

Die Abhängigkeit von den Autokratien – Brauchen wir russisches Gas?

Seminararbeit von

Marius Hegele

Technik und Fortschritt im Anthropozän, Zentrum für Angewandte Kulturwissenschaft

Der russische Angriffskrieg und die Klimakrise motivieren die Reduktion des deutschen Gasverbrauchs und der Importe aus Russland. Ist es möglich das russische Gas durch anderes Gas zu ersetzen? Macht man sich damit nur abhängig von anderen Autokratien? Gibt es Alternativen im Verbrauch? Die Abhängigkeit muss aus dem Sichtpunkt unterschiedlicher Anwendungsbereiche – Wärme, Strom und Industrie – betrachtet werden.

Die EU-Kommision schlägt vor Erdgas und Atomkraft in der EU-Taxonomie zur nachhaltigen Entwicklung als nachhaltig einzustufen. Mit welchen Argumenten wird diese Entscheidung begründet? Was ist dem entgegenzuhalten?

1 Brauchen wir (russisches) Erdgas?

Deutschland bezog 2020 mit 500 TWh Erdgas 55% des Gesamtbedarfs aus Russland [7]. Russland exportiert umgekehrt mit etwa 25% das meiste Erdgas nach Deutschland [19]. Diese Zahlen verdeutlicht, dass Deutschland stark abhängig von russischem Gas ist. Russland mag in der Lage sein andere Abnehmerländer für das Gas zu finden. Ein schnelles vollständiges Embargo würde die russischen Einnahmen aus Erdgas dennoch stark reduzieren. Solange Deutschland diese Handelsbeziehung fortführt finanziert es indirekt den russischen Angriffskrieg auf die Ukraine mit.

Die Lage der Energieversorgung im Frühjahr 2022 wurde dadurch verschärft, dass Stand 05.03. die deutschen Erdgasspeicher nur zu 27% gefüllt waren, wohingegen sie im selben Zeitraum normalerweise bis zu 50-80% gefüllt sind [26]. Am 30.03. rief das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) die Frühwarnstufe des Notfallplans Gas aus [3]. Das bedeutet, dass zwar die Versorgungssicherheit weiterhin gewährleistet war, aber Vorsorgemaßnahmen getroffen wurden und jeder Verbraucher angehalten ist seinen Verbrauch so gut wie möglich zu reduzieren.

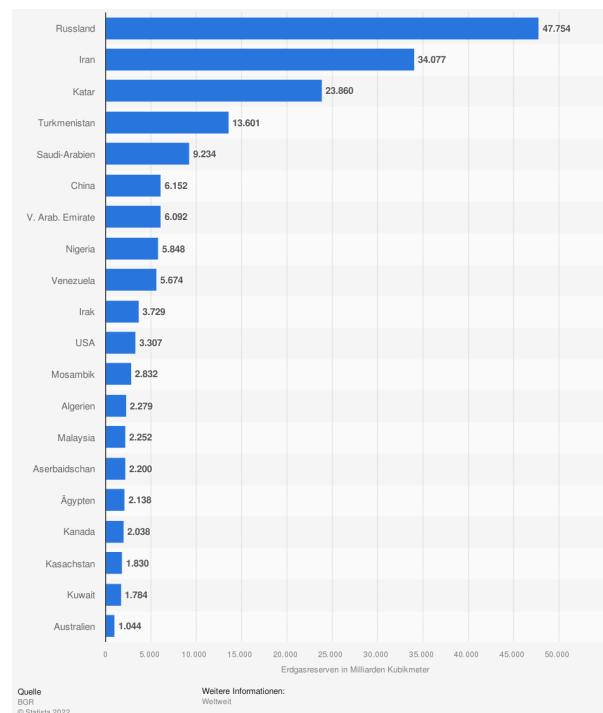


Abbildung 1: Länder mit den größten konventionellen Erdgasreserven 2020 (in Milliarden Kubikmeter) [32]

Russland drohte mit einem Gaslieferstopp wenn Gaszahlungen nicht in Rubel beglichen werden [3]. Am 15.06. schickte Gazprom nur noch 0.7 statt den üblichen 1.7 TWh/d (= 59%) durch die Nord Stream Gasleitung [24]. Der dafür genannte Grund sind durch Lieferschwierigkeiten verzögerte Reparaturarbeiten, doch diese Begründung wird vielerseits angezweifelt. Aufgrund der hohen Abhängigkeit eignet sich die Einstellung oder Reduktion der Gaslieferungen für Russland als sehr gutes Druckmittel gegenüber dem die Ukraine unterstützenden Deutschland.

Deutschland muss alternative Quellen für russisches Erdgas verwenden oder den Erdgasverbrauch reduzieren. In den Folgenden Abschnitten wird ergründet ob und wie dies möglich ist.

1.1 Direkter Ersatz durch Importe

Russland ist 2020 mit über 500.000 TWh weltweit das Land mit den größten konventionellen Erdgasreserven. Abbildung 1 zeigt, dass auch für die Politik der nächsterdgasreichsten Ländern eine Tendenz zur Autokratie beobachtet werden kann.

Der Theorie des “Fluches der Rohstoffe” oder auch “Paradox of Plenty” sieht eben genau im Rohstoffreichtum dieser Länder dafür eine mögliche Erklärung [22]. Rohstoffreichtum kann ein Chance aber auch eine Herausforderung in der Entwicklung eines Landes sein. Werden die Rohstoffe gut genutzt, können sie für verbreiteten Wohlstand sorgen. Schlecht genutzt sorgen sie für Instability, soziale Konflikte und Umweltschäden. Rohstoffe

können strategischer Natur wie Energieträger, aber auch industrieller (z.B. Kupfer) oder gewinnträchtiger (z.B. Diamanten) Natur sein.

Eine erklärende Theorie ist dass Regierungen wahrscheinlicher zu demokratischen Elementen übergehen, wenn ihr fiskales Budget abhängig von Steuern ist [21]. Existieren wertvolle natürliche Ressourcen im Land und werden diese von nur wenigen Menschen oder Unternehmen kontrolliert, kann ein Großteil des nationalen Budgets aus dieser Richtung kommen. Damit ist eine Regierung weniger abhängig davon die Bürger zu befriedigen und umgekehrt sind Bürger weniger darauf aufmerksam, was mit dem nationalen Budget gemacht wird.

Konflikte über die Kontrolle der Rohstoffe sorgen für Instabilität im Land. Ölproduzierende Länder leiden doppelt so wahrscheinlich unter Bürgerkriegen und sind häufiger Ziel internationaler Kriege ("petro-aggression") [21].

Doch ein Zuwachs an natürlichen Rohstoffen können auch negative wirtschaftliche Auswirkungen auf andere Sektoren haben [21]. Dieses Phänomen wird auch "holländische Krankheit" bezeichnet, in Anlehnung an den Rückgang des niederländischen produzierenden Sektor nach Entdeckung des Groninger Erdgasfeldes 1959. Ein höheres Maß an Rohstoffen stärkt die nationale Währung und macht damit Importe günstiger und Exporte teurer, was auf lange Sicht die Wettbewerbsfähigkeit des produzierenden Gewerbes schwächt.

Diese Erklärungen deuten darauf hin, dass Erdgasimporte jeglicher Art und Herkunft tendenziell den bitteren Beigeschmack haben, dass man damit hilft elitäre Herrschaftssysteme in diesen Ländern aufrechtzuerhalten.

Die (langfristige) Notwendigkeit von Erdgas wird in späteren Abschnitten evaluiert. Für manche Verbraucher ist der kurzfristige Ersatz durchaus schwierig, weswegen ein Ersatz aus anderen Ländern trotz beschriebener Problematik kurzfristig angestrebt wird. Erdgas kann entweder als gasförmiger Energieträger über Pipelines importiert werden oder über längere Strecken in flüssiger Form auf Behältern in Schiffen transportiert werden. Diese Form wird auch Flüssiggas oder Liquid Natural Gas (LNG) genannt. Pipeline-Importe sind den LNG-Importen im Allgemeinen aus verschiedenen Gründen vorzuziehen.

Zum Ersten ist die Umwandlung in Flüssiggas, der Transport über weite Wege und die Wiederaufbreitung zu Gas deutlich energieintensiver, damit teurer und mit höheren Emissionen verbunden [18]. Darüber hinaus hat Deutschland und die EU (noch) keine ausreichende Infrastruktur um Flüssiggas am Meer zu empfangen und die Importe ins Landesinnere weiterzutransportieren [19]. Deutschland besitzt bisher noch keine LNG-Terminals, die Anbindung anderer EU-Nachbarländer ist jedoch gut. Die Umschlagkapazität der Terminals ist nicht ausgereizt: die Importkapazität der LNG-Terminals der 27 EU-Länder liegt bei 1715 TWh wovon nur 798 TWh tatsächlich genutzt werden [26]. Zusätzlich verfügt die Türkei über mehrere LNG-Terminals.

Deutschland mit den Flüssiggas-Beschleunigungsgesetz 11 LNG-Terminals für Deutschland, was einer Importkapazität von 286 TWh entsprechen wird [23]. Teile davon werden als schwimmende Anlagen errichtet. Der Bau stößt bei Umweltverbänden wegen einer möglicher Gefährdung von Schweinswalen auf Kritik. Schwierig ist der Weitertransport durch Gasleitungen vor allem aufgrund fehlender Pipelines von Spanien nach Mitteleuropa [19]. Langfristig wird die Klimaneutralität angestrebt. Das stellt die Investition in teure Infrastruktur, die neben Erdgasimporten womöglich keinen anderen Zweck erfüllt

infrage. Deswegen ist beim Bau auf die Fähigkeit zur Umstellung auf einen Transport von Wasserstoff statt Erdgas (H₂-ready Konzept) zu beachten [26].

Neben der Frage, ob Deutschland in der Lage ist Importe zu empfangen ist zu klären aus welchen Ländern Erdgas importiert werden kann. Kurzfristig soll die Produktion innerhalb der EU und Importe aus nicht-russischen Gebieten (insbesondere Aserbaidschan und Norwegen) um 106 TWh im Vergleich zu 2021 erhöht werden können [17]. Diese Erhöhung geht auf eine höhere Nutzung der Kapazitäten und Vorkommen, übersprungene Wartungen im Sommer und eine Erhöhung der Produktionsgrenzen zurück, was die längerfristige Anwendbarkeit dieser Strategie infragestellt. Des Weiteren ist die EU-weite Erhöhung um 106 TWh bei Weitem nicht in der Lage die existierende Nachfrage zu decken.

Zu den möglichen Herkunftsländern von Flüssiggas zählen die USA, Australien und Katar [17]. Auch hier ist in naher Zukunft nur eine Erhöhung der Importe um 212 TWh EU-weit möglich, was wieder nicht ausreicht die Nachfrage nach russischem Erdgas zu decken. Ein weiterer negativer Aspekt des Imports von Flüssiggas aus den USA und Kanada ist, dass ein wesentlicher Teil des Erdgases durch hydraulische Frakturierung (Fracking) aus Schiefergestein gewonnen wird [34, 33]. Dabei wird Gas aus dichteren und weniger porösen Gesteinen entzogen als bei der konventionellen Gewinnung indem durch Flüssigkeit unter hohem Druck Risse im Gestein erzeugt und erweitert werden. Die Nachteile dieser Technologie sind unter anderem der hohe Wasserbedarf die Verunreinigung von Grundwasser und die Schwierigkeit der ordnungsgemäßen Entsorgung des vielseitig kontaminierten an die Oberfläche zurückfließenden Abwassers (Flowback) [40].

1.2 Ansätze im Verbrauch

Deutschland hat insgesamt einen Gasbedarf von 905 TWh pro Jahr [7]. Dies entspricht 27% der Gesamtprimärenergienachfrage und macht Gas damit zum zweitwichtigsten Primärenergieträger nach Mineralöl. Gas wird zum größten Teil (66%) zur Wärmeproduktion eingesetzt.

Wie in Abbildung 2 erkennbar, wird Gas außerdem mit einem signifikanten Teil in Kraftwerken zur Stromproduktion verwendet, zu geringem Teil ausgespeichert und zu großen Teilen im verarbeitenden Gewerbe eingesetzt.

Die nächsten Abschnitte adressieren die Speicherung von Erdgas, sowie welche Alternativen zum Erdgasverbrauch es für die genannten Anwendungsbereiche gibt und in welchem Zeithorizont diese umsetzbar sind.

1.2.1 Gasspeicher

Deutschland verfügt mit 265 TWh über die höchste Gasspeicherkapazität der EU [19]. Den Großteil dieser Kapazität machen 51 unterirdische Kavernenspeicher aus. Deren Zweck ist es, Lieferengpässe beim Erdgas auszugleichen. Da die Kapazität etwa 30% des Jahrverbrauchs ausmacht, sind sie dafür auch durchaus geeignet. Es wird darauf abgezielt die Speicher zu Beginn des Winters so voll wie möglich zu haben. Im Normalfall ist die Füllquote auch bei 95%. Im Winter 2021 waren die Speicher allerdings nur zu 66% gefüllt. Ein Viertel der deutschen Gasspeicher gehörten dem russischen Staatskonzern Gazprom. Diese Speicher wurden über das letzte Jahr kaum befüllt. So waren schließlich

Energieflussbild der Bundesrepublik Deutschland 2020
Energieeinheit Petajoule (PJ)*

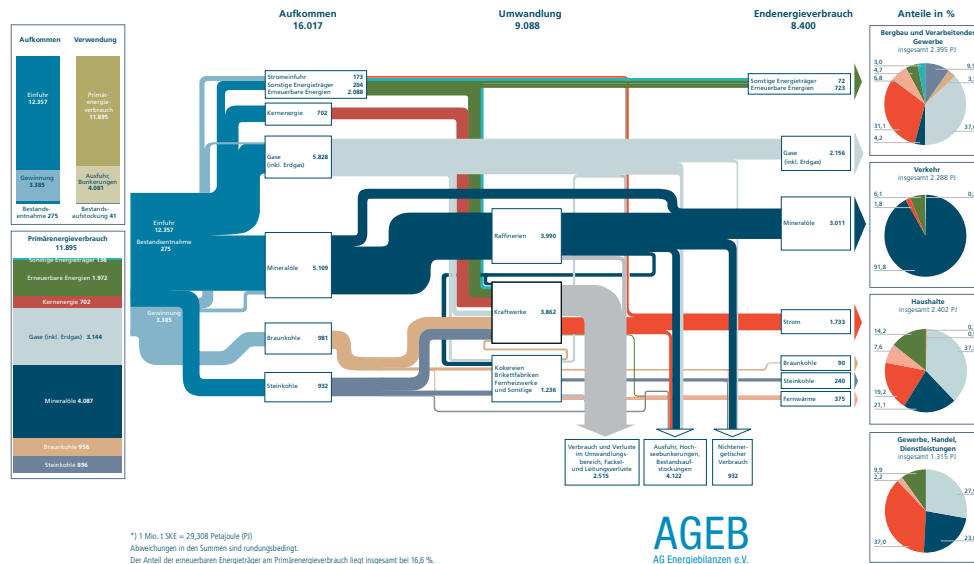


Abbildung 2: Energiefluss für Deutschland 2020 [9]

auch 05. März 2022 zu Beginn des russischen Angriffskrieges auf die Ukraine dazu, dass die Speicher nur noch zu 27% gefüllt waren. Im Normalfall sind sie im selben Zeitraum 50-80% gefüllt.

Die deutschen Erdgasspeicher stehen allesamt bisher in privatem Besitz [26]. Aus rein ökonomischer Sicht ist es unter Umständen aber zu riskant die Gasspeicher zu befüllen. Wenn zum Beispiel Gazprom bei vollem Speicherstand in Zeiten hoher Nachfrage den Gasmarkt mit billigem Gas flutet, erleiden die Gasimporteure und Speicherbetreiber einen hohen wirtschaftlichen Schaden, da sie das gespeicherte Gas nicht verkaufen können. Auf der anderen Seite sind ungefüllte Speicher wie in diesem Jahr erkenntlich elementar für die Stabilität und Unabhängigkeit der deutschen Energieversorgung. Deswegen sollte die Handhabung der deutschen Speicher so reguliert werden, dass sich eine Einspeicherung im Sommer stets lohnt oder gezwungenermaßen vonstatten geht.

1.2.2 Wärmeversorgung

Die größte Rolle spielt Gas bei der Wärmeversorgung. Es wird zwischen der Raumwärmeversorgung (28%), der Prozesswärme in der Industrie (26%) und der Wärmeversorgung im Dienstleistungssektor (12%) unterschieden. Tatsächlich sind 49,5% der deutschen Heizungen noch Gasheizungen.

Im Wärmesektor herrscht ein beschränktes aber nicht zu vernachlässigendes Potential für kurzfristige Energieeinsparungen. Eine Reduktion Temperatur aller mit Erdgas beheizten Wohnungen der EU um 1 Grad Celsius entspricht einer Einsparung im Erdgasverbrauch um 100 TWh pro Jahr [17].

Die sowieso schon hohen Gaspreise sorgen sowohl in den Haushalten wie auch in der Wirtschaft durch Verhaltensänderung bereits für Einsparungen [13]. Zwischen Januar und Mai 2022 ist der Gasverbrauch 14% niedriger als im Jahr 2021. Dafür sind auch die milderen Temperaturen im Frühjahr verantwortlich. Wenn man diese in die Berechnung miteinbezieht sank der Verbrauch immernoch um 6,4%. Haushalte wie Unternehmen denken stärker darüber nach ob und welche Fläche beheizt werden muss.

Deswegen sollten die Preis-Anreize auch beibehalten werden. Kontraproduktiv wäre es, in dieser Situation z.B. die Mehrwertsteuer auf fossile Energie zu reduzieren, da dies die Anreize außer Kraft setzen würde. Um sozialen Verwerfungen entgegenzuwirken kann stattdessen auf ein pauschales oder sozial gestaffeltes Energiegeld gesetzt werden [7]. Diese Idee wird auch häufig im Rahmen des CO₂-Bepreisung eingebracht. Die Einnahmen aus dem CO₂-Preis können für die sozialverträgliche Kompensation der Mehrbelastung genutzt werden, indem jeder Bürger ein monatliches oder jährliches Energiegeld erhält. Wer wenig Energie verbraucht (was für die meisten Geringverdiener zutrifft) erzielt dabei in der Gesamtrechnung einen Gewinn. Für alle bleibt der Anreiz zum Energiesparen erhalten [26]. Je stärker und länger die Energiepreise wachsen, desto wichtiger wird eine solche finanzielle Kompensation.

Eine technologische Form der Wärmeeinsparung ist das intelligente Heizen: über vernetzte Thermostatventile und Heizungsteuerungen kann durch informierte Entscheidungen darüber welche Räume wann zu heizen sind bis zu 20% der Heizenergie gespart werden [7]. Diese Technologie ist außerdem breit verfügbar und mit geringen Investitionen verbunden. Sie sollte deswegen stärker incentiviert werden, zum Beispiel durch Subventionen oder Pflichten.

Die Effizienz von (Gas-)Heizungen ist über die letzten Jahr gestiegen. Die daraus resultierende Energieeinsparung wurde jedoch durch den signifikanten Anstieg in der Wohnfläche pro Person kompensiert. Wohnte eine durchschnittliche Person in Deutschland 1991 noch auf 34,9 Quadratmetern, wohnt sie 2020 nun auf 47,4 Quadratmetern [7]. Erhöhte Energiepreise könnten langfristig dafür sorgen, dass sich dieser Trend wieder etwas umkehrt.

Eine weitere längerfristige Maßnahme zur Heizenergieeinsparung ist die Sanierung von Altbauten. Dazu zählt die Isolation von Gebäuden, aber auch die effizientere Wärmeverteilung durch moderne Pumpen [15]. Momentan werden jährlich nur 1% der EU-Gebäude saniert [17]. Steigende Preise dürften diese Maßnahmen incentivieren, doch es muss auch dafür gesorgt werden, dass Lieferketten und Fachkräfte für standardisierte Upgrade sichergestellt sind. Es kann auch darüber nachgedacht werden, staatliche Fördermaßnahmen einzurichten, um diese Anpassungen noch stärker zu motivieren.

Eine grundlegend anderer Ansatz zur Einsparung von Erdgas in der Wärmeversorgung ist der Ersatz der Gasheizung. Auch diese Maßnahme ist kurzfristig schwer umzusetzen, insbesondere in der Prozesswärmeversorgung der Industrie [26]. Grundlegend gibt es folgende Alternativen: der Anschluss an Wärmenetze, der Ersatz durch regenerative Wärmequellen, die Elektrifizierung über Wärmepumpen oder der Einsatz von (grünem) Wasserstoff in dezentralen Gasheizungen [7]. Von diesen Optionen ist nur die letzte aufgrund hoher Effizienz Nachteile im Vorherein auszuschließen. Beim Einsatz von 100 kWh erneuerbarem Strom kann durch die Umwandlung in Wasserstoff mit anschließender Verbrennung nur 61 kWh Wärme produziert werden. Eine Wärmepumpe produziert im Vergleich 135 - 270 kWh, je nach Außentemperatur [10].

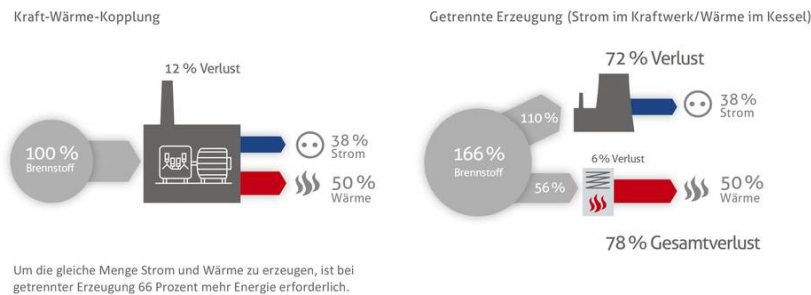


Abbildung 3: Potenzial der Kraft-Wärme-Kopplung [20]

Konventionelle Kraftwerke produzieren Strom durch die Verbrennung (fossiler) Energieträger. Sie heizen damit Wasser zu Dampf, der eine Turbine antreibt, die über einen Generator Strom produziert. Dabei bleibt ein signifikanter Teil der Energie in Form von Abwärme ungenutzt. Wird statt der separaten Produktion von Wärme, diese Abwärme lokal genutzt oder über Wärmenetze verteilt, spricht man vom Prinzip der Kraft-Wärme-Kopplung [20]. Dieses ist in Abbildung 3 dargestellt. Um den Gasverbrauch zu reduzieren, sollte also das Potenzial Wärmenetze auszubauen oder zusätzliche Gebäude an diese Netze anzuschließen ergründet werden. Zum Ausbau der Wärmenetze zählt auch der Aufbau von Quartierswärmespeichern, wie Erdbeckenwärmespeicher, die die lokale Wärmeversorgung vor allem bei volatiler regenerativer Energieversorgung stabilisieren können [7].

Wärmenetze können nämlich auch durch regenerative Wärmequellen gespeist werden. Dazu zählen vor allem die Solarthermie und die Geothermie. Die Solarthermie hat eine hohe Flächeneffizienz und die niedrigsten Treibhausgas-Vermeidungskosten, ist kombinierbar mit landwirtschaftlicher Nutzung (Agri-Solarthermie) und kann für etwa 60 TWh/a der Niedertemperaturprozesswärme eingesetzt werden [7].

Bei der Geothermie wird die in der Erdkruste gespeicherte Wärme durch Wärmetauscher übertragen. Dazu sind Bohrungen in unterschiedlichen Tiefen möglich oder sinnvoll. Dies hängt auch stark von der lokalen Präsenz von Wärmeanomalien ab. So ist Deutschland ungeeignet für den Einsatz von Hochenthalpie-Anlagen, die hohe Temperaturen in vergleichsweise geringer Tiefe abgreifen können und für die Wärme oder gar Stromproduktion nutzen. Deswegen ist die in Deutschland insgesamt installierte Leistung (27 MW 2015) durch Geothermieanlagen im internationalen Vergleich mit Ländern wie den Philippinen (1870 MW) oder Island (665 MW) deutlich geringer [15]. Doch für die Wärmeversorgung eignen sich auch Niederenthalpie-Anlagen, die keine besonderen Wärmeanomalien aber häufig tiefe Bohrungen voraussetzen. Solche Anlagen bei 400m Tiefe haben in Deutschland ein Potential von 100-300 TWh/a für die Wärmeproduktion [7]. Der Vorteil der Geothermie ist deren Unabhängigkeit von Eingabeenergie und Stabilität. Schwierigkeiten sind die hohen Kosten bei tiefen Bohrungen, salziges korrosives Wasser (Ausnahme: Süddeutschland) und Risiken seismischer Aktivität bei der Tiefengeothermie [15].

Eine weitere regenerative Wärmequelle ist die Biomasse. Die Verbrennung von Holz ist die geschichtlich am weitesten zurückreichende Methode des Heizens und auch heute noch mit 68% 2017 den größten Teil in der erneuerbaren Wärmeversorgung aus [15].

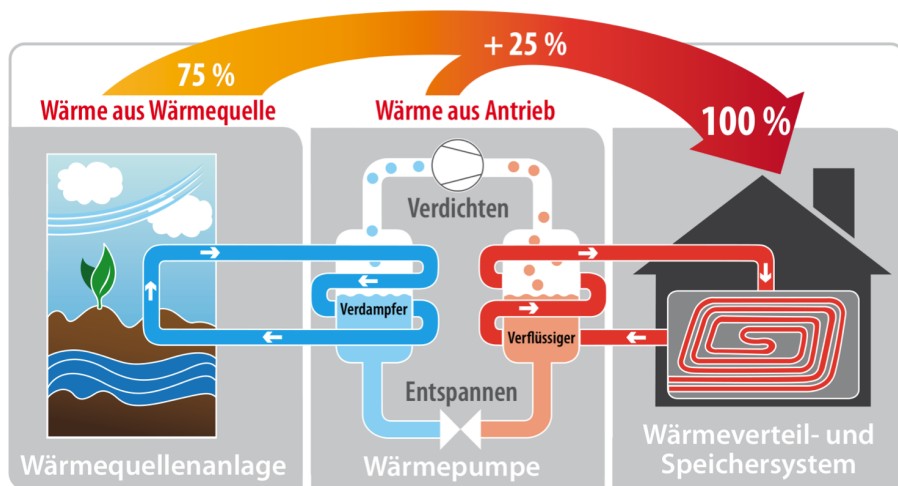


Abbildung 4: Funktionsprinzip der Wärmepumpe [15]

Die flächendeckende Anwendung von Biomasse für die Wärmeversorgung ist im dicht besiedelten heutigen Deutschland mit immer schwächer nachwachsenden Wäldern infrage zu stellen. Prinzipiell ist das Anpflanzen und Verbrennen von Bäumen zwar klimaneutral, da die Bäume beim Wachsen CO₂ binden, das beim Verbrennen freigesetzt wird. Bei der Produktion und dem Transport fallen jedoch Treibhausgase an, die in Summe zu einem Plus an Treibhausgasemissionen führen. Dies gilt insbesondere für das Heizen mit Pellets, die häufig über lange Wege transportiert werden. Erneuerbar ist das Heizen mit Holz natürlich auch nur dann wenn auch nur so viele Bäume entnommen werden wie nachwachsen, was in Zeiten des Klimawandels und Waldsterbens bei hoher Nachfrage sehr unrealistisch ist. Neben Holz hat Biogas in Deutschland mit 10% 2017 den zweitgrößten Anteil an der erneuerbaren Wärmeversorgung. Der Anbau von Energiepflanzen zur Produktion von Biogas steht über den Flächenverbrauch jedoch im Konflikt mit der Nahrungsmittelversorgung und kann deswegen jedenfalls nicht weiter erhöht werden.

Gebäude können auch rein elektrisch geheizt werden. Neben ineffizienten Brennstäben bietet kann dafür eine Wärmepumpe verwendet werden. Dessen Funktionsprinzip ist in Abbildung 4 dargestellt. Eine Wärmepumpe funktioniert nach dem umgekehrten Prinzip eines Kühlschranks. Sie verwendet elektrische Leistung um thermische Energie aus einem Kältereservoir in eine Wärmereservoir zu übertragen. Dabei versteht man das Kältereservoir auch als Wärmequelle, weil die darin enthaltene thermische Energie mit verwendet wird. Die ausgegebene thermische Energie ist dadurch im Betrag höher als die eingegebene elektrische Energie. Deswegen wird die Effizienz einer Wärmepumpe nicht in Form eines Wirkungsgrades $\epsilon \in [0, 1]$ sondern in Form einer Leistungszahl $\epsilon > 1$ angegeben [15]. Sie eignet sich als Ersatz für fossile Heizungen in der Wärmewende, weil sie direkt die durch Photovoltaik oder Windkraft gewonnene elektrische Energie verwenden kann. Langfristig sollen mit Wärmepumpen 60-70% des Wärmebedarfs gedeckt werden können. Sie können bis 2030 25-75% des russischen Erdgases einsparen [7]. Im Neubau war 2020 die Wärmepumpe zum ersten mal die meistverbaute Heiztechnologie [31]. Im Bestand machen sie aber noch immer nur weniger als 3% der verbaute Heizungen aus. Die Gasheizung ist mit etwa 50% seit 1995 die meistverbaute Heizung [30].

Womöglich auch deswegen waren auch 2021 nur 18% der ausgetauschten Heizsysteme Wärmepumpen [7]. Die Wärmewende und die Unabhängigkeit von russischem Erdgas erfordern eine massive Beschleunigung im Einbau von Wärmepumpen. Dafür sind qualifizierte Fachkräfte notwendig. Die Regierung sollte eine Ausbildungsoffensive im Handwerk für Wärmepumpeninstallateure und Elektrofachkräfte aufbauen, die auch in der Lage sind, die Wärmepumpen stromseitig an eine PV-Anlage anzuschließen. Die Elektrifizierung der Mobilität mit Elektrofahrzeugen und die Elektrifizierung der Wärmeproduktion über Wärmepumpen erfordern darüber hinaus einen Ausbau der erneuerbaren Stromproduktion um das Ziel bis 2030 zu halten 80% des Stroms aus erneuerbaren Quellen zu decken [7]. Bis 2050 muss dafür die Stromproduktion aus Sonne und Wind zum Jahr 2020 verdreifacht werden [10]. Die Förderung von Erdgas-Brennwertheizungen sollte vollständig beendet werden. Momentan kann man für den Wechsel auf eine Gasheizung noch 20-40% Förderung vom Staat erhalten – wenn diese entweder als “renewable ready” Heizung innerhalb von 2 Jahren um eine erneuerbare Quelle ergänzt wird oder sofort als Gas-Hybridheizung mit einer erneuerbaren Quelle wie Solarthermie kombiniert wird [38]. Die Idee hinter einem Einbau dieser Systeme ist verständlich. Wärme wird bevorzugt aus der Solarthermie bezogen, für die kalten und dunklen Wintermonate kann man sich aber auf das sicher verfügbare Gas verlassen. Langfristig kann das keine nachhaltige Alternative sein, was das Gas nur sehr teuer durch energieintensiven Wasserstoff ersetzt werden kann [10]. Ab einem gewissen Zeitpunkt könnten die Gasheizungen aufgrund der Klimaneutralität tatsächlich auch die Betriebsgenehmigung verlieren, sogar über ein Verbot vom Einbau von Öl- und Gasheizungen nachgedacht werden kann. Der aktuelle Koalitionsvertrag sieht bereits vor, dass ab 2025 nur noch Heizungen eingebaut werden dürfen, die auf 65% Erneuerbaren betrieben werden [7].

Ein allgemeines Problem bei vielen dieser Maßnahmen ist das Vermieter-Mieter-Dilemma [42]. Der Mieter bezahlt monatlich den Preis für die zur Heizung von Raum und Wasser notwendigen Energie. Doch der Vermieter entscheidet über energetische Sanierungen oder den Ersatz der Heizung durch effizientere oder nachhaltigere Alternativen. Diese Investitionen können sich für den Vermieter aber zum Teil gar nicht refinanzieren, da dieser von der Investition nicht genug Geld zurück erhält. Es dürfen 11% der Investitionssumme über die Kaltmiete auf den Mieter umgelegt werden. Auch für den Mieter ist die Investition dann aber nicht unbedingt immer finanziell erstrebenswert, wenn nämlich die Sanierung nicht genug Energie einspart um die Mehrkosten der Miete zu decken. Für den Vermieter ist auch nur entscheidend wie teuer, nicht wie effektiv die Sanierung war. Ein alternatives Modell ist die Warmmiete mit Temperaturfeedback. Ist im Mietvertrag geregelt, dass sich der Vermieter, um die Wärmeversorgung kümmert und eine Mindesttemperatur bereitstellt, kann dieser Geld einsparen indem er Investitionen zielt. Dieses Konzept ist in Schweden üblich. Dort sind auch seit 2000 die Emissionen der Haushalte um 95% gesunken.

1.2.3 Stromproduktion

Zur Stromproduktion wurden 2021 171 TWh (19%) vom Erdgas in Gaskraftwerken in 95 TWh Elektrizität umgewandelt [7]. Wendet man darauf den Anteil der russischen Erdgasimporte (55%) an, sind so schnell wie möglich 52 TWh/a Strom anderweitig zu produzieren.

Es gibt zwei Arten von Gaskraftwerken. Das einfache Gaskraftwerk wandelt Gas mittels Gasturbine unter sehr hohen Temperaturen in Strom um. Auch die Abwärme ist bei diesen Kraftwerken sehr hoch. Die sogenannten Gas- und Dampfkraftwerke nutzen diese Abwärme nach dem Prinzip der Kraft-Wärme-Kopplung in einem zweiten dampfbasierten Energiewandelprozess um zusätzlichen Strom zu produzieren. Dadurch ist das Gas- und Dampfkraftwerk unter allen Kraftwerkstypen mit einem Wirkungsgrad von 60% die effizienteste Art [15]. Dieses Attribut ist natürlich nur für fossile Kraftwerke und Kernkraftwerke wirklich relevant, da erneuerbare Kraftwerke mit Ausnahme der Biomassebasierten Kraftwerke kostenlose und unlimitierte Eingabeenergie verwenden. Das spiegelt sich auch darin wieder, dass Gaskraftwerken gegenüber anderen auf fossiler Energie basierenden Kraftwerken weniger Treibhausgasemissionen und Luftschadstoffe verursachen [41]. Das stammt jedoch auch daher, dass die Verbrennung von Methan im Allgemeinen weniger Treibhausgasemissionen verursacht als die Verbrennung von Kohle oder Öl.

Das bedeutet in Summe, dass wenn Strom aus Gaskraftwerken durch Strom aus Kohlekraftwerken ersetzt wird, zum einen durch Niedereffizienz mehr Primärenergie benötigt wird und die Treibhausgasemissionen in der Stromproduktion höher sind. Kohle und Öl stehen jedoch im Kontrast zu Alternativen für einen Ersatz auch zur Verfügung [17]. Die Verbrennung deutscher Kohle statt russischem Gas würde 27 Mt CO₂ mehr verursachen als die Verbrennung von Gas [26]. Die Emissionen der europäischen Stromproduktion sind aber durch den Emissionshandel (ETS) fest nach oben limitiert. Das bedeutet, dass die Kohleverstromung die Preise erhöht, aber in Summe nicht die Emissionen, da diese anderweitig eingespart werden müssen. Diese Situation stellt natürlich den geplanten Kohleausstieg 2038 infrage. Es bleibt aber weiterhin sinnvoll an diesem festzuhalten, unter anderem deswegen, weil über die Jahre 2017 bis 2021 40 bis 50% der Steinkohle aus Russland importiert wurde [4].

Eine weitere Option für Deutschland liegt in der Verzögerung des geplanten Laufzeitendes am 31. Dezember 2022 der letzten drei verbleibenden Atommeiler. Diese produzieren im Jahr 2022 eine geplante Elektrizitätsmenge von etwa 30 TWh [27]. Könnten diese im selben Modus weiterbetrieben werden, würden sie damit mehr als die Hälfte des Ausfalls oder Vermeidung russischen Erdgases verbleibenden Strombedarfs decken. Die Verlängerung ihrer Laufzeiten gestaltet sich infolge der schon vorbereiteten Abschaltung als technisch herausfordernd und ökonomisch sehr aufwendig [26]. Dazu kommt, dass die EU auch beim Uran stark von Russland abhängig ist [**spiegel-uran**]. 40% des in der EU genutzten Urans wird aus Russland und Kasachstan importiert. Gravierend ist, dass Russland 26% des *angereicherten* Urans herstellt und für Betreiber von WWER-Reaktoren der einzige Lieferant von sechseckigen Brennstäben ist. Würde Deutschland die Laufzeit der Atomkraftwerke verlängern wäre zu klären, woher das Uran importiert werden soll, wenn gerade EU-weit versucht wird auf andere Lieferländer auszuweichen.

Was bleibt ist die Substitution durch Kraftwerke aus erneuerbaren Energien. Hierbei sind in Deutschland vor allem die Photovoltaik und die Windkraft relevant. Nach Berechnungen ersetzt 1 GW installierter Windkraftleistung 5,6 TWh/a Gas (bei 2800 Volllaststunden) und 1 GW Leistung aus Photovoltaik ersetzt 1,8 TWh/a Gas (bei 920 Volllaststunden) [7]. Der Ersatz der 45 TWh Strom aus russischem Erdgas erfordert also einen Zubau von 30-40% der bisher installierten Kapazität an PV und Windenergie. Das verdeutlicht, dass diese

Property	OCGT	CCGT	Hard coal-fired power plant	Lignite-fired power plant
Most commonly used power plants				
Minimum load [% P_{Nom}]	40–50 %	40–50 %	25–40 % ^a	50–60 %
Average ramp rate [% P_{Nom} per min]	8–12 %	2–4 %	1.5–4 %	1–2 %
Hot start-up time [min] or [h]	5–11 min ^b	60–90 min	2.5–3 h	4–6 h
Cold start-up time [min] or [h]	5–11 min ^c	3–4 h	5–10 h	8–10 h
State-of-the-art power plants				
Minimum load [% P_{Nom}]	20–50 %	30–40 % (20 % with SC ^d)	25 ^e –40 % ^f	35 ^g –50 %
Average ramp rate [% P_{Nom} per min]	10–15 %	4–8 %	3–6 %	2–6 ^h %
Hot start-up time [min] or [h]	5–10 min ⁱ	30–40 min	80 min–2.5 h	1.25 ^j –4 h
Cold start-up time [min] or [h]	5–10 min ⁱ	2–3 h	3–6 h	5 ^k –8 h

Abbildung 5: Flexibilität unterschiedlicher Kraftwerkstechnologien nach Beschleunigungsrate und Kalt- und Warmstartzeit [11]

Alternative leider nur mittel- bis langfristig realistisch ist. Eine mögliche Maßnahmen ist jedoch, die 5 GW (= 28 TWh/a) Windkraft, die momentan im Genehmigungsstau stehen als Notfallmaßnahme beschleunigt zuzulassen [7]. Allgemein sollte versucht werden starre Regularien und langsame Genehmigungsverfahren zu vereinfachen und zu beschleunigen. Dabei kann es helfen administrative Kapazität aufzubauen, klare Deadlines festzulegen und die Prozesse zu digitalisieren [17]. Zusätzlich kann die Installation gefördert werden oder bei der Photovoltaik auf Neubauten sogar verpflichtet werden.

Ein weiterer Aspekt von Gaskraftwerken ist, dass sie im Vergleich zu Kohle- und Kernkraftwerken sehr flexibel betrieben werden können. Die dafür wichtigen Parameter sind wie schnell die produzierte Leistung erhöht werden kann (Ramp rate) und wie lange ein Kraftwerk für einen Kalt- oder Warmstart benötigt (Hot- oder Cold-start-up time). Wie in Abbildung 5 erkennbar, benötigen Gaskraftwerke für beides nur etwa 5–10 Minuten und sind damit deutlich schneller als Gas- und Dampfkraftwerke welche wiederum etwas schneller als Kohle- und Kernkraftwerke sind. Im Stromnetz ist die Frequenzstabilität ein wichtiger Faktor. Gaskraftwerke eignen sich gut dafür Spitzenlast durch kurzfristig erhöhte Produktion zu decken und helfen damit das Stromnetz gegen Ausfälle zu sichern [15]. Gaskraftwerke werden deshalb im Stromsektor als Haupt-Flexibilitätsquelle vor allem im Wandel zu mehr volatiler Stromproduktion durch Wind und Sonne betrachtet [17]. Daher rührt auch die Bezeichnung von Gas als Übergangstechnologie.

Soll (russisches) Erdgas ersetzt werden muss also nicht nur die produzierte Strommenge, sondern auch die durch sie bereitgestellte Regelleistung ersetzt werden. Das demonstriert über die bereits beschriebenen Probleme hinaus, warum Kernkraftwerke den Strom aus Gaskraftwerken nicht äquivalent ersetzen können. Doch dieses Problem haben auch Kohlekraftwerke, vor allem jedoch betrifft es die Erneuerbaren. Ein Zubau von Erneuerbaren erhöht sogar die erforderliche Regelleistung im Netz um ihre Volatilität auszugleichen. Deswegen müssen andere (und neue) Möglichkeiten der Frequenzstabilisierung auf die Wege gebracht werden. Eine Option ist lastseitig auf einen erhöhten Verbrauch zu antworten. Bestimmte Stromverbraucher eignen sich dazu in ihrer Last unterbrochen zu werden.

Die Industrie kann Netzbetreibern eine solche Unterbrechbarkeit als Dienstleistung anbieten [15]. Die bereits genannte fortschreitende Elektrifizierung von Elektrofahrzeugen und Wärmepumpen eignet sich gut für solche Lastunterbrechungen, da Autos häufig lange Standzeiten haben und Räume und Wassertanks die Wärme speichern. Eine weitere mögliche und sowieso nötige Investition ist der Aufbau von kurz- und langfristigen Stromspeichern. Als kurzfristige Stromspeicher eignen sich Batterien. Diese sind ähnlich zu Gaskraftwerke gut steuerbar und können diese Flexibilität im Netz gut ersetzen [7]. Um die Dunkelflaute mit wenig Wind und Sonne, die bis zu Wochen dauern kann zu überbrücken wird es langfristig auch Langzeitspeicher brauchen. Die dafür geeignetste Technologie ist die Umwandlung in Wasserstoff, Speicherung in den genannten großen Kavernenspeichern und Rückverstromung in Gaskraftwerken oder Brennstoffzellen [26]. Doch Wasserstoff ist nicht nur als Energiespeicher gefragt.

1.2.4 Erdgas in der Chemieindustrie

Die Chemieindustrie machte 2021 15,4% des Erdgasbedarfs in Deutschland aus [6]. Erdgas ist der wichtigste Energieträger in der Industrie. 99,3 TWh (73%) wurden 2021 energetisch und 36,8 TWh (27%) stofflich eingesetzt. Bei der Produktion chemischer Produkte benötigen bestimmte Reaktionen eine energetische Eingabe in Form von Wärme oder Strom. Beim stofflichen Einsatz wird das Methan benötigt, aus dem Erdgas zum großen Teil besteht. Das prominenteste Beispiel dafür ist die Ammoniakherstellung. Ammoniak wird weltweit zu 99% nach dem Haber-Bosch Verfahren produziert [28]. Dabei wird Methan mittels Dampfreformierung unter Zufuhr von Wasser und Energie in Wasserstoff umgewandelt. Der Ammoniak entsteht dann durch eine Reaktion von Wasserstoff mit Stickstoff aus der Luft unter Wärmezufuhr. Ammoniak ist ein wichtiger Rohstoff für die mineralische Düngemittelproduktion und damit für die Agrarwirtschaft. Es könnte versucht werden die mineralischen Düngemittel durch organische Düngemittel zu ersetzen. Es ist jedoch fraglich, ob die Nachfrage nach Lebensmitteln der wachsenden globalen Bevölkerung mit diesen gestillt werden kann.

Die für die Chemieindustrie nötige Energie in Form von Wärme und Strom kann man analog zu den vorherigen Abschnitten zu ersetzen versuchen. Durch diese Industrie erhöht sich dementsprechend anteilig nochmal die zu ersetzende Menge an Erdgas. Doch wenn hier Methan als chemischer Stoff eingesetzt wird, stellt sich die Frage wie dieser überhaupt ersetzt werden kann.

Wasserstoff kann neben der Dampfreformierung auch durch Elektrolyse produziert werden. Dabei wird Wasser unter Zufuhr von Strom in Wasserstoff und Sauerstoff umgewandelt. Stammt der zugeführte Strom aus erneuerbaren Energien ist von grünem Wasserstoff die Rede. Die Elektrolyse wäre wie gesagt auch der Weg temporär überschüssigen erneuerbaren Strom für längere Zeiten zwischenspeichern. Bis 2030 wird so gewonnener Wasserstoff aber nur in sehr geringen Maßen verfügbar sein [5]. Um die Nachfrage nach Wasserstoff zu decken wird ein zusätzlich zur Elektrifizierung nochmal stärkerer Zubau an Erneuerbaren Energien notwendig sein [10]. Insgesamt ist also erforderlich, dass die installierte Leistung an Wind- und Solarstrom bis 2040 vervierfacht wird. Zusätzlich müssen Elektrolyseure installiert werden, bevorzugt in der Nähe großer

(Offshore-)Windparks [15]. Für einen Transport des produzierten Wasserstoffs eignet sich das existierende Gasnetz, wenn der Wasserstoff vor der Einspeisung methanisiert wird.

Auch ein Import von Wasserstoff aus Regionen mit höherer Verfügbarkeit an erneuerbarem Strom ist denkbar. Deswegen ist es wichtig, dass die momentan gebaute Infrastruktur zum Import von Flüssiggas sich auch zum Import von Wasserstoff eignen wird [26]. Der Preis für Wasserstoff liegt derzeit mit 100 Euro pro MWh deutlich über dem 40 Euro pro MWh für Erdgas [14]. Doch auch in Zukunft wird der Energieträger teuer bleiben.

Aus diesem Grund ist vom Gebrauch von Wasserstoff abzusehen, wo er nicht dringender benötigt wird. Wie besprochen gibt es in der Wärmeversorgung von Haushalten mit der Wärmepumpe eine effizientere Alternative den Strom aus Erneuerbaren direkt zu nutzen. In der Ammoniak- und Stahlproduktion hingegen gibt es bisher keine Alternativen zum Wasserstoff [5].

1.3 Fazit

Die Analyse der alternativen Importländer zeigt, dass die großen Mengen an aus Russland importierten Gas schwer schnell zu ersetzen sind. Durch weiterhin entschiedenes und schnelles Handeln könnte es aber möglich sein, auch einen Lieferstopp vonseiten Russlands auszuhalten, wenn genug Flüssiggas beschafft und transportiert werden kann, die Gasspeicher über den Sommer gefüllt werden, Erdgas im Stromsektor durch Kohle ersetzt wird und die Mehrbelastungen bei Bürgern durch höhere Preise mit einem Energiegeld abgefedert wird.

Längerfristig geht die Liberalisierung von russischem Erdgas Hand in Hand mit der Transformation zur Klimaneutralität. Um den Verbrauch der Sektoren Wärme, Strom und Chemieindustrie zu adressieren müssen die erneuerbaren Energien massiv ausgebaut, die Wärmeproduktion elektrifiziert, Verbraucher flexibilisiert, Batteriespeichern installiert, Elektrolyseuren aufgebaut und das Gasnetz zum Transport von Wasserstoff ertüchtigt werden.

2 Ist Erdgas nachhaltig?

Die EU-Taxonomie für nachhaltige Entwicklung soll ein Goldstandard für grüne Investitionen sein und dadurch klimafreundliche Investitionen in die Projekte lenken, die wirklich dabei helfen werden den Planeten langfristig zu schützen [1]. Am 31.12.2021 fasste die EU-Kommission einen Beschlussentwurf nach dem Atom- und Gaskraftwerke als grüne Technologie in die Taxonomie eingehen sollen [2]. Das soll gelten wenn ein Gaskraftwerk eine Altanlage (Kohlekraftwerk) ersetzt [12] und wenn sie maximal 270 g/kWh direkte Emissionen oder 550 g/kWh durchschnittliche Emissionen über 20 Jahre produziert [29]. Letzteres würde 1,4 Milliarden Tonnen CO₂-Äquivalente als nachhaltig deklarieren, wenn alle bestehenden Kohlekraftwerke durch Gaskraftwerke ersetzt werden würden. Dazu kommt, dass die letztere Anforderung keinen Schwellenwert für Emissionen pro kWh definiert und damit die jährlich Treibhausgasemissionen aus Gaskraftwerken schwer bestimmbar macht.

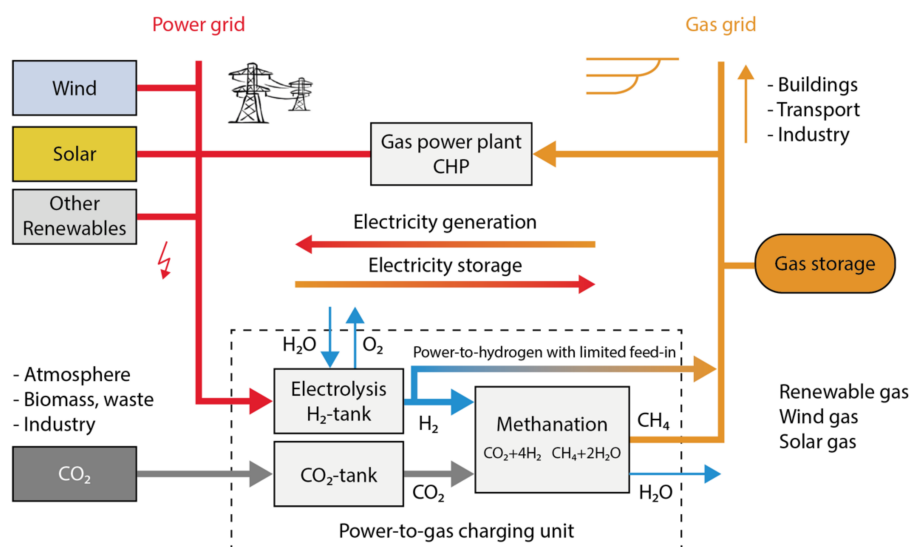


Abbildung 6: Power-to-Gas und Power-to-X: ein multimodales Energienetz [35]

In einer Ausschusssitzung haben sich EU-Parlamentarier am 14.06.2022 gegen diesen Beschlusstentwurf ausgesprochen [36]. Damit wird der Vorschlag wahrscheinlich im Juli 2022 kippen. In diesem Abschnitt soll dennoch darauf eingegangen werden mit welchem Argumenten die Position der EU-Kommission vertreten wird und was dagegen spricht Gaskraftwerke als nachhaltige Investitionen zu deklarieren.

Ein weiterer aktueller Streitpunkt ist der Bau der Süddeutsche Erdgasleitung (SEL) [37]. Diese soll über 250 km von Lampertheim in Hessen durch Baden-Württemberg nach Bissingen in Bayern fließen. Die bauende terranets BW beschreibt sie als kluge Investition in die Zukunft, die die Region über die nächsten Jahre mit dringend benötigtem Erdgas versorgt. Sie haben eine Befragung bei Verteilnetzbetreibern, Stadtwerken, Kraftwerken und der Industrie gemacht und daraus bestimmt, dass der Gasbedarf von 39,5 GW 2022 auf 49,1 GW 2032 wachsen wird. Dieser Abschnitt wird neben der von der EU-Kommission eingeschätzten Nachhaltigkeit von Gaskraftwerken auch die Nachhaltigkeit von Investitionen in das Gasnetz einschätzen.

In Unterunterabschnitt 1.2.3 wurden bereits verschiedene Aspekte von Gaskraftwerken beschrieben: sie sind effizient, haben niedrigere Treibhausgasemissionen als Öl- und Kohlekraftwerke und dienen als Flexibilitätsquelle für Stromnetzbetreiber bei der Frequenzstabilisierung. Ihre Rolle wird deswegen häufig und so auch von der EU-Kommission als Brückentechnologie beim Kohleausstieg und im Übergang zu erhöhter Stromproduktion aus erneuerbaren Quellen gesehen [1, 12]. Der Energiebedarfs soll kontinuierlich und zuverlässig gedeckt werden [29]. Gaskraftwerke können so ausgelegt sein, dass sie auch in der Lage sind Wasserstoff zurückzuverstromen (H₂-ready) [14]. In diesem Fall können sie auch langfristig Teil der Wasserstoffspeicherinfrastruktur sein.

Beim Neubau von Gasnetzen kann darauf geachtet werden, dass diese auch bereit sind, Wasserstoff zu transportieren. Aus technischer Sicht gibt es drei Möglichkeiten. Man kann Wasserstoff einem normalen Gasnetz beimischen. Dabei sind 5% im Fernnetz und 20% im Verteilnetz denkbar [16]. Die zweite Möglichkeit ist die Methanisierung von Wasserstoff.

Das HELMETH-Verfahren kombiniert die Elektrolyse mit der Methanisierung, bindet dabei CO₂, produziert Methan und Wasser und hat einen Wirkungsgrad von 76% [25]. Das Methan kann dann dem Gasnetz dann unbegrenzt beigeführt werden. Die dritte Möglichkeit besteht darin reine Wasserstoffnetze zu betreiben. Für große Abnehmer wie die Stahl- und Chemieindustrie kann das sinnvoll sein [16]. Ein reines Wasserstoffnetz erfordert ein anderes Design für Verdichter. Die Umstellung des existierenden Netzes auf ein reines Wasserstoffnetz würde also Kosten mit sich bringen. Mit Blick auf die energetisch äquivalente Alternative der Methanisierung ist eine solche Umstellung also nicht unbedingt sinnvoll. Allgemeine Vorteile der Übertragung von Energie über das Gasnetz statt dem Stromnetz ist, dass eine große Pipeline mit Durchmesser von einem Meter und 80-100 bar mit 24 GW etwa acht mal so viel Energie übertragen kann wie eine Hochspannungsleitung [16]. Zusätzlich hat das Gasnetz wie angesprochen bereit jetzt eine sehr große Speicherkapazität.

In Summe zeigt Abbildung 6 ein multimodales Energienetz, das die langfristige Speicherung von Energie und Versorgung der Industrie durch die Elektrolyse und Methanisierung sowie Rückverstromung über Gaskraftwerke ermöglicht.

Die für den Transport und die Verstromung von Erdgas gebaute Infrastruktur kann also auch zukünftig Verwendung finden. Aus diesen Gründen könnte man den Schluss ziehen, dass auch die Investition in diese Technik als nachhaltig klassifiziert werden sollte. Doch es gibt einige Argumente, die dagegen sprechen.

Zuallererst ist das Verbrennen von Erdgas (nicht von grünem Wasserstoff) in Gaskraftwerken alles andere als nachhaltig: es produziert Treibhausgase und verwendet einen nicht nachwachsenden Rohstoff. Dazu kommt, dass der Erdgaspipelines Leckagen haben über die Erdgas direkt in die Atmosphäre austritt [1]. Das ist ein großes Problem, weil Methan mit 25 CO₂-Äquivalenten kurzfristig ein sehr potentes Treibhausgas ist [39]. Eine Klassifikation von Gaskraftwerken als nachhaltige Technologie setzt möglicherweise in Zeiten in denen der Ausbau der Erneuerbaren stark vorangetrieben werden muss, finanziell die falschen Anreize [29]. Darüber hinaus verstoßen die von der EU-Kommission gegebenen Kriterien für deren Nachhaltigkeit gegen den Grundsatz der Technologieneutralität – für andere Kraftwerke gelten maximal 100 gCO₂e/kWh [29]. Auf psychologischer Ebene und im internationalen Vergleich gefährdet diese Klassifikation die Glaubwürdigkeit der Taxonomie und damit die Glaubwürdigkeit der europäischen Anstrengungen im Klimaschutz [8].

Vorangegangene Argumente sprechen aber durchaus dafür die Gasinfrastruktur zu erhalten oder gar auszubauen. Soll das finanziell incentiviert werden, sollte man dies statt in der EU-Taxonomie separat regulieren, jährliche Grenzwerte mit abnehmendem Verlauf für den Einsatz von fossilem Gas definieren und feste Kriterien für den Einsatz von kohlenstoffarmen Gas definieren [29].

Literatur

- [1] Kate Abnett. „Germany to reject EU green investment label for nuclear power“. In: *Reuters* (Mai 2022). URL: <https://www.reuters.com/business/germany-reject-eu-green-investment-label-nuclear-power-2022-05-16/> (besucht am 12.06.2022).

- [2] „Atomkraft und Klimawandel: EU hält AKW für klimafreundlich“. In: *Die Tageszeitung: taz* (Jan. 2022). URL: <https://taz.de/!5825470/>.
- [3] BMWK. *Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz ruft Frühwarnstufe des Notfallplans Gas aus*. URL: <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Pressemitteilungen/2022/03/20220330-bmwk-ruft-fruehwarnstufe-des-notfallplan-gas-versorgungssicherheit-gewaehrleistet.html> (besucht am 12. 06. 2022).
- [4] Statistisches Bundesamt. *Einfuhr von Steinkohle für die Jahre 2017 bis 2021*. URL: <https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Energie/Verwendung/Tabellen/einfuhr-steinkohle-zeitreihe.html> (besucht am 13. 06. 2022).
- [5] Bundesministerium für Bildung und Forschung. *Durchstarten trotz Unsicherheiten: So müsste eine anpassungsfähige Wasserstoffstrategie aussehen*. Nov. 2021. URL: https://www.kopernikus-projekte.de/aktuelles/news/ariadne_kurzdossier_wasserstoff_unsicherheiten_nov_2021 (besucht am 12. 06. 2022).
- [6] Verband der Chemischen Industrie e.V. *Energiestatistik*. 25. Mai 2022. URL: <https://www.vci.de/ergaenzende-downloads/energiestatistik-2022.pdf>.
- [7] Jens Clausen u. a. „Wärmewende beschleunigen, Gasverbrauch reduzieren. Ein Kurzpuls.“ In: (März 2022). DOI: 10.5281/zenodo.6363715. URL: <https://zenodo.org/record/6363715/export/hx> (besucht am 12. 06. 2022).
- [8] „Deutschland lehnt Atomkraft und Gas in der EU-Taxonomie ab“. In: *Deutscher Naturschutzring* (Mai 2022). URL: <https://www.dnr.de/aktuelles-terminen/aktuelles/deutschland-lehnt-atomkraft-und-gas-der-eu-taxonomie-ab/aktuelles-terminen/aktuelles/deutschland-lehnt-atomkraft-und-gas-der-eu-taxonomie-ab> (besucht am 12. 06. 2022).
- [9] *Energieflussbilder AG Energiebilanzen e. V.* URL: <https://ag-energiebilanzen.de/daten-und-fakten/energieflussbilder/> (besucht am 12. 06. 2022).
- [10] Agora Energiewende. „12 Thesen zu Wasserstoff“. In: *Agora Industrie* (2022).
- [11] Agora Energiewende. „Flexibility in thermal power plants – With a focus on existing coal-fired power plants“. In: *Agora Energiewende: Berlin, Germany* (2017).
- [12] *EU-Taxonomie: Kommission leitet Expertenkonsultation ein*. Text. URL: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/de/IP_22_2 (besucht am 12. 06. 2022).
- [13] „Gasverbrauch sinkt deutlich“. In: *tagesschau* (30. Juni 2022). URL: <https://www.tagesschau.de/wirtschaft/verbraucher/gasverbrauch-101.html>.
- [14] Steven Geyer, Frank-Thomas Wenzel und Johannes Christ. „Ökowasserstoff für alle? Die Fallstricke des Habeck-Plans für die Industrie“. In: *RedaktionsNetzwerk Deutschland* (Mai 2022). URL: <https://www.rnd.de/politik/oeko-wasserstoff-fuer-alle-die-fallstricke-des-habeck-plans-fuer-die-industrie-ANOFNRCTTBCKNLO2ECY3QAHHWM.html> (besucht am 12. 06. 2022).
- [15] Veit Hagenmeyer. *Vorlesung Energieinformatik* 1. Okt. 2020.

-
- [16] Thomas Hüwener und Alexander Martin. *Gasleitungen: Schnellstraßen für Wasserstoff?* URL: <https://www.iis.fraunhofer.de/de/magazin/serie-wasserstoff/wasserstoff-gasleitungen.html> (besucht am 12.06.2022).
- [17] IEA. „A 10-Point Plan to Reduce the European Union’s Reliance on Russian Natural Gas“. In: IEA Paris, France, 2022.
- [18] „Im Eiltempo zu den LNG-Terminals“. In: *tagesschau* (5. Mai 2022). URL: <https://www.tagesschau.de/wirtschaft/lng-fluessiggas-lng-terminal-erdgas-gasembargo-101.html>.
- [19] Institut der deutschen Wirtschaft. *Erdgas: Fatale Abhängigkeit*. März 2022. URL: <https://www.iwd.de/artikel/erdgas-fatale-abhaengigkeit-538135/> (besucht am 12.06.2022).
- [20] *Kraft-Wärme-Kopplung*. URL: <https://www.bkwk.de/kraft-waerme-kopplung/>.
- [21] Natural Resource Governance Institute. „The Resource Curse“. In: NRG Reader (März 2015). URL: https://resourcegovernance.org/sites/default/files/nrgi_Resource-Curse.pdf.
- [22] Dr Simon-Martin Neumair. *Definition: Fluch der Rohstoffe*. Text. Publisher: Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH Section: economy. URL: <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/fluch-der-rohstoffe-51570> (besucht am 12.06.2022).
- [23] Martin Polansky. „LNG-Gesetz im Bundestag: Habeck, die Schweinswale und ein Dilemma“. In: *tagesschau* (19. Mai 2022). URL: <https://www.tagesschau.de/inland/innenpolitik/habeck-lng-gesetz-101.html>.
- [24] „Russland verknappt Gas weiter“. In: *tagesschau* (15. Juni 2022). URL: <https://www.tagesschau.de/wirtschaft/konjunktur/erdgas-preis-gazprom-lng-lieferkuerzungen-101.html>.
- [25] Kosta Schinarakis. *KIT Press Release 009/2018: Power-to-Gas with High Efficiency*. URL: https://www.kit.edu/kit/english/pi_2018_009_power-to-gas-with-high-efficiency.php.
- [26] Robert Schlögl. „Wie sich russisches Erdgas in der deutschen und europäischen Energieversorgung ersetzen lässt“. In: (2022). Publisher: RWI Essen: Rheinisch-Westfaelisches Institut fuer Wirtschaftsforschung.
- [27] Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung. *Bekanntmachung der gemäß § 7 Absatz 1c AtG erzeugten übertragenen und verbleibenden Elektrizitätsmengen (netto) der deutschen Kernkraftwerke*. URL: https://www.base.bund.de/SharedDocs/Downloads/BASE/DE/berichte/kt/elektrizitaetsmenge-2021-12.pdf?__blob=publicationFile&v=63 (besucht am 02.07.2022).
- [28] Vaclav Smil. „Nitrogen cycle and world food production“. In: *World Agriculture* 2.1 (2011), S. 9–13.
- [29] Martin Stallmann. *EU-Taxonomie: Atomkraft und Erdgas sind nicht nachhaltig*. Text. Publisher: Umweltbundesamt. Jan. 2022. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/eu-taxonomie-atomkraft-erdgas-sind-nicht-nachhaltig> (besucht am 12.06.2022).

- [30] Statista. *Beheizungsstruktur des Wohnungsbestandes in Deutschland in den Jahren 1995 bis 2021*. URL: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/162218/umfrage/beheizungsstruktur-des-wohnbestandes-in-deutschland-seit-1975/> (besucht am 01. 07. 2022).
- [31] Statista. *Beheizungsstruktur im Wohnungsneubau in Deutschland in den Jahren 2000 bis 2021*. URL: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/37957/umfrage/beheizungssysteme-in-neubauten-im-jahr-2008/> (besucht am 01. 07. 2022).
- [32] Statista. *Länder mit den größten konventionellen Erdgasreserven 2020*. URL: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/37381/umfrage/laender-nach-konventionellen-erdgasreserven/> (besucht am 13. 06. 2022).
- [33] Statista. *Wichtigste Länder weltweit nach Produktion nicht-konventioneller Gase in den Jahren 2013 bis 2014*. URL: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/602801/umfrage/wichtigste-laender-weltweit-nach-produktion-nicht-konventioneller-gase/> (besucht am 01. 07. 2022).
- [34] Statista. *Wichtigste Länder weltweit nach Schiefergasproduktion in den Jahren 2012 bis 2014*. URL: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/602737/umfrage/wichtigste-laender-weltweit-nach-schiefergasproduktion/> (besucht am 01. 07. 2022).
- [35] Michael Sterner und Michael Specht. „Power-to-Gas and Power-to-X—The History and Results of Developing a New Storage Concept“. In: *Energies* 14.20 (2021). ISSN: 1996-1073. DOI: 10.3390/en14206594. URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/20/6594>.
- [36] „Taxonomie: EU-Vorschlag fällt überraschend durch - Mehrheit gegen Klimalabel für Atomkraft und Gas“. de. In: *Der Spiegel* (Juni 2022). URL: <https://www.spiegel.de/wissenschaft/abstimmung-im-eu-parlament-vorschlag-zur-taxonomie-faellt-ueberraschend-durch-a-681ff121-6322-43eb-9379-34461966ffe2> (besucht am 14. 06. 2022).
- [37] *terranets bw – Süddeutsche Erdgasleistung*. URL: <https://www.terranets-sel.de/> (besucht am 12. 06. 2022).
- [38] thermondo. *Förderung Heizung 2022: So erhalten Sie 50% vom Staat*. URL: <https://www.thermondo.de/info/finanzen/foerderung/foerderung-heizung/> (besucht am 01. 07. 2022).
- [39] Umweltbundesamt. *Die Treibhausgase*. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimaschutz-energiepolitik-in-deutschland/treibhausgas-emissionen/die-treibhausgase> (besucht am 13. 06. 2022).
- [40] Umweltbundesamt. *Fracking*. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/wasser/gewaesser/grundwasser/nutzung-belastungen/fracking> (besucht am 01. 07. 2022).

-
- [41] Umweltbundesamt. *Gesellschaftliche Kosten von Umweltbelastungen*. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/umwelt-wirtschaft/gesellschaftliche-kosten-von-umweltbelastungen#gesamtwirtschaftliche-bedeutung-der-umweltkosten> (besucht am 13.06.2022).
- [42] Agora Energiewende und Universität Kassel. „Wie passen Mieterschutz und Klimaschutz unter einen Hut?“ In: (2022).