

EIN ERNEUERBARES ENERGIESYSTEM

FÜR DEUTSCHLAND OHNE ATOMKRAFT

Studienvergleich zum Erreichen der Klimaneutralität bis 2045



AGENTUR FÜR
ERNEUERBARE
ENERGIEN

AUTOR

Magnus Doms
Redaktionsschluss: Juni 2022

HERAUSGEGEBEN VON

Agentur für Erneuerbare Energien e. V.
EUREF-Campus 16
10829 Berlin
Tel.: 030 200535 50
Fax: 030 200535 51
E-Mail: kontakt@unendlich-viel-energie.de

INHALT

Einleitung	4
Vorgehensweise	7
Energieverbrauch und Beitrag der Atomkraft in Deutschland: Status quo	8
Sinkender Endenergieverbrauch bis 2045	11
Elektrifizierung lässt Stromverbrauch steigen	12
Erneuerbare Energie zügig ausbauen	13
Ausgleichsoptionen für Wind und Sonne	14
Regelbare Kraftwerke	14
Kurzfristige Flexibilitäten	16
Stromerzeugung und Stromimporte	17
Importe vs. inländische Wasserstoffherzeugung	19
Fazit	20
Ausgewertete Literatur	22

EINLEITUNG

Der Angriffskrieg Russlands gegen die Ukraine hat in Deutschland eine vielzitierte „Zeitenwende“ eingeläutet – nicht nur in der Verteidigungs-, sondern auch in der Energiepolitik. Ist damit nun auch eine erneute „Atomwende“ gemeint? Nach der Reaktorkatastrophe in Fukushima im Jahr 2011 hatte der Bundestag mit großer Mehrheit den Ausstieg aus der Atomkraft bis Ende 2022 beschlossen. Mehr als zehn Jahre lang gab es zum Atomausstieg einen breiten Konsens zwischen Gesellschaft, Politik und Wirtschaft. Angesichts der potenziell drohenden Energieknappheit als Folge der Russlandsanktionen und Putins denkbarem „Zudrehen des Gashahns“ werden nun allerdings einzelne Rufe laut, die Atomenergie in Deutschland weiter zu nutzen. So soll die Atomkraft zur Versorgungssicherheit sowie zum Klimaschutz und zu niedrigen Strompreisen beitragen. Diese Versprechungen kann sie aber gar nicht erfüllen.

Zunächst einmal gehört Russland nicht nur bei Kohle, und Gas, sondern auch bei den Brennelementen für die deutschen Atomkraftwerke zu den Hauptlieferanten. Zur Verringerung der Abhängigkeit von Russland trägt die Atomkraft also keineswegs bei. **Die Ministerien für Wirtschaft und Klimaschutz sowie Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz** haben einer Laufzeitverlängerung in Deutschland bereits nach eingehender Prüfung eine Absage erteilt. Kurzfristig kann die Atomkraft keine Abhilfe gegen Engpässe in der Energieversorgung leisten. Dafür gibt es mehrere Gründe:

- Die drei verbliebenen Atomkraftwerke müssten Sicherheitsprüfungen durchlaufen, die schon seit drei Jahren überfällig sind. Diese Tests müssen eigentlich alle zehn Jahre stattfinden. Der letzte wäre turnusgemäß 2019 gewesen. Da die Anlagen eh Ende 2022 vom Netz gehen sollen, wurde eine Ausnahmeregelung erteilt. Unerkannte Defizite seien angesichts der überfälligen Sicherheitschecks nicht auszuschließen.
- Die Brennelemente sind fast aufgebraucht. Die Beschaffung neuer Brennelemente dauert mindestens zwölf bis 15 Monaten, normalerweise bis zu zwei Jahren. Die drei Kraftwerke würden also frühestens im Herbst 2023 wieder voll in Betrieb gehen können.
- Ein Weiterbetrieb würde nur im sogenannten „Streckbetrieb“ funktionieren, mit dem die Kraftwerke zwar länger, dafür aber mit geringerer Leistung laufen könnten. D.h. die Stromerzeugung müsste jetzt gedrosselt werden und der dadurch fehlende Strom aus Atomkraftwerken müsste durch mehr Kohlestrom gedeckt werden.
- Für den Weiterbetrieb fehlt Personal. Neues Personal müsste erst ausgebildet werden. Zudem fehlen Ersatzteile, da die Bevorratung im Hinblick auf den beschlossenen Atomausstieg abgebaut wurde.
- Für den anfallenden Atommüll müssten die Betreiber zusätzlich 2,5 Milliarden Euro als Deckungsvorsorge aufbringen. Die Atomkonzerne lehnen einen Weiterbetrieb deshalb ab.

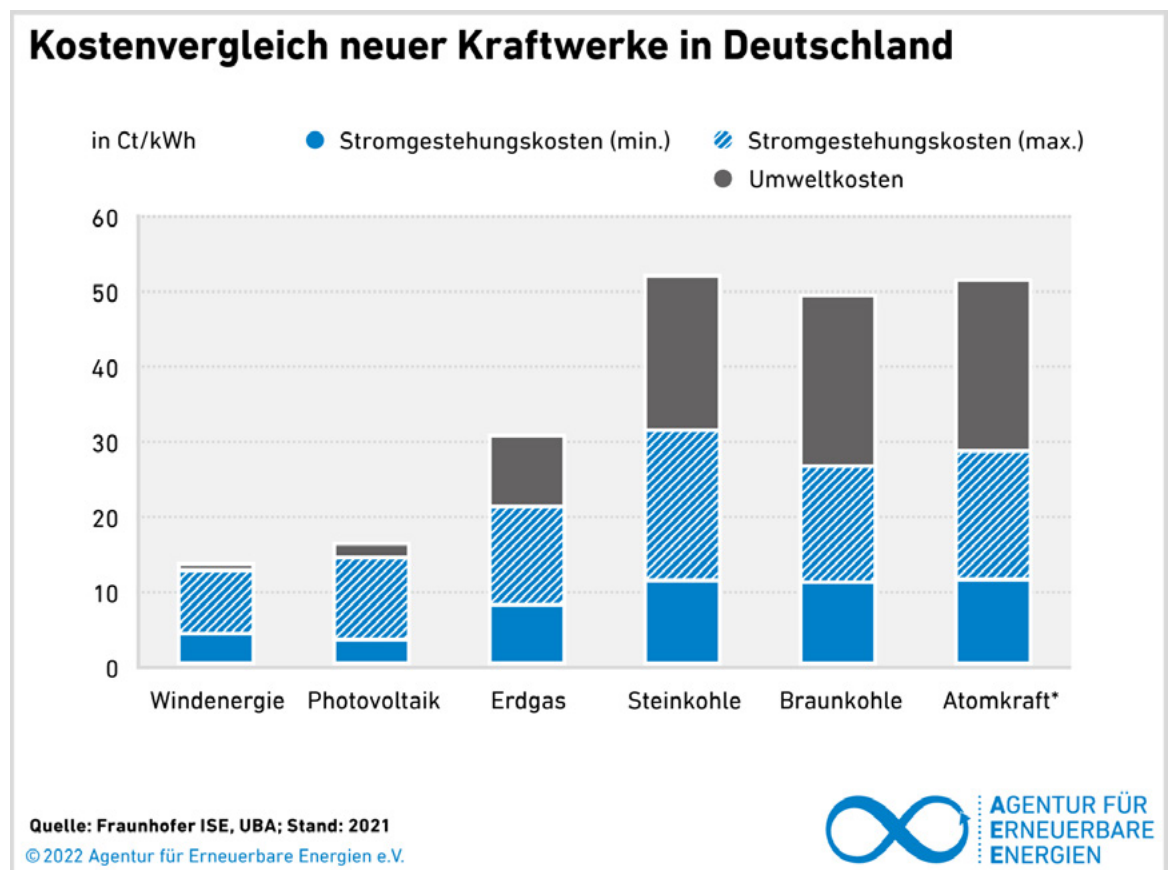
Als Argument pro Laufzeitverlängerung für die bestehenden Atomkraftwerke wird oft das Versprechen günstiger Strompreise aufgeführt. Dass Atomkraft nicht für niedrige Strompreise sorgt, zeigt aber ein Blick nach Frankreich. Seit Anfang des Jahres 2021 zeigen die Großhandelspreise am Strommarkt in ganz Europa steil nach oben. Auch in Ländern, die weiter auf Atomkraft setzen, sind die Strompreise stark gestiegen. So zahlten die Franzosen Anfang April 2022 am Spotmarkt die höchsten Preise

in ganz Europa, ein Vielfaches mehr als die Deutschen. Im Tagesmittel lag er in Deutschland laut **Bundesverband Erneuerbare Energie (BEE)** bei 7,5 Ct/kWh, in Frankreich bei 55 Ct/kWh. Woran liegen diese Preisexplosionen in Frankreich? Diese Frage ist relativ einfach zu beantworten. Die Stromnachfrage ist größer als das Angebot. Mehr als die Hälfte der französischen Reaktoren (29 von 56) stehen still. Dadurch sind statt 64 GW Leistung nur 30 GW am Netz. Sie müssen wegen Korrosions- und Abnutzungsschäden repariert und gewartet werden – darunter nicht nur die älteren, sondern auch jüngere Meiler. Die Stromnachfrage kann durch die unter Rost und Alterserscheinungen leidende Atomkraft oft nicht mehr gedeckt werden.

Neben der aktuellen Energiekrise werden als weitere Argumente für die weitere Nutzung der Atomkraft in Deutschland die im Mai 2021 verschärften Klimaschutzziele (Treibhausgasneutralität bis 2045 statt 2050) und der steigende Zeitdruck bei der Senkung der Treibhausgasemissionen angeführt. Denn im Betrieb erzeugen Atomkraftwerke quasi keine Emissionen. Die EU-Kommission wollte die Atomkraft in der EU-Taxonomie deshalb sogar als nachhaltig einstufen. Dadurch sollen Investitionsanreize in Atomkraftwerke als vermeintliche Klimaschutztechnologie gesetzt werden. Sowohl der Wirtschafts- als auch der Umweltausschuss im EU-Parlament hat den Vorschlag aber parteiübergreifend abgelehnt. Denn die Atomkraft ist keineswegs emissionsfrei. Beim Uranabbau, der Herstellung der Brennelemente, beim aufwändigen Kraftwerksbau und -rückbau sowie schließlich bei der Endlagerung entstehen durchaus erhebliche Mengen an Treibhausgasen.¹ Hinzu kommt natürlich die ungeklärte Endlagerfrage und die Gefahren durch radioaktive Strahlung.

Die offensichtlichen Risiken der Atomkraft – von einfachen Störfällen bis zum GAU – beiseite: Es gibt eine Reihe von rein energiewirtschaftlichen Gründen, warum die Atomkraft trotz der „Zeitenwende“ in der Energiewende keinen Platz hat. Angesichts des geringen Anteils der Atomkraft an der Energieversorgung müssten neue Atomkraftwerke gebaut werden, um wirklich einen nennenswerten Klimaschutzbeitrag zu leisten. Der Bau neuer Kraftwerke wäre aber zu teuer und zu langsam. Die Bauzeiten betragen oft bis zu 20 Jahre, manchmal sogar noch länger. Wenn Deutschland und Europa bis 2045 Klimaneutralität erreichen wollen, kann die Atomkraft also schon aus zeitlichen Gründen keine Rolle spielen. Erneuerbare Energien sind demgegenüber schneller verfügbar, kostengünstiger und ungefährlich. Das zeigen u.a. aktuelle Analysen der **Scientists for Future** und des **Forums Ökologisch-Soziale Marktwirtschaft**. Die Studienlage ist klar: Die Transformation des Energiesystems geht in der erforderlichen Geschwindigkeit nur mit Erneuerbaren Energien. Atomkraft blockiert die Energiewende sogar. Die enormen Ausgaben, die für den Bau neuer AKW notwendig wären, würden am anderen Ende beim Ausbau nachhaltiger Klimaschutztechnologien wie Erneuerbaren Energien, Speichern, Wasserstoff und Energieeffizienz fehlen. Da jeder Euro nur einmal ausgegeben werden kann, fehlt das Geld also für eine echte Energiewende. Das Atomkraftwerk Hinkley Point in Großbritannien steht sinnbildlich für die Probleme beim Bau neuer AKW. Der Bau des neuen Reaktorblocks C verzögert sich nicht nur um Jahre, sondern wird mittlerweile auch doppelt so teuer wie ursprünglich geplant. Ohne Quersubventionen aus der Forschungsförderung wird deutlich, wie teuer Atomstrom ist. Die Betreiber von Hinkley Point C erhalten eine Einspeisevergütung von rund 11 Cent pro Kilowattstunde plus Inflationsausgleich – und das über 35 Jahre und nicht über 20 Jahre wie die Erneuerbaren Energien in Deutschland. Die Betreiber von Windenergieanlagen und Solarparks bekommen deutlich weniger. Wie viel günstiger die Erneuerbaren Energien sind, zeigt die folgende Grafik:

¹ Die THG-Bilanz über den gesamten Lebenszyklus untersuchten u.a. der **IPCC**, das **Öko-Institut** und ein aktueller Diskussionsbeitrag der **Scientists for Future**.



Der Weiterbetrieb von Atomkraftwerken (oder gar der Bau neuer Kraftwerke) würde zudem dazu führen, dass Erneuerbare-Energien-Anlagen öfter abgeregelt werden müssten und so erhebliche Ökostrommengen verloren gingen. Durch ihre unflexible Fahrweise blockieren Atomkraftwerke die Einspeisung von Ökostrom – und das obwohl Erneuerbare Energien eigentlich Einspeisevorrang genießen. AKW werden in der Praxis laut dem **Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB)** aus technischen Gründen nur auf maximal 50–60 Prozent der installierten Leistung gedrosselt. Denn jedes Hoch- und Herunterfahren führt aufgrund der Temperatur- und Druckwechsel zu Materialermüdung. Außerdem haben Atomkraftwerke relativ hohe Fixkosten, weswegen es wirtschaftlich attraktiver ist, die Kraftwerke möglichst viel laufen zu lassen. So bleibt ein Mindestsockel immer am Netz, auch wenn die Einspeisung aus Windenergie und Photovoltaik hoch ist. Eine **Studie von Energy Brainpool im Auftrag von Green Planet Energy** zeigt, dass sich sogar eine Laufzeitverlängerung der Atomkraftwerke in Frankreich auf die Abregelung Erneuerbarer-Energien-Anlagen in Deutschland auswirkt. Die abgeregelt Strommenge würde um zwölf Prozent steigen, was pro Jahr dem Stromverbrauch von mehr als 600.000 Durchschnittshaushalten entspricht. Im Fazit heißt es: „Die technischen Eigenschaften bezüglich ihrer Flexibilität machen die Technologien Solar- und Windenergie mit ihrer Wetterabhängigkeit und Volatilität auf der einen Seite und Kernkraftwerke mit sehr gering ausgeprägten Möglichkeiten zur Lastreduktion auf der anderen Seite weitgehend inkompatibel.“

Wie sieht also eine klimaneutrale Energieversorgung der Zukunft ohne Atomkraft aus? Wie wird die Versorgungssicherheit sichergestellt? Diesen Fragestellungen haben sich bereits eine Reihe von Organisationen und Thinktanks in Zusammenarbeit mit Forschungsinstituten gestellt. Die Auftraggeber der Studien decken ein breites politisches und inhaltliches Spektrum ab: Vom Bundesverband der Deutschen Industrie (BDI) und den Übertragungsnetzbetreibern über das deutsche Wirtschaftsministerium

* Die Abschätzung der Umweltkosten der Atomkraft ist schwierig, da die Kosten nuklearer Störfälle und der Umgang mit nuklearen Abfällen schwierig zu quantifizieren sind. Das Umweltbundesamt empfiehlt deshalb behelfsmäßig (analog zur Methodenkonvention) die Umweltkosten der Technologie mit den höchsten Werten, in diesem Fall also Braunkohle, zu verwenden.

(BMWK) und das Forschungsministerium (BMBF) hin zu Think Tanks und Verbänden wie Agora Energiewende, die Deutsche Energieagentur (dena) und den Bundesverband Erneuerbare Energie (BEE). Die folgende Metaanalyse beschäftigt sich mit den Kernaussagen zentraler Szenarien, wie Energiewende und Klimaschutz auch ohne Atomkraft funktionieren. Ziel ist es zu zeigen, dass bereits eine Vielzahl an Studien untersucht haben, wie eine Vollversorgung aus Erneuerbaren Energien aussehen kann und wie auch der steigende Stromverbrauch durch Sektorenkopplungstechnologien wie Wärmepumpe und Elektromobilität klimaneutral gedeckt werden kann.

VORGEHENSWEISE

In dieser Metaanalyse werden die wichtigsten Ergebnisse und Kernaussagen der bekanntesten und am meisten zitierten Studien zu Energiewende und Klimaschutz in Deutschland verglichen. Hierzu gehören die **Langfristszenarien des BMWK**, der **Szenariorahmen zum Netzentwicklungsplan der Übertragungsnetzbetreiber (ÜNB)**, der **Ariadne-Report** aus den BMBF-geförderten Kopernikus-Projekten, die **BDI-Klimapfade 2.0**, die **dena-Leitstudie Aufbruch Klimaneutralität**, die **BEE-Studie Neues Strommarktdesign** und die Studie **„Klimaneutrales Deutschland 2045“** der Agora Energiewende. Der Fokus liegt dabei darauf, wie der Energiemix in den Jahren 2045 bzw. 2050 aussehen kann und wie Versorgungssicherheit durch Flexibilitäten und regelbare Kraftwerke auch ohne Atom und fossile Energieträger gewährleistet werden kann. Außerdem wird im Hinblick auf die Aggression Russlands gegen die Ukraine und auf die hohe Energieabhängigkeit Deutschlands von Russland betrachtet, wie die Energieimporte in Zukunft aussehen können. Studien, die eine Vollversorgung aus Erneuerbaren Energien untersuchen, dabei aber keine genauen Zeiträume angeben, werden hier aufgrund der eingeschränkten Vergleichbarkeit nicht berücksichtigt.²

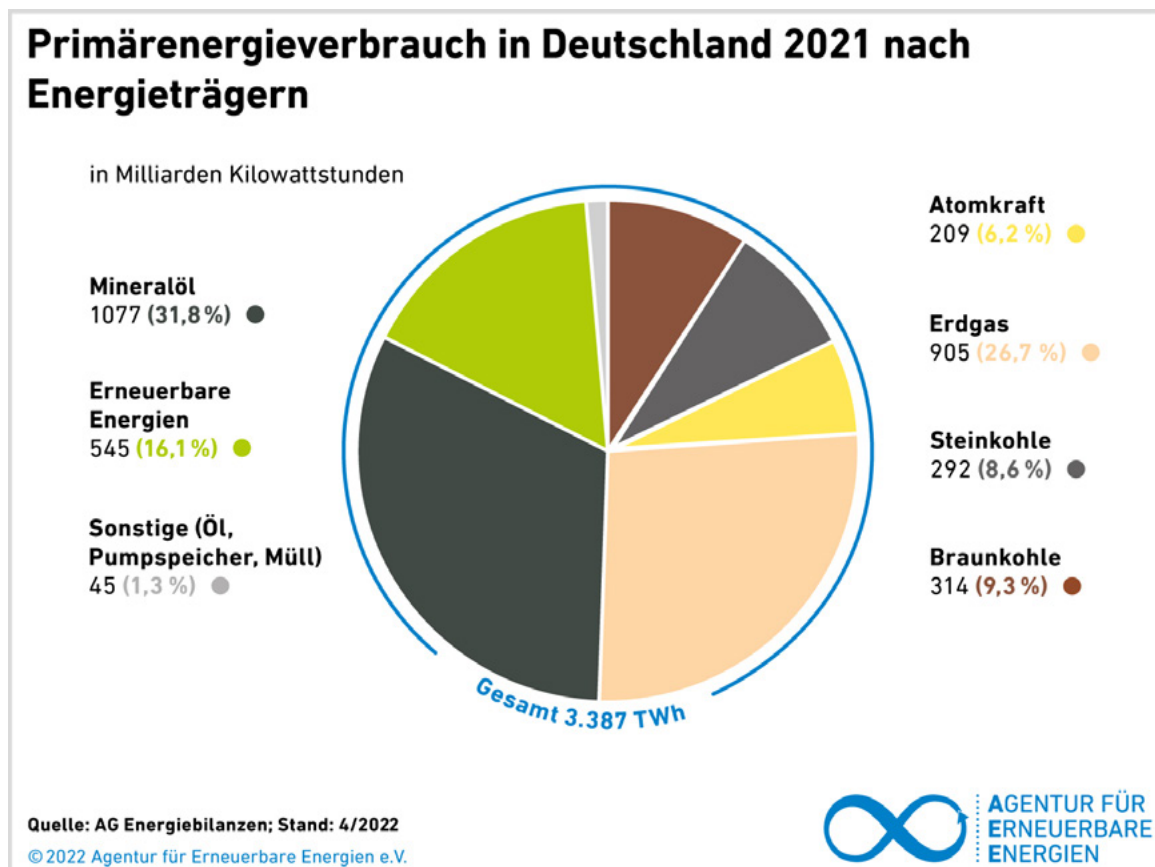
Alle betrachteten Studien sind zwar noch relativ aktuell und nicht älter als aus dem Jahr 2021, trotzdem müssen gewisse Aspekte mittlerweile angesichts der aktuellen politischen Entwicklungen in neuem Licht betrachtet werden. Aktuelle Analysen zeigen, dass der Einsatz von Erdgas vorübergehend geringer ausfallen wird, als bisher angenommen. Die Bundesregierung will bei der Stromerzeugung für einen begrenzten Zeitraum Erdgas durch Kohle ersetzen, um insgesamt Erdgas einzusparen und um die Wärmeversorgung im Winter sicherzustellen. Diese vorübergehende Verschiebung im Stromsektor von Erdgas zu Kohle ist in den Studien noch nicht berücksichtigt. Trotzdem zeigt der Studienvergleich, dass die Frage nicht lautet, ob Atomausstieg und Klimaschutz parallel möglich sind, sondern nur wie. Verschiedene Wege führen in die Klimaneutralität 2045.

Die Studienergebnisse werden in Grafiken oder in tabellarischer Form gegenübergestellt. Klimaneutralität wird in allen Studien (bis auf zwei) im Jahr 2045 erreicht. Nur die Langfristszenarien des BMWK und das neue Strommarktdesign des BEE beziehen sich noch auf die alte Zielmarke 2050. Diese beiden Studien sind aber dennoch vergleichbar, nur die Transformationsschritte müssten etwas schneller erfolgen.

² So z.B. DIW: 100 % erneuerbare Energie für Deutschland unter besonderer Berücksichtigung von Dezentralität und räumlicher Verbrauchsnähe – Potenziale, Szenarien und Auswirkungen auf die Netzinfrastrukturen. April 2021.

ENERGIEVERBRAUCH UND BEITRAG DER ATOMKRAFT IN DEUTSCHLAND: STATUS QUO

Im Jahr 2021 betrug der Primärenergieverbrauch (PEV) rund 3.387 Milliarden Kilowattstunden (Mrd. kWh). Die Atomkraft trug nur sechs Prozent zur Energieversorgung bei. Den größten Anteil hatte Mineralöl – worunter z. B. Benzin, Diesel und Heizöl fallen – gefolgt von Erdgas und den Erneuerbaren Energien. Der Primärenergiebedarf wird heute noch zu ca. 70 Prozent über Importe gedeckt.



Der PEV zeigt allerdings ein etwas verzerrtes Bild. Er beinhaltet im Gegensatz zum Endenergieverbrauch (EEV) auch die Energieverluste bei der Umwandlung der Energieträger in Strom, Wärme und Bewegungsenergie. Der PEV wird über das Wirkungsgradprinzip ermittelt. Für Strom aus Windenergie, Wasserkraft und Photovoltaik wird – aufgrund der verlustfreien Gewinnung – ein Wirkungsgrad von 100 Prozent unterstellt. Fossile und biogene Brennstoffe werden mit dem Heizwert multipliziert. Atomstrom geht aufgrund der Abwärmeverluste mit dem Faktor drei in den PEV ein. Der Atomkraft-Anteil ist also bei der Endenergie, die in den Endanwendungen tatsächlich genutzt wird, deutlich geringer – während der Erneuerbaren-Anteil eigentlich höher ist.

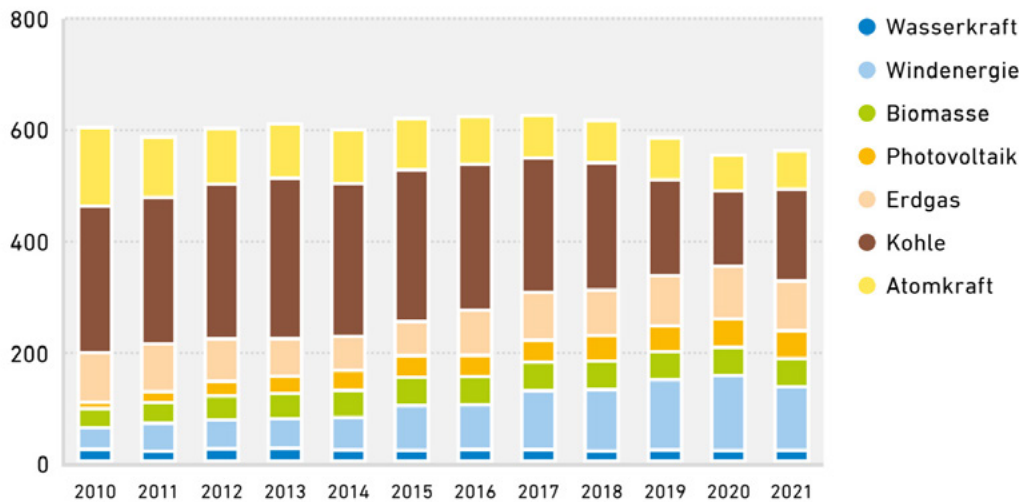
Ein Blick auf die Entwicklung der Stromerzeugung in Deutschland verdeutlicht die schwindende Bedeutung der Atomkraft. Während sich die Stromproduktion aus Erneuerbaren Energien seit 2011 fast verdoppelt hat, von 124 Mrd. kWh auf 234 Mrd. kWh, ist die Atomstromerzeugung von 108 Mrd. kWh auf 69 Mrd. kWh zurückgegangen.

Auch nach Abschaltung der letzten Atomkraftwerke Ende 2022 bleibt die Versorgungssicherheit gewährleistet. Das zeigt eine [aktuelle Analyse des Deutschen Instituts für Wirtschaftsforschung \(DIW\)](#).

Erneuerbare Energien ersetzen sukzessive Atom- und fossilen Strom in Deutschland

Die Stromerzeugung aus Erneuerbaren Energien hat sich seit 2011 fast verdoppelt auf 234 Milliarden Kilowattstunden.

in Milliarden Kilowattstunden



Quelle: AGEE Stat, BMWK, Stand: 3/2022

© 2022 Agentur für Erneuerbare Energien e.V.



Sie geht aus gegebenem Anlass der Frage nach, ob Deutschland gleichzeitig auf Atomstrom und auf russische Energielieferungen verzichten kann. Nach dem Angriff Russlands auf die Ukraine verhängte die Europäische Union Sanktionsmaßnahmen gegen Russland. Ziel ist es nun, so schnell wie möglich unabhängig von russischen Gas-, Öl- und Kohleimporten zu werden. Die Autoren kommen zu dem Ergebnis, dass die Energieversorgung in Deutschland gesichert ist, selbst wenn die Kohle- und Gaslieferungen aus Russland komplett eingestellt werden würden. Kohlekraftwerke könnten kurzfristig russisches Erdgas ersetzen. Die Kohleverstromung würde dadurch von 165 Mrd. kWh in 2021 auf 170–190 Mrd. kWh im Jahr 2023 ansteigen. Durch den Ausbau der Erneuerbaren Energien würde sie aber ab 2024 schon wieder sinken. Steinkohle lässt sich im Gegensatz zu Erdgas relativ problemlos aus anderen Ländern beschaffen. Bisher bezieht Deutschland seine Steinkohle noch zu 60 Prozent aus Russland (18 Millionen Tonnen). Es gäbe ein ausreichendes Kohleangebot auf den Weltmärkten, durch das Importe aus Russland relativ einfach ersetzt werden könnten. 2022 befinden sich noch 17 Gigawatt (GW) Erzeugungskapazitäten aus Braunkohlekraftwerken am Netz sowie 15 GW aus Steinkohlekraftwerken. Für den kurzfristig steigenden Braunkohleeinsatz müssten keine weiteren Dörfer abgebaggert werden. Auch neue Steinkohlekraftwerke müssen nicht gebaut werden und es müssen keine stillgelegten Kraftwerke reaktiviert werden, um russisches Erdgas zu ersetzen. Damit die Kohleverstromung schnell wieder zurückgefahren werden kann, müsste der Ausbau der Erneuerbaren Energien aber – wie im Osterpaket der Bundesregierung vorgesehen – deutlich beschleunigt werden. So können auch die letzten drei Atomkraftwerke wie geplant Ende 2022 vom Netz gehen. Auch der Kohleausstieg kann bis 2030 erfolgen.

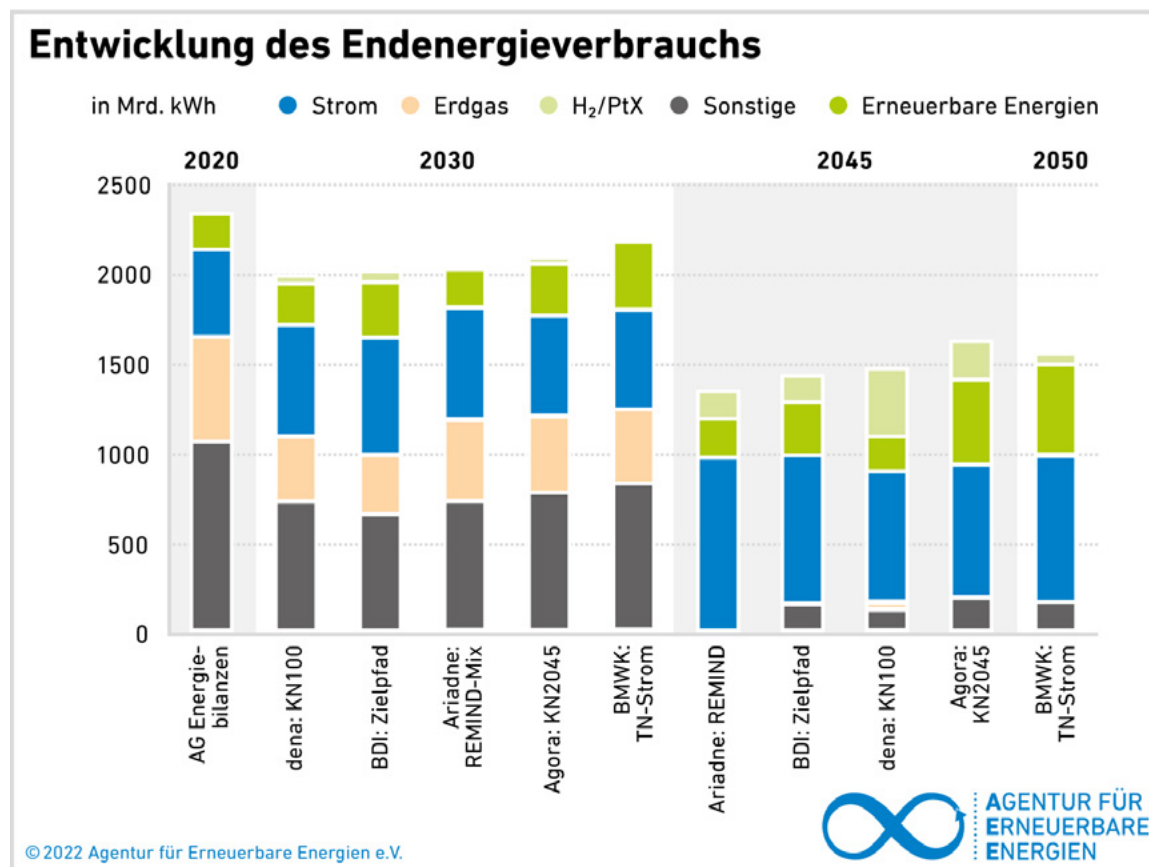
Um Erdgas einzusparen und vorübergehend Erdgas im Stromsektor durch Kohle zu ersetzen, hat die Bundesregierung im Juni 2022 den **Entwurf des „Ersatzkraftwerkebereithaltungsgesetz“** vorgelegt. Ziel des Gesetzes ist es weniger Erdgas zur Stromerzeugung einzusetzen, wenn Gas knapp wird. Für die Gasverstromung sollen in Mangelsituationen Pönale gezahlt werden. Dadurch sollen in der Merit-Order mehr Kohle- statt Gaskraftwerke zum Zug kommen. Damit genügend Kohlekraftwerkskapazitäten zur Verfügung stehen, sollen Anlagen aus der Netzreserve bereitgestellt werden. Zudem sollen Kraftwerke, die 2022 oder 2023 im Rahmen des Kohleausstiegs aus dem Markt genommen worden wären, weiter eingesetzt werden. Die Regelung soll bis März 2024 gelten. Der **BDEW** betont hierzu: „Klar ist, der kurzfristige Einsatz von Kohlekraftwerken, die bereits aus dem Markt hätten ausscheiden sollen, kann nur eine Übergangslösung sein. Ziel ist es, insgesamt unabhängig von fossilen Energieträgern zu werden, um die Klimaziele zu erreichen. Daher müssen wir insbesondere beim Ausbau der Erneuerbaren Energien einen Zahn zulegen und die Erzeugung und Beschaffung klimaneutraler Gase wie Wasserstoff oder Biomethan voranbringen.“

Agora Energiewende zeigt in einer Studie, dass Deutschland den Gasverbrauch bis 2027 um ein Fünftel senken könnte. Kurzfristig ließe sich die Gasnachfrage durch Energiesparmaßnahmen und Erneuerbare Energien um 160 bis 250 Mrd. kWh reduzieren. Neben der Einsparung von Erdgas gehört zur Strategie der Bundesregierung auch, die Importe auf breitere Füße zu stellen. Deutschland bezieht derzeit sein Erdgas zu 55 Prozent aus Russland. Um die Gasversorgung durch Importe zu diversifizieren, setzt die Bundesregierung für eine Übergangszeit auch auf Flüssiggas (LNG). Dadurch kann Deutschland Erdgas auch aus Ländern importieren, die keinen Zugang zum deutschen Gasnetz haben (z.B. USA, Katar oder Algerien). In Brunsbüttel und in Wilhelmshafen sollen zwei neue LNG-Terminals entstehen, die etwa 20 Prozent des deutschen Gasbedarfs decken können. Die Gasinfrastruktur soll dabei so ausgebaut werden, dass sie sukzessive auf erneuerbare Gase wie Wasserstoff umgestellt werden kann.

SINKENDER ENDEENERGIEVERBRAUCH BIS 2045

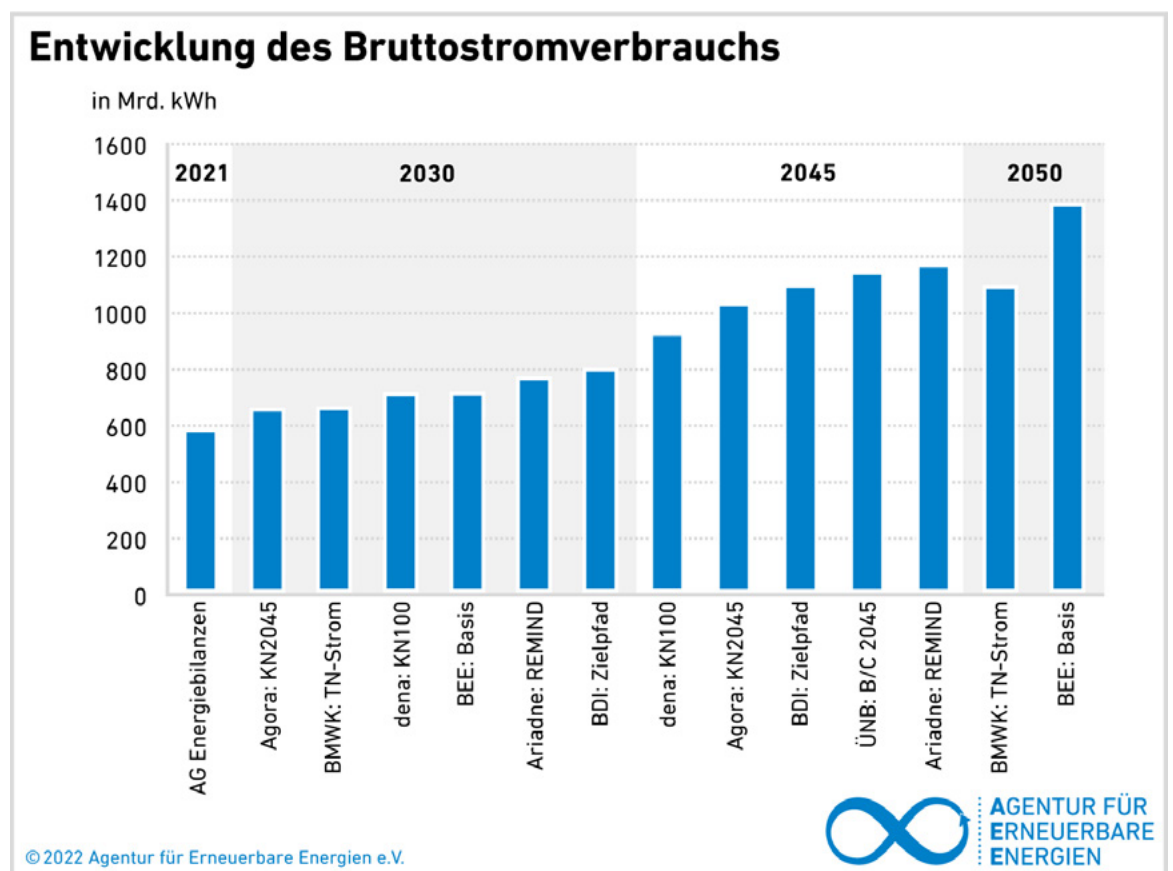
Im Jahr 2020 betrug der Endenergieverbrauch (EEV) 2.317 Mrd. kWh. Die weitere Entwicklung des EEV in Deutschland wird in den betrachteten Szenarien zwar in Höhe und Zusammensetzung unterschiedlich eingeschätzt, einig sind sie sich allerdings darin, dass der EEV bis 2045 sinken wird – auf 1.390 Mrd. kWh (Ariadne) bis 1.598 Mrd. kWh (Agora). Dabei macht sich neben Energieeinsparungen (z. B. durch Gebäudesanierung) v.a. die höhere Effizienz elektrischer Endanwendungen, wie Elektromobilität oder Wärmepumpen, die ineffiziente(re) fossile Technologien ersetzen, bemerkbar. So verbrauchen E-Autos viel weniger Energie als konventionelle Verbrenner. Elektrische Antriebe haben einen Wirkungsgrad von 90 Prozent, Verbrenner nur von 20 bis 40 Prozent.

Während Strom im Jahr 2020 nur 21 Prozent des EEV ausmachte, wird er im Jahr 2045 mit 46 Prozent bis 69 Prozent zur wichtigsten Größe. So fällt beim Studienvergleich auf, dass in den beiden Szenarien mit dem geringsten EEV auch der Stromanteil am höchsten ist. In den Szenarien von Agora und dena ist der EEV etwas höher. Es wird weniger Strom eingesetzt, dafür mehr Wasserstoff.



ELEKTRIFIZIERUNG LÄSST STROMVERBRAUCH STEIGEN

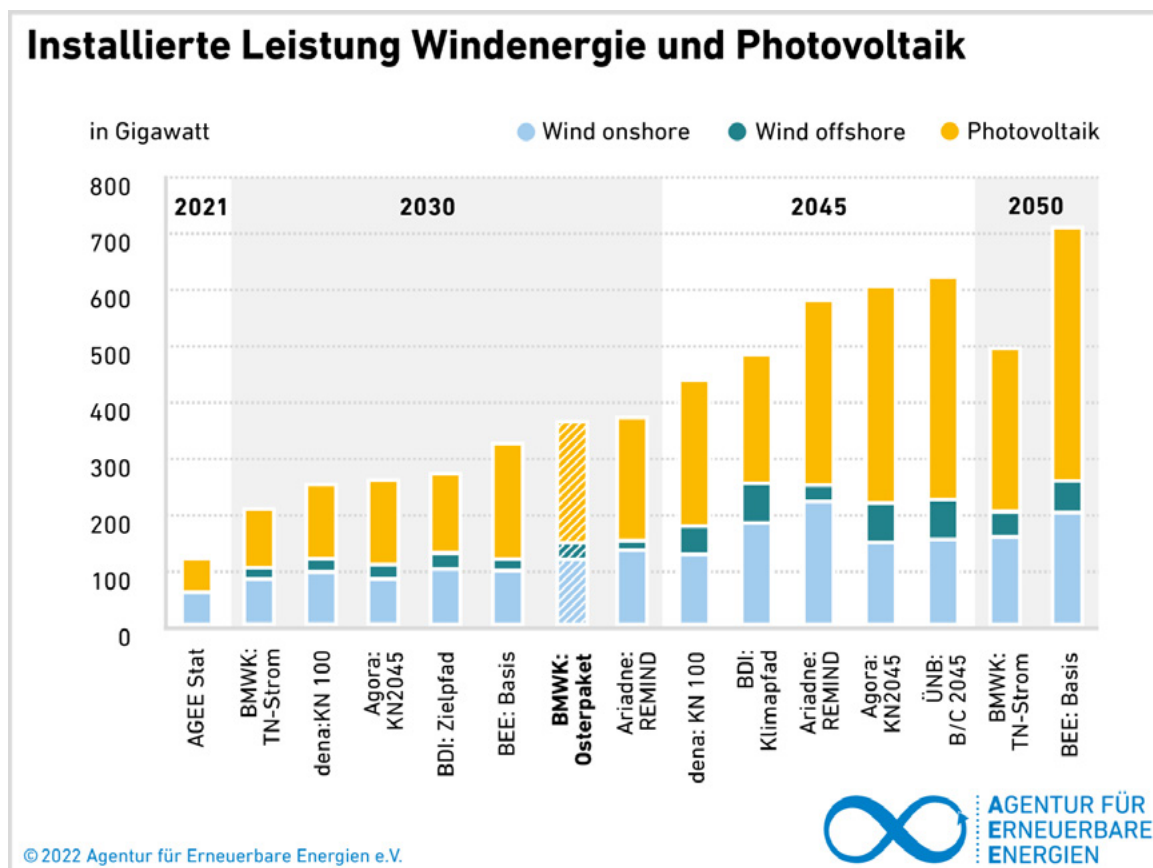
Die Bandbreite der Szenarien zur Entwicklung des Stromverbrauchs ist relativ groß. Hintergrund sind unterschiedliche Annahmen: Wie ambitioniert werden Energieeffizienzmaßnahmen umgesetzt? Wie stark werden die Sektoren Verkehr, Wärme und Industrie elektrifiziert? Und vor allem: Wie stark setzt Deutschland auf den Import synthetischer Energieträger? Die Annahmen zur inländischen Erzeugung synthetischer Brennstoffe wie Wasserstoff und Methan lassen den Strombedarf in den Szenarien bis 2045 bzw. 2050 sehr stark wachsen. Die BEE-Studie spielt eine Sonderrolle, da Deutschland darin den Wasserstoffbedarf komplett aus heimischer Erzeugung deckt. Im Szenario der dena werden dagegen Power-to-Gas- (PtG) oder Power-to-Liquid-Produkte größtenteils importiert. Eine gewisse Menge heimischer Wasserstoffherzeugung ist in allen Szenarien enthalten. Schließlich dient die Elektrolyse der Flexibilisierung des Energiesystems und somit auch der Integration der fluktuierenden Stromerzeugung aus Wind- und Sonnenenergie.



ERNEUERBARE ENERGIEN ZÜGIG AUSBAUEN

Für eine emissionsfreie Energieversorgung bis 2045 müssen die Erneuerbaren Energien, v.a. die kostengünstigen und potenzialreichen Technologien Windenergie und Photovoltaik, dynamisch ausgebaut werden. Die Entwicklung der dargebotsabhängigen Energiequellen und die Entwicklung der regelbaren Kraftwerkskapazitäten werden im Folgenden separat abgebildet.

Bis 2030 muss die installierte Leistung aus Wind und Solar von 123 GW im Jahr 2021 mindestens verdoppelt werden. In den Szenarien liegen die Kapazitäten bei 246 GW (dena: KN 100) bis 365 (Ariadne: REMIND) GW. Die 204 GW in den Langfristszenarien des BMWK basieren noch auf dem zuvor geltenden Klimaschutzziel, Treibhausgasneutralität bis 2050 zu erreichen, bevor es im Jahr 2021 auf 2045 verkürzt wurde. Deshalb ist auch hier ein steilerer Ausbaupfad notwendig. Die Ausbauziele im Osterpaket der Bundesregierung (360 GW) übertreffen sogar die Ausbaupfade in fast allen hier verglichenen Szenarien und machen damit – sofern sie erreicht werden – die Einhaltung der Klimaschutzziele ganz ohne eine Verlängerung der Laufzeiten von Atom- und Kohlekraftwerken noch einmal wahrscheinlicher. Bis 2045 müssen zwischen 433 GW (dena: KN 100) und 704 GW (BEE: Basisszenario) installiert sein. Der Bedarf an erneuerbaren Stromerzeugungskapazitäten variiert in den Szenarien je nach Annahmen zu den Energieimporten, dem Elektrifizierungsgrad der Sektoren Wärme, Verkehr und Industrie sowie zu Energieeinsparungen und Energieeffizienz.



Die installierte Leistung von Windenergie an Land liegt im Jahr 2045 zwischen 124 GW (dena: KN 100) und 218 GW (Ariadne: REMIND), Windenergie auf See zwischen 29 GW (Ariadne: REMIND) und 71 GW (ÜNB: B/C 2045). Der Ausbau der Photovoltaik muss noch am stärksten voranschreiten. Im Zieljahr summieren sich Freiflächen- und Dachanlagen auf 230 GW (BDI: Zielpfad) bis 395 GW (ÜNB: B/C 2045).

– gegenüber 59 GW im Jahr 2021. Im BEE-Szenario sind es sogar 449 GW, wobei sich diese Zahl auf das Jahr 2050 bezieht.

Dadurch ergeben sich bis 2045 durchschnittlich pro Jahr folgende Ausbaukorridore (in Klammern zum Vergleich der durchschnittliche Ausbau zwischen den Jahren 2018 und 2021):

- Windenergie an Land: ca. 3 bis 7 GW (1,7 GW)
- Windenergie auf See: ca. 1 bis 3 GW (0,7 GW)
- Photovoltaik: ca. 7 bis 14 GW (4,2 GW)

Der Ausbau müsste also in allen Technologien gegenüber den vergangenen vier Jahren mindestens verdoppelt werden. In der Vergangenheit sind die notwendigen Ausbauraten in manchen Jahren in allen Sparten erreicht worden. Das zeigt, dass es prinzipiell machbar ist – insbesondere wenn man weitere technologische Weiterentwicklungen unterstellt.

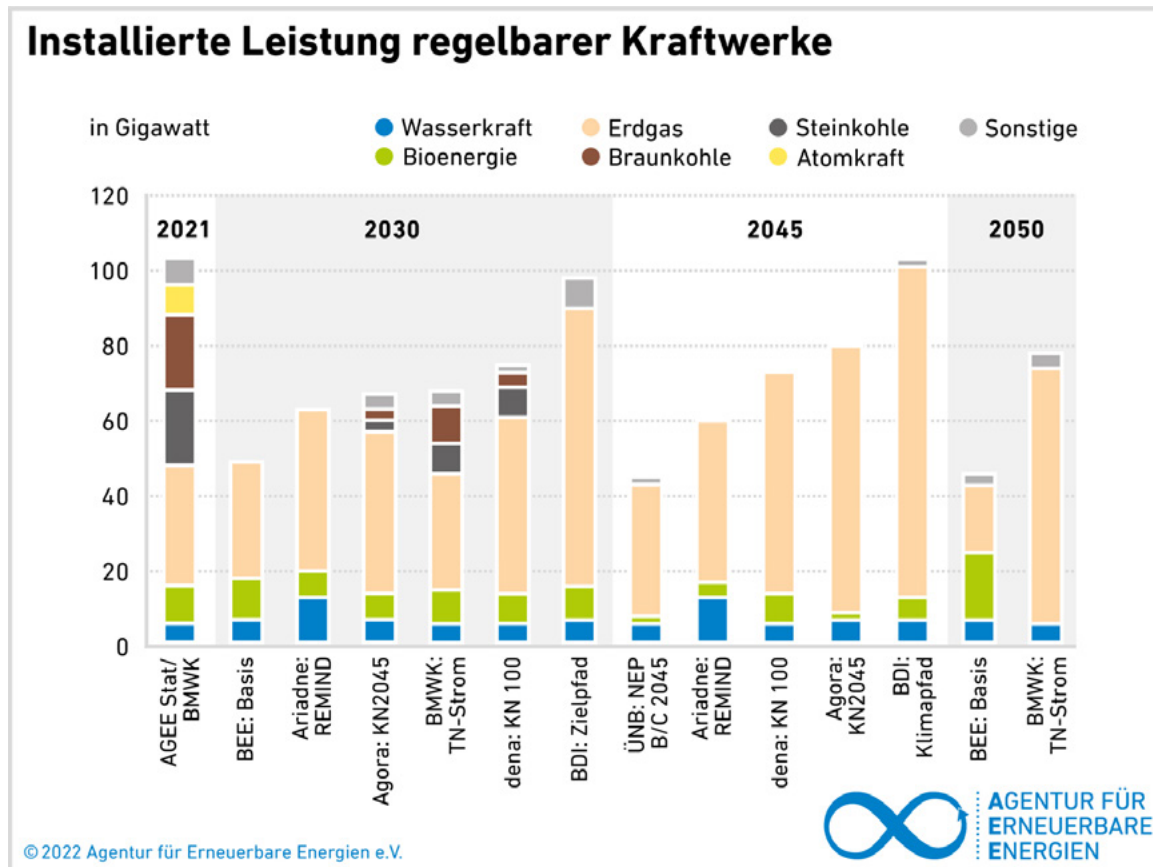
AUSGLEICHOPTIONEN FÜR WIND UND SONNE

Regelbare Kraftwerke

Um Versorgungssicherheit zu gewährleisten, braucht es als Ergänzung zu den fluktuierenden Erneuerbaren Energien regelbare Kraftwerke, die einspringen, wenn über längere Zeiträume zu wenig Wind weht und kaum Sonne scheint. Heute besteht der regelbare Kraftwerkspark v.a. aus Gas-, Kohle- und Atomkraftwerken sowie Bioenergie und Wasserkraft. Ende des Jahres 2022 gehen die letzten Atomkraftwerke vom Netz. Der Atomausstieg steht in keiner Studie zur Diskussion. Die Szenarien von BEE, Ariadne und BDI gehen davon aus, dass auch der Kohleausstieg bis 2030 schon vollzogen ist. Nur bei Agora, dena und BMWK sind Anfang des nächsten Jahrzehnts noch Kohlekraftwerke in Betrieb. Im Zieljahr 2045 bzw. 2050 sind in keinem Szenario noch Kraftwerke am Netz, die mit Kohle befeuert werden. Nur Gaskraftwerke werden weiter gebraucht und werden in allen Szenarien (außer BEE) sogar ausgebaut. Denn das deutsche Gasnetz ist (nach heutigem Stand der Technik) der einzige verfügbare Langzeitspeicher, in denen erneuerbarer Strom – umgewandelt in synthetisches Gas – in großen Mengen und über mehrere Wochen oder Monate gespeichert werden kann. Nur mit Gaskraftwerken, die mit synthetischen Gasen (und Biomethan) befeuert werden, lassen sich längere Zeiträume mit geringer Einspeisung aus Erneuerbaren Energien oder größere Leistungsabfälle bei den Erneuerbaren Energien („Dunkelflauten“) überbrücken. Biogasanlagen eignen sich zwar auch zum Ausgleich der fluktuierenden Einspeisung von Wind- und Solarenergie, allerdings ist das Ausbaupotenzial begrenzt.

Die Kapazität an Gaskraftwerken steigt in den Szenarien von 32 GW in 2021 auf 35 GW (ÜNB: B/C 2045) bis 88 GW (BDI: Zielpfad) in 2045. Nur im BEE-Szenario sinkt der Bedarf an Gaskraftwerken. Künftig werden diese Kraftwerke mit Wasserstoff oder synthetischem Methan befeuert. Eine hohe installierte Leistung bedeutet allerdings nicht gleichzeitig eine hohe Vollaststundenzahl der Gaskraftwerke oder einen hohen Gasverbrauch. So geht das BDI-Szenario von der höchsten Gaskraftwerkskapazität aus, gleichzeitig aber auch von einem relativ geringen Gas-/Wasserstoffverbrauch. Das heißt, in diesem Szenario ist der Bedarf an Backup-Kraftwerken zwar hoch, sie kommen aber relativ wenig zum Einsatz.

BDI und BEE gehen zudem von einem leichten Ausbau der Wasserkraft von 5 GW auf 6 GW aus. Im Ariadne-Szenario wird die Kapazität sogar mehr als verdoppelt. Noch deutlichere Unterschiede gibt es bei der Nutzung der Bioenergie. In allen Szenarien (außer im BEE-Szenario) werden Kapazi-



täten im Stromsektor abgebaut. Die installierte Leistung sinkt von 10 GW in 2021 auf 1 GW (BMWK: TN-Strom) bis 8 GW (dena: KN 100). In diesen Szenarien wird die Bioenergie vorrangig in anderen Sektoren eingesetzt (z. B. Prozesswärme in der Industrie oder im Verkehr). Ganz im Gegensatz dazu steigt die Kapazität an Bioenergie-Anlagen im BEE-Szenario auf 18 GW. In diesem Szenario wird der Großteil der Biogasanlagen flexibilisiert und die Leistung bestehender Anlagen erhöht, um besser Wind- und Solarenergie zu ergänzen. Die Anlagen produzieren dadurch nicht mehr kontinuierlich Strom, sondern nur noch, wenn sie gebraucht werden – dann aber mit einer deutlich höheren Spitzenleistung. Die Stromerzeugung bleibt in der Jahresbilanz in etwa gleich.

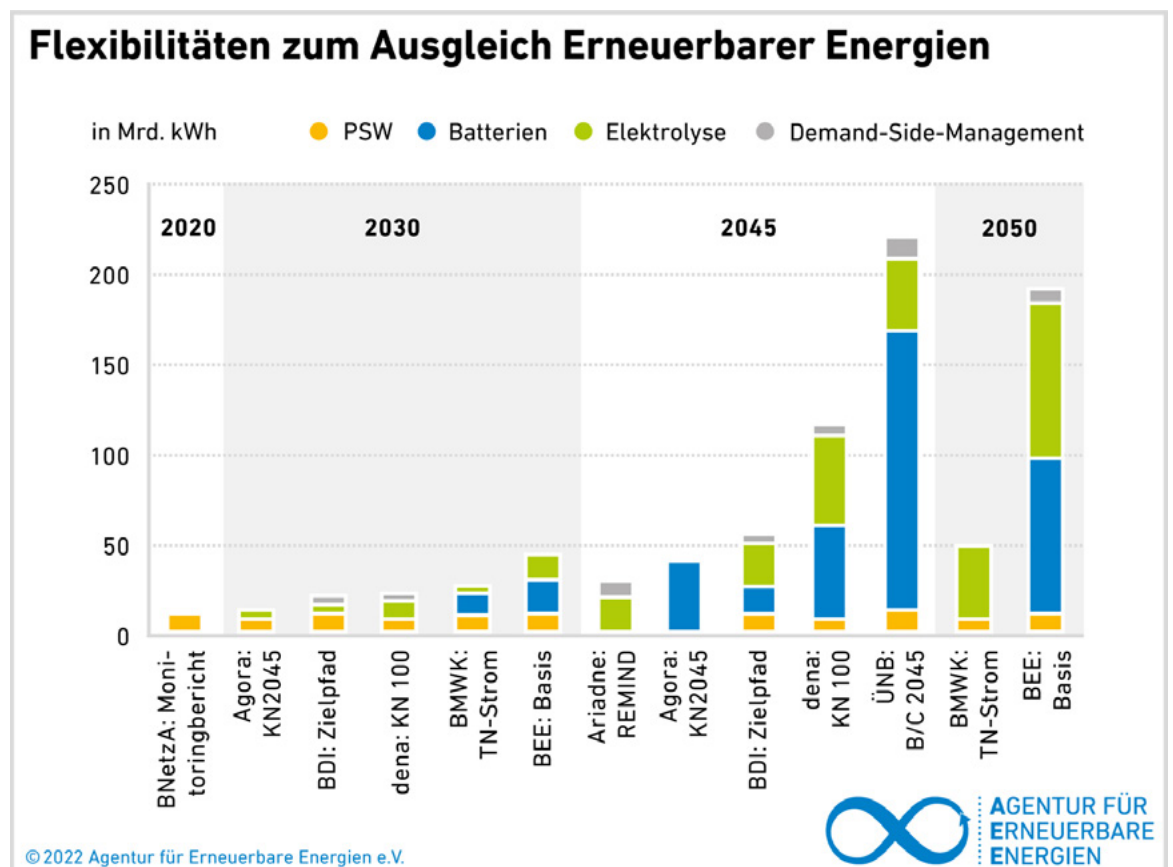
Obwohl alternative Flexibilitätsoptionen wie Lastmanagement und Batteriespeicher regelbare Kraftwerke nicht 1:1 ersetzen können, da sie nur kurz- bis mittelfristige Schwankungen in der Stromerzeugung ausgleichen können, zeigt sich im Szenarienvergleich doch, dass der Bedarf an regelbaren Kraftwerken geringer ausfällt, je mehr alternative Flexibilitäten im Stromsystem zur Verfügung stehen.

Kurzfristige Flexibilitäten

Neben regelbaren Kraftwerken, die ihre Stromerzeugung flexibel hoch- und herunterfahren können, werden auch weitere kurzfristige Flexibilitätsoptionen gebraucht, um die fluktuierende Energiebereitstellung aus Wind- und Solarenergie auszugleichen. Dazu gehören Batterien und Pumpspeicherkraftwerke, Wärmepumpen sowie Lastmanagement (Demand Side Management). Außerdem können Power-to-Heat-Anlagen Erzeugungsspitzen aus Erneuerbaren Energien aufnehmen, so dass weniger Windenergie- und Photovoltaikanlagen abgeregelt werden müssen.

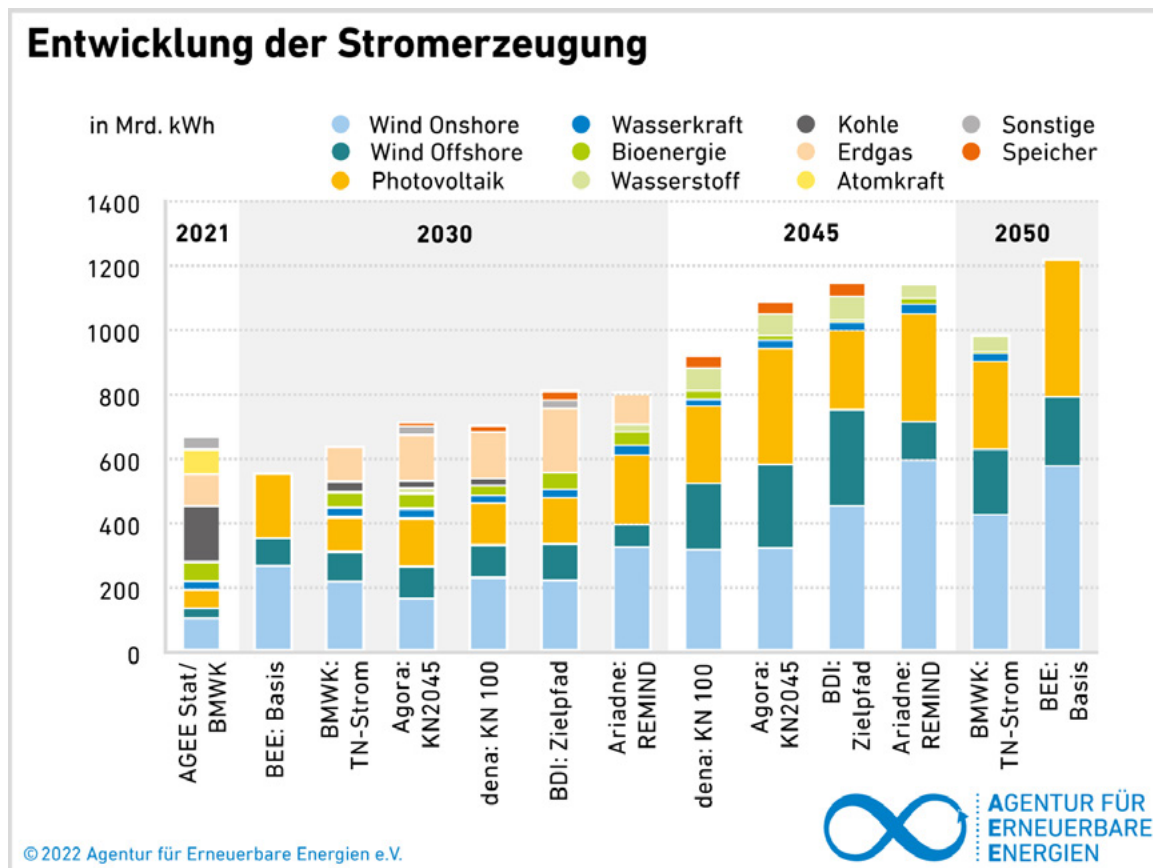
Das Ausbaupotenzial von Pumpspeicherkraftwerken (PSW) ist begrenzt. Nur im Szenario der ÜNB wird es von heute 10 GW auf 12 GW im Jahr 2045 ausgebaut. Bei dena und BEE bleibt die installierte Leistung konstant. Bei Agora und dem BMWK-Langfristszenario geht die Leistung sogar auf 7 GW zurück. Das Lastmanagementpotenzial in der Industrie wird auf 5 GW bis 12 GW geschätzt. Die Elektrolyseleistung liegt in den Szenarien zwischen 19 GW (Ariadne: REMIND) und 86 GW (BEE: Basisszenario). Die größten Unterschiede gibt es bei der Batterieleistung. Im BMWK-Szenario spielen Batterien kaum eine Rolle. Von der geringsten Leistung geht sonst Agora aus (15 GW). BDI rechnet mit einer kumulierten Speicherleistung aus Batterien und Pumpspeichern von 39 GW (ohne zu differenzieren). Der mit Abstand größte Ausbau an Batteriespeichern findet sich im ÜNB-Szenario B/C 2045 mit 155 GW. Auch der BEE rechnet mit einem starken Ausbau auf 86 GW. Hohe Speicherkapazitäten im ÜNB-Szenario und beim BEE gehen mit einem relativ niedrigen Bedarf an regelbaren Kraftwerken einher.

Agora, Ariadne und BDI gehen zudem von fünf bis sechs Millionen Wärmepumpen im Jahr 2030 und 15 Millionen im Jahr 2045 aus – was annähernd der Anzahl der Einfamilienhäuser in Deutschland entspricht (16 Millionen). Die dena rechnet mit nur neun Millionen Wärmepumpen. Die Zahl der Elektro-Pkw liegt in den Szenarien zwischen 34 und 42 Millionen. Welches Lastverschiebepotenzial sich durch den Wärmepumpenausbau und die Elektromobilität ergibt, wird in den Studien nicht näher bestimmt.



Stromerzeugung und Stromimporte

Wind, Solar, Biomasse und Wasserkraft haben im Stromsektor in den vergangenen Jahren eine sehr dynamische Entwicklung vollzogen. Im Jahr 2021 lag ihr Anteil an der Stromerzeugung bei rund 46 Prozent. Bis 2030 soll der Anteil auf 80 Prozent steigen. Spätestens im Jahr 2045 stammt der in Deutschland erzeugte Strom ausschließlich aus Erneuerbaren Energien. In den Szenarien von BEE und Ariadne ist die Stromerzeugung am höchsten, was sich mit dem hohen Stromverbrauch deckt (siehe oben).



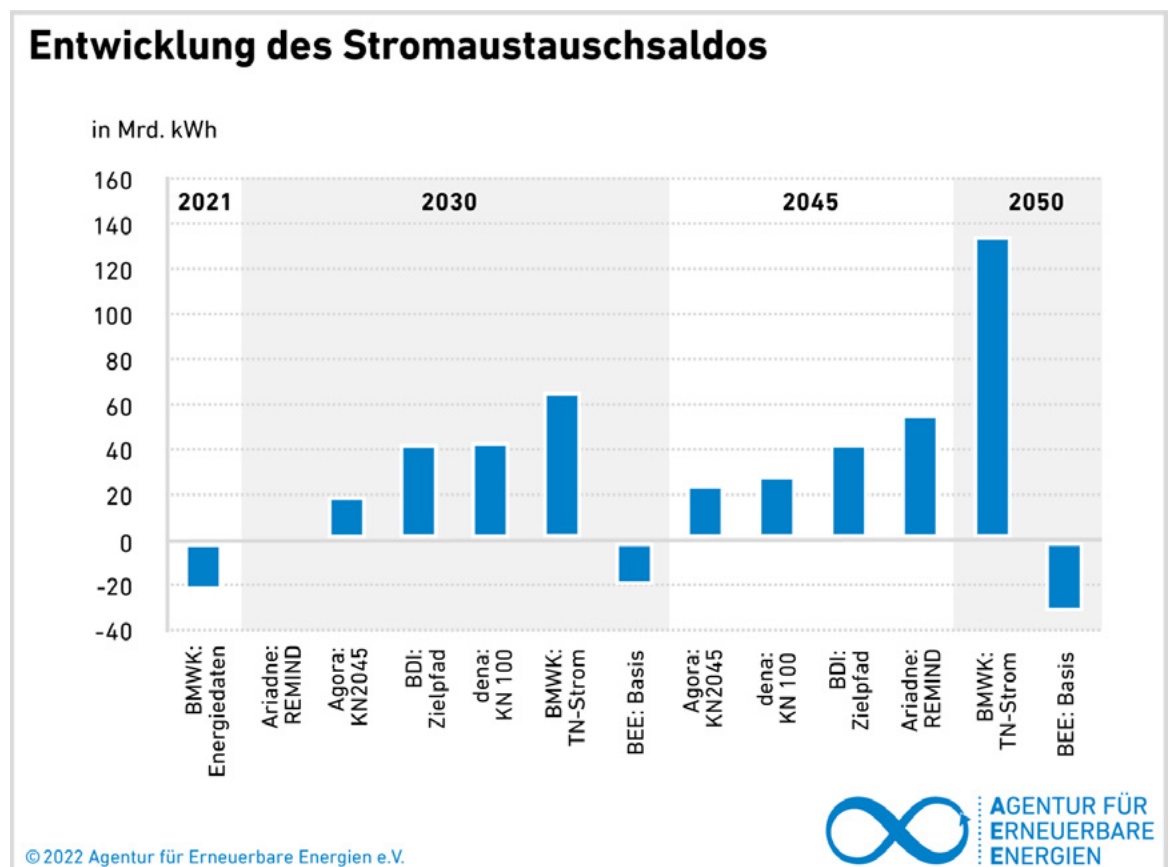
Den größten Beitrag im Jahr 2045 leistet in allen Szenarien (außer Agora) die Windenergie an Land. Die Windstromerzeugung an Land liegt zwischen 303 Mrd. kWh (dena) und 582 Mrd. kWh (Ariadne). Offshore-Windenergie trägt zwischen 114 Mrd. kWh (Ariadne) und 292 Mrd. kWh (BDI) bei. Im BDI-Szenario ist Offshore-Stromproduktion sogar größer als die aus Solarenergie (240 Mrd. kWh). Das Agora-Szenario ist das einzige, in dem die Stromerzeugung aus Photovoltaik am höchsten ist (355 Mrd. kWh). Bei der Bioenergie sehen die meisten Studien (BDI, Agora, Ariadne, BMWK) das für die Stromerzeugung nutzbare Potenzial skeptisch. Das heißt nicht, dass die Bioenergienutzung weitgehend eingestellt wird, sondern die Biomassepotenziale vorrangig als Kraftstoff und in der Industrie eingesetzt werden.

Um die in der Grafik dargestellten Werte einordnen zu können, müssen der Stromverbrauch und die Entwicklung des europäischen Stromaustauschs im Blick behalten werden. Wie oben beschrieben variiert der Bruttostromverbrauch im Jahr 2045 bzw. 2050 zwischen etwas mehr als 900 Mrd. kWh und fast 1.400 Mrd. kWh.

Deutschland hat in den vergangenen Jahren stets in der Jahresbilanz mehr Strom exportiert als importiert. Doch Strom ist nur ein Teil der gesamten Energiehandelsbilanz. Rund 70 Prozent des gesamten Energiebedarfs muss derzeit importiert werden. Denn Deutschland verfügt selbst über wenig Rohstoffe. Die Erneuerbaren Energien sind schon heute der wichtigste im Inland gewonnene Energieträger. Sie machen mehr als die Hälfte der heimischen Energiegewinnung aus. Erdöl, Erdgas, Steinkohle und Uran werden quasi vollständig aus anderen Ländern importiert.³ Strom wird durch die Elektrifizierung der Sektoren Wärme und Verkehr immer mehr Benzin, Diesel, Heizöl und Erdgas ersetzen. Da stellt sich nun die Frage, ob dieser Strombedarf – im Gegensatz zu den fossilen Energieträgern – aus inländischer Stromproduktion gedeckt werden kann, oder ob Deutschland in Zukunft statt Kohle, Öl und Gas mehr Strom importieren muss.

Die meisten Szenarien gehen davon aus, dass Deutschland in Zukunft vom Netto-Stromexporteur zum -importeuer wird. Nur der BEE geht davon aus, dass auch 2030 und 2050 in der Jahresbilanz mehr Strom exportiert als importiert wird. Generell werden die Austauschkapazitäten mit den europäischen Nachbarstaaten ausgebaut, um die Versorgungssicherheit zu erhöhen. In den BMWK-Langfristszenarien steigt die Austauschkapazität um das Dreifache, auf 80 bis 100 GW (wobei hier auch der gesamteuropäische Stromtransit berücksichtigt ist).

Während die Stromimporte also in fast allen Szenarien zunehmen, sinkt die Energieabhängigkeit Deutschlands aber in der Gesamtbilanz. So steigen die Nettostromimporte im BDI-Klimapfad zwar von -19 Mrd. kWh auf +40 Mrd. kWh. Die gesamten Nettoenergieträgerimporte sinken aber um 84 Prozent bzw. von 2.670 Mrd. kWh auf 433 Mrd. kWh. Selbst im importlastigen dena-Szenario geht der Energieimport um 77 Prozent bzw. auf 622 Mrd. kWh zurück. Der Importanteil am Primärenergiebedarf sinkt von 74 Prozent im Jahr 2019 auf 41 Prozent im Jahr 2045. Ein Vorteil des Stromimports ist, dass der Strom aus dem europäischen Ausland stammen würde und somit aus politisch stabilen Regionen – im Gegensatz zum Großteil der Kohle-, Öl- und Gasimporte.

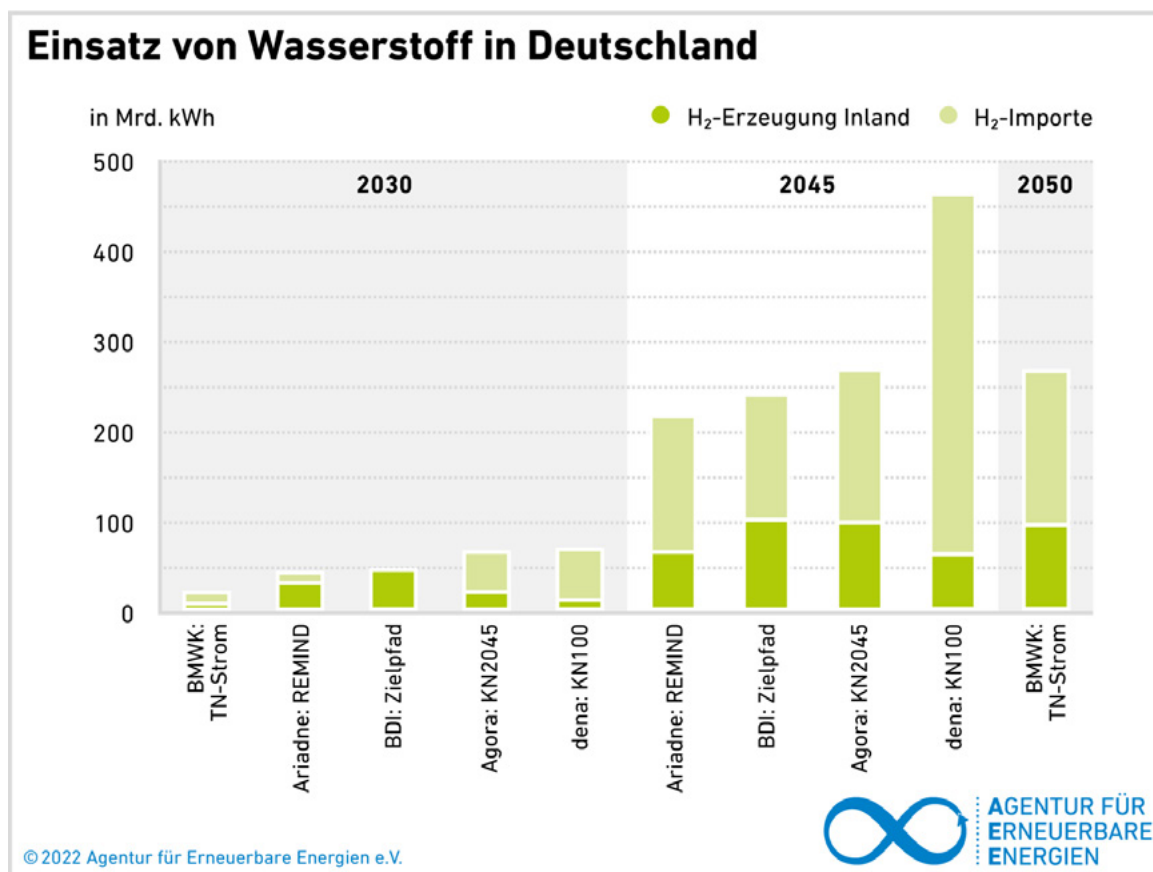


³ Umweltbundesamt: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/primaerenergiegewinnung-importe>. Januar 2022.

Importe vs. inländische Wasserstofferzeugung

Synthetische Energieträger, die mithilfe von grünem Strom erzeugt werden, sind unverzichtbar, um die Klimaziele zu erreichen. Im Jahr 2045 decken sie in den untersuchten Studien zwischen 144 Mrd. kWh (BDI) und 376 Mrd. kWh (dena) des EEV (10 Prozent bzw. 25 Prozent). Die Gesamtmenge des Wasserstoffeinsatzes liegt zwischen 215 Mrd. kWh (Ariadne) und 458 Mrd. kWh (dena). Sie schließen die Lücke, die nach Erschließung der Potenziale von Energieeffizienz und direkter Elektrifizierung übrigbleibt. Ihre Einsatzgebiete sind v.a. der Güter- und Schwerlastverkehr, der Flug- und Schiffsverkehr, als Grundstoff in der Industrie und als Langzeitspeicher für den Stromsektor.

Die Studien von BDI, Agora und BMWK gehen davon aus, dass Deutschland zwischen 35 Prozent und 42 Prozent des Wasserstoffbedarfs aus inländischer Produktion decken kann. Im Gegensatz dazu werden in der dena-Studie 87 Prozent des Wasserstoffs importiert. Der hohe Importbedarf spiegelt die relativ geringe installierte Leistung und Stromerzeugung aus Erneuerbaren Energien in diesem Szenario wider.



Für die inländische Produktion spricht, dass Transportwege vermieden, neue Wertschöpfungsketten vor Ort aufgebaut und Innovationen in Deutschland angestoßen werden. Auch als Flexibilitätsoption zur Integration von Wind- und Solarenergie spielt die Elektrolyse eine wichtige Rolle. Durch die Elektrolyse muss weniger Wind- und Solarstrom abgeregelt werden. Dabei konkurriert sie aber mit anderen Optionen, wie Speicher, Lastmanagement oder Power-to-Heat.

Für den Import aus europäischen und außereuropäischen Standorten sprechen die Kostenvorteile durch hohe Sonneneinstrahlung und hohes Windaufkommen sowie die geringere Flächenknappheit. Eine [Analyse der Agora Energiewende](#) von 2018 zeigt, dass die Produktion synthetischer Gase in Island, Nordafrika oder im Nahen Osten am günstigsten wären, da hier hohe Volllaststunden gegeben

sind. Wasserstoff und synthetisches Methan kann entweder über Pipelines oder in verflüssigter bzw. komprimierter Form über Tankschiffe transportiert werden. Von den potenziellen Importregionen ist nur Nordafrika an das europäische Gasnetz angeschlossen, der Nahe Osten und Island dagegen nicht. Aus politischer Sicht würde der Import synthetischer Gase und Kraftstoffe den Ländern, die heute noch von Erdöl- oder Erdgasexporten abhängig sind, eine Perspektive für neue Einkommensquellen geben. Außerdem könnte Deutschland die Zusammenarbeit bei der Wasserstoffproduktion mit der Einhaltung der Menschenrechte verknüpfen. Der Ausbau der Wasserstoffproduktion muss schon in den nächsten Jahren deutlich an Fahrt gewinnen. Nur so können die Kosten durch Skalen- und Lerneffekte in erforderlichem Maße gesenkt werden – wie die Erfahrungen mit der Photovoltaik in den vergangenen 20 Jahren bereits erfolgreich demonstriert haben.

FAZIT

Aus dem Vergleich der Studien lassen sich folgende Kernergebnisse ableiten:

1. In allen Studien wird der Atomausstieg Deutschlands bis Ende 2022 als gesetzt angesehen und nicht zur Diskussion gestellt. Bis 2030 wäre auch der Kohleausstieg möglich, wenn die Erneuerbaren Energien zügig ausgebaut und weitere Maßnahmen (Effizienz, Flexibilisierung, etc.) konsequent umgesetzt werden.
2. Das Erreichen der Klimaschutzziele steht und fällt mit einem dynamischen Ausbau der Erneuerbaren Energien. Dieser muss gegenüber den Vorjahren deutlich gesteigert werden.
3. Strom wird immer größere Teile der gesamten Energienachfrage decken. Das bedeutet: Ein großer Teil der Endanwendungen wie Heizungssysteme und Verkehrsträger wird elektrifiziert.
4. Die Elektrifizierung bringt durch die höheren Wirkungsgrade deutliche Effizienzgewinne. Deshalb sinkt der Energieverbrauch in allen Szenarien. Der Stromverbrauch nimmt dagegen zu.
5. Flexibilitäten müssen erschlossen und ausgebaut werden: Lastmanagement, Speicher, Wärmepumpen, Elektrolyseure und regelbare Kraftwerke.
6. Es müssen geeignete Rahmenbedingungen für die Erzeugung und Nutzung von Wasserstoff und anderen synthetischen, strombasierten Energieträgern aufgebaut werden, damit diese rechtzeitig in ausreichender Menge und zu vertretbaren Kosten zur Verfügung stehen.
7. Der Ausbau des europäischen Stromaustauschs trägt zur Versorgungssicherheit bei. Die Energieimporte gehen in den hier verglichenen Szenarien insgesamt zurück.

Alle in dieser Metaanalyse verglichenen Studien sind sich einig: Energiewende und Klimaschutz sind ohne Atomkraft machbar. Es gibt verschiedene Pfade, der Atomausstieg wird aber in keiner Studie in Frage gestellt und ein alternatives „Atom-Szenario“ durchgespielt. Durch den Krieg in der Ukraine kommt es voraussichtlich gegenüber den Annahmen in den hier verglichenen Studien zu vorübergehenden Verschiebungen von Erdgas hin zu mehr Kohle. Die dadurch kurzzeitig erhöhten CO₂-Emissionen können durch einen verstärkten Ausbau der Erneuerbaren Energien später wieder kompensiert werden.

Die Szenarien setzen jeweils verschiedene Schwerpunkte: Agora Energiewende setzt stärker auf Photovoltaik als die anderen, der BDI relativ stark auf Windenergie Offshore. Als Ausgleichsoptionen kommen mal mehr regelbare Gas-/Wasserstoffkraftwerke zum Einsatz (BDI und Agora), mal mehr Speicher und Lastmanagement (ÜNB). Außerdem gibt es Unterschiede, in welchem Maße der Endenergieverbrauch elektrifiziert wird. Eine intensiv diskutierte Frage ist, wie viel Energie in Zukunft in Deutschland erzeugt wird und wie viel importiert werden muss. In manchen Szenarien wird v.a. Wasserstoff (oder synthetisches Methan) importiert. Für den Import von Wasserstoff und/oder synthetischen Brennstoffen sprechen die geringeren Erzeugungskosten in sonnen- und windreichen Regionen sowie der geringere Bedarf an erneuerbaren Stromerzeugungskapazitäten in Deutschland und somit die geringere Flächeninanspruchnahme. Der Ausbau von Power-to-Gas- und Power-to-Liquid-Anlagen muss in jedem Fall schon in den nächsten Jahren beschleunigt werden. Nur so können die erforderlichen Kostensenkungen über Lern- und Skaleneffekte erzielt werden. Das Beispiel der Photovoltaik hat erfolgreich gezeigt, dass anfangs hohe Investitionskosten noch stärker sinken können als es zu Beginn für möglich gehalten wurde.

Die wichtigsten Kennzahlen der verglichenen Studien werden in dieser Tabelle nochmal zusammengefasst:

Studie/Szenario	Agora: KN2045	Ariadne: REMIND	BDI: Zielpfad	BEE: Basis- szenario (2050)	BWMK: TN-Strom (2050)	dena: KN100 (2050)	ÜNB: B/C 2045
Bruttostromverbrauch (in Mrd. kWh)	1017	1154	1082	1370	1078	910	1128
Wind Onshore (in GW)	145	218	180	198	155	124	150
Wind Offshore (in GW)	70	29	70	57	45	50	71
Photovoltaik (in GW)	385	329	230	449	290	260	395
Anteil Strom am EEV (in %)	46	69	59	-	53	49	
Wasserstoffbedarf (in Mrd. kWh)	265	215	237	-	262	364	240
Wasserstoffher- stellung in Deutschland (in Mrd. kWh)	96	63	99	300	92	60	-
PtL-Bedarf (in Mrd. kWh)	158	176	305	-	0	198	-
Anteil H ₂ /PtX am EEV (in %)	13,2	14,8	10,2	-	3,9	25,4	-
Elektrolyseure (in GW)	50	19	-	86	41	24	40
Elektro-Pkw (inkl. Plug-in in Mio.)	36	42	40	39	35	36	34
Wärmepumpen (in Mio.)	14	15	15	16	16	9	16
Speicher (in GW)	59	-	39	96	8	25	167

AUSGEWERTETE LITERATUR

► **Agora Energiewende: Klimaneutrales Deutschland 2045. 2021**

Die Studie „Klimaneutrales Deutschland 2045“ zeigt, dass Deutschland Klimaneutralität im Jahr 2045 ohne neue Technologiepfade erreichen kann. Agora identifiziert drei Hebel, wie der Klimaschutz beschleunigt werden könnte: 1. Energieeffizienz und Energieeinsparung: Der PEV würde von 13.000 PJ auf 6.500 PJ zurückgehen. Auch der EEV sinkt von 7.500 PJ auf 5.750 PJ. 2. Elektrifizierung: Die im Szenario unterstellten Effizienzgewinne wären v.a. auf die Stromnutzung in den Sektoren Wärme und Verkehr zurückzuführen. 3. Wasserstoff. 36 Prozent des Wasserstoffs würden in Deutschland hergestellt. Der größte Teil dient der Stromerzeugung. Strombasierte Brennstoffe (PtG/PtL) werden importiert (160 Mrd. kWh).

Der Kohleausstieg wird annahmegemäß bis 2030 umgesetzt. Der Anteil der Erneuerbaren Energien an der Stromerzeugung würde bis dahin auf 70 Prozent steigen. Zwischen 2021 und 2030 werden pro Jahr 10 GW Photovoltaik, 5 GW Windenergie Onshore und 2 GW Windenergie Offshore zugebaut. Zwischen 2030 und 2045 steigen die Zubauzahlen auf 14 GW, 7 GW und 3 GW. Wasserstoff wird bis 2030 schon in relevanter Menge eingesetzt. Pro Jahr kommt 1 GW an Elektrolyseleistung hinzu, zwischen 2030 und 2045 jedes Jahr 2,7 GW. Von Ende der 2020er an wird Wasserstoff in Kraftwerken rückverstromt und in KWK-Anlagen genutzt. Die Elektrifizierung der Sektoren Wärme und Verkehr geht schnell voran. 2030 fahren bereits 14 Millionen E-Autos und 30 Prozent der Lkw elektrisch. Zudem steigt die Zahl der Wärmepumpen auf 6 Millionen. Der Stromverbrauch steigt bis 2030 gegenüber 2018 um 51 Mrd. kWh bzw. um 9 Prozent, bis 2045 um 400 Mrd. kWh bzw. um 60 Prozent auf rund 1.000 Mrd. kWh. 160 Mrd. kWh entfallen auf den Verkehr, 150 Mrd. kWh auf die Wasserstoffproduktion und 90 Mrd. kWh auf die Industrie. 89 Prozent des Stromverbrauchs können durch Erneuerbare Energien direkt gedeckt werden, 6 Prozent durch Wasserstoffkraftwerke, die restlichen 5 Prozent durch zwischengespeicherten oder importierten Strom. Die Industrie wird durch den Einsatz von Strom, Wasserstoff und fester Biomasse (in Verbindung mit CCS) schon 2040 klimaneutral.

► **Bundesverband der Deutschen Industrie (BDI): Klimapfade 2.0. 2021**

Die Klimapfade 2.0 sind eine Folgestudie der 2018 erschienenen „Klimapfade für Deutschland“. Ziel der Studie ist es, einen klimapolitischen Instrumentenmix zu erarbeiten, der in allen Sektoren die Erreichung der Klimaziele im Jahr 2030 ermöglichen würde und die wichtigsten Weichen in Richtung Treibhausgasneutralität im Jahr 2045 stellt. Die Studie ist aus einem „Bottom-up“ Prozess mit der deutschen Industrie (80 Unternehmen und Verbände), dem BDI und ca. 150 Expert*innen von BCG entstanden. Der Fokus liegt auf einem kosteneffizienten Zielpfad aus einer vorrangig nationalen Perspektive. Innerhalb der nächsten Jahre müssen die Investitionen in fossile Energien eingestellt werden und der Kohleausstieg muss bereits bis 2030 erfolgen. Die Umsetzung der Klimaschutzmaßnahmen erforderte im Energiesektor bis 2030 Mehrinvestitionen in Höhe von rund 415 Mrd. Euro. Das entspricht jährlich knapp 2,5 Prozent des deutschen Bruttoinlandsprodukts (BIP). Beim Ausbau der Erneuerbaren Energien müsse Deutschland bis an die Potenzialgrenzen gehen. Insgesamt brauche es eine installierte Leistung an Wind und PV von mehr als 480 GW. Bis 2030 müsse sich die installierte Leistung aus Erneuerbaren Energien bereits verdoppeln. Der Stromverbrauch werde auf 990 Mrd. kWh ansteigen, was in etwa einer Verdopplung gegenüber 2021 entspricht. Zur Absicherung der Stromerzeugung brauche es einen Zubau von 40 GW an gasbefeuerten Backup-Kraftwerken, die in Zukunft zu 100 Prozent mit erneuerbaren Gasen betrieben werden. Deutschland würde von den benötigten 237 Mrd. kWh Wasserstoff mehr als die Hälfte über eine neu zu errichtende Infrastruktur importieren. Hinzu kommen

305 Mrd. kWh synthetische Brennstoffe auf Kohlenstoffbasis (PtG/PtL), v.a. für den Verkehr und die Grundstoffchemie.

► **Bundesverband Erneuerbare Energie (BEE): Neues Strommarktdesign. 2021**

Ziel der BEE-Studie ist es, aufzuzeigen, wie das Strommarktdesign anzupassen ist, um Versorgungssicherheit, Refinanzierung des erforderlichen Ausbaus der Erneuerbaren Energien sowie Wirtschaftlichkeit von Sektorenkopplungstechnologien gewährleisten zu können. Die Studie konzentriert sich auf eine möglichst dezentrale Umsetzung der Energiewende. Der Zubau von Wind- und PV-Anlagen erfolgt im verbrauchsnahe Kontext. Dadurch sollen die heimische Wertschöpfung gestärkt werden sowie der Netzausbau optimiert und die Abhängigkeit von anderen Staaten begrenzt werden. Die aktuell festgelegte Förderdauer von 20 Jahren sollte in eine Mengenförderung überführt werden, um den Erneuerbaren Energien zu ermöglichen, selbst auf Strompreise zu reagieren. Das soll den wirtschaftlichen Betrieb der EE-Anlagen sichern und den Strommarkt stabilisieren.

Die Simulationen zeigen, dass der Stromverbrauch durch einen ambitionierteren Ausbau der Erneuerbaren Energien zu jeder Stunde des Jahres gedeckt werden kann und Deutschland dabei in der Jahresbilanz Nettostromexporteur bleibt. Über Bioenergie, KWK-Anlagen und Speicher kann ausreichend steuerbare Leistung für die Versorgungssicherheit bereitgestellt werden, bei gleichzeitig sehr geringerem Zubau an Gaskraftwerksleistung. Im Basisszenario ergibt sich für das Jahr 2050 ein Bedarf von etwa 10 GW zusätzlicher Wasserstoff-Gasturbinen, um die Versorgungssicherheit zu gewährleisten. Die inländische Elektrolyse sei von zentraler Bedeutung und ein früher Markthochlauf erforderlich. Bis zu 100 GW Elektrolyse-Leistung könnten in Deutschland aufgebaut und wirtschaftlich betrieben werden, so dass Wasserstoffimporte nicht zwingend notwendig sind. Die in der Studie dargestellten Dekadenschritte seien auch bis 2045 realisierbar, wenn die Schritte ambitionierter angegangen werden.

► **BMWK: Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland. 2021**

Im Projekt „Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland“ (Langfristszenarien 3) werden insgesamt drei Szenarien für die zukünftige Entwicklung des Energiesystems modelliert, mit denen die Klimaziele der Bundesregierung erreicht werden. In diesem Studienvergleich wird nur das Szenario TN-Strom betrachtet, das auf eine starke Elektrifizierung des Energiesystems setzt. Im Vergleich hätte eine auf Wasserstoff oder synthetischen Kohlenstoffen basierende Wirtschaft einen höheren Bedarf an erneuerbarem Strom. Der Ausbau der Erneuerbaren Energien müsste schwerpunktmäßig bei Wind an Land und Freiflächenphotovoltaik erfolgen. Deutschland werde auch zukünftig auf Importe angewiesen sein (Wasserstoff zu 65 Prozent). Quelle der Strom- und Energieimporte sei Europa. Die Produktionskosten seien zwar innerhalb Europas höher, dafür würden Transportkosten eingespart. Alle Langfristszenarien kommen mit einem relativ geringen Anteil an Speichern aus, wenn die Voraussetzungen für die Sektorenkopplung geschaffen werden. Die Stromerzeugung nimmt in allen Szenarien zu, im TN-Strom auf 950 Mrd. kWh. Der klassische Stromverbrauch sinkt, dafür kommen neue Stromverbraucher hinzu: Industrie 214 Mrd. kWh, E-Mobilität 160 Mrd. kWh und Wärmepumpen 76 Mrd. kWh. Die Potenziale für Wind und Sonne werden im TN-Strom-Szenario vollständig erschlossen. Die Szenarien wurden vor der Novelle des Klimaschutzgesetzes definiert und berechnet, Zieljahr für die Treibhausgasneutralität ist also 2050. Für die Erreichung der Treibhausgasneutralität in 2045 müsste die Entwicklung also beschleunigt werden.

► **Deutsche Energieagentur: dena-Leitstudie Aufbruch Klimaneutralität. 2021**

Die dena-Leitstudie wurde in einem Multi-Stakeholder-Ansatz mit mehr als 70 Projektpartnern erstellt. Das Erreichen von Klimaneutralität im Gesamtsystem stützt sich auf vier Säulen: Energieeffizienz, direkte Nutzung von Erneuerbaren Energien, breiter Einsatz synthetischer Brennstoffe und die Erschließung von CO₂-Senken. Bis 2030 seien die direkte Elektrifizierung und die Steigerung der Energieeffizienz die größten Hebel zur Senkung der THG-Emissionen. Im Szenario Klimaneutralität 100 (KN100) steigt der Stromverbrauch bis 2045 auf 910 Mrd. kWh. Der Wasserstoffbedarf summiert sich auf 458 Mrd. kWh – der höchste in allen hier verglichenen Szenarien. Fossile Energieträger werden im dena-Szenario weniger als in den anderen auf strombasierte Anwendungen umgestellt, sondern durch klimaneutrale Brennstoffe ersetzt. Die Wasserstoffherzeugung in Deutschland ist in der Studie sehr begrenzt. Wasserstoff wird überwiegend über Pipelines aus Europa transportiert und in Deutschland in allen Sektoren eingesetzt. Die existierenden Erdgasleitungen werden umgerüstet. Flüssige synthetische Energieträger werden überwiegend aus Weltregionen mit guten Standortbedingungen und ausreichend Flächen importiert. Infrastrukturen und Märkte für synthetische Energieträger müssten schon heute aufgebaut werden. Deutschland werde auch langfristig von Energieimporten abhängig bleiben.

► **PIK/Fraunhofer ISE: Ariadne-Report. Deutschland auf dem Weg zur Klimaneutralität 2045. 2021**

Das Projekt Ariadne umfasst insgesamt sechs Szenarien mit unterschiedlichen technologischen Schwerpunkten, die entweder das Gesamtsystem oder einzelne Sektoren modellieren. Dadurch kann eine große Bandbreite an strukturellen Unsicherheiten und Optionen aufgezeigt werden. Dieser Szenarienvergleich greift nur das REMIND-Szenario heraus, welches das Gesamtsystem betrachtet. Die Elektrifizierung des Energieverbrauchs spielt darin eine entscheidende Rolle. 69 Prozent des EEV werden im Jahr 2045 durch Strom gedeckt (2020: 21 Prozent). Durch Effizienz der direkten Stromnutzung sinkt der EEV um 34 bis 59 Prozent. Bis 2030 sei eine Verdreifachung der EE-Stromerzeugung notwendig. Dafür müssten 120 GW Windenergie und 185 GW Photovoltaik zugebaut werden. Die ermittelten Potenziale in Deutschland müssten in fast allen Szenarien vollständig ausgeschöpft werden. Der Kohleausstieg erfolge schon bis 2030 aus wirtschaftlichen Gründen durch die CO₂-Bepreisung. Die Elektrifizierung führt zu einem Stromverbrauch von 1.154 Mrd. kWh. Die Ariadne-Szenarien zeigen, dass eine Fokussierung auf Wasserstoff und synthetischen Brennstoffen zu einer höheren Importabhängigkeit führt. Bis zu 1.500 Mrd. kWh Strom aus Erneuerbaren Energien müssten im Ausland für den Wasserstoff-/PtX-Import erzeugt werden.

► **Übertragungsnetzbetreiber: Szenariorahmen für den Netzentwicklungsplan 2037 mit Ausblick auf 2045. 2022**

Der mit der Bundesnetzagentur abgestimmte Szenariorahmen der Übertragungsnetzbetreiber bildet die Grundlage für den Netzentwicklungsplan Strom. Er enthält drei Szenarien für das Jahr 2037 und gibt erstmals einen Ausblick auf das Jahr 2045. Der Kohle- und Atomausstieg sind darin genauso berücksichtigt wie die nationale Wasserstoffstrategie. Viele Basisannahmen wurden von der Agora-Studie „Klimaneutrales Deutschland 2045“ und den Langfristszenarien des BMWK übernommen. Der Ausbau der Erneuerbaren Energien müsste verfünffacht werden. Insgesamt werden etwa 620 GW an installierter Leistung aus Erneuerbaren Energien benötigt. Zwei Drittel davon entfällt allein auf die Photovoltaik. Der Bruttostromverbrauch würde sich in etwa verdoppeln auf rund 1.000 Mrd. kWh. Die grenzüberschreitenden Übertragungskapazitäten müssten über die bisherigen Planungen hinaus ausgebaut werden.

