteile beruhen auch auf der vorhandenen, im Zweifel umzurüstenden Infrastruktur.

Vor diesem Hintergrund wäre es fahrlässig, bereits heute politische Entscheidungen zum Ausstieg aus Erdgas und der Gasnetzinfrastruktur zu treffen, während – in einem hiervon getrennten regulatorischen Rahmen – Vorbereitungen zum Aufbau eines Wasserstoffnetzes getroffen werden.

- **Reform der Steuern, Abgaben Umlagen:** Die auch für eine gelingende Wärmewende einschlägige Sektorkopplung – ganz gleich ob in Form von Power-to-Heat, Power-to-Gas oder von Wärmepumpen – steht aktuell nicht (ausschließlich) vor technischen Herausforderungen, sondern insbesondere vor ökonomischen und regulatorischen. Denn aufgrund der getrennten Entwicklung der Märkte für Strom, Gas und Wärme (analoges gilt für den hier nicht besonders berücksichtigten Kraftstoff- und Verkehrssektor) sind die Preisbildungsmechanismen im Energiesektor komplett inhomogen, und zwar nicht nur zwischen den einzelnen Commodities und ihren Infrastrukturen, sondern auch in Bezug auf ihre Abnehmer.⁴⁵

Eine Bereinigung des Abgaben- und Umlagensystems ist insoweit ebenso notwendig wie eine THG-Orientierung von Lenkungsabgaben und – last but not least – die Klärung des Letztverbrauchsbegriffs. Hier kann das System der Mehrwertsteuer als Orientierung gelten, bei der der tatsächliche Endverbrauch einschlägig ist.

⁴⁴ Miet- und steuerrechtlich umstritten ist trotz eines mieterfreundlichen BGH-Urteils [BGH 2020], wie hoch der Anteil, der vom Vermieter zu tragenden Instandhaltung und der auf den Mieter umlegbaren Modernisierung bei einer energetischen Sanierung sein kann.

⁴⁵ Im Rahmen des Osterpakets wurde zwar die EEG-Umlage abgeschafft; jedoch ist noch Handlungsbedarf bei der CO₂-Bepreisung, bei den Netzentgelten und beim Letztverbraucherbegriff.

ZUR DISKUSSION

c. Kommunale Wärmeplanung

Die klimaneutrale Wärmeversorgung der Zukunft wird ganz wesentlich aus Strom in Wärmepumpen, Fernwärme und klimaneutralen Gasen bestehen. Sie wird sehr viel stärker als die heutige Wärmeversorgung auf Infrastrukturen der allgemeinen Versorgung beruhen, also auf dem Stromnetz, dem Fernwärmenetz und dem Gas- bzw. Wasserstoffnetz. Die Bedeutung von Öl und Kohle, von Energieträgern also, die über die Straße, die Schiene und Wasserwege zu privaten, gewerblichen oder industriellen Endkunden transportiert werden, wird auf null zurückgehen. Die Bedeutung von rein dezentralen EE-Wärmelösungen (Holzpellets, Solarthermie u.ä.) wird zwar absolut wachsen, jedoch wohl nicht über das Maß der heutigen Bedeutung von Kohle und Öl (304 TWh)⁴⁶ hinaus. In Summe wächst die Bedeutung der Infrastruktur der allgemeinen Versorgung vor allem durch die zunehmende Nutzung von Wärmepumpen und Fernwärme. Doch auch das (umgenutzte) Gasnetz wird eine wichtige Rolle spielen. Das gilt selbst dann, wenn es nicht mehr im bisherigen Umfang genutzt würde. Die Infrastruktur ist kapitalintensiv und von langer Kapitalbindungsdauer. Hierdurch wächst im Sinne von Investitionssicherheit die Bedeutung von Koordination.

Und da klimaneutrale Wärmequellen häufig ebenso so lokal spezifisch sind wie die Wärmebedarfsstruktur, ist es sinnvoll, Infrastrukturinvestitionen auf lokaler Basis durch Erarbeitung von zu priorisierenden Wegen abzusichern. Wärmeplanung auf kommunaler Ebene ist somit ein vorzugswürdiger Weg, Risikoprämien zu senken und folglich Kosten zu vermeiden. Die Bedeutung und Verantwortung von Städten und Gemeinden bei der Koordination der Infrastrukturprojekte für die Wärmewende ist ausgesprochen hoch.

Vor der Einführung von kommunalen Wärmeplänen gilt es, einige wichtige Fragen zu klären. Nachfolgend werden die wichtigsten aufgeführt und Vorschläge zu Lösungen unterbreitet:

- **Fernwärme-Transformationspläne und kommunale Wärmeplanung:** Insbesondere in den großen, wachstumsstarken Ballungsräumen, namentlich in den Städten der 8KU, haben die Energieversorger damit begonnen, Transformationspläne für die klimaneutrale Fernwärme aufzustellen und die damit verbundenen Projekte umzusetzen. Dies ist nicht zuletzt ein wesentliches Kriterium der „Bundesförderung effiziente Wärmenetze“ (BEW), die zu Recht als Hebel für die Wärmewende in der Stadt gilt. Wärmenetze sind – wie oben gezeigt – im Regelfall die kosteneffizienteste Infrastruktur, um unterschiedliche klimaneutrale Wärmequellen zu Kunden zu bringen. Daher ist unbedingt zu beachten, dass von Vornherein Inhalt und Struktur der Transformationspläne für die Fernwärme, die ja jetzt aktuell entstehen bzw. bereits umgesetzt werden Vorrang gegenüber der kommunalen Wärmeplanung haben, durch diese ergänzt oder jedenfalls nicht nachträglich in zentralen, Infrastrukturinvestitionen betreffenden Teilen konterkariert werden. Das ist allein deshalb von elementarer Bedeutung, weil andernfalls Investitionsvorhaben auf unsicherer Basis stünden und nicht umgesetzt würden.

Umgekehrt eignen sich jedoch gerade Wärmenetze als Ankerpunkte kommunaler Wärmeplanung, denn erfahrungsgemäß werden derart kapitalintensive Investitionen nur dann getätigt, wenn sie sich in der Planung gegenüber weniger kapitalintensiven als grundlegend vorteilhaft und zukunftsfähig erweisen.

⁴⁶ [AGEB 2021b]

ZUR DISKUSSION

- **Föderale Governance:** Die Wärmewende beginnt – wie gesagt – lokal in Stadt und Gemeinde. Sie beginnt mit der örtlichen Nachfrage nach Wärme, mit dem örtlichen Angebot an (klimaneutraler) Wärme und mit der Infrastruktur. Sie hat jedoch auch einen klar nationalen Bezug: Denn zum einen ist es die Bundesrepublik Deutschland, die die EU-Klimaziele umsetzen will (und muss), zum zweiten sind die wesentlichen Fördermittel eine nationale Angelegenheit und zum dritten steht die Infrastruktur in einem nationalen Regime. Hinzukommt, dass mit hoher Wahrscheinlichkeit die lokalen Potenziale an klimaneutraler Wärme nicht (überall) ausreichend sind, so dass für die überörtliche Beschaffung von klimaneutraler Wärme eine Koordination auf nationaler Ebene erforderlich ist. Die Wärmewende ist eine nationale Aufgabe. Sie ist in einen europäischen Rahmen eingebettet, wird jedoch lokal umgesetzt. Diese Struktur erfordert ein strategisches Management der Wärmewende. Es geht darum, eine Governance zu strukturieren, die das Zusammenwirken der verschiedenen Ebenen so organisiert, dass diese ihrer Verantwortlichkeit und Zuständigkeit gerecht werden und dass ferner Kompetenzen (und finanzielle Mittel) dort allokiert werden, wo Verantwortung und Zuständigkeit bestehen.

Für die Wärmewende bedeutet das:

Der Bund ist europapolitisch verantwortlich dafür, dass die Wärmeversorgung in Deutschland bis spätestens 2045 klimaneutral erfolgen kann. Er benötigt jedoch für die Umsetzung die kommunale Ebene. Zum einen, weil diese nach § 28 (2) des Grundgesetzes ohnehin für die örtlichen Angelegenheiten zuständig ist, zum anderen, weil sie lokale Kenntnisvorteile besitzt und überdies das klimaneutrale Wärmedargebot ohnehin weitgehend lokal definiert ist.

Insoweit der Bund in der Verantwortung für die Erreichung der Klimaziele steht, kommt er nicht umhin, die Wärmewende zu forcieren, anders gesagt: zu fördern. Dabei ist es selbstverständlich, dass der Bund die Klimaziele zeitgerecht und kosteneffizient erreicht. Hieraus wiederum folgt, dass er die Mittel unter dem Kriterium der Zielerreichung kosteneffizient bereithält. Wenn aber Kosteneffizienz berechtigterweise im Interesse des Bundes liegt, dann ist der Bund auch berechtigt, seine Fördermittel wärmewendeadäquat und kosteneffizient einzusetzen. Hieraus folgt, dass er sich Entscheidungskriterien für den kosteneffizienten Mitteleinsatz erarbeiten muss. Dieser Ansatz zielt ins Zentrum der kommunalen Wärmeplanung. Zwar liegen die wärmewenderelevanten Optionen vor Ort in den Kommunen. Im Sinne der kosteneffizienten Umsetzung und folglich auch Förderung der Wärmewende kommt der Bund nicht umhin, methodisch belastbare und in jeder Kommune auf die gleiche Weise angewendete Instrumente für die Ermittlung einer kosteneffizienten Wärmewendestrategie zu erarbeiten. Diese wird – weil sie auf lokalen Bedingungen fußt – lokal stets unterschiedlich ausfallen. Und der Bund sollte in gleicher Weise entscheiden, die lokal kosteneffizienten Wärmewendestrategien zu fördern – und andere nicht.

Insoweit die Erreichung der Klimaziele eine nationale Aufgabe ist, kann der Bund die Mitwirkung von Ländern und Gemeinden erwarten. Länder und Gemeinden können vom Bund die Förderung der Umsetzung dieser Politik erwarten. Die Frage nach der Verbindlichkeit der kommunalen Wärmeplanung kann damit so beantwortet werden, dass nur bundesweit geltende methodische Standards eine kosteneffiziente Umsetzung vor Ort bewirken können. Sollen in den Kommunen Maßnahmen gefördert werden, so hat der Bund das Recht, hierfür einheitliche

ZUR DISKUSSION

methodische Grundlagen zu schaffen, deren Anwendung Fördervoraussetzung ist. Und nur die priorisierten Maßnahmen können gefördert werden.

- **Wärmewende: Konzeption im Gegenstromverfahren:** Vielfach wurde in der Vergangenheit die Energiewende – ganz gleich, ob im Strom- oder im Wärmebereich – rein angebotsseitig, also von der Erzeugungstechnologie aus strukturiert. Bei der Stromwende ging es beispielsweise darum, Wind-, PV- oder Biomasseanlagen zu fördern, indem der produzierte Strom ins Netz der allgemeinen Versorgung aufgenommen und technologiespezifisch vergütet wurde. Lokale Produktionsumstände oder die Verfügbarkeit von Infrastruktur spielten (zunächst) keine Rolle. Die Erneuerbaren konnten umstandslos ins Netz aufgenommen und verteilt werden. Ihr Anteil war zunächst so gering, dass gar keine Probleme mit der Infrastruktur entstanden. Die Angebotsseite dominierte, die Nachfrageseite konnte vernachlässigt werden. Denn ob ein Kunde viel oder wenig Strom benötigt und dann auch zuverlässig bekommt, wurde ohnehin auf der Ebene der Bilanzkreise geklärt. Strom ist zwar nur relativ schwer speicherbar, lässt sich aber ohne große Probleme transportieren. Bei Erneuerbarer Wärme ist es umgekehrt. Zwar können Strom oder (klimaneutrales) Gas als Energieträger im Wärmebereich unverändert sehr leicht transportiert werden; klimaneutrale Wärme aus Geothermie oder Abwärme ist hingegen zwar speicherbar aber nicht so leicht transportfähig. Es kommt also sehr viel mehr auf die lokalen Bedingungen und die Passung zwischen Angebot und Nachfrage an.

Es ist elementar für die Wärmewende, spezifisch auf die Wärmemenge und auf das benötigte Temperaturniveau der Kunden abgestimmt zu sein. Gleichzeitig gilt es, die heterogenen Ausgangsbedingungen auf der Seite des lokalen Dargebots klimaneutraler Wärme zu beachten und zur Nachfrage in Relation zu setzen. Überdies muss die Kapazität der lokalen Infrastruktur beachtet werden. Und last but not least: Wenn die klimaneutralen lokalen Wärmepotenziale nicht ausreichen, muss Wärme herantransportiert werden, in Netzen für klimaneutrales Gas, über das Stromnetz und – wengleich limitiert auf einen Radius von nicht mehr als 30 km – Fernwärme. In solchen Transportfällen müssen die lokale Nachfrage mit dem lokalen und dem regionalen oder überregionalen Angebot (einschließlich der Infrastruktur) zusammengebracht werden.

Es entsteht auf diese Weise ein Gegenstromverfahren von lokalen und ggf. (über-)regionalen Elementen. In möglichst abnehmerscharfer Auflösung müssen also – bei aller Unsicherheit bezüglich langfristiger Annahmen - erfasst werden:

- lokale Nachfrage: Wärmemenge, Abnahmestruktur, Temperaturniveau, Entwicklungstrends (inkl. potenzieller Effizienzsteigerungen usw.),
- lokales Angebot: Art und Charakteristik der Quelle (z.B. Menge, Saisonalität, Verfügbarkeit, Temperaturniveau etc.), Entwicklungstrends, Kosten,
- lokale Infrastruktur: Kapazität, Zustand, Eignung für bestimmte Energieträger, Entwicklungstrends, Kosten (inkl. der indirekten Kosten z.B. bei der Wertberichtigung von Netzen, die nicht mehr benötigt werden),
- überregionales Angebot: (wie oben),
- überregionale Infrastruktur: (wie oben.)

Aus den oben genannten Elementen ergibt sich unter dem Kriterium der Kosteneffizienz und realisierbaren Umsetzungsgeschwindigkeit eine vorzugswürdige individuelle Lokalstrategie, die immer dann (über-)regional koordiniert werden

ZUR DISKUSSION

muss, wenn in nennenswertem Umfang klimaneutrale Wärme oder die dafür notwendigen Primärenergieträger in die entsprechende Kommune transportiert werden muss. Dies muss bei der Kostenoptimierung bedacht werden. Das Gesamtoptimum der Kosten muss handlungsleitend sein.

- **Energiewirtschaftliche Governance - integrierter Ansatz:** Der Weg zu einer klimaneutralen Wärmeversorgung von Haushalten, Gewerbe und Industrie basiert ganz wesentlich auf der Infrastruktur der allgemeinen Versorgung. Das gilt für Wärmepumpen, Fernwärme und klimaneutrale Gase gleichermaßen. Ohne bedarfsgerechte Strom-, Wärme- und Gasnetze ist die Wärmewende nicht denkbar. Reichweite und Anwendungsgebiete von Wärmeenergieträgern wie Holzpellets, Auf-Dach-PV, Solarthermie u.ä., also solchen, die vollständig ohne Infrastruktur auskommen, sind begrenzt. Umso wichtiger sind die richtige Dimensionierung und das Zusammenwirken der Infrastrukturen. Die Dimensionierung ist natürlich abhängig von Nachfrage und Angebot. Allerdings müssen unter dem Leitkriterium der Kosteneffizienz bei der Erreichung einer klimaneutralen Wärmeversorgung stets die Gesamtkosten von Energieträgern und Infrastruktur entlang des zeitlichen Transformationszielpfades betrachtet werden.

Die Errichtung einer Power-to-Heat-Anlage – um ein Beispiel zu nennen - ist dann dann/deshalb kosteneffizient, wenn sie ansonsten abgeregelten Strom (was ggf. entschädigungspflichtig ist) in Wärme umwandelt, einem Wärmenetz verfügbar macht und zugleich den Verbrauch eines anderen Wärmeenergieträgers (klimaneutrales Gas, Biomasse usw.) vermeidet. Die Methodik von kommunalen Wärmeplänen muss derlei zwingend mitabbilden, weil sie ansonsten keine kosteneffizienten Ergebnisse erzielen kann. Sie wird auf diese Weise zu einer integrierten Energiesystemplanung, die bereits bestehende Planungen (insbesondere Transformationsplanungen nach der BEW) in sich aufnimmt.

- **Regelungsgehalt:** Nachfolgend werden wesentliche Umsetzungsschritte entwickelt:
 - **Konzeptionelle Fertigstellung:** In einem ersten Schritt ist die Konzeption und damit der gesetzliche Rahmen der kommunalen Wärmeplanung zu entwickeln. Neben der Festlegung der oben beschriebenen Elemente Governance, Gegenstromverfahren und dem integrierten Ansatz sind für die Vorbereitung allgemein gültige Verfahrensschritte und Datenerhebungsstrukturen zu definieren. Hierbei geht es darum, für das Zusammenwirken von Bund, Ländern und Kommunen allgemein gültige und untereinander anschlussfähige inhaltliche Kriterien zu entwickeln. Nur bei vergleichbaren Datenerhebungsroutinen ist dies möglich. Es geht also darum, in jeder Kommune die lokale Nachfrage, das lokale Angebot an klimaneutraler Wärme und die Infrastruktur abzubilden. Da nicht immer vor Ort ausreichende Potenziale vorhanden sind, ist es fallweise nötig, die lokalen Größen mit dem überregionalen Angebot und der überregionalen Infrastruktur zu verknüpfen.
 - **Ableitung von Maßnahmeplänen:** Aus dem Match von Angebot, Nachfrage und Infrastruktur ergeben sich unter dem Leitkriterium der Kosteneffizienz vorzugswürdige Transformationsstrategien. Hierbei werden sich Maßnahmenbündel ergeben, die unmittelbar umsetzbar und besonders klimaschonend sind. Es ist aber auch anzunehmen, dass für bestimmte Bereiche einer Kommune aktuell keine robusten Aussagen zu treffen sind. Dies kann beispielsweise der Fall sein, wenn – beispielsweise an der städtischen Peripherie – die gegebenen Wärmebedarfe sich in absehbarer Zeit weder durch

ZUR DISKUSSION

Elektrifizierung (zu hoher Spitzenbedarf an EE-Strom, Ausbaubedarf des Stromnetzes) noch durch Fernwärme (zu hohe Temperaturen, Ausbau des Fernwärmenetzes) oder klimaneutrales Gas (Verfügbarkeit) sicher kosteneffizient umsetzen lassen. Derartige Aufgabenstellungen sind dann zeitlich nach hinten zu schieben und allerdings mit einem Zeitpunkt zu versehen, zu dem sie dann spätestens zu lösen sind.

Ein solches Verfahren, das bewusst Unsicherheit einkalkuliert, hat immerhin den Vorteil, dass unter dem Eindruck des aktuellen Fachkräftemangels jedenfalls die sicher vorteilhaften Maßnahmen zuerst umgesetzt werden. Gleichzeitig erzeugt ein klarer Zeitplan bei privaten Haushalten ebenso wie bei Unternehmen Erwartungssicherheit in Bezug auf mögliche Investitionen, sei es eine Instandhaltung oder Neuinvestition.

- Förderpolitik: Eine entscheidende Größe bei der kosteneffizienten Umsetzung klimaneutraler Wärmeversorgung für Haushalte und Unternehmen ist es, eine möglichst fokussierte Förderpolitik umzusetzen. Kommunale Wärmepläne sind ein ganz wesentlicher Hebel, den nötigen förderpolitischen Fokus zu schärfen. Denn wenn klar ist, dass die Wärmeversorgung eines bestimmten Gebiets (nur) in einer bestimmten, die lokalen Gegebenheiten beachtenden Art und Weise kosteneffizient klimaneutral werden kann, dann fällt die Auswahl der Förderinstrumente ungleich treffsicherer aus als vorher. Denn es sollte nur noch das gefördert werden, was in den Maßnahmenkatalog des Wärmeplans hineinpasst. Umgekehrt sollte künftig auch nichts anderes mehr gefördert werden, was im Übrigen dazu beiträgt, dass die wechselseitige Kannibalisierung von Wärmewendestrategien der Vergangenheit angehört. Auf diese Weise entschärft sich auch die Frage nach der Verbindlichkeit der kommunalen Wärmepläne. Denn nur wenn eine Kommune einen nach bundeseinheitlichen Kriterien strukturierten, aber ausschließlich die kommunalen Bedingungen abbildenden Plan erstellt, kommt sie bzw. kommen ihre Bürger und Unternehmen in den Genuss staatlicher Förderung – aber dann eben auch einer, die wirklich bei der Umsetzung hilft. Gleiches gilt für einzelne Bürger oder Unternehmen: Zwar sollten sie frei bleiben in ihrer Entscheidung, auch individuelle Wärmewendestrategien umzusetzen, die sich jenseits der Wärmepläne bewegen; finanzieren müssten sie dies jedoch aus eigenen Mitteln. Dass hierbei in der Abwägung das Gemeinwohl vor individuellem Freiraum steht, sollte sich in unserer Gesellschaftsform von selbst verstehen.

ZUR DISKUSSION

6. Zum Abschluss: Eine Politik für die Wärmewende

Wie sich gezeigt hat, geht es bei der Wärmewende in der Stadt weniger darum, völlig neue Ansätze zu erfinden. Vielmehr ist es wichtig, die jeweiligen vor Ort befindlichen Bedarfe des Wärmemarkts auf mögliche Wärmewendeinstrumente zu beziehen und im Rahmen einer Gesamtschau möglichst kosteneffiziente Lösungskombinationen – Wärmebündel - zu finden, die sich je nach lokalen Gegebenheiten auch deutlich voneinander unterscheiden können.

Grundlegende Entscheidungen bei der Wärmewende sind abhängig von der Energie-, Industrie- und Bevölkerungsdichte. In hochverdichteten Ballungsräumen empfehlen sich idealtypisch leitungsgebundene Wärmewende-Strategien, also Wärmenetze, die klimaneutrale Wärme einsammeln und kosteneffizient verteilen.

Je geringer die Einwohner-, Industrie und Energiedichte ausgeprägt ist, umso mehr können dezentrale Wärmepumpen ihre Vorteile ausspielen. Nicht zu vergessen ist aber die Gasnetzinfrastruktur. Sie bleibt nötig, wenn im Vollkostenvergleich die Nutzung von klimaneutralem Gas günstiger ist als jeweils klimaneutral betriebene Wärmepumpen oder Wärmenetze.

Auch kostenoptimierte technologische Wärmebündel weisen im Verhältnis zu den herkömmlichen Anwendungen Wirtschaftlichkeitslücken auf. Diese Wirtschaftlichkeitslücken sollten entschlossen durch Förderung und durch Beseitigung von Fehlansätzen behoben werden (BEW, BEG, KWKG, H₂ im EnWG, Reform von Abgaben und Umlagen, Wärmelieferverordnung, kommunale Wärmepläne). Auf der Basis der hier vorgeschlagenen Vollkostenbetrachtung erscheint dies auch kosteneffizient umsetzbar.

Die oben gezeigten Positionierungsansätze ermöglichen dies. Sie werden von uns in einem weiteren Schritt präzisiert und in legislative Vorschläge übersetzt.

ZUR DISKUSSION

Anhang: Klimaneutrale Gase und Wasserstoff

Wie oben ausgeführt können klimaneutrale Gase bzw. Wasserstoff einen enorm hohen Lösungsbeitrag für die Wärmewende liefern. Dass ihr potenzieller Einsatz gleichwohl mit außerordentlich unterschiedlichen Erwartungen behaftet ist, verdankt sich nicht zuletzt dem enormen Zeitdruck der Energiewende. Bei den beiden Energieträgern sind keine grundlegenden Änderungen bei Technologie oder Verfahren zu erwarten. Und abgesehen von – allerdings erheblichen – Skalierungseffekten dürfte auch kein Preisverfall zu erwarten sein. Die Preisanpassungslogik basiert auf Energiekosten und Maschinenbau, nicht auf der Halbleiterlogik wie etwa bei PV-Modulen.

Die Rolle, die Wasserstoff in der Wärmewende über seinen Einsatz in der Residuallast hinaus spielt, ist abhängig von Randbedingungen, deren Ausprägung noch nicht abgeschlossen ist. Im Rahmen der in der vorliegenden Studie angenommenen Bedeutung des kosteneffizienten Zusammenspiels von Nachfrage, Infrastruktur und Angebot werden nachfolgend einige wesentliche Aspekte des Themenkomplexes dargestellt.

a. Infrastrukturen als Grundlage der Wärmewende

Der Lösungsbeitrag von grünen Gasen und Wasserstoff zur Wärmewende ist insbesondere von zahlreichen Annahmen abhängig, die ihrerseits aufgrund hoher Investitionen zu Pfadabhängigkeiten führen. Aufgrund des notwendig infrastrukturasierten Charakters der Energiewende, die auf Strom-, Wärme- und Gasnetzen basiert, tangiert jede neue infrastrukturelle Entscheidung die jeweils anderen Infrastrukturen. Abgesehen von einigen industriellen Wasserstoffleitungen existiert zum heutigen Tage keine Wasserstoffinfrastruktur, wohl aber eine für Gas, die im Vergleich mit einem Neubau zu geringeren Kosten umgerüstet werden könnte. Dies wäre freilich mit Vorteilen für die etablierten Gasnetzbetreiber (inkl. der Stadtwerke) verbunden. Ein grundlegend anderer Ansatz wäre die Errichtung einer von den Gasnetzen vollkommen abgelösten Wasserstoffinfrastruktur – einschließlich einer eigenen Finanzierungs- und Regulierungslogik. Bei einer reinen Wasserstoffinfrastruktur dürfte relativ schnell Erwartungssicherheit für die „hard-to-abate-Sektoren“ mit ihren großen Wasserstoffbedarfen zu gewährleisten sein. Denn Kapazitäten, Errichtungszeiträume und Preise wären gut kalkulierbar.

Dem stehen allerdings die Vorteile einer gemischten Entwicklung gegenüber, bei denen die Gasinfrastruktur in wichtigen Teilen in eine Wasserstoffinfrastruktur vergleichsweise kosteneffizient umgebaut würde und bei der große regionale Energieversorger als „Energie- und Transformationsmanager“ eine sehr positive Rolle spielen dürften. Denn dort, wo große Hoch-Temperatur-Bedarfe an Prozesswärme bestehen und auch stoffliche Nutzungsbedarfe hoch sind, kommt dem sogenannten Hochlauf der Wasserstoffwirtschaft eine Bedeutung zu, die in der Breite über die Versorgung nur weniger – zweifelsohne großer – Abnehmer hinausgeht und auch den industriellen Mittelstand betrifft.

Und wenn ein regionales Wasserstoff-Cluster sich wegen eines großen Hoch-Temperatur-Wärmebedarfs oder wegen des stofflichen Einsatzes von Wasserstoff als notwendig und sinnvoll erweist (dies dürfte an der Rheinschiene, im mitteldeutschen Chemiesdreieck oder auch an der Küste der Fall sein), ist hierdurch zugleich ein entscheidendes Kriterium für den Dekarbonisierungspfad der gesamten Wärmerversorgung gegeben.

ZUR DISKUSSION

b. Biomethan/synthetisches Methan

Biogas wird aus Biomasse, insbesondere aus nachhaltig und gewässerverträglich angebauten Energiepflanzen, Gülle, Mist oder kommunalen und industriellen organischen Reststoffen hergestellt. Die Biomasse wird in Biogasanlagen unter Ausschluss von Sauerstoff und Licht zu Biogas vergoren. Das entstandene Biogasgemisch besteht zu 50-65% aus Methan, zu 35-50% aus Kohlenstoffdioxid und in geringen Konzentrationen aus Stickstoff, Wasser, Sauerstoff und Schwefelwasserstoff. Anschließend wird das Biogas getrocknet, entschwefelt und das enthaltene CO₂ abgeschieden. Das so entstandene Biomethan besitzt die gleichen Eigenschaften wie Erdgas und kann durch die vorhandenen Erdgasleitungen und Speicher sofort und ohne zusätzliche Kosten transportiert werden. In Deutschland wurden im Jahr 2021 in rund 200 Anlagen knapp 10 TWh Biomethan erzeugt. Dieses wird jedoch nicht zum Großteil ins Gasnetz eingespeist, sondern vor allem zur Stromerzeugung vor Ort und als Kraftstoff im Verkehrssektor eingesetzt. Im leitungsgebundenen Wärmemarkt findet Biomethan aktuell keine Verwendung. Die bisher geringe Produktionsmenge ist über die letzten Jahre relativ gleichgeblieben. Die Produktion lässt sich auch nur begrenzt ausweiten und kann nicht in der Menge verfügbar gemacht werden wie Erdgas, da die benötigten Energiepflanzen Anbaufläche binden und mit der Nahrungsmittelproduktion und dem Schutz natürlicher Ökosysteme konkurrieren. Ein in Zukunft verstärkter Einsatz in der Wärmeversorgung von Gebäuden und Quartieren scheint unwahrscheinlich, da die Nutzung von Biomethan in KWK-Anlagen nach aktuellem Entwurf einer KWKG-Novelle zukünftig nicht mehr gefördert werden wird.

Synthetisches Methan wird durch die Methanisierung von grünem Wasserstoff (PtCH₄) unter Verwendung einer biogenen THG-Quelle oder durch Abscheidung von Kohlenstoffdioxid aus der Luft produziert. Es ist wie Biomethan technisch bzw. energetisch voll kompatibel zur Einspeisung in das bestehende Gasnetz. Aufgrund hoher Effizienzverluste bei der Umwandlung und der Notwendigkeit Investitionen in zusätzliche Methanisierungsanlagen tätigen zu müssen, die mit CO₂ aus Biomethananlagen oder der Luft versorgt werden, kann synthetisches Methan mit anderen Energieträgern im Wärmesektor bisher nicht konkurrieren.⁴⁷

c. Wasserstoff

Abgesehen vom Ausbau der Erneuerbaren Energien im Stromsystem ist in den letzten Jahren kein energiepolitisches und energiewirtschaftliches Thema so sehr mit Erwartungen versehen und wohl auch überfrachtet worden wie der Einstieg in die Wasserstoffwirtschaft.

Die Erwartungen an die Rolle, die Wasserstoff für den Klimaschutz spielen kann, sind hoch. Die Erzeugung von grünem Wasserstoff unter Nutzung von Erneuerbarem Strom erlaubt in breitem Maße klimaneutrale Anwendungen in Industrie und Energiewirtschaft. Allerdings stehen diesen Erwartungen zumindest kurz- bis mittelfristig erhebliche Hürden im Weg. Im Folgendem werden die Chancen und Schwächen des Energieträgers Wasserstoff untersucht. Dabei wird sowohl die Angebots- als auch die Nachfrageseite betrachtet.

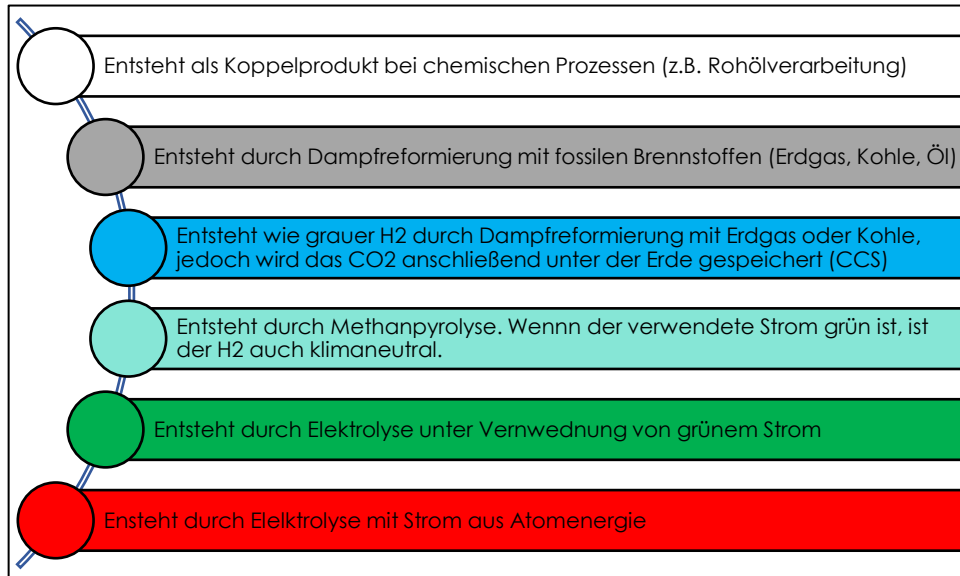
⁴⁷ [LBST/SPC 2022]

ZUR DISKUSSION

➤ Wasserstoff-Erzeugung

Es gibt verschiedene Möglichkeiten Wasserstoff zu erzeugen. Je nach Produktionsprozess, verwendetem Energieträger bzw. Strom und der anschließenden Verwendung von entstandenem Kohlenstoffdioxid wird dem Wasserstoff eine Farbe zugeordnet, die in folgender Grafik verdeutlicht wird.

Wasserstoff-Farbspektrum:



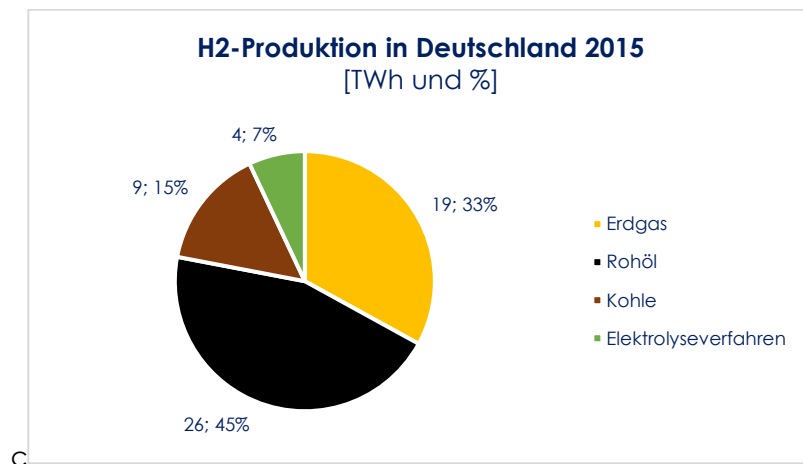
Eigene Darstellung

Deutschland strebt in seiner Nationalen Wasserstoffstrategie die zukünftige Verwendung von grünem Wasserstoff an, da dieser klimaneutral mit Strom aus erneuerbaren Energien-Anlagen erzeugt wird und als Substitut für fossile Energieträger Energieanwendungen dekarbonisieren kann.

Bisher erzeugter Wasserstoff (rd. 57 TWh/a) basiert jedoch größtenteils auf fossilen Energieträgern (93%). Dieser wird vor allem direkt vor Ort bei den Verbrauchern selbst erzeugt (Petro- und Grundstoffchemieindustrie). Lediglich 7% des erzeugten Wasserstoffes werden mittels Elektrolyseverfahren (vor allem Chlor-Alkali-Elektrolyse) produziert. Die Farbe des erzeugten Wasserstoffes hängt dabei vom verwendeten Strommix ab. Grüner Wasserstoff wird bisher nur in Pilot- und Demonstrationsanlagen erzeugt.⁴⁸

⁴⁸ [DVGW 2022]

ZUR DISKUSSION



[DENA 2020]

Die Bundesregierung setzt in der Nationalen Wasserstoffstrategie auf den Einsatz von grünem Wasserstoff. Wegen der begrenzten Verfügbarkeit geht sie jedoch davon aus, übergangsweise auch blauen Wasserstoff auf dem EU- und Weltmarkt einkaufen zu müssen.⁴⁹

Elektrolyse-Verfahren

Bei der Herstellung von grünem Wasserstoff lassen sich drei Elektrolyse-Verfahren unterscheiden:

- Alkalische Elektrolyse (AEL)
- Proton-Exchange-Membran-Elektrolyse (PEMEL)
- Hochtemperatur-Elektrolyse (HTEL)

Allen drei Verfahren ist gleich, dass Strom durch einen Elektrolyten (z.B. Wasser) geleitet und dieser mittels einer permeablen Membran in seine Bestandteile Sauerstoff und Wasserstoff gespalten wird. Bei der Alkalischen Elektrolyse wird als Elektrolyt eine alkalisch wässrige Lösung verwendet, bei der Proton-Exchange-Membran-Elektrolyse kommen eine saure Lösung und noch zusätzliche Edelmetalle zur Anwendung, um Korrosion zu verhindern. Beide Verfahren arbeiten mit Temperaturen von 60 bis 80 °C und zählen damit zur Niedrigtemperatur-Elektrolyse. Die Hochtemperatur-Elektrolyse spaltet unter einem höheren Temperaturniveau (ca. 900 °C) anstatt Wasser Wasserdampf in seine Bestandteile Wasserstoff und Sauerstoff.⁵⁰

Bis dato wurde aus Kostengründen vor allem die alkalische Elektrolyse eingesetzt. Der PEMEL wird kurz- bis mittelfristig zugesprochen mit der AEL konkurrieren zu können. Langfristig wird auch die HTEL an Bedeutung gewinnen, wenn die Wirkungsgrade und die Wirtschaftlichkeit steigen.

⁴⁹ [BMWi 2020] S. 3

⁵⁰ [DIHK 2020]

ZUR DISKUSSION

➤ **Kostenentwicklung**

Herstellungskosten und Einkaufspreise

Für die Herstellungskosten von grauem Wasserstoff sind insbesondere der Gas- und der CO₂-Preis ausschlaggebend. Der Gas-Preis unterliegt den allgemeinen Marktschwankungen und ist aktuell durch die Kriegssituation massiv gestiegen.

Die Produktionskosten von grünem Wasserstoff setzen sich aus den Stromkosten und denen des Elektrolyseurs zusammen. Der erneuerbare Strom kann je nach Konstellation des Projektes grundsätzlich über PPAs (Power Purchase Agreements), aus dem allgemeinen Stromnetz bzw. über die Strombörse oder durch eigene EE-Erzeugungsanlagen bezogen werden. Der Preis von grünem Strom aus dem allgemeinen Stromnetz setzt sich zum einen aus den Kosten für die Erzeugung, Beschaffung und den Vertrieb und zum anderen aus den Netzentgelten, den Umlagen und Steuern zusammen. Da der Abnehmer nachweislich grünen Strom für die Elektrolyse benötigt und der aktuelle Strommix zu 50-60 % aus konventioneller Stromerzeugung stammt, stellt sich die Frage der Zertifizierung des grünen Stroms. Ein nachweislich klimaneutraler Strombezug wäre durch PPAs gegeben. Im Falle von PPA wird ein langfristiger Stromliefervertrag geschlossen, der eine Lieferung einer bestimmten Strommenge zu einem festgelegten Preis oder einem gleichwertigen finanziellen Ausgleich regelt. Dadurch sichert sich der Abnehmer gegen steigende Strompreise ab. Wird grüner Wasserstoff durch Strom aus eigenen EE-Erzeugungsanlagen hergestellt, müssen Investitions- und Betriebskosten, sowie Kosten der Finanzierung der Erzeugungsanlagen bei den H₂-Herstellungskosten berücksichtigt werden. Es ist noch ungewiss, wie der Strombezug für die Elektrolyse reguliert wird. Gegebenenfalls können für die Elektrolyse Netzentgelte, Umlagen oder Steuern entfallen.

Bei den Elektrolyseurs-Kosten unterscheidet man nach Kapital- und Betriebskosten. Erstere sind wiederum abhängig von der Lebensdauer der Anlage, den anfallenden Zinsen und der Höhe der Volllaststunden. Die Betriebskosten richten sich nach dem Wirkungsgrad der Anlage.⁵¹

Bisher konnte grauer Wasserstoff aufgrund der niedrigen Gaspreise für ca. 5ct/kWh H₂ hergestellt werden, die Kosten für grünen Wasserstoff sind im Schnitt doppelt bis dreimal so groß.⁵² Im Zuge des Russland-Ukraine-Konflikts ist der Gaspreis jedoch gestiegen und mit ihm die Erzeugungskosten für grauen Wasserstoff. Auf dem Spotmarkt konnte grauer Wasserstoff in diesem Jahr (2022) für durchschnittlich 32 ct/kWh H₂ eingekauft werden.⁵³ 2021 vor der Gasmangellage waren es noch rund 12 ct/kWh H₂.⁵⁴

Grüner Wasserstoff kostete auf dem Spotmarkt 2021 noch rd. 32 ct/kWh H₂. Da die Strompreise durch das Merit-Order-Prinzip an die Gaspreise gekoppelt sind, sind durch den Krieg auch die Kosten von grünem Wasserstoff gestiegen (2022: 55 ct/kWh H₂).⁵⁴ An einzelnen Tagen fielen die Kosten von grünem Wasserstoff aber unter das Kostenniveau von grauem. Langfristig muss grüner Wasserstoff aber weiterhin mit seinem erdgasbasierten Pendant konkurrieren bis steigende CO₂-Preise für Erdgas die Wirtschaftlichkeitslücke ausgleichen können.

⁵¹ [Bundestag 2020]

⁵² [EWI 2021]

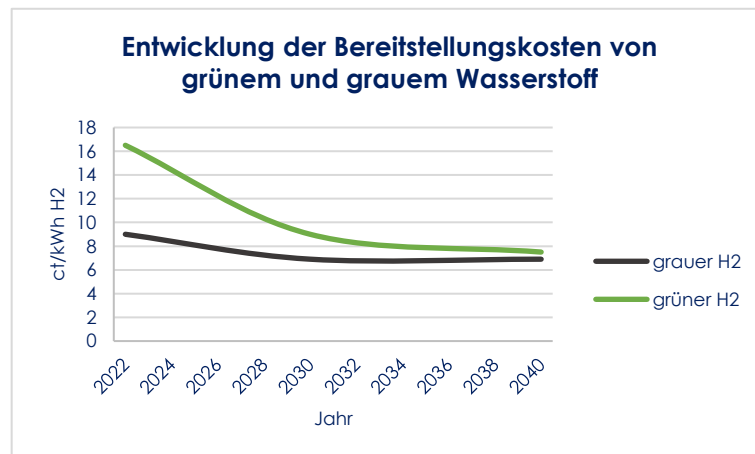
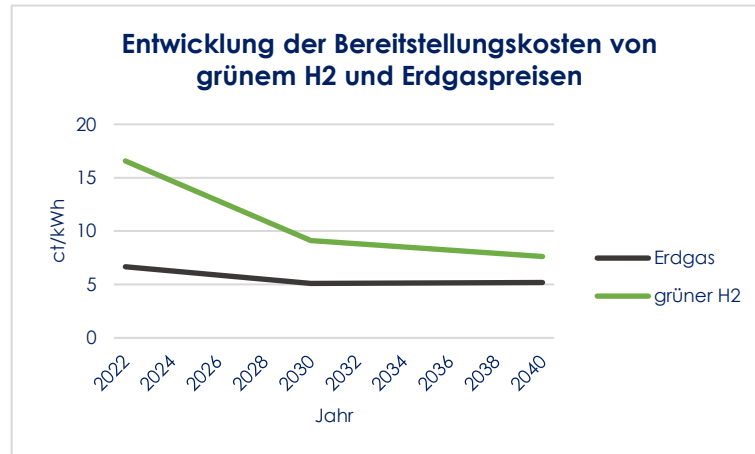
⁵³ Grundlage für den Sportpreis-Index sind die kurzfristigen Strom-, Gas- und EUA-Notierungen (CO₂-Preis-Zertifikate) ohne Kapitalkosten. [Hydex 2022]

⁵⁴ [ASUE 2021], [ASUE 2022]

ZUR DISKUSSION

Zukünftige Bereitstellungskosten

Ob ein Unternehmen in den Bau von Elektrolyseuren investiert, entscheidet sich anhand der spezifischen abdiskontierten Bereitstellungskosten.



[Odenweller et al. 2022]⁵⁵

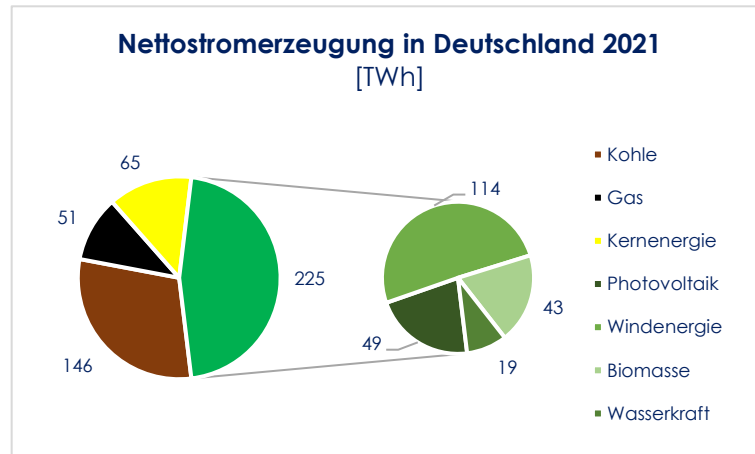
Die Bereitstellungskosten für grünen Wasserstoff liegen aktuell noch merklich über den Verbraucherpreisen von Erdgas für energieintensive Industrien. Bis zum Jahr 2040 nähern sie sich zwar weiter an, aber bis dahin sind Investitionen in Anwendungen mit grünem Wasserstoff ohne staatliche Unterstützung oder höhere CO₂-Preise nicht wirtschaftlich. Entsprechend würden sich auch die Bereitstellungskosten von grünem und grauem Wasserstoff verhalten. Trotz kurzfristig gestiegener Erdgas- und Strompreise würden die Bereitstellungskosten von grauem Wasserstoff noch bis über die 2030er Jahre hinaus kleiner sein als die von grünem.

⁵⁵ Es wird von einer einheimischen stromnetzgebundenen Wasserstoffproduktion und einer Stromnetzentgeltbefreiung ausgegangen.

ZUR DISKUSSION

➤ **Grüner Strom als Grundvoraussetzung für eine grüne Wasserstoffwirtschaft**

Der Markthochlauf von grünem Wasserstoff ist kein reines Kostenproblem, sondern auch eine Frage der Verfügbarkeit von grünem Strom. 2021 wurden 487 TWh Strom in Deutschland erzeugt (Nettostromerzeugung), davon stammen rund 46% (225 TWh) aus Erneuerbaren Quellen wie Wind oder PV.



[Fraunhofer ISE 2022]

Der Bruttostromverbrauch betrug im Jahr 2021 565 TWh, 232 TWh davon wurden an grünem Strom nachgefragt.⁵⁶ Da in vielen Sektoren die Elektrifizierung und die Erzeugung von grünem Wasserstoff zur Erreichung der Klimaschutzziele beitragen soll, wird die Nachfrage nach klimaneutralem Strom zunehmen.

Im Jahr 2030 rechnet man mit einem Bruttostromverbrauch von rd. 640 TWh. In dem Jahr stehen voraussichtlich insgesamt 435 TWh grüner Strom zur Verfügung. Der Großteil wird für den Gebäude- und Industriesektor benötigt (z.B. für die Elektrifizierung von Prozesswärme, für Wärmepumpen und Beleuchtung), rund 30 TWh werden vermutlich zur Wasserstoff-Erzeugung genutzt (20 TWh H₂).

2045 rechnet man mit einer EE-Nettostromerzeugung von ca. 900 TWh. Gleichzeitig wird ein Bruttostromverbrauch von knapp 1.000 TWh erwartet, wovon rund 150 TWh für die Produktion von 100 TWh Wasserstoff verwendet werden.⁵⁷ Wie im nachfolgenden Abschnitt „Zukünftige Entwicklung von Angebot und Nachfrage“ zu sehen ist, wird aber mindestens eine viermal so hohe Wasserstoff-Nachfrage erwartet.

Neben der Verfügbarkeit von grünem Strom spielen auch die regulatorischen Rahmenbedingungen eine Rolle für den Markthochlauf von grünem Wasserstoff. Auf europäischer Ebene wird derzeit im Rahmen der neuen Erneuerbare-Energien-Richtlinie (RED II) diskutiert, welche Anforderungen der für die grüne Wasserstoff-Erzeugung genutzte Strom erfüllen muss. Ziel ist es, dass die grüne Wasserstoff-Herstellung keine Erzeugung von Strom aus fossilen Brennstoffen unterstützt, sondern vielmehr den Bau neuer EE-Erzeugungsanlagen bedingt. Um die Nutzung von Strom aus EE-Bestandsanlagen aber nicht auszuschließen und damit das Produktionspotenzial von Wasserstoff in Deutschland einzuschränken, wird auch über die Verwendung von Strom aus dem allgemeinen Stromnetz

⁵⁶ [UBA 2022b]

⁵⁷ [Prognos et al. 2021b]

ZUR DISKUSSION

debattiert. Derzeit arbeitet die Europäische Kommission an einem finalen Entwurf des Rechtsaktes.⁵⁸

➤ **Wasserstoff-Nachfrage**

Aktuell werden die 57 TWh/a an Wasserstoff hauptsächlich für die stoffliche Nutzung in der Industrie benötigt, darunter fällt vor allem der Einsatz in der Stahl-, Grundstoff- und Petrochemie. Insbesondere Gase-Hersteller (z.B. für Methanol oder Wasserstoffperoxid), Düngemittelanlagen (zur Ammoniak-Erzeugung) oder Raffinerien (Raffinierung von Mineralöl, Herstellung von Kraftstoffen) haben einen hohen Bedarf an Wasserstoff für die stoffliche Verwertung.

Es werden derzeit große Hoffnungen in Wasserstoff als klimaschonendes Substitut für fossile Energieträger und zur Dekarbonisierung von energieintensiven Prozessen gesetzt. Dabei konkurriert das klimaneutrale Gas mit grünem Strom, da einige Industrieverfahren auch durch Elektrifizierung THG-Emissionen reduzieren können. Die Einsatzpotenziale von Wasserstoff sind vielfältig, für eine verlässliche Einsatzstrategie und einen Markthochlauf insbesondere im Wärmemarkt müssen aber folgende Voraussetzungen erfüllt werden:

- Eindeutiger und den Markthochlauf fördernder regulatorischer Rahmen für Planungs- und Investitionssicherheit
- Ausreichend grüner Strom zur Produktion von grünem Wasserstoff oder H₂-Importe zu wettbewerbsfähigen Preisen
- Vorhandensein einer ausreichenden Abnahmestruktur
- Verfügbarkeit von Erzeugungs-, Verteil- und Transportinfrastruktur

Langfristig gesehen könnte Wasserstoff dann in den vier Sektoren Industrie, Verkehr, Wärme und Strom einen Beitrag zur Energiewende leisten, insbesondere dort, wo eine Elektrifizierung nur schwer oder gar nicht möglich ist, wie zum Beispiel in der energieintensiven Stahl-Herstellung. Hierbei könnten der CO₂-intensive Kohlenstaub und Koks durch grünen Wasserstoff ersetzt werden.⁵⁹ Da es in der Methanol- und Ammoniak-Produktion üblich ist, den benötigten Wasserstoff separat in einem Methan-Dampfreformer herzustellen, könnte dieser direkt durch grünen Wasserstoff substituiert werden.

Im Mobilitätssektor ist nicht jedes Verkehrsmittel für einen elektrischen Antrieb geeignet. Das betrifft im straßengebundenen Verkehr vor allem Schwerlastfahrzeuge wie Busse oder landwirtschaftliche Nutzfahrzeuge, bei denen aufgrund ihres hohen Eigengewichtes keine großen Reichweiten mit Stromantrieb erreicht werden können. Brennstoffzellen, die mit grünem Wasserstoff betankt werden, können in diesem Fall Abhilfe schaffen. Im schienengebundenen Verkehr können Wasserstoff-Züge dort zum Einsatz kommen, wo keine Oberspannungsleitungen vorhanden sind. Im Flugverkehr wird aktuell noch fossiles Kerosin eingesetzt. Wasserstoff könnte hier in Form von Brennstoffzellen-Flugzeugen oder in Kombination mit CO₂ zur Herstellung von synthetischem Kerosin (Power-to-Liquid-Kerosin)

⁵⁸ [Herwartz/Stratmann 2022]

⁵⁹ [DIHK 2020]

ZUR DISKUSSION

CO₂-Emissionen einsparen.⁶⁰ Im Schiffsverkehr dominiert derzeit der Einsatz von Schweröl, hier kann zukünftig die Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie eine alternative, umweltfreundliche Antriebsmöglichkeit sein.⁶¹

Wasserstoff kann auch rückverstromt werden. Eine Möglichkeit dafür ist die Verbrennung von Wasserstoff und Sauerstoff in Brennstoffzellen, allerdings mit kleineren Wirkungsgraden und geringerer Aggregatsleistung als bei der Verbrennung von Erdgas. Existierende Brennstoffzellenheizgeräte für Erdgas können auf Wasserstoff umgerüstet werden. Es können aber auch Brennstoffzellen, die direkt mit Wasserstoffträgern betrieben werden, zum Einsatz kommen. Aktuell wird an dieser Technologie geforscht, um Kosten zu senken und Stack-Lebensdauern zu verlängern. Gasturbinen sind derzeit noch nicht auf hohe H₂-Konzentrationen ausgelegt. Allerdings bestehen keine prinzipiellen technischen Hürden, Gasturbinen und die benötigte Infrastruktur auf hohe Konzentrationen bis hin zur vollständigen Nutzung vorzubereiten. Wasserstoff kann durch die Möglichkeit der Rückverstromung einen Stromspeicher bilden, der in Zeiten von Dunkel- und Windflauten Elektrizität liefert.⁶²

Im Wärmesektor ließe sich Wasserstoff für die Erzeugung von Raum- und Prozesswärme einsetzen. Prozesswärme kann dort durch den Einsatz von grünem Wasserstoff dekarbonisiert werden, wo Wärmepumpen, Solar- oder Geothermie keine Hochtemperatur-Prozesswärme (über 200°C) erzeugen können, eine Elektrifizierung oder auch die ersatzweise Nutzung von Biomasse lokal nicht möglich ist.⁵⁹ Im Falle der Raumwärme könnten Kunden über reine Wasserstoff-Netze versorgt werden, wenn diese KWK-Brennstoffzellen-Heizungen nutzen. Der Einsatz von Wasserstoff in großen KWK-Anlagen kann dazu beitragen die Fernwärmeversorgung klimaneutral zu gestalten. Den Grundstein dafür legt unter anderem die geplante KWKG-Novelle, die vorschreiben soll, dass neue KWK-Anlagen ab 10 MW H₂-ready sein müssen.

Eine Beimischung von Wasserstoff in das bestehende Erdgasnetz ist zwar möglich, aber Restriktionen bezüglich der Höhe der Wasserstoff-Anteile und hohe Transformationskosten für die Anpassung kritischer Komponenten machen diese Option wenig praktikabel. Bis zu einer Zumischung von 10% wird das Betriebsverhalten von Bestandsanlagen wahrscheinlich nicht beeinflusst. Darüber hinaus sind jedoch Anpassungen an Gasturbinen, Kavernenspeichern, CNG-Fahrzeugtanks und Großbrennern nötig. Zudem verringert die Beimischung von Wasserstoff die Lebensdauer der Leitungen.⁶³

➤ **Zukünftige Entwicklung von Angebot und Nachfrage**

Laut Koalitionsvertrag geht die Bundesregierung für das Jahr 2030 von einer installierten Elektrolyseleistung von 10 GW in Deutschland aus. Das entspräche einer Wasserstoffmenge von ca. 28 TWh/a. Wirft man jedoch einen Blick auf die geplanten Projekte zum Ausbau der Elektrolyseleistung in Deutschland, werden im Jahr 2030 jedoch nur rd. 4,3 GW erreicht⁶⁴, das entspräche einer Erzeugungsmenge von ca. 12 TWh/a Wasserstoff (inklusive weiterer Kohlenwasserstoffe) und

⁶⁰ [Göbbels/Klein 2021]

⁶¹ [NOW 2022]

⁶² [N-Ergie 2021] S.106 ff

⁶³ ebenda S. 69

⁶⁴ [OTH 2022]

ZUR DISKUSSION

läge damit deutlich unter den Erwartungen der Bundesregierung.⁶⁵ Für das Jahr 2045 wird davon ausgegangen, dass das Stromsystem vollständig auf Erneuerbaren Energien basiert und eine inländische Wasserstoff-Produktion in Höhe von rd. 96 TWh möglich ist (ca. 34 GW Elektrolysekapazität).⁶⁶

Auf der anderen Seite rechnet man 2030 mit einem Wasserstoff-Bedarf von 45-100 TWh/a.⁶⁷ Das Maximum deckt sich in etwa mit den Aussagen der Bundesregierung, die 90-110 TWh H₂/a einplanen. Für 2045 wird ein bedeutend höherer H₂-Bedarf von 400-700 TWh/a erwartet. Wasserstoff würde dann vor allem für die Stromerzeugung eingesetzt, die teilweise in KWK-Anlagen erfolgt und für die Fernwärmeversorgung eine wichtige Rolle spielt.⁶⁸

Deutschland	2022	2030	2045
Erzeugung grüner H₂ [TWh]	0,2	12-28	96
Installierte Elektrolyseleistung [GW]	<1	4,3-10	34
H₂-Nachfrage [TWh]	57	45-110	400-700

Die Zahlen verdeutlichen, dass wir in Deutschland mit der einheimischen Produktion die Nachfrage nicht werden decken können. Deutschland wird damit auf Wasserstoff-Lieferungen aus dem Ausland angewiesen sein.

➤ Importe

Im Jahr 2030 rechnet man damit, 50-90% des benötigten Wasserstoffes und seiner Syntheseprodukte importieren zu müssen. Weit mehr als die Hälfte unserer Nachfrage kann nicht aus einheimischer Produktion gedeckt werden. Für 2045 wird eine noch höhere Import-Quote von 75-90% erwartet.⁶⁷ Grund für die Zunahme wird die begrenzte Flächenverfügbarkeit für neue EE-Anlagen in Deutschland sein.

Wasserstoff kann auf verschiedenen Wegen nach Deutschland gelangen. Der Transport von reinem Wasserstoff über Pipelines ist am wirtschaftlichsten über kurze Distanzen, insbesondere über umgerüstete Erdgas-Leitungen, die ein hohes H₂-Transportvolumen aufweisen. Der Neubau von reinen Wasserstoff-Leitungen ist dagegen sehr kostenintensiv, da eine komplett neue Infrastruktur aufgebaut werden muss. Über große Distanzen kann Wasserstoff in flüssiger Form per Schiff transportiert werden. Für die Verflüssigung sind jedoch hoher Druck und tiefe Temperaturen nötig, das macht den Prozess energieintensiv und stellt hohe Anforderungen an die Materialien. Je größer die Entfernung zum Exportland, desto länger muss der Wasserstoff gespeichert werden können, das kostet Energie und Geld.⁶⁷

⁶⁵ Eigene Berechnung unter der Annahme für 2030: 4.500 Vollaststunden, spezifischer Strombedarf 0,0048 MW/Nm³ H₂/h

⁶⁶ [Prognos et al. 2021b] S. 13

⁶⁷ [Staiß et al. 2022]

⁶⁸ [Prognos et al. 2021a]: S. 23

ZUR DISKUSSION

Wasserstoff kann auch in Form von Derivaten wie Methanol oder Ammoniak importiert werden. Methanol wird aus der Verbindung von Wasserstoff und Kohlenstoffdioxid gewonnen. Das CO₂ kann dabei entweder der Umgebungsluft entzogen oder aus Abgasen abgeschieden werden. Die Abscheidung von CO₂ ist jedoch mit hohen Kosten verbunden und das CO₂ würde bei der anschließenden Verbrennung von Methanol wieder freigesetzt werden. Große Hoffnung setzt man daher in Ammoniak als Speicher- und Transportmedium. Es besitzt eine hohe Wasserstoff-Speicherdichte und kann sowohl flüssig bei -33 °C wie auch gasförmig bei Umgebungstemperatur und einem Druck von etwa 10 bar transportiert werden. Die bereits weltweit erprobte Versorgungsstruktur für Ammoniak bietet zudem einen großen Vorteil. Das Ammoniak kann anschließend durch Cracking unter hohen Temperaturen in ein Gasgemisch zerlegt werden, das aus 75% Wasserstoff und 25 % Stickstoff besteht. Dieser Prozess ist jedoch aufgrund der benötigten Hochtemperatur-Prozesswärme (900 Grad Celsius) energieaufwendig und sehr kostspielig. Je nach Reinheitsbedarf des Wasserstoffes kann zudem eine zusätzliche Reinigung zur Entfernung von Ammoniak-Resten notwendig werden. Die hohen Rückgewinnungskosten lassen sich jedoch umgehen, wenn Ammoniak direkt als eigener Energieträger verwendet wird, z.B. in HTEL-Brennstoffzellen, Gasturbinen oder Verbrennungsmotoren in Schiffen. Ammoniak ist bereits heute ein weitverbreiteter Grundstoff, der in der Chemieindustrie eingesetzt wird (z.B. für Düngemittel, Kunststoffe). Bisher wird er dezentral in kleineren Anlagen erzeugt. Bei einer energetischen Nutzung von Ammoniak im großen Maßstab müssten daher zusätzliche Erzeugungsanlagen errichtet werden.⁶⁹

Lange Importwege und aufwendige Umwandlungsketten der verschiedenen Energieträger mit einhergehenden Energieverlusten werden letztendlich nur Anwendung finden, wenn sie kostentechnisch mit anderen Dekarbonisierungsstrategien (wie z.B. der Elektrifizierung) konkurrieren können.

➤ Fazit

Die Implementierung eines einheimischen Wasserstoffmarktes mit H₂-Importmöglichkeiten aus dem Ausland wird kein Selbstläufer sein. Zunächst stehen den für eine durchgängig klimaneutrale Wirtschaft (allein in Deutschland) benötigten Energiemengen nur überaus unzureichende Mengen an klimaneutralem Wasserstoff gegenüber. Vor diesem Hintergrund ergibt sich logischerweise ein ernsthaftes Verteilungsproblem. Denn die sehr begrenzten Mengen sollten dort eingesetzt werden, wo es keine wirklich überzeugenden Alternativen gibt. Hieraus wird vielfach politisch abgeleitet, die in den nächsten Jahren erschließbaren Mengen exklusiv der Industrie zur Verfügung zu stellen und dies in einem eigenen Regulierungsregime zu organisieren.

Eine solche Exklusivität ließe sich politisch durchaus umsetzen. Es entstünden aber drei weitere Probleme: zum einen ignoriert ein solcher Exklusivitätsansatz die Tatsache, dass der industrielle Prozesswärmebedarf in einer Größenordnung von rd. 440 TWh (davon gut 200 TWh aus Gas) nicht ohne Nutzung auch des Gasverteilnetzes gedeckt werden kann. Hieraus folgt, dass die exklusive Zuordnung von Wasserstoff an wenige große Industrieunternehmen außerhalb der allgemeinen Versorgung volkswirtschaftlich nicht vorteilhaft ist. Zum zweiten erzeugt eine Exklusivitätsstrategie Abnahmerisiken für Lieferanten und Infrastrukturbetreiber mit

⁶⁹ [N-Ergie 2021] S. 80/81

ZUR DISKUSSION

der Folge von höheren Risikoaufschlägen für die Finanzierung. Diese könnten aber, drittens, nur mit entsprechender staatlicher Flankierung (nicht über Netzentgelte, die ja nur in der allgemeinen Versorgung angemessen sind) gemindert werden, was beihilferechtlich zumindest problematisch sein kann.

Überdies geht die oft vertretene These, Wasserstoff sei zu teuer und zu wertvoll für Energiewirtschaft und Wärmemarkt dort fehl, wo Alternativen zwar möglich, aber ihrerseits deutlich teurer wären. Das nicht nur wegen der Kosten des kompletten Umstiegs von Haushalten und GHD auf Wärmepumpen und klimaneutrale Fernwärme. Vielmehr würden die verbleibenden Netzkosten auf eine deutlich geringere Menge von Gas oder Wasserstoff umgelegt, mit dem Ergebnis spezifisch steigender Netzentgelte – in diesem Fall für die industrielle Prozesswärme.

Schon allein aus diesen Erwägungen heraus kann die Nutzung von klimaneutralem Wasserstoff für die Deckung von industriellen Prozesswärmebedarfen sinnvoll sein. Die Nutzung der bestehenden Gasnetzinfrasturktur zum Transport von Wasserstoff ist aber immer nur dann und auf Dauer vorteilhaft, wenn die Vollkosten der alternativen Energieträger bzw. Technologien – also biogene oder synthetische Brennstoffe bzw. der Einsatz von Strom – höher ausfallen.

Die Wahl zwischen den Dekarbonisierungspfaden Elektrifizierung, reiner Wasserstoff oder Wasserstoffderivaten hängt von der Verfügbarkeit erneuerbaren Stroms und der Entwicklung der Herstellungskosten, der Transport- und Umwandlungsraten von Wasserstoff und seinen Syntheseprodukten ab. Alle drei Pfade müssen hinsichtlich ihrer Vollkosten abgewogen werden.

Die Elektrifizierung von Industrieprozessen bietet den Vorteil, die gängige Stromversorgung und -infrastruktur nutzen zu können. Die Ausbaupotenziale von Erneuerbaren Energien sind in Deutschland aufgrund der begrenzten Flächenverfügbarkeit jedoch eingeschränkt. Zudem ist die Einspeisung von grünem Strom in das Stromnetz aufgrund der Wetterabhängigkeit sehr volatil. Strom lässt sich auch nicht in dem Maße speichern, wie es bei Wasserstoff oder Ammoniak möglich ist.

Vor Ort erzeugter grüner Wasserstoff kann über umgewidmete Erdgasleitungen oder neue H₂-Leitungen an die Verbraucher verteilt und direkt eingesetzt werden. Es bedarf keines Umwandlungsprozesses wie bei Ammoniak. Die heimische H₂-Produktion ist jedoch begrenzt, Deutschland ist auf Importe angewiesen. Der Import von reinem Wasserstoff kann jedoch sehr kostenintensiv sein. Erdgas-Pipelines können zwar H₂-ready gemacht und neue H₂-Leitungen können gebaut werden, die Masse an grünem Wasserstoff wird aber wahrscheinlich auf dem Weltmarkt über große Distanzen (Südamerika, Afrika, Australien etc.) per Schiff importiert werden müssen.

Der Transport von Ammoniak ist aufgrund der höheren volumetrischen Dichte eine relativ kleine Kostenkomponente im Vergleich. Dafür ist das Cracken von Ammoniak in Wasserstoff und Stickstoff energieaufwändig und teuer. Ammoniak kann andererseits auch als eigener Energieträger verwendet werden, sodass der Umwandlungsprozess und die hohen Energiekosten entfallen. In der Regel importieren nur die Länder reinen Wasserstoff, die nicht über eine wettbewerbsfähige einheimische H₂-Produktion verfügen. Aufgrund der einfacheren und kostengünstigeren Transportfähigkeit ist ein verstärkter Handel von H₂-Synthesgasen wie Ammoniak auf dem internationalen Markt daher denkbar.⁷⁰

⁷⁰ [Hydrogen Council 2022] S.14

ZUR DISKUSSION

Literaturverzeichnis

- [AGEB 2021a] AG Energiebilanzen e.V.: Auswertungstabellen zur Energiebilanz Deutschland Daten für die Jahre von 1990 bis 2020; 09.2021; [Auswertungstabellen » AG Energiebilanzen e. V. \(ag-energiebilanzen.de\)](#) (zuletzt aufgerufen am 05.08.2022)
- [AGEB 2021b] AG Energiebilanzen e.V.: Anwendungsbilanzen zur Energiebilanz Deutschland - Endenergieverbrauch nach Energieträgern und Anwendungszwecken; 29.09.2021; [Anwendungsbilanzen » AG Energiebilanzen e. V. \(ag-energiebilanzen.de\)](#) (zuletzt aufgerufen am 05.08.2022)
- [AGFW et al 2020] Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e. V (AGFW), Bundesverband Erneuerbare Energie e.V. (BEE), 8KU GmbH: Strategien zur Treibhausgasminde rung und zum systemrelevanten Ausbau der leitungsgebundenen Wärme und Kälte in Deutschland; 07.2020; [Standard \(8ku.de\)](#) (zuletzt aufgerufen am 16.11.2022)
- [AGFW 2015] Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e. V (AGFW): 70/70-Strategie – Konzept und Ergebnisse; 05.2015; [Studie 70_70_Endversion_01.pdf \(agfw.de\)](#) (zuletzt aufgerufen am 16.11.2022)
- [AGFW 2018] Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e. V (AGFW): 40/40-Strategie – Unser Konzept für die Wärmewende; 06.2018; [180705_Studie_40_40_final_web.pdf \(agfw.de\)](#) (zuletzt aufgerufen am 16.11.2022)
- [AGFW 2022] Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e. V (AGFW): BEW-Richtlinie veröffentlicht; 24.08.2022; [AGFW](#) (zuletzt aufgerufen am 16.11.2022)
- [Agora Energiewende et al. 2022] Agora Energiewende, Prognos, Consentec: Klimaneutrales Stromsystem 2035, S. 28.; 06.2022; https://static.agora-energieswende.de/fileadmin/Projekte/2021/2021_11_DE_KNStrom2035/A-EW_264_KNStrom2035_WEB.pdf (zuletzt aufgerufen am 16.11.2022)
- [ASUE 2021] Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V.: Hydex Verlauf 2021; 31.12.2021; [ASUE_Hy dex-Auswertung_Kosten-Wasserstoff_2021.jpg \(1160x817\)](#) (zuletzt aufgerufen am 17.11.2022)
- [ASUE 2022] Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V.: Hydex Verlauf 2022; 07.10.2022;

ZUR DISKUSSION

- [ASUE Hydex-Auswertung Kosten-Wasserstoff_09-2022.jpg \(1160x817\)](#) (zuletzt aufgerufen am 17.11.2022)
- [BCG 2021] Boston Consulting Group: Klimapfade 2.0 – Ein Wirtschaftsprogramm für Klima und Zukunft; Gutachten im Auftrag des Bundesverbands der Deutschen Industrie e. V. (BDI); 10.2021; [Klimapfade 2.0 – Ein Wirtschaftsprogramm für Klima und Zukunft \(bdi.eu\)](#) (zuletzt aufgerufen am 16.11.2022)
- [BCG/Prognos 2018] BCG, Prognos: Klimapfade für Deutschland; 18.01.2018; [20180118_bdi_studie_klimapfade_fuer_deutschland_01.pdf \(prognos.com\)](#) (zuletzt aufgerufen am 16.11.2022)
- [BDEW 2022] Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e. V.: Netowärmeerzeugung nach Energieträgern in Deutschland; 31.05.2022; [Nettowärmeerzeugung* nach Energieträgern in Deutschland \(bdew.de\)](#) (zuletzt aufgerufen am 16.11.2022)
- [BDH 2023a] Bundesverband der Deutschen Heizungsindustrie e.V.: Marktentwicklung Wärmemarkt 2022 – Januar bis Dezember; 02.2023; https://www.bdh-industrie.de/fileadmin/user_upload/Pressemeldungen/Marktentwicklung_Waermemarkt_Deutschland_2022.pdf (zuletzt aufgerufen am 14.02.2023)
- [BDH 2023b] Bundesverband der Deutschen Heizungsindustrie e.V.: Marktentwicklung Wärmerezeuger Deutschland 2013–2022; 02.2023; https://www.bdh-industrie.de/fileadmin/user_upload/Pressemeldungen/Marktstruktur_zehn_Jahre_2022_DE_022023b.pdf (zuletzt aufgerufen am 14.02.2023)
- [BGH 2020] Bundesgerichtshof: Urteil bezüglich Mieterhöhung nach baulichen Veränderungen, VIII ZR 81/19; 17.06.2020; [Urteil des VIII. Zivilsenats vom 17.6.2020 - VIII ZR 81/19 - \(bundesgerichtshof.de\)](#) (zuletzt aufgerufen am 17.11.2022)
- [BIB 2022a] Bundesinstitut für Bevölkerungsforschung: Bevölkerungsstand in Deutschland (1950 – 2050); 2022; <https://www.bib.bund.de/Permalink.html?id=1217762> (zuletzt aufgerufen am 14.11.2022)
- [BIB 2022b] Bundesinstitut für Bevölkerungsforschung: Zahl der Privathaushalte und durchschnittliche Haushaltsgröße in Deutschland (1991-2035); 2022; <https://www.bib.bund.de/Permalink.html?id=1217608> (zuletzt aufgerufen am 15.11.2022)
- [BMWI 2017] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie: Ergebnispapier – Strom 2030 - Langfristige Trends – Aufgaben für die kommenden Jahre; 05.2017; [Strom 2030 \(bmwk.de\)](#) (zuletzt aufgerufen am 16.11.2022)

ZUR DISKUSSION

- [BMWI 2019] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie: Monitoringbericht des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie nach § 63 i.V.m. § 51 EnWG zur Versorgungssicherheit im Bereich der leitungsgebundenen Versorgung mit Elektrizität; 06.2019; [Microsoft Word - 190701 VS Bericht BMWi nach EnWG final.docx \(bmwk.de\)](#) (zuletzt aufgerufen am 16.11.2022)
- [BMWi 2020] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie: Die Nationale Wasserstoffstrategie; 06.2020; [Nationales Reformprogramm 2020 - Die Nationale Wasserstoffstrategie \(bmbf.de\)](#) (zuletzt aufgerufen am 17.11.2022)
- [BMWK 2022a] Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz: Energiedaten: Gesamtausgabe; 20.01.2022; https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Binaer/Energiedaten/energiedaten-gesamt-xls-2022.xlsx?__blob=publicationFile&v=8 (zuletzt aufgerufen am 17.11.2022)
- [BMWK 2022b] Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz: Booster für grüne Fernwärme: Bundesförderung für effiziente Wärmenetze (BEW) startet, Pressemitteilung; 15.09.2022; [BMWK - Booster für grüne Fernwärme: Bundesförderung für effiziente Wärmenetze \(BEW\) startet](#) (zuletzt aufgerufen am 16.11.2022)
- [BMWK/BMWSB 2022] Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz und Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen: Sofortprogramm gemäß § 8 Abs. 1 KSG für den Sektor Gebäude, S. 24; 13.07.2022; https://www.bmwsb.bund.de/SharedDocs/downloads/Webs/BMWSB/DE/veroeffentlichungen/bauen/sofortprogramm-sektor-gebaeude.pdf;jsessionid=DBD0506B9B254C84CE18743ADA586D9F.1_cid332?__blob=publicationFile&v=1 (zuletzt aufgerufen am 17.11.2022)
- [BRH 2022]: Bundesrechnungshof: Bericht nach § 99 BHO zur Steuerung des Klimaschutzes in Deutschland; 24.03.2022; https://www.bundesrechnungshof.de/SharedDocs/Downloads/DE/Berichte/2022/steuerung-klimaschutz-deutschland-volltext.pdf?__blob=publicationFile&v=1 (zuletzt aufgerufen am 17.11.2022)
- [Bundestag 2020] Deutscher Bundestag, Wissenschaftlicher Dienst: Kosten der Produktion von grünem Wasserstoff; Dokumentation WD 5 - 3000 - 029/20; 03.04.2020; [WD-5-029-20-pdf-data.pdf \(bundestag.de\)](#) (zuletzt aufgerufen am 17.11.2022)
- [Bundestag 2021] Deutscher Bundestag, Kleine Anfrage der Abgeordneten Dr. Julia Verlinden, Christian Kühn (Tübingen), Britta Haßelmann, Oliver Krischer, Stefan Schmidt, Markus Tressel, Daniela Wagner und der Fraktion BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN: Wirksamkeit der Fördermittel im Gebäudebereich für den Klimaschutz; Drucksache 19/25728;

ZUR DISKUSSION

- 07.01.2021; [Drucksache 19/25728 \(bundestag.de\)](https://www.bundestag.de/Drucksache-19-25728) (zuletzt aufgerufen am 16.11.2022)
- [DENA 2020] Deutsche Energie-Agentur GmbH: dena-Factsheet Wasserstoff; 09.2020; [dena-FACTSHEET Wasserstoff PtG.pdf](https://www.dena.de/medien/pressenotizen/2020/09/09-2020-dena-factsheet-wasserstoff-ptg.pdf) (zuletzt aufgerufen am 17.11.2022)
- [Destatis 2004]: Statistisches Bundesamt: Fachserie 5. Reihe 3, Bautätigkeit und Wohnungen. Bestand an Wohnungen zum 31.12.2003; 24.11.2004; https://www.statistischebibliothek.de/mir/receive/DE-Heft_mods_00005266; (zuletzt aufgerufen am 15.11.2022)
- [Destatis 2012] Statistisches Bundesamt: Bauen und Wohnen, Mikrozensus - Zusatzerhebung 2010 - Bestand und Struktur der Wohneinheiten, Wohnsituation der Haushalte; 15.03.2012; [Mikrozensus - Zusatzerhebung 2010, Bestand und Struktur der Wohneinheiten, Wohnsituation der Haushalte - Fachserie 5 Heft 1 - 2010 \(statistischebibliothek.de\)](https://www.statistischebibliothek.de/mir/receive/DE-Heft_mods_00005266) (zuletzt aufgerufen am 15.11.2022)
- [Destatis 2019] Statistisches Bundesamt: Wohnen in Deutschland - Zusatzprogramm des Mikrozensus 2018; 01.10.2019; https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Wohnen/Publikationen/Downloads-Wohnen/wohnen-in-deutschland-5122125189005.xlsx;jsessionid=5DE193BFE8D9BE4F9AC6CA8BD0F27CB7.live731?_blob=publicationFile (zuletzt aufgerufen am 15.11.2022)
- [Destatis 2020] Statistisches Bundesamt: Fachserie 5. Reihe 3, Bautätigkeit und Wohnungen. Bestand an Wohnungen zum 31.12.2019; 29.07.2020; https://www.statistischebibliothek.de/mir/receive/DE-Heft_mods_00132462 (zuletzt aufgerufen am 15.11.2022)
- [Destatis 2021a] Statistisches Bundesamt: Ausblick auf die Bevölkerungsentwicklung in Deutschland und den Bundesländern nach dem Corona-Jahr 2020; 30.09.2021; https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Bevoelkerung/Bevoelkerungsvorausberechnung/Publikationen/Downloads-Vorausberechnung/bevoelkerung-deutschland-2035-5124202219004.pdf?_blob=publicationFile (zuletzt aufgerufen am 14.11.2022)
- [Destatis 2021b] Statistisches Bundesamt: Wohnungsbestand in Deutschland; 09.07.2021; <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Wohnen/Tabellen/liste-wohnungsbestand.html> (zuletzt aufgerufen am 14.11.2022)
- [Destatis 2021c] Statistisches Bundesamt: Fachserie 5. Reihe 3, Bautätigkeit und Wohnungen. Bestand an Wohnungen zum 31.12.2020; 22.07.2021; <https://view.officeapps.live.com/op/view.aspx?src=https%3A%2F%2Fwww.destatis.de%2FDE%2FThemen%2FGesellschaft-Umwelt%2FWohnen%2FPublikationen%2FDownloads-Wohnen%2Fbestand->

ZUR DISKUSSION

- [wohnungen-2050300207005.xlsx%3F_blob%3Dpublication-File&wdOrigin=BROWSELINK](#) (zuletzt aufgerufen am 15.11.2022)
- [Destatis 2022] Statistisches Bundesamt: Alle politisch selbständigen Gemeinden mit ausgewählten Merkmalen am 31.12.2020; 31.03.2022; <https://www.destatis.de/DE/Themen/Laender-Regionen/Regionales/Gemeindeverzeichnis/Administrativ/Archiv/GVAuszugQ/AuszugGV1QAktuell.html> (zuletzt aufgerufen am 15.11.2022)
- [DIHK 2020] Deutscher Industrie- und Handelskammertag e.V.: Wasserstoff - DIHK-Faktenpapier; 06.2020; [2020 DIHK Broschüre Wasserstoff A4 final.indd](#) (zuletzt aufgerufen am 17.11.2022)
- [DVGW 2022] DVGW Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V.: Interaktive Power to Gas Karte Deutschland; 17.11.2022; [DVGW e.V.: Interaktive Power to Gas Karte](#) (zuletzt aufgerufen am 17.11.2022)
- [Eurostat 2022a] Eurostat Datenbank: Verteilung der Bevölkerung nach Wohnbesitzverhältnissen, Haushaltstyp und Einkommensgruppe; 13.05.2022; https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/ILC_LVHO02_custom_127715/bookmark/table?lang=de&bookmarkId=617eba84-b54e-484a-a4b5-a63ef1cc12b9 (zuletzt aufgerufen am 20.09.2022)
- [Eurostat 2022b] Eurostat Datenbank: Quote der Überbelastung durch Wohnkosten nach Alter, Geschlecht und Armutsgefährdung; 13.05.2022; https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/ILC_LVHO07A_custom_70815/bookmark/table?lang=de&bookmarkId=1214505d-bb9b-4968-b65c-14ddcaaa01ac (zuletzt aufgerufen am 20.09.2022)
- [EWI 202] Energiewirtschaftliches Institut an der Universität zu Köln: Global Hydrogen Cost Tool; 09.2021; https://www.ewi.uni-koeln.de/cms/wp-content/uploads/2021/09/Global_H2_Cost_Tool_v3.xlsx (zuletzt aufgerufen am 17.11.2022)
- [FIW 2015] Forschungsinstitut für Wärmeschutz e.V.: Wirtschaftlichkeit von wärmedämmenden Maßnahmen; 16.04.2015; [Wirtschaftlichkeit von waermedaemmenden-Massnahmen.pdf \(nachhaltiges-bauen.jetzt\)](#) (zuletzt aufgerufen am 16.11.2022)
- [Fraunhofer IEE 2019] Fraunhofer-Institut für Energiewirtschaft und Energiesystemtechnik: Entwicklung der Gebäudewärme und Rückkopplung mit dem Energiesystem in -95%-Klimazielszenarien; 02.2019; [Entwicklung der Gebäudewärme und Rückkopplung mit dem Energiesystem in -95 % THG Klimazielszenarien \(fraunhofer.de\)](#); (zuletzt aufgerufen am 16.11.2022)

ZUR DISKUSSION

- [Fraunhofer ISE 2022] Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme: Öffentliche Nettostromerzeugung in Deutschland im Jahr 2021; 14.02.2022; [Microsoft PowerPoint - Stromerzeugung 2021_e.pptx \(energy-charts.info\)](#) (zuletzt aufgerufen am 17.11.2022)
- [Frisch et al. 2010] Sabine Frisch, Dr. Martin Pehnt, Philipp Otter (ifeu-Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg), Michael Nast (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt Institut für Technische Thermodynamik Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR)): Prozesswärme im Marktanreizprogramm - Zwischenbericht zu Perspektivische Weiterentwicklung des Marktanreizprogramms FKZ 03MAP123; 07.2010; [Beispielbericht \(dlr.de\)](#) (zuletzt aufgerufen am 16.11.2022)
- [Göbbels/Klein 2021]: Gianluca Göbbels, Hannah Klein (Technikjournal Autorenteam): Wasserstoff als Alternative für den Luftverkehr; Artikel im Technikjournal; 28.07.2021; [Wasserstoff als Alternative für den Luftverkehr - Technikjournal](#) (zuletzt aufgerufen am 17.11.2022)
- [Hamburg Institut/Prognos 2020] Hamburg Institut/Prognos: Perspektive der Fernwärme - Maßnahmenprogramm 2030 - Aus- und Umbau städtischer Fernwärme als Beitrag einer sozial-ökologischen Wärmepolitik, im Auftrag des Energieeffizienzverbands für Wärme, Kälte und KWK e. V (AGFW); 11.2020; [Perspektive der Fernwärme \(agfw.de\)](#) (zuletzt aufgerufen am 16.11.2022)
- [Herwartz/Stratmann 2022] Christoph Herwartz und Klaus Stratmann: Wasserstoff über das normale Stromnetz – EU will Wasserstoffhochlauf beschleunigen; Artikel im Handelsblatt; 14.09.2022; [Wasserstoff: EU will Wasserstoffhochlauf beschleunigen \(handelsblatt.com\)](#) (zuletzt aufgerufen am 17.11.2022)
- [Hydex 2022] Hydex (Wasserstoff-Preis-Index nach E-Bridge Consulting GmbH): Terminology; 17.11.2022; [E-Bridge: Competence in Energy](#); (zuletzt aufgerufen am 17.11.2022)
- [Hydrogen Council 2022] Hydrogen Council in Zusammenarbeit mit McKinsey & Company: Global Hydrogen Flows: Hydrogen trade as a key enabler for efficient decarbonization; 10.2022; [Global-Hydrogen-Flows.pdf \(hydrogencouncil.com\)](#) (zuletzt aufgerufen am 17.11.2022)
- [ifeu et al. 2018] ifeu, Fraunhofer IEE und Consentec: Wert der Effizienz im Gebäudesektor in Zeiten der Sektorenkopplung. Studie im Auftrag von Agora Energiewende; 11.2018; [Wert der Effizienz im Gebäudesektor in Zeiten der Sektorenkopplung \(agora-energiewende.de\)](#) (zuletzt aufgerufen am 16.11.2022)
- [KSG 2021] www.gesetze-im-internet.de: Bundes-Klimaschutzgesetz; 28.08.2021; <http://www.gesetze-im-internet.de/ksg/KSG.pdf> (zuletzt aufgerufen am 14.11.2022)

ZUR DISKUSSION

- [LBST/SPC 2022] Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH und Schultz projekt consult: POTENZIALSTUDIE GRÜNE GASE Analyse und Bewertung der Potenziale Grüner Gase in der Innovationsregion Mitteldeutschland; Im Auftrag der Metropolregion Mitteldeutschland; 09.02.2022; [Potenzialstudie Grüne Gase IRMD \(innovationsregion-mitteldeutschland.com\)](https://www.innovationsregion-mitteldeutschland.com) (zuletzt aufgerufen am 17.11.2022)
- [MVV 2018] MVV Energie AG: Take-Off Wärmewende - Impulse für das neue Wärmemarktdesign; 12.2018; [Take-Off Wärmewende - Impulse für das neue Wärmemarktdesign \(mvv.de\)](https://www.mvv.de) (zuletzt aufgerufen am 16.11.2022)
- [N-Ergie 2021] N-Ergie Campus Nürnberg: Handbook Screening Wasserstoff-Technik, im Auftrag der N-Ergie AG; 04.2021; https://www.n-ergie.de/public/remotemedien/media/n_ergie/internet/die_n_ergie/unternehmen_1/publikationen/FirstSpi-rit_1632302712497H2_Handbook_-_final_-_19-09-2021.pdf (zuletzt aufgerufen am 17.11.2022)
- [NOW 2022] NOW GmbH: Wasser - Brennstoffzelle mit Elektromotor – hohe Reichweite und keine Schadstoffemissionen; 17.11.2022; [Wasser - NOW GmbH \(now-gmbh.de\)](https://www.now-gmbh.de) (zuletzt aufgerufen am 17.11.2022)
- [Odenweller et al. 2022] Adrian Odenweller, Jan George, Viktor Müller, Philipp Verpoort, Lukas Gast, Benjamin Pfluger, Falko Ueckerdt: Wasserstoff und die Energiekrise: fünf Knackpunkte. Kopernikus-Projekt Ariadne; 09.2022; [Ariadne-Analyse Wasserstoff-Energiekrise September2022.pdf \(ariadneprojekt.de\)](https://www.ariadneprojekt.de) (zuletzt aufgerufen am 17.11.2022)
- [Oschatz 2016] Prof. Dr.-Ing. Bert Oschatz (ITG Institut für Technische Gebäudeausrüstung Dresden Forschung und Anwendung GmbH): Präsentation zur Studie: Dezentrale vs. zentrale Wärmeversorgung im deutschen Wärmemarkt - Vergleichende Studie aus energetischer und ökonomischer Sicht; 26.10.2016; [PowerPoint-Präsentation \(stiftung-umweltenergierecht.de\)](https://www.stiftung-umweltenergierecht.de) (zuletzt aufgerufen am 15.11.2022)
- [Oschatz et al. 2016] Prof. Dr.-Ing. Bert Oschatz, Dr.-Ing. Bernadetta Winiewska, Dipl.-Ing. Bettina Mailach (ITG Institut für Technische Gebäudeausrüstung Dresden Forschung und Anwendung GmbH) und Prof. Dr. Andreas Pfnür (Forschungscenter Betriebliche Immobilienwirtschaft FBI an der Technischen Universität Darmstadt): Dezentrale vs. zentrale Wärmeversorgung im deutschen Wärmemarkt - Vergleichende Studie aus energetischer und ökonomischer Sicht; 04.08.2016; [Studie "Dezentrale vs. zentrale Wärmeversorgung im deutschen Wärmemarkt" \(freie-waerme.de\)](https://www.freie-waerme.de) (zuletzt aufgerufen am 15.11.2022)

ZUR DISKUSSION

- [OTH 2022] Forschungsstelle Energienetze und Energiespeicher der Ostbayerischen Technischen Hochschule Regensburg: Wasserstoff-Atlas; 17.11.2022; [Wasserstoffatlas](#); (zuletzt aufgerufen am 17.11.2022)
- [Prognos et al. 2021 a] Prognos, Öko-Institut, Wuppertal-Institut: Klimaneutrales Deutschland 2045. Wie Deutschland seine Klimaziele schon vor 2050 erreichen kann, Langfassung im Auftrag von Stiftung Klimaneutralität, Agora Energiewende und Agora Verkehrswende; 06.2021; [Klimaneutrales Deutschland 2045 \(agora-energiewende.de\)](#) (zuletzt aufgerufen am 16.11.2022)
- [Prognos et al. 2021 b] Prognos, Öko-Institut, Wuppertal-Institut: Klimaneutrales Deutschland 2045. Wie Deutschland seine Klimaziele schon vor 2050 erreichen kann, im Auftrag von Stiftung Klimaneutralität, Agora Energiewende und Agora Verkehrswende, Übersicht der Ergebnisse; Präsentation; 06.05.2021; [2021-05-06 Praesentation_KND45.pdf \(agora-energiewende.de\)](#) (zuletzt aufgerufen am 17.11.2022)
- [Seitz/Estelmann 2017] Dr. Antje Seitz, Stefan Estelmann (DLR - Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt): Erneuerbare Energien für Prozesswärme aus Sicht der Wissenschaft, Fachgespräch „Erneuerbare Energien und Abwärme in der Prozesswärme“; 24.10.2017; [Erneuerbare Energien für Prozesswärme aus Sicht der Wissenschaft - PDF Kostenfreier Download \(docplayer.org\)](#) (zuletzt aufgerufen am 16.11.2022)
- [Staiß et al. 2022] Frithjof Staiß (AG-Leitung), Jörg Adolf, Florian Ausfelder, Christoph Erdmann, Manfred Fischedic, Christopher Hebling, Thomas Jordan, Gernot Klepper, Thorsten Müller, Regina Palkovits, Witold-Roger Poganietz, Wolf-Peter Schill, Maïke Schmidt, Cyril Stephanos, Philipp Stöcker, Ulrich Wagner, Kirsten Westphal, Sven Wurbs: Optionen für den Import grünen Wasserstoffs nach Deutschland bis zum Jahr 2030: Transportwege – Länderbewertungen – Realisierungserfordernisse, Schriftenreihe Energiesysteme der Zukunft; Herausgeber: acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e. V.; 01.08.2022; [Optionen für den Import grünen Wasserstoffs nach Deutschland bis zum Jahr 2030. Transportwege – Länderbewertungen – Realisierungserfordernisse - acatech](#) (zuletzt aufgerufen am 17.11.2022)
- [Statista 2021] Statista: Treibhausgasemissionen in Deutschland nach Sektoren des Klimaschutzgesetzes in den Jahren 1990 bis 2020 und Prognose für 2030 (in Millionen Tonnen CO₂-Äquivalent); 05.2021; <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1241046/umfrage/treibhausgasemissionen-in-deutschland-nach-sektor/> (zuletzt aufgerufen am 14.11.2022)
- [Statistikportal 2022] Statistische Ämter des Bundes und der Länder - Gemeinsames Statistikportal: Bruttoinlandsprodukt, Bruttowertschöpfung in

ZUR DISKUSSION

den kreisfreien Städten und Landkreisen der Bundesrepublik Deutschland; 1992 und 1994 bis 2020, Berechnungsstand November 2021; 28.07.2022; https://www.statistikportal.de/sites/default/files/2022-07/vgrdl_r2b1_bs2021_1.xlsx (zuletzt aufgerufen am 15.11.2022)

[UBA 2022a] Umweltbundesamt: Nationale Trendtabellen; 15.03.2022; https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/361/dokumente/2022_03_15_trendtabellen_thg_nach_sektoren_v1.0.xlsx (zuletzt aufgerufen am 14.11.2022)

[UBA 2022b] Umweltbundesamt: Stromverbrauch; 25.03.2022; [Stromverbrauch | Umweltbundesamt](#) (zuletzt aufgerufen am 17.11.2022)