

Kurzbericht

Thermische Kraftwerke im Energiesystem der Zukunft

Ergänzend zum Policy Briefing:
H2-Ready Kraftwerke

Autor:innen: Andreas Christidis,
Anne Wasike-Schalling,
Juliane Arriens

November 2023

Gefördert durch: European Climate Foundation



Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung	3
2.	Wie entwickelt sich der Kraftwerkspark?	4
2.1	Erforderliche Kapazitäten thermischer Kraftwerke im Jahr 2045.....	4
2.2	Wesentliche Annahmen für die unterschiedlichen Ergebnisse der Studien	6
2.3	Kraftwerkstypen im zukünftigen Kraftwerkspark.....	8
2.4	Die Rolle der Bestandskraftwerke im Jahr 2045	9
3.	Fazit und Ausblick	11
4.	Quellen.....	12

1. Einleitung

Um das Ziel der Klimaneutralität zu erreichen, ist es von entscheidender Bedeutung, 100 % erneuerbare Energie (EE) zu nutzen. Im deutschen Stromsektor wurden mit dem Kohleausstieg und dem Aufbau von erneuerbaren Energien bereits wichtige Schritte gegangen. Die größte Herausforderung ist langfristig der Ausstieg aus der Nutzung von Erdgas. Hierbei spielt erneuerbarer Wasserstoff eine wichtige Rolle, da er als Energieträger dazu beitragen kann, den schrittweisen Ausstieg aus fossilen Brennstoffen im Stromsystem zu ermöglichen. Damit dieser in Kraftwerkwerken genutzt werden kann, braucht es den Auf- und Umbau von Kraftwerkskapazitäten (siehe auch [1]).

Doch in welchen Mengen werden diese Kraftwerkskapazitäten künftig benötigt? Die Spannweite in Energieszenarien ist groß. Grund dafür sind unterschiedliche Annahmen darüber, wie sich das Energiesystem selbst, aber auch die Sektoren Verkehr, Industrie und Gebäude zukünftig entwickeln werden. Klar ist: Das Energiesystem der Zukunft wird dezentraler, es wird zum Großteil auf fluktuierenden EE basieren und die Nachfrage nach Strom wird durch eine voranschreitende Elektrifizierung des Verkehrs-, Industrie- und Wärmesektors ansteigen. Weniger klar ist, welche und wie viele emissionsfreie, thermische Kraftwerke es zukünftig braucht, um Dunkelflauten zu überbrücken, Netzdienstleistungen zu gewährleisten und die Wärmeversorgung in Fernwärmenetzen und der Industrie sicherzustellen.

Trotz der hohen Unsicherheiten ist eine Abschätzung über die zukünftigen Kraftwerke zentral, denn: Kapazitäten, die im Jahr 2045 benötigt werden, müssen spätestens 6 bis 10 Jahre vorher beschlossen werden. Die langen Planungs-, Genehmigungs- und Bauzeiten für Kraftwerke führen zu einer stark verzögerten Auswirkung heutiger Planungen auf das Energiesystem.

Ziel dieses Kurzberichtes ist der Ausblick des Bedarfes und der Zusammensetzung der Kapazitäten von thermischen Kraftwerken für das Jahr 2045. Dafür werden die erforderlichen Kapazitäten an thermischen Kraftwerken für das Jahr 2045 aus einschlägigen Studien dargestellt und der Einfluss getroffener Annahmen beschrieben. Zudem wird der Kraftwerkspark von heute dem im Jahr 2045 gegenübergestellt. Dieser Kurzbericht ergänzt die Erkenntnisse des Policy Briefings zu H2-Ready Kraftwerken [1].

2. Wie entwickelt sich der Kraftwerkspark?

Der Bruttostrombedarf in Deutschland wird von heute ca. 560 TWh bis zum Jahr 2045 auf ca. 700 bis 1.300 TWh steigen [2]–[7]. Grund dafür ist die Elektrifizierung der Wärmeversorgung, der Mobilität und der Industrie, sowie die Wasserstoffherzeugung in Elektrolyseuren. Die installierte Leistung erneuerbarer Energien wird sich in dem Zeitraum von heute ca. 130 GW auf 430 bis 700 GW erhöhen [2]–[7].

Die Rolle von thermischen Kraftwerken bleibt grundsätzlich weiterhin die Deckung der Residuallast, d.h. Strombedarf abzüglich Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien und Stromspeichern. Der Zubau von Speicherkraftwerken wird den Einsatz von thermischen Kraftwerken bei Tag-Nacht-Schwankungen in der erneuerbaren Stromerzeugung reduzieren. Es ist jedoch wirtschaftlich nicht sinnvoll, ausreichend Stromspeicher für längere Dunkel- und Windflauten bereitzustellen. Daher werden auch zukünftig thermische Kraftwerke als Backup-Kapazität benötigt, um die Stromversorgung zu gewährleisten.

2.1 Erforderliche Kapazitäten thermischer Kraftwerke im Jahr 2045

Heute beträgt die installierte Leistung von thermischen Kraftwerken im Strommarkt etwa 75 GW [8]. Davon sind 29,3 GW Gaskraftwerke und 37,7 GW Stein- und Braunkohlekraftwerke. Der Ausstieg aus der Kohleverstromung bis zum Jahr 2038 würde somit zu einer deutlichen Reduktion der installierten Leistung führen, sofern die Kohlekraftwerke nicht durch Gaskraftwerke ersetzt werden. Der aus verschiedenen Studien für das Jahr 2045 prognostizierte Bedarf an thermischen Kraftwerken¹ ist in Abbildung 1 dargestellt.

Grundsätzlich unterscheiden sich die Studien darin, welcher Anteil der thermischen Kraftwerke mit Wasserstoff betrieben wird. Im „Netzentwicklungsplan Strom“ (NEP Strom) der Übertragungsnetzbetreiber [7], in den „Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems“ im Auftrag des BMWK [5], im Gutachten der Boston Consulting Group im Auftrag des Bundesverbandes der Deutschen Industrie [6] sowie in der Studie von Agora Energiewende „Klimaneutrales Deutschland 2045“ [3] wird nahezu ausschließlich Wasserstoff als Energieträger angenommen.

¹ Ohne Biomasse, Biogas, Abfall als Brennstoff, sofern aus den Studien erkennbar.

Die Studien „Neues Strommarktdesign“ [9], DENA-Leitstudie „Aufbruch Klimaneutralität“ [4] und „Zukunft des deutschen Strommarktes für 2040“ [2] gehen von einem Mix an Energieträgern aus – es kommen sowohl Wasserstoff, als auch synthetisches Methan² oder Erdgas mit CO₂-Abscheidung und Einspeicherung (CCS) zum Einsatz.

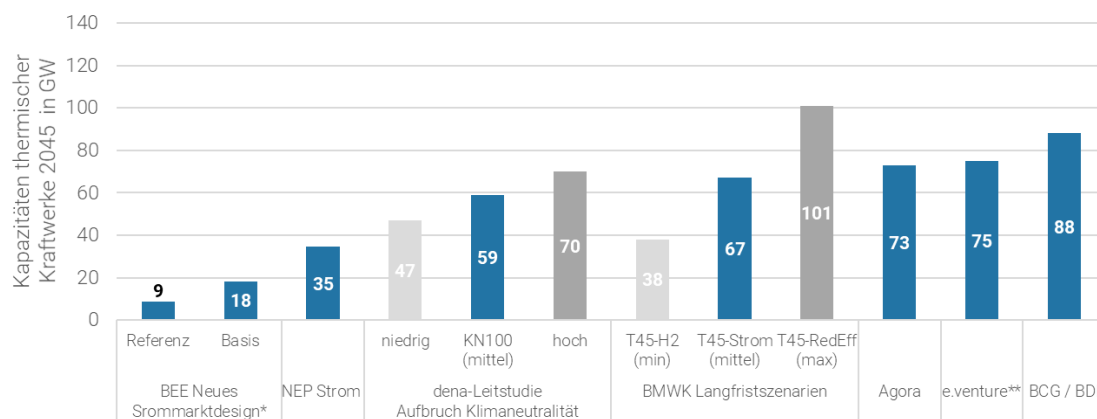


Abbildung 1: Erforderliche Kapazitäten thermischer Kraftwerke für 2045 in Deutschland, Daten: [2]–[7], [9] * für 2050, ** für 2040

Es wird deutlich, dass der Bedarf an thermischen Kraftwerken mit H₂ oder synthetischem Methan als Brennstoff für ein klimaneutrales Energiesystem mit Werten zwischen 9 und 88 GW noch sehr unterschiedlich eingeschätzt wird. Werden zu den 9 bzw. 18 GW aus [9] die Kraftwerke auf Basis von Bioenergie hinzugezählt, ergibt sich eine Kapazität von ca. 35 GW, wie im Netzentwicklungsplan Strom [7]. Es kann demnach festgehalten werden, dass eine installierte Leistung von 35 GW an flexiblen Kraftwerken in Zwei Studien als ausreichend betrachtet wird.

² Synthetisches Methan, oder auch synthetisches Erdgas (engl.: synthetic natural gas, SNG) ist Methan (der Hauptbestandteil von Erdgas), welches aus (erneuerbarem / grünem) Wasserstoff hergestellt wird.

2.2 Wesentliche Annahmen für die unterschiedlichen Ergebnisse der Studien

Die verschiedenen Kapazitäten der thermischen Kraftwerke in den Studien³ ergeben sich aufgrund unterschiedlicher Annahmen in allen Sektoren. Es gibt verschiedene Einflüsse, die sich auf die Kraftwerkskapazitäten auswirken. Grundsätzlich ist nicht klar abzugrenzen, welcher Einflussfaktor in welchem Modell die Kraftwerkskapazitäten wie stark beeinflusst. In jeder Studie wird ein Bündel von Annahmen getroffen. Allerdings lässt sich eine Tendenz ableiten, in welche Richtung die Annahmen die Kraftwerkskapazitäten beeinflussen.

Ein wichtiger Einflussfaktor ist, welche **anderen regelbaren Kraftwerkskapazitäten** angenommen werden. Die BEE-Studie „Neues Strommarktdesign“ [9] aus dem Jahr 2021 hat mit 9 bis 18 GW die niedrigsten Kapazitäten an H₂-Kraftwerken und Kraftwerken mit synthetischem Methan als Brennstoff, s. Abbildung 1. Jedoch werden große Kapazitäten an Bioenergie⁴ berücksichtigt (s. Tabelle 1). Dazu kommen vergleichsweise hohe Kapazitäten an Stromspeichern, die den Bedarf von Spitzenlastkraftwerken reduzieren. Insgesamt bewegt sich die notwendige Gesamtkapazität dieser regelbaren Kraftwerksleistung im Bereich von 90 GW im Basisszenario. Gleichzeitig zeigt die Studie, dass der Bedarf an regelbarer Kraftwerksleistung deutlich sinken kann. Dazu wird im Reformszenario ein ganzes Bündel an Annahmen getroffen. Zentral ist, dass Biomasseanlagen einen Anschluss ans Gasnetz haben und Blockheizkraftwerke (BHKW) damit flexibler für die Stromerzeugung eingesetzt werden können. Außerdem entfällt ein Must-Run-Betrieb für Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen (KWK) zur Eigenstromerzeugung. Zudem werden Stromspeicher für die PV-Eigenstromoptimierung angenommen, die bivalent betrieben werden, also mit dem Strommarkt interagieren können. Im Reformszenario sind etwa 75 GW regelbare Kraftwerksleistung inkl. Speicher notwendig. Davon sind lediglich 0,1 GW Wasserstoffgasturbinen und 8,7 GW KWK-Anlagen, die mit synthetischem Methan betrieben werden.

Ein zweiter wichtiger Faktor ist **Flexibilität**. Der Grundsatz ist einfach – je flexibler alle Sektoren auf ein fluktuierendes EE-Angebot reagieren können, desto weniger regelbare Kraftwerksleistung ist notwendig. Die BEE-Studie schafft dies durch abgesenkte Endverbraucherpreise sowie industrielles Demand-Side-Management. Außerdem können Batteriespei-

³ An dieser Stelle werden die Annahmen der Studie „BEE Neues Strommarktdesign“ sowie die „BMWK Langfristszenarien T45“ herangezogen, da diese sowohl vergleichende Szenarien haben, als auch die Kapazität an H₂-Kraftwerken im Szenario ermitteln. (Der Wert wird also nicht exogen vorgegeben.) Dadurch lassen sich aus diesen Studien besonders gut Rückschlüsse auf den Einfluss verschiedener Annahmen auf die H₂-Kraftwerkskapazität ziehen.

⁴ Biogas, feste Biomasse, Abfall, Gülle

cher sowie flexible Elektrolyseure zur Flexibilität des Energiesystems beitragen. Ein ausreichender Netzausbau ist eine wichtige Voraussetzung, um Flexibilität zu ermöglichen. Dies betrifft sowohl die Netze in Deutschland als auch die Kapazität von Interkonnektoren, also die Netzabschnitte, die den Stromaustausch mit europäischen Nachbarländern ermöglichen.

Die BMWK-Langfristszenarien von 2022 [5] verdeutlichen, dass außerdem die **Gesamtnachfrage nach Strom** in allen Sektoren Einfluss auf die installierte Menge von H₂-Kraftwerken hat. Insbesondere im Verkehrs- und Gebäudesektor werden in allen Szenarien starke Anstiege der Stromnachfrage erwartet. Im Sektor Gebäude gibt es in allen Szenarien einen großen Anstieg von Wärmepumpen. Im Szenario „T45-H₂“ wird ein Teil der Raumwärme durch die Nutzung von H₂ in Gaskesseln produziert. Dadurch ist die Stromnachfrage geringfügig kleiner als im „T45-Strom“ Szenario. Ähnlich verhält es sich im Verkehrssektor: In allen Szenarien ist der Anstieg an batterieelektrischen Fahrzeugen im Straßenverkehr hoch und sorgt entsprechend für einen starken Anstieg der Stromnachfrage im Verkehrssektor. Im „T45-H₂“ Szenario kommt – insbesondere im Schwerlastverkehr – auch Wasserstoff im Straßenverkehr zum Einsatz. Dadurch reduziert sich die Stromnachfrage geringfügig. Der größte Hebel der Stromnachfrage ist jedoch der Industriesektor. Je nachdem, ob dort der Fokus auf einer direkten Elektrifizierung liegt oder aber große Mengen an Wasserstoff zum Einsatz kommen, steigt die Stromnachfrage massiv an: von 267 TWh Strombedarf im H₂-Szenario auf 355 TWh im Strom-Szenario. Mit einer höheren Stromnachfrage bei etwa gleichbleibendem EE-Angebot bedeutet dies: Es werden mehr thermische Kraftwerke benötigt. Und im Umkehrschluss bedeutet dies auch - je geringer das **Stromangebot aus erneuerbaren** Quellen, desto größer die Stromlücke, die durch thermische Kraftwerke gedeckt werden muss.

Darüber hinaus verdeutlichen die Langfristszenarien noch einen weiteren Einflussfaktor, der sich auf die Stromnachfrage auswirkt. Im Szenario „T45-RedEff“ wurde untersucht, was es bedeutet, wenn die angenommenen Effizienzsteigerungen geringer ausfallen, als angenommen. Der Endenergiebedarf sinkt im Vergleich zu heute im „T45-Strom“-Szenario auf etwa 1.600 TWh im Jahr 2045. Im Szenario „T45-RedEff“ sind es hingegen knapp 1.900 TWh. Dieser zusätzliche Endenergiebedarf entsteht bei allen Energieträgern – besonders stark wächst jedoch die Stromnachfrage. Entsprechend steigt der Bedarf an H₂-Kraftwerken von 67 GW im „T45-Strom“ Szenario auf 101 GW im „T45-RedEff“ Szenario an.

Der Einfluss der einzelnen Faktoren auf die erforderliche H₂-Kraftwerksleistung ist in Abbildung 2 dargestellt.

Der Bedarf installierter H₂-Kraftwerksleistung ist

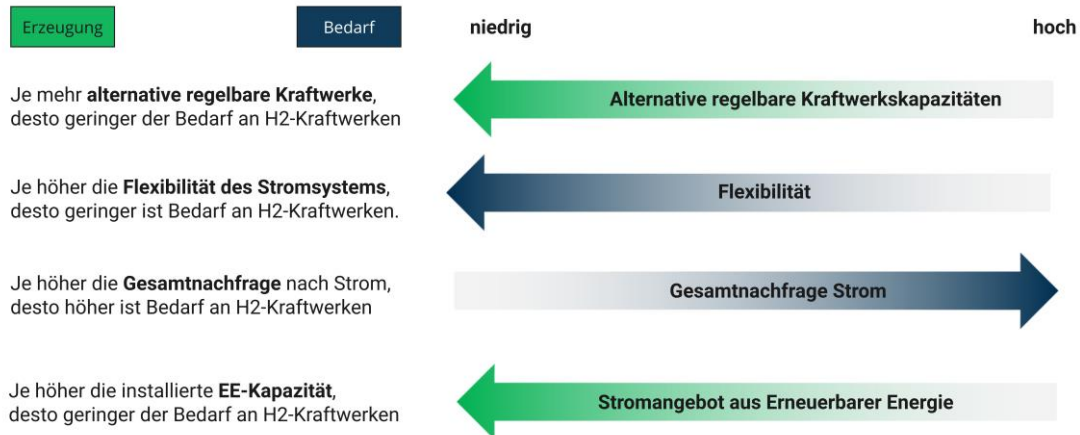


Abbildung 2: Einflussgrößen für H₂-Kraftwerkskapazitäten, eigene Darstellung

2.3 Kraftwerkstypen im zukünftigen Kraftwerkspark

Neben der Frage, wie hoch die erforderliche Kapazität von thermischen Kraftwerken zukünftig sein wird, stellt sich die Frage, welche Kraftwerkstypen voraussichtlich zum Einsatz kommen werden. Quantitative Angaben dazu konnten nur zwei Studien entnommen werden, s. Tabelle 1. Daraus und aus qualitativen Aussagen der anderen Studien werden folgende Punkte deutlich:

- **Als Gaskraftwerke werden hauptsächlich Gasturbinen (GT) berücksichtigt und weniger Gas- und Dampfturbinenkraftwerke (GuD).** Die Gasturbinen werden überwiegend mit Wasserstoff betrieben, s. Abschnitt 2.1. Das lässt sich durch niedrige Betriebsstunden und geringeren Investitionskosten im Vergleich zu GuD-Kraftwerken begründen. In [7], [9] werden nur Gasturbinenkraftwerke als Treibhausgasneutrale Kraftwerke berücksichtigt und in keiner der betrachteten Studien wird explizit ein Neubau von GuD-Kraftwerken beschrieben. Lediglich in [4] werden GuD-Anlagen und Gasturbinenkraftwerke vorgesehen, jedoch ohne Angabe zum Anteil der jeweiligen Kraftwerkstypen.
- **Die Studien gehen von einem sinkenden Anteil der Wärmeversorgung durch Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen aus.** Der Grund hierfür sind steigende Brennstoffpreise und die Durchsetzung alternativer Technologien, wie Wärmepumpen, E-Heizer, Geo- und Solarthermie. Momentan beträgt die installierte elektrische Leistung von KWK-Anlagen mit 49,4 GW ca. 66 Prozent der Kraftwerkskapazität. In [7], [9] ist die gesamte installierte Leistung von thermischen Kraftwerken niedriger, s. Tabelle 1.

Tabelle 1: Kraftwerkstypen im zukünftigen Kraftwerkspark

		GuD	GT	Sonst.	Kohle	Summe¹
Heute (2022) [8]	KWK	6,5	4,6	9,8 ²	28,5	75,2
	Nicht-KWK	5,4	2,8	8,4 ²	9,1	
BEE 2050 Basis [9]	KWK		8,6 ³	18,3 ⁴	-	36,6
	Nicht-KWK		9,7		-	
BEE 2050 Reform [9]	KWK		8,7 ³	26,7 ⁴	-	35,5
	Nicht-KWK		0,1		-	
NEP 2045 [7]	KWK		34,6 ⁵	2 ⁶	-	36,6
	Nicht-KWK				-	

¹ Die angegebene Summe ist mit höherer Genauigkeit berechnet, als die angegebenen Teilkapazitäten. Durch Rundungen auf eine Nachkommastelle kann die angegebene Summe ungleich der Summe der Teilkapazitäten sein.

² Sonstige: Erdgas sonstige Kraftwerke ca. zur Hälfte und zur anderen Hälfte: Mineralöl, Abfall, sonstige

³ keine Unterscheidung zwischen GuD-KWK und GT-KWK im Bericht, Nachfrage bei Projektleiterin der Studie ergab, dass die KWK-Anlagen als Gasturbinen mit Abhitzeessel modelliert wurden.

⁴ Sonstige: Bioenergie (Biogas, feste Biomasse, Abfall, Gülle)

⁵ keine Unterscheidung zwischen KWK-GT und nicht-KWK-GT im Bericht aufgeführt

⁶ Sonstige: Abfall

2.4 Die Rolle der Bestandskraftwerke im Jahr 2045

Der erforderliche Bedarf an flexiblen Kraftwerken (inkl. Bioenergie) für ein klimaneutrales Energiesystem im Jahr 2045 liegt laut der betrachteten Studien zwischen ca. 35 und 88 GW. Es stellt sich die Frage, welche Kapazität der heutigen Bestandskraftwerke im Jahr 2045 noch in Betrieb sein könnten. In Abbildung 3 ist die Kapazität der Bestandskraftwerke heutzutage (Stand 2022) dargestellt und deren Kapazität im Jahr 2045, für eine Lebensdauer der Kraftwerke von 50 und 30 Jahren. Es beantwortet die Frage, wie viel der heutigen Kraftwerkskapazität 2045 noch zur Verfügung steht, wenn keine Kraftwerke zugebaut oder modernisiert werden, und die bestehenden Kraftwerke nach einer typischen Lebensdauer von 30 bis 50 Jahren außer Betrieb genommen werden.

Selbst bei einer angesetzten Lebensdauer von 50 Jahren wird es nur noch 19,5 GW Kraftwerkskapazität geben und dies sind alles Gaskraftwerke. Die restlichen 55,8 GW würden bis 2045 außer Betrieb gehen, da sie dann älter als 22 Jahre sind. Bei Kohlekraftwerken kommt der Kohleausstieg bis spätestens 2038 hinzu. Aber es ist nicht nur der Ausstieg aus der Kohle, der zu einer Reduktion der Kraftwerkskapazität führt, sondern auch das Alter der Bestandskraftwerke. Die Gegenüberstellung der verbleibenden Kraftwerkskapazität von Bestandskraftwerken im Jahr 2045 mit dem Spektrum der flexiblen Kraftwerksleistung in den betrachteten Studien in Abbildung 3 zeigt, dass sich eine Lücke ergeben würde, wenn nicht neue Kraftwerke hinzukommen oder bestehende erneuert werden. Die sich ergebende Lücke beträgt demnach mindestens 15 GW, die Kapazität, die zurzeit in der Kraftwerksstrategie für H2-Ready Kraftwerke ausgeschrieben werden soll.

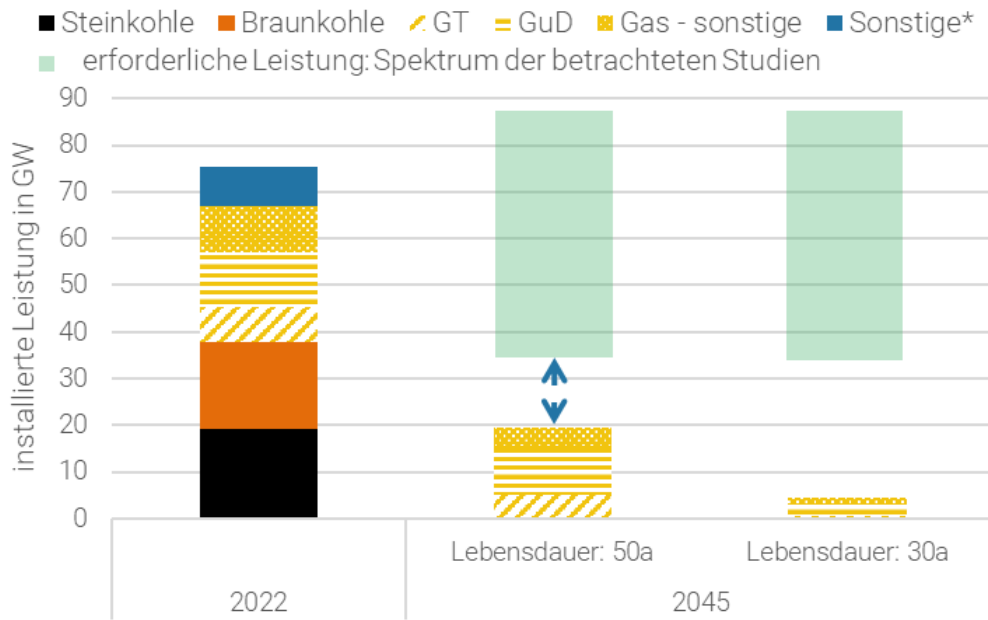


Abbildung 3: Bestandgaskraftwerke heute (2022) und im Jahr 2045 bei einer angenommenen Lebensdauer von 50 und 30 Jahren, Daten: [8]

3. Fazit und Ausblick

Die Betrachtung von sieben Studien zeigt, dass die Bedarfsprognosen für thermische Kraftwerke mit H₂ oder synthetischem Methan als Brennstoff in einem klimaneutralen Energiesystem stark variieren (9-88 GW). Den Bedarf genauer zu kennen ist jedoch wichtig, um die nötigen Investitionen und Förderungen daraus abzuleiten. Zudem verdeutlichen die Studien, dass die benötigten Kapazitäten von einer Vielzahl von Annahmen abhängen. Je größer das Stromangebot aus Erneuerbarer Energie, je mehr alternative regelbare Kraftwerkskapazitäten (z.B. Stromspeicher, Biogas- und Biomasseanlagen und Abfallverbrennung) und je höher die Flexibilität des Stromsystems selbst und der Nachfrage in den Sektoren, desto weniger H₂-Kraftwerke werden benötigt. Auf der anderen Seite führt eine höhere Stromnachfrage dazu, dass sich die Kapazitäten erhöhen.

Welche Kraftwerkstypen zum Einsatz kommen, wird davon beeinflusst, welche Aufgaben thermische Kraftwerke in der Zukunft erfüllen müssen. Die meisten Studien sehen primär Gasturbinen als H₂-Kraftwerke im klimaneutralen Energiesystem vor. Sie dienen als typische Spitzenlastkraftwerke und können auch bei wenigen Betriebsstunden im Jahr wirtschaftlich sein. Im Gegensatz dazu spielen Gas- und Dampfkraftwerke eine untergeordnete Rolle, da sie durch ihre hohen Investitionskosten bei niedrigen Betriebsstunden kaum wirtschaftlich zu betreiben sind. Die meisten Studien gehen davon aus, dass die Bedeutung von KWK-Anlagen in der Wärmeerzeugung zukünftig sinken wird und damit voraussichtlich auch die installierte elektrische Leistung und die Betriebsstunden von KWK-Anlagen.

Der Auf- und Umbau von H₂-Kraftwerkskapazitäten geht mit hohen Kosten einher (siehe [1]). Der Kurzbericht verdeutlicht zudem: Viele Gaskraftwerke in Deutschland haben ein vergleichsweise hohes Alter. Im Jahr 2045 könnten – unter optimistischen Annahmen und nach einer Umrüstung auf Wasserstoff – noch rund 20 GW der heutigen Kraftwerkskapazitäten in Betrieb sein. Das ist eine geringere Kapazität, als der angegebene Bedarf für flexible Kraftwerksleistung in allen Studien, der für Kraftwerke mit H₂, synthetischem Methan und Bioenergie mindestens 35 GW beträgt.

Für ein stabiles und 100 Prozent erneuerbares Energiesystem sind H₂-Kraftwerke ein wichtiger Baustein. Aufgrund der Stilllegung von Kohlekraftwerken und des oftmals hohen Alters von Gaskraftwerken ist klar: Neue H₂-Kraftwerke müssen gebaut werden und bestehende umgerüstet. Wie viel Kapazität benötigt wird, ist jedoch unsicher. Da die Verstromung von erneuerbarem Wasserstoff energetisch ineffizient ist und grüner Wasserstoff auch in anderen Sektoren für die Dekarbonisierung benötigt wird, sollten Maßnahmen ergriffen werden, um die H₂-Kraftwerkskapazitäten auf das Notwendigste zu beschränken. Dafür ist vor allem

der starke Zubau von Erneuerbarer Energien sowie das Anreizen von Flexibilitäten entscheidend. Darüber hinaus können Effizienz- und Suffizienzmaßnahmen in allen Sektoren zu einer Reduktion der Strom- und damit auch der H₂-Nachfrage im Stromsektor beitragen.

4. Quellen

- [1] A. Christidis, A. Wasike-Schalling, und J. Arriens, „Policy Briefing: H₂-Ready-Gaskraftwerke“, Reiner Lemoine Institut, Nov. 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://reiner-lemoine-institut.de/h2-ready-analyse-technischer-anforderungen-zur-umruestung-von-gas-und-gud-kraftwerken-2/>
- [2] e.venture, „Zukunft des deutschen Strommarktes 2040“, Apr. 2023. Zugegriffen: 5. Oktober 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://e-vc.org/wp-content/uploads/e.venture_Strommarkt-2040_Versand.pdf
- [3] Agora Energiewende, „Klimaneutrales Deutschland 2045“, Juni 2021. Zugegriffen: 5. Oktober 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.agora-energiewende.de/publikationen/klimaneutrales-deutschland-2045-1>
- [4] „Dena-Leitstudie Aufbruch Klimaneutralität“, 2021. Zugegriffen: 25. September 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2021/Abschlussbericht_dena-Leitstudie_Aufbruch_Klimaneutralitaet.pdf
- [5] Fraunhofer ISI, Consentec, IFEU, TU Berlin, und Energy and Resources, „Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland“, Nov. 2022. Zugegriffen: 5. Oktober 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://langfristszenarien.de/ener-tile-explorer-de/index.php>
- [6] Boston Consulting Group, „Klimapfade 2.0 - Ein Wirtschaftsprogramm für Klima und Zukunft“, Okt. 2021. Zugegriffen: 5. Oktober 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://bdi.eu/publikation/news/klimapfade-2-0-ein-wirtschaftsprogramm-fuer-klima-und-zukunft/>
- [7] 50 Herz Transmission GmbH, Amprion GmbH, TenneT TSO GmbH, und TransnetBW GmbH, „Netzentwicklungsplan Strom 2037 mit Ausblick 2045, Version 2023, zweiter Entwurf“, Juli 2023. Zugegriffen: 5. Oktober 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.netzentwicklungsplan.de/nep-aktuell/netzentwicklungsplan-20372045-2023>
- [8] Bundesnetzagentur, „Kraftwerksliste der Bundesnetzagentur“. Zugegriffen: 4. Juli 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Fachthemen/ElektrizitaetundGas/Versorgungssicherheit/Erzeugungskapazitaeten/Kraftwerksliste/start.html>
- [9] Fraunhofer ISE, Becker Büttner Held, und Fraunhofer IEE, „Neues Strommarktdesign für die Integration fluktuierender Erneuerbarer Energien“, Fraunhofer ISE, Becker Büttner Held (BBH), Fraunhofer IEE im Auftrag des BEE, Nov. 2021. Zugegriffen: 5. September 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://www.klimaneutrales-stromsystem.de/pdf/Strommarktdesignstudie_BEE_final_Stand_14_12_2021.pdf