

EINE MILLIARDE TONNEN

CO₂ -Ausstoß senken und Deutschlands
Kohleausstieg beschleunigen

Eine Milliarde Tonnen

CO₂ -Ausstoß senken und Deutschlands Kohleausstieg beschleunigen

im Auftrag von: Ökomoderne e.V.

erstellt durch: Think Atom Ltd.

Hauptautor: Rauli Partanen

Mitautor: Olli Soppela

Vorwort: Mark Lynas

Klima Aktionsplan: Dr. Anna Veronika Wendland und

Dr. Rainer Moormann

Danke an: Florian Blümm, Amardeo Sarma, Tea Törmänen

	Ergebnisse und Handlungsempfehlungen	6
	Ein Aktionsplan für den Klimanotstand	8
	Vorwort von Mark Lynas	12
	Einleitung - Energiewende, Quo Vadis?	14
	Ein neuer Blick auf die Kernenergie	24
	Szenarien	48
	Abschließende Überlegungen	78
	ANHANG – Bonus Szenario – Zeitmaschine	79
	Über die Autoren	86

<https://www.oekomoderne.de/> /
<https://thinkatom.net/> / info@thinkatom.net

ISBN 978-952-94-5189-0
ISBN 978-952-94-5190-6 (PDF)
© Think Atom Ltd & Rauli Partanen 2021
Grafikdesign und Gestaltung: Katariina Pekkola

Nutzung des Inhalts für nicht-kommerzielle Zwecke ist
mit angemessener Zitierung erlaubt.



Rund 60 Millionen Tonnen zusätzliche CO₂-Emissionen pro Jahr vermeiden

Heute, im Jahr 2021, sind in Deutschland immer noch sechs Kernreaktoren in Betrieb, die etwa 65 Terawattstunden Strom pro Jahr erzeugen und im Vergleich zur Kohleverbrennung jährlich etwa 60 Millionen Tonnen CO₂-Emissionen vermeiden.

Mögliche Einsparungen von etwa 3 Milliarden Euro Emissionskosten pro Jahr

Bei den aktuellen Preisen von ca. 50 € je Tonne CO₂ im europäischen Emissionshandelssystem können diese Reaktoren etwa 3 Milliarden Euro pro Jahr gegenüber der Verbrennung von Kohle einsparen.

Eine Laufzeitverlängerung schützt die Umwelt

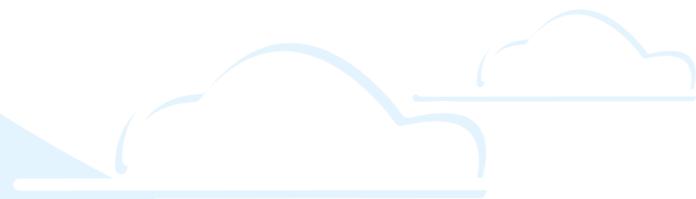
Die Kernenergie ist sehr emissionsarm und benötigt deutlich weniger Land und Rohstoffe als andere emissionsarme Energiequellen. Sie hat daher generell eine geringere Umweltbelastung. Eine Laufzeitverlängerung der Kernkraftwerke trägt zum Schutz der Umwelt bei.

Eine Laufzeitverlängerung schützt die Bevölkerung

Die Kernenergie ist eine der sichersten Arten der Energieerzeugung. Entgegen der landläufigen Meinung werden weniger Menschen durch Kernenergie beeinträchtigt oder getötet als durch andere Energiequellen. Eine Laufzeitverlängerung der Kernkraftwerke schützt die Bevölkerung.

500 Millionen Tonnen CO₂-Emissionen hätten bisher vermieden werden können

Bis 2020 haben die vorzeitigen Stilllegungen deutscher Kernreaktoren rund eine halbe Milliarde Tonnen zusätzlicher CO₂-Emissionen verursacht. Diese hätten wir vermeiden können, wäre stattdessen die Kohleverstromung eingestellt worden.



Ungefähr eine Milliarde Tonnen CO₂-Emissionen können noch verhindert werden

Wenn die verbleibenden sechs Reaktoren weiter laufen, können bis 2045 rund eine Milliarde Tonnen CO₂-Emissionen vermieden werden, wenn stattdessen fossile Kapazitäten stillgelegt werden (Kohle und Erdgas). Das entspricht ungefähr einem Viertel des verbleibenden deutschen CO₂-Budgets, um die Reduktionsziele von Paris einzuhalten.¹

Tausende Menschenleben und Millionen Arbeitsstunden stehen auf dem Spiel

Das Abschalten von Kohle statt Kernkraft rettet Tausende von Menschenleben und vermeidet Millionen von Stunden an verlorener Produktivität in den nächsten Jahrzehnten aufgrund der geringen Luftverschmutzung.

Einsparungen von etlichen Milliarden Euro pro Jahr sind möglich

Die Laufzeitverlängerung der Kernkraftwerke kann dem deutschen Steuerzahler jedes Jahr mehrere Milliarden Euro einsparen. Diese Einsparungen setzen sich zusammen aus niedrigeren Stromkosten, niedrigeren Gesundheitskosten, mehr Lebensqualität und einer höheren Produktivität.

Noch eine Milliarde Tonnen CO₂-Emissionen können zusätzlich vermieden werden

Zusätzlich könnte Deutschland ein Programm zum Neubau fortschrittlicher Wärmequellen starten, die mit sauberem Wasserstoff und PtX-Kraftstoffen Erdgas effizient ersetzen. Dadurch können bis 2050 zusätzlich fast eine Milliarde Tonnen an CO₂-Emissionen vermieden werden. Diese Einsparungen kommen zu den Reduktionen im Referenzszenario noch hinzu.

Kernkraft bietet preisgünstige und wertvolle Systemdienste

Sowohl bestehende Kernkraftwerke als auch und insbesondere fortgeschrittene Reaktoren mit thermischen Speichersystemen passen gut zu Windkraft und Photovoltaik. Die Kernenergie kann kostengünstige und wertvolle Dienste für ein Energiesystem mit einem hohen Anteil an variablen erneuerbaren Energiequellen bieten.

¹ Siehe <https://tinyurl.com/yev2fzlt>



Der Klimanotstand ist nicht nur ein Modewort. Es besteht ein breiter Konsens darüber, dass der durch den Menschen verursachte Klimawandel dringende und wirksame Maßnahmen erfordert, um die katastrophalsten Folgen zu verhindern. In seinem Urteil vom April 2021 hat das Bundesverfassungsgericht der Bundesregierung aufgegeben, noch vor 2030 deutlich stärkere CO₂-Reduktionen als bisher geplant umzusetzen. Von derzeit rund 800 Millionen Tonnen CO₂-Ausstoß pro Jahr müssen die deutschen Emissionen um 30 bis 35 Millionen Tonnen pro Jahr sinken. Nur so kann Deutschland sein CO₂-Budget einhalten, das mit den Zielen des Pariser Abkommens vereinbar ist. Das neue deutsche Klimaschutzgesetz erfüllt diese Ziele nur zum Teil.

Ein neuer Ansatz

Dieser Bericht wurde von der Umweltorganisation Ökomoderne e.V. in Auftrag gegeben, stellvertretend für eine große Zahl von Menschen, die dazu aufrufen, völlig neu über den Klimaschutz in Deutschland nachzudenken. Wir sind eine Gruppe von Ökomodernist*innen, Wissenschaftler*innen, Fachleuten aus der Energiebranche, Klimaaktivist*innen sowie Bürger*innen aus dem gesamten politischen Spektrum und aus allen Altersgruppen.

Unsere neue Art, über Klimapolitik nachzudenken, ist evidenzbasiert und wissenschaftlich fundiert. Sie schließt neben dem Ausbau der erneuerbaren Energien auch die tabuisierte und in Deutschland bereits aufgegebenen Atomenergie mit ein. In Auftrag gegeben wurde dieser Bericht, um aufzuzeigen, welche Auswirkungen und Folgen eine solche integrative Klimapolitik hätte. Sie würde zu einem schnelleren Kohleausstieg und einer geringeren Abhängigkeit von importiertem fossilem Gas führen.

Sowohl Erneuerbare als auch Atomkraft sind starke Klimaschutz Technologien.

Wir haben viel Zeit verloren

Es gibt mehrere Gründe, warum unser Land diesen klimapragmatischen Weg bisher nicht eingeschlagen hat.

- 1 Derzeit fehlen der politische Mut und die Kraft, den abrupten Ausstieg der Regierung Merkel aus der Kernenergie nach dem Unfall in Fukushima 2011 in Frage zu stellen. Solange Merkel im Amt bleibt, wollen selbst Politiker, die dies als Fehler ansehen, keinen politischen Kampf für eine Revision beginnen. Dieser Weg schafft mit jedem Tag neue Tatsachen und Pfadabhängigkeiten. Mit dem Urteil des Bundesverfassungsgerichts wurde daraus eine Flucht nach vorn mit einer Überinstallation von erneuerbaren Kapazitäten. Doch es ist fraglich, ob die Klimaziele auf diese Weise erreicht werden können - noch dazu in der vorgegebenen Zeit
- 2 Verschärft wird die Situation durch alte politische Konfliktlinien aus der Blütezeit der Anti-Atom-Bewegung. Diese wurden auf die Klimadebatte übertragen, was zu einer gegenseitigen Ausbremsung führte, obwohl wir alle am gleichen Strang ziehen müssten. Jede Diskussion oder Kampagne wird schnell zu einem Lagerwahlkampf "Fossilparteien gegen Grünlinks" oder "Industrie gegen den Planeten Erde". Die Wahrheit ist, dass das Klima ein zu großes Thema ist, als dass man es nur am gesellschaftlichen Rand belassen könnte. Wir brauchen alle Parteien an Bord, egal ob sie konservativ, liberal, links oder grün sind, egal ob sie mit der Industrie oder ökologischen Gruppen verbandelt sind.
- 3 Der Klimawandel ist ein zu großes Thema, um ihn zu einer Frage des persönlichen Lebensstils zu machen oder um individuelle Konsumententscheidungen anzuprangern. Dies führt zu sozialer Abgrenzung und verhindert kollektives Handeln für gemeinsame Interessen. Wir brauchen, um die Erderwärmung zu stoppen, schon heute enorme Mengen an sauberer, also CO₂-armer Energie. In den nächsten Jahrzehnten brauchen wir noch viel mehr davon.
- 4 Die Vergangenheit der deutschen Energiewende ist mit ihrer Auspielung von erneuerbaren Energien gegen die Kernenergie nicht hilfreich. Das ist sogar schädlich. Sowohl die erneuerbaren Energien als auch die Kernenergie sind starke Klimaschutztechnologien. Aber eine Politik der gegenseitigen Ausgrenzung hat ihre Befürworter gegeneinander aufgebracht. Das sorgt dafür, dass wir Kohle und andere fossile Energieträger noch viel länger verbrennen werden als wir es müssten. Wir können uns diese Gegnerschaft nicht länger leisten.

"Alles fürs Klima" bedeutet wirklich alles

"Alles fürs Klima": Wir nehmen die oft zitierte Handlungsanweisung von Fridays for Future ernst. Doch wenn wir "alles" sagen, meinen wir auch wirklich "alles". Wir meinen die Dekarbonisierung der Industriegesellschaft unter Einsatz aller verfügbaren Technologien. Wir können es uns schlicht nicht leisten, auf eine von ihnen zu verzichten oder sie zu benachteiligen. Wir brauchen in den nächsten zehn Jahren und darüber hinaus sowohl erneuerbare Energien als auch Kernenergie, um unsere Klimaziele zu erreichen.

Aber unser erstes und wichtigstes Anliegen ist die dringende Rettung der verbleibenden sechs deutschen Kernkraftwerke vor der Abschaltung. Das SaveGER6-Memorandum vom Juli 2020 fordert die Aussetzung des Atomausstiegs und plädiert stattdessen für eine rasche Stilllegung eines vergleichbaren Anteils der Kohleproduktion. Es ging den Abgeordneten des Deutschen Bundestages zu und die Berichterstattung in der ZEIT führte zu einer immer noch andauernden Debatte über die Sinnhaftigkeit des Atomausstiegs.

Der vorliegende Bericht geht auf die Folgen ein. Er liefert viele überzeugende Ar-

gumente für den Weiterbetrieb der sechs Reaktoren und die Beendigung der Kohleförderung. Darüber hinaus stellen wir weitere Szenarien vor, die unter Einbeziehung der Kernenergienutzung denkbar wären.

Mit diesem Bericht möchten wir auch an die deutsche Klimabewegung, die Umweltverbände und die Grünen appellieren, sich uns anzuschließen und alte Vorbehalte gegen die Nutzung der Kernenergie zugunsten einer nüchternen Betrachtung zurückzustellen. Die Klimakrise ist einfach zu ernst. Wie Fridays for Future sagt, brauchen wir alles. Dazu gehört auch ein gründliches Überdenken der Nutzung der Kernenergie, zur viel schnelleren Senkung unserer Emissionen als ohne sie.

Wir müssen rasch handeln

Ende 2021 werden drei der verbliebenen sechs deutschen Kernkraftwerke unwiderruflich vom Netz gehen. Würden wir stattdessen Braunkohlekraftwerke abschalten, könnten wir den Ausstoß von bis zu 65 Mio. Tonnen CO₂ pro Jahr verhindern. Das ist bis zu dreißigmal mehr Einsparung als ein Tem-

Wir brauchen in den nächsten zehn Jahren und darüber hinaus sowohl erneuerbare Energien als auch Kernenergie, um unsere Klimaziele zu erreichen.

polimit von 120 km/h bringen würde.

Wenn wir die Kernkraftwerke abschalten, gehen 12 % unserer Stromproduktion verloren. Das entspricht dem Abriss aller deutschen Photovoltaikanlagen oder 15.000 unserer Windkraftanlagen. Genau genommen ist es sogar noch schlimmer, da Kernkraftwerke wertvolle versorgungssichere Energie für das Stromnetz liefern. Unabhängig davon, wieviel mehr erneuerbare Energien wir zubauen, wird es viele Jahre dauern, bis wir diesen Verlust bei der CO₂-armen Energieerzeugung wieder wettgemacht haben.

Dieser Bericht liefert Entscheidungsträgern die Argumente, die sie brauchen, um nach der Bundestagswahl zügig Maßnahmen für eine Klimanotverordnung mit Aussetzung des deutschen Atomausstiegs durch Änderung des § 7 des Atomgesetzes zu ergreifen.

Ein solcher Schritt wäre auch ein wichtiges Signal für diejenigen, die sich bisher weniger Sorgen um die Notwendigkeit der Dekarbonisierung gemacht haben. Es würde zeigen, dass die Sache ernst ist - ernst genug, dass die Politik und die Klimabewegung bereit sind, nicht nur eine deutliche Änderung des

Lebensstils in der Bevölkerung zu verlangen, sondern auch ihr eigenes Verhalten und ihre Prioritäten in Bezug auf die Kernenergie zu ändern, um den Klimawandel zu mildern. "Alles fürs Klima" muss endlich beim Wort genommen werden.

August 2021,

Dr. Anna Veronika Wendland,
Nukleartechnik-Historikerin

Dr. Rainer Moormann,
Experte für Reaktorsicherheit

Autoren des Memorandums

"Warum wir die deutschen Kernkraftwerke jetzt noch brauchen" (2020)

Unabhängig davon, wieviel mehr erneuerbare Energien wir zubauen, wird es viele Jahre dauern, bis wir diesen Verlust bei der CO₂-armen Energieerzeugung wieder wettgemacht haben.



“Funktionsfähige Kernkraft-Kapazitäten abzuschalten, mitten im Klimawandel-Notstand (also jetzt), wie es Deutschland und Japan getan haben, ist eine fortgeschrittene Form des Wahnsinns. Das gilt vor allem dann, wenn wahrscheinlich ein Teil dieser Kapazitäten durch Gas oder Kohle ersetzt wird, mit ihren viel höheren CO₂-Emissionen.”

Das schrieb George Monbiot, der bekannte britische Schriftsteller und Umweltschützer, bereits im Jahr 2016. Seitdem hat sich der Klimanotstand nur noch verschlimmert. In Kanada herrschen Temperaturen wie im Death Valley. Ganze Ortschaften werden durch Waldbrände ausgelöscht. Im Death Valley selbst wird derweil mit 54,4 °C ein neuer Rekord für die weltweit höchste Temperatur aufgestellt. Die Meereseisbedeckung in der Arktis sinkt jeden Sommer auf neue Tiefstwerte, während es am Nordpol im Winter regnet.

Befindet sich die Welt in Alarmstufe Rot, um die Klimakrise zu bewältigen? Nicht wirklich. Seit George sich über die "fortgeschrit-

tene Form des Wahnsinns" beklagte, die CO₂-freie Kernkraft inmitten eines ausufernden Klimanotfalls stillzulegen, ergreift dieser Wahnsinn die Gemüter in Europa so stark wie nie zuvor. In Belgien kämpfen Abgeordnete der Grünen mit Händen und Füßen für die Schließung von Kernkraftwerken, wohl wissend, dass diese durch fossile Brennstoffe wie Erdgas ersetzt werden. In Deutschland beteiligt sich Greenpeace an einem Kohlekonvens, der vorsieht, die Kohlekraftwerke bis 2038 am Netz zu halten. Dies ist ein so eklatanter Verrat an zukünftigen Generationen, dass er anschließend vom Bundesverfassungsgericht zu einem solchen erklärt wurde.

Was ist bloß so besonders an der Kernkraft, dass engagierte Umweltschützer ihren Verstand ausschalten und zu einer ebenso großen Gefahr für das Klima werden wie Shell? Wie kam es zu diesem Wahnsinn und warum ist er in Deutschland so dominant geworden wie nirgendwo sonst auf der Welt? Wie dieser Bericht zeigt - und wie die wissenschaftlichen Berater der Europäischen Union

Was ist bloß so besonders an der Kernkraft, dass engagierte Umweltschützer ihren Verstand ausschalten und zu einer ebenso großen Gefahr für das Klima werden wie Shell?

kürzlich erklärten - gibt es keine wissenschaftlichen Beweise dafür, dass die Atomkraft auf besondere Weise gefährlich ist. Das Gegenteil ist der Fall - gemessen an der Zahl der Todesopfer ist die Kernenergie um Größenordnungen sicherer als alle fossilen Brennstoffe. Sie hat einen CO₂-Ausstoß, der mit dem von Windrädern vergleichbar und niedriger als der von Solaranlagen ist.

Den Preis für die Anti-Atom-Psychose (denn über eine solche reden wir hier) werden die gefährdeten Länder und zukünftigen Generationen zahlen, die unter den ausufernden Schäden des Klimazusammenbruchs leiden. Dieser Bericht beziffert diesen zu zahlenden Preis erstmals - eine satte runde Zahl von einer Milliarde Tonnen. Das sind die Opportunitätskosten für das vorzeitige Abschalten der verbliebenen sechs Kernkraftwerke in Deutschland. Währenddessen wird die Kohle noch fast zwei Jahrzehnte am Leben erhalten, wie von der Anti-Atom-Lobby gefordert. Inseln werden versinken, Korallenriffe werden sterben - aber Hauptsache, die Anti-Atom-Lobby wurde beruhigt.

Zum Glück gibt es - auch in Deutschland - Menschen, die einen evidenzbasierten Ansatz verfolgen und das Klima priorisieren.

Zum Glück gibt es - auch in Deutschland - Menschen, die einen evidenzbasierten Ansatz verfolgen und das Klima priorisieren. In ganz Europa wächst ein pragmatischerer, wissenschaftsorientierter Umweltschutz heran, der den gemeinsamen Notstand von Klima und Biodiversität ganz oben auf die Agenda setzt. Er ist nicht in ideologischen Denkmustern gefangen, die in den 1970er Jahren stehen geblieben sind. Wie die Fridays for Future-Bewegung zu Recht sagt: "Hört auf die Wissenschaft!" Was auch immer das Thema ist, von COVID bis zum Klima, die Wissenschaft ist unser Leuchtturm. Lasst uns auf das hören, was sie sagt.

Mark Lynas, Juli 2021
Autor von 6 Grad mehr:
Die verheerenden Folgen
der Erderwärmung

AWAKENING
THOUGHTS

CO₂

CLIMATE
CHANGE

CO₂



Über die deutsche Energiewende wurde schon viel geschrieben und es macht keinen Sinn, all das hier zu wiederholen. Aber ein kurzer Überblick über die entscheidenden Sachverhalte und Vorfälle ist notwendig, um den Kontext für diesen Bericht zu geben. Es gibt viele unterschiedliche Auslegungen, was Zweck und Ziele der Energiewende ursprünglich waren. Die folgenden vier Säulen der Energiewende sollten eine vernünftige Annäherung an den ursprünglichen Plan sein:²

1. Die Umstrukturierung Deutschlands von einer auf fossilen Brennstoffen basierenden Gesellschaft zu einer Gesellschaft mit geringen Kohlendioxidemissionen bis 2050. Ursprünglich sollten es 80 - 95 Prozent weniger CO₂ -Emissionen als 1990 werden. Dieses Ziel wurde inzwischen auf ein CO₂ -neutrales Deutschland bis 2045 aktualisiert.
2. Die Umstrukturierung Deutschlands zu einer Wirtschaft basierend auf erneuerbaren Energien, mit einem Anteil von 80 % Erneuerbaren bis 2050. Fossile Ener-

gie sollte nur noch als Backup eine Rolle spielen. Da Deutschland laut aktuellem Verfassungsgerichtsurteil bis 2045 klimaneutral sein muss, wird dieses Ziel entsprechend aktualisiert werden müssen.

3. Vorzeitiges Abschalten der aktuellen Flotte von Kernkraftwerken bis 2022.
4. Erhöhung der Flexibilität im Energieverbrauch und Steigerung der Energieeffizienz.

Nur die erste Säule ist ein Ziel. Die anderen drei Säulen sind zusätzliche Vorgaben und Einschränkungen, wie dieses Ziel erreicht werden muss: nur mit erneuerbaren Energien bei gleichzeitiger Schließung von CO₂-armen Kernkraftwerken und Erhöhung der Energieeffizienz und Nachfrageflexibilität.

In den rund 20 Jahren seit Beginn der Energiewende hat es einige Änderungen und Ergänzungen gegeben. So hat Deutschland im Jahr 2020 mit dem Kohleausstiegsgesetz beschlossen, alle Kohlekraftwerke bis 2038 abzuschalten. Außerdem hat die deutsche Regierung im Jahr 2021 eine nationale CO₂-Bepreisung für Brennstoffe im Verkehrs- und

² Diese Säulen stammen aus dem Vortrag "Energiewende in Perspective", von Dr. Leonard Birnbaum beim World Energy Council in Finnland, 2014.

Heizungssektor eingeführt. Das europäische Emissionshandelssystem umfasst bisher nur Strom, Fernwärme und die Schwerindustrie. Das Ziel, die Emissionen bis 2050 um 80-95 % zu senken, wurde umdefiniert auf "klimaneutral bis 2050" und so weiter.

Infolge eines Urteils des Bundesverfassungsgerichts³ im Jahr 2021 wurde das Ziel für 2050 in Deutschland verschärft und um Zwischenziele ergänzt:

- Bis 2030 muss Deutschland eine Reduktion der Emissionen um 65% gegenüber 1990 erreichen (statt 55% wie zuvor im Klimaschutzgesetz).
- Bis 2040 muss Deutschland eine Reduktion der Emissionen um 88% erreichen.
- Bis 2045 muss Deutschland klimaneutral sein. Restemissionen in der Wirtschaft müssen dann durch Kohlenstoffsenken vergleichbarer Größe ausgeglichen werden. Das können entweder natürliche oder künstliche Kohlenstoffabscheidung und -speicherung sein.

Diese Zwischenziele und die jüngste Erhöhung der Preise für CO₂ -Emissionen im europäischen Emissionshandelssystem ETS werden den "Kohleausstieg bis 2038" wahrscheinlich obsolet machen. Die Preise für CO₂ -Emissionen im ETS sind in wenigen Jahren von 5 Euro pro Tonne auf 50 Euro pro Tonne in der ersten Hälfte des Jahres 2021 gestiegen. Mittlerweile hat sich die EU auch darauf geeinigt, ihre CO₂ -Emissionsminderungsziele von 40 % auf 55 % bis 2030 (gegenüber dem Stand von 1990) zu verschärfen. Das wird wohl auch ein Grund für den jüngsten Preisanstieg der Emissionsgutschriften im ETS sein.

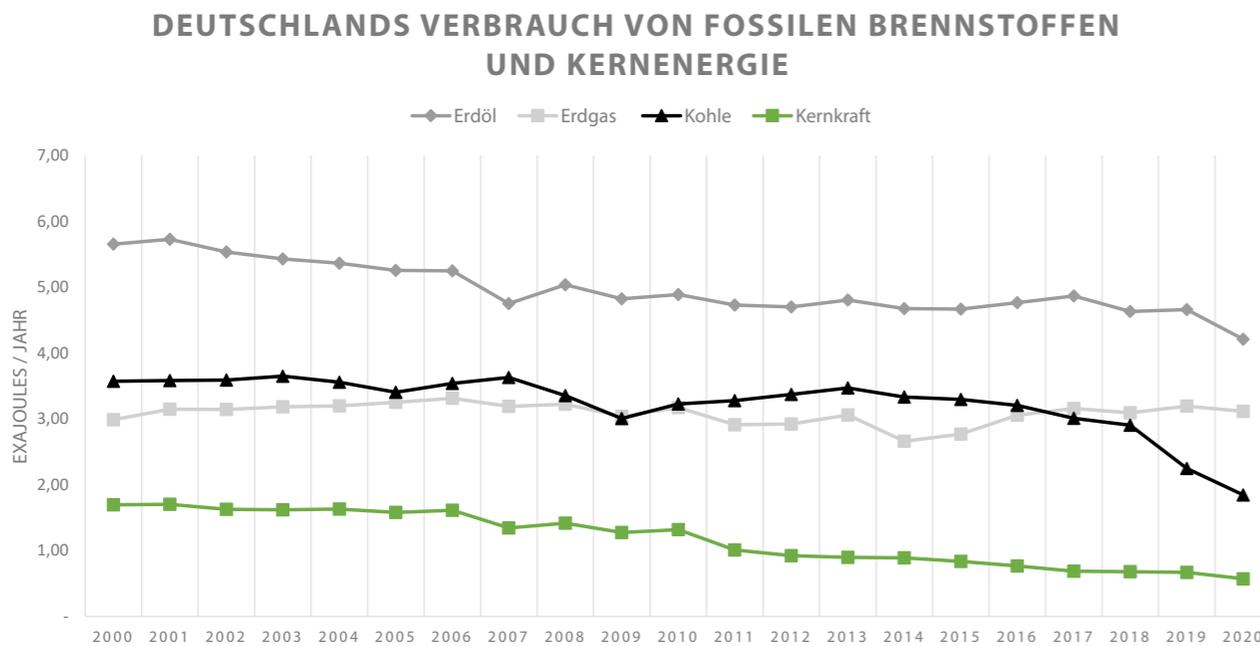
Im Jahr 1990 lagen die gesamten Treibhausgasemissionen Deutschlands bei 1.248 Mio. Tonnen CO₂-Äquivalent pro Jahr. Im Jahr 2020 betragen die Emissionen 739 Mio. Tonnen, was einer Reduktion von 509 Mio. Tonnen (40,8 %) gegenüber 1990 entspricht. Das sind etwa 17 Mio. Tonnen (1,36 %) Minderung pro Jahr. Dies wurde zum Teil dank einer über achtprozentigen Reduzierung im ersten Jahr der COVID-Pandemie erreicht. Nach dem neuen Emissionsziel für

³ Siehe <https://www.bundesverfassungsgericht.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/DE/2021/bvg21-031.html>

2030 von 437 Mio. Tonnen pro Jahr muss in den nächsten zehn Jahren eine Reduktion von etwa 30 Mio. Tonnen pro Jahr erreicht werden. Das ist fast doppelt so schnell wie in den vergangenen 30 Jahren. Dies ist ein ehrgeiziges Ziel, auch aus den folgenden Gründen: Die Reduktion in den letzten 30 Jahren beinhaltet eine globale Pandemie (70 Mio. Tonnen Rückgang in einem Jahr) sowie den Einmaleffekt der Schließung ineffizien-

ter ostdeutscher Industrien und Kraftwerke in den frühen 1990er Jahren (über 110 Mio. Tonnen Rückgang in 4 Jahren). Diese Ereignisse sind einmalig und nicht wiederholbar. Zusammen machen sie etwa ein Drittel des Rückgangs in den letzten 30 Jahren aus. Außerdem dürfte der Effekt, den die COVID-19-Pandemie verursacht hat, zumindest teilweise nur vorübergehend sein.

Abbildung 1: Entwicklung der Nutzung fossiler Brennstoffe und der Kernkraft in Deutschland. Quelle: BP Energy Statistics 2021.



Nach den jüngsten Berechnungen der Boston Consulting Group⁴ bedeuten die neuen Ziele, dass mindestens Folgendes geschehen muss:

- Der Kohleausstieg muss vorverlegt werden, zum Beispiel auf 2030.
- In neuen Gebäuden darf nach 2022 keine Öl- oder Gasheizung mehr installiert werden.
- Bei Bestandsgebäuden ist der Investitionsbedarf in die Energieeffizienz massiv.
- Neuzulassungen von Autos mit Verbrennungsmotoren müssen ab 2030 aufhören.
- Investitionen in Wind und Solar müssen verdoppelt werden.

Bisher waren die Ergebnisse der Energiewende erwartungsgemäß nicht besonders gut. Deutschland hat eine Stromproduktion mit einem großen Anteil von Windkraft, Solarstrom und Biomasse aufgebaut, unter hohen Kosten. In deutschen Stromrechnungen wird eine EEG-Umlage erhoben, mit der die Einspeisevergütungen für erneuerbare Energien bezahlt wird. Diese Vergütung be-

⁴ Siehe Handelsblatt: <https://tinyurl.com/3xmvwdhd>

trägt etwa 24 Milliarden Euro pro Jahr oder etwa 6,5 Eurocents pro kWh Strom in der Endverbraucherrechnung. Wenn man die EEG-Umlage auf den gesamten erneuerbaren Strom umrechnet (einschließlich Wind-, Solar-, Bio- und Wasserkraft), beträgt die Förderung etwa 10 Eurocents pro kWh erneuerbaren Stroms. Mit jährlich 24 Milliarden Euro hätte man drei EPR- (European Pressurized Reactor) pro Jahr bauen können, wenn man davon ausgeht, dass man aus dem Prototyp nichts lernen würde. Teuer scheint ein relativer Begriff zu sein.

Deutschland hat seine Kernkraftwerke planmäßig abgeschaltet. Ende 2010 gelang es Bundeskanzlerin Angela Merkel zwar noch, die Laufzeiten zu verlängern, über den ursprünglichen Termin 2022 hinaus. Als Hauptgrund wurde die Notwendigkeit von Emissionsreduzierungen angegeben. Nur einige Monate später, in der Panik nach dem Fukushima-Unfall, kippte Deutschland diese Entscheidung wieder. Lediglich drei Tage nach dem Tsunami wurden acht der älteren Reaktoren endgültig abgeschaltet. Für die restlichen neun Blöcke wurden Restlaufzeiten bis maximal 2022 festgelegt.

Während die Kohle einen leichten Rückgang zu verzeichnen hat, ist die Stromproduktion von Erdgas konstant geblieben und teilweise sogar gestiegen. Bestimmte Arten von Gasturbinen (sogenannte offene Gasturbinen mit einem Anteil von etwa 20 % an der Gas-Kapazität in Deutschland) sind flexibler und können das Stromnetz auch bei höheren Schwankungen in der Produktion von Wind- und Solarstrom stabilisieren. Erdöl, das hauptsächlich im Transportwesen verwendet wird, wird seit einem Jahrzehnt oder länger auf dem gleichen Niveau verbraucht. Zwar hat sich die Kraftstoffeffizienz neuer Verbrennungsmotoren verbessert, aber die Autos wurden größer und die gefahrenen Kilometer nahmen zu.

Die Nutzung der Kohle ist seit einigen Jahren stark rückläufig. Die Hauptgründe dafür sind:

1. Warme Wintertemperaturen in 2019 - 2020, daher geringerer Heizbedarf.
2. Geringere Energienachfrage insgesamt aufgrund der wirtschaftlichen Folgen von COVID in 2020.

5 Siehe https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Sachgebiete/ElektrizitaetundGas/Unternehmen_Institutionen/Kohleausstieg/kohleausstieg_node.html

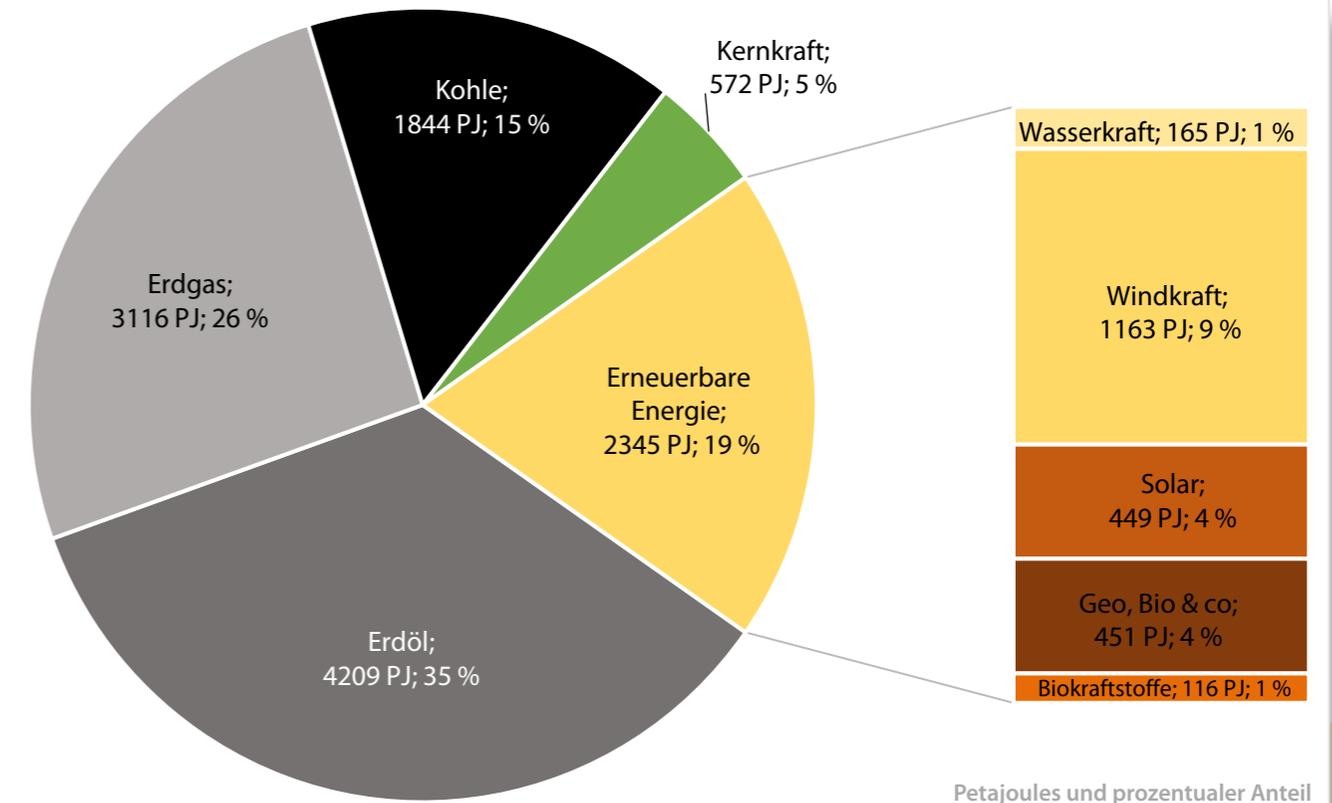
6 Siehe https://ag-energiebilanzen.de/index.php?article_id=29&fileName=awt_2019_d.pdf

3. Anstieg der CO₂-Preise im ETS-Markt, welcher die Einsatzreihenfolge von Kraftwerken beeinflusst.
4. Weiterer Anstieg der Stromerzeugung durch erneuerbare Energien.
5. Staatliche Vorgaben zur vorzeitigen Stilllegung von Kohlekraftwerken.⁵

Die Momentaufnahme der deutschen Energienutzung in Abbildung 2 zeigt, dass es noch viel zu tun gibt. Nach 20 Jahren Energiewende und Ausgaben in Höhe von Hunderten von Milliarden Euro liegt der Anteil der erneuerbaren Energien am Gesamtenergieverbrauch bei etwa 20 %. Bemerkenswert ist, dass die Hälfte davon aus Biomasse stammt, wenn man zusätzlich zu dem in Abbildung 2 gezeigten Anteil die Verbrennung in Holzöfen für den Heimgebrauch berücksichtigt.⁶ Die Nachhaltigkeit von solcher festen Biomasse wird vielfach in Frage gestellt. Außerdem stellen rund 75 % des gesamten Energiemixes immer noch fossile Energieträger.

In den folgenden nochmals 20 Jahren muss

Abbildung 2: Primärenergiemix in Deutschland im Jahr 2020.



Die Nutzung der Kohle ist seit einigen Jahren stark rückläufig.

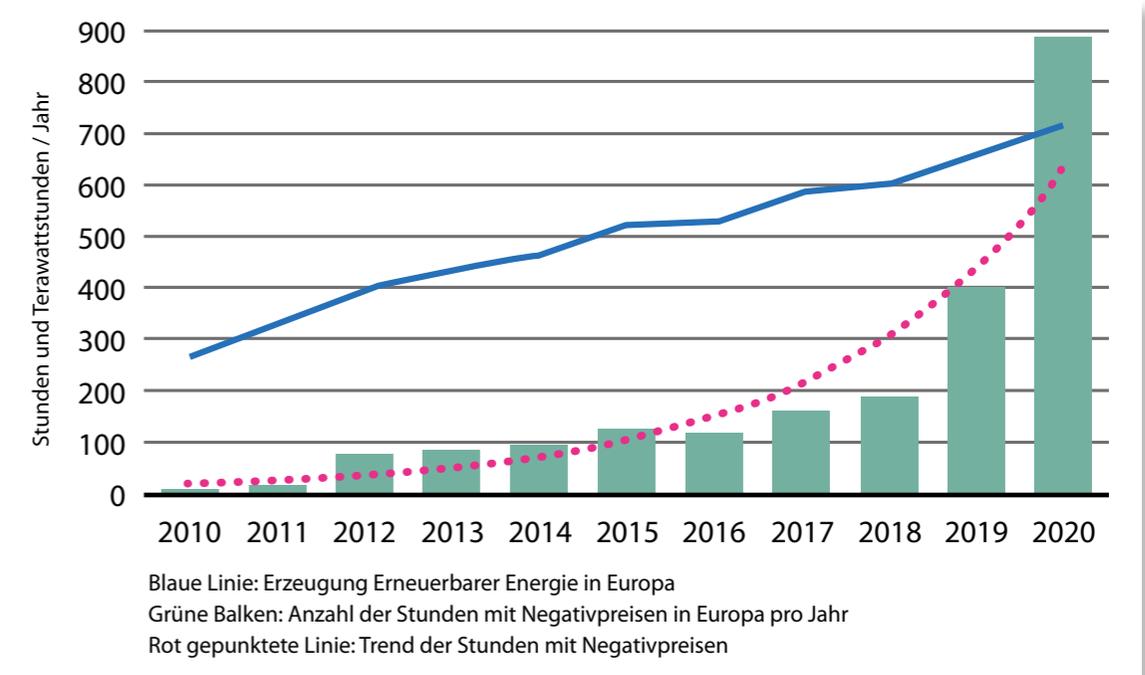
Deutschland diesen Anteil um das Vier- oder Fünffache erhöhen, wobei dies aus mehreren Gründen exponentiell aufwändiger wird. Erstens wird es schwieriger und teurer, mehr variable Energieerzeugung (Wind, Solar) ans Netz zu bringen, je mehr ihr Anteil steigt (siehe Abbildung 3). Zweitens wurden fossile Brennstoffe zuerst dort ersetzt, wo es am einfachsten und billigsten war. In Zukunft wird das Ersetzen fossiler Energie tendenziell immer anspruchsvoller und teurer werden.

Die Dekarbonisierung von Heizung, industrieller Prozesswärme und Transportkraftstoffen wird viel schwieriger sein als die im Stromsektor. Da Deutschland sowohl Kernkraftwerke als auch Kohlekraftwerke abschalten will, wird es wahrscheinlich seine Kapazität an Erdgasturbinen mehr als verdoppeln müssen, um sicherzustellen, dass der Spitzenverbrauch jederzeit gedeckt werden kann. Die erzeugte Menge an erneuerbarem Strom im europäischen Netz ist seit 2010 linear von 280 Terawattstunden (TWh) pro Jahr auf 710 TWh/Jahr gestiegen (blaue

Linie). Derweil ist die Anzahl der Stunden pro Jahr mit negativem Preis im Strommarkt von fast null im Jahr 2010 auf fast 900 im Jahr 2020 gestiegen (grüne Säulen und rot gestrichelte Trendkurve). Der jüngste Zubau von nur 50 TWh an zusätzlicher erneuerbarer Stromproduktion im Jahr 2020 führte zu mehr als einer Verdopplung der Stunden mit negativem Strompreis in Europa. Wahrscheinlich spielten dabei aber auch die COVID-19-Pandemie und der warme Winter eine Rolle, weil dadurch die Nachfrage insgesamt sank.

Da Deutschland sowohl Kernkraftwerke als auch Kohlekraftwerke abschalten will, wird es wahrscheinlich seine Kapazität an Erdgasturbinen mehr als verdoppeln müssen, um sicherzustellen, dass der Spitzenverbrauch jederzeit gedeckt werden kann.

Abbildung 3: Anzahl der Stunden mit negativem Strompreis im europäischen Energiemarkt Quelle: Platts Electricity Service and BP Energy Statistics 2020.



Wir haben schon zu viel CO₂ und andere Treibhausgase im Atmosphäre und müssen Wege finden, diese Konzentrationen zu reduzieren, um unser Klimasystem zu stabilisieren.

Preisstruktur und negative Preise

Negative Strompreise treten auf, wenn es im Vergleich zur Nachfrage eine Überproduktion gibt. Dieses Phänomen tritt tendenziell häufiger auf, wenn der Anteil variabler Quellen wie Wind und Solar an der Gesamtproduktion ein bestimmtes Niveau erreicht.

Stunden mit negativen Strompreisen sind daher vor allem eine Folge von Subventionen auf die Stromproduktion. Das können Einspeisevergütungen sein, die für bestimmte Energiequellen gewährt werden, unabhängig davon, wie hoch Verbrauch und Marktpreis sind. Dadurch lohnt sich die Investition in solche Erzeuger auch bei höherem Systemanteil. Wenn die Nachfrage im Netz konstant 100 GW beträgt und 100 GW Windkraft installiert sind, kann die gesamte Nachfrage allein durch Windkraft gedeckt werden, solange ausreichend Wind weht. Das führt dazu, dass die Marktpreise für den gesamten Strom gegen Null tendieren. Da der Wind aber nur selten mit voller Kraft weht, kann diese Windkapazität am Ende nur etwa 30 - 40 % des gesamten jährlichen Strombedarfs decken⁷. Die Restmenge ist die Residuallast, die an-

ders gedeckt werden muss. Wenn Erzeuger, die diese Residuallast abdecken sollen, keine Subventionen erhalten, verlieren sie aufgrund der erhöhten Anzahl "wertloser" Stunden ihre Wettbewerbsfähigkeit. Als Folge der zunehmenden Elektrifizierung und des Ausstiegs aus der Atom- und Kohleverstromung in Deutschland besteht beispielsweise ein wachsender Bedarf an neuen Gaskraftwerken - etwa 100 GW bis 2030 im Vergleich zur derzeitigen Kapazität von 27 GW -, um die zunehmende Variabilität der Wind- und Solarproduktion zu unterstützen. Diese Gasturbinen arbeiten mit sehr niedrigen Kapazitätsfaktoren, so dass es nicht möglich ist, sie ohne Subventionen rentabel zu betreiben. Dies hat zu einer Situation geführt, in der wir Subventionen zahlen müssen, um zusätzliche Infrastruktur für fossile Brennstoffe aufzubauen, anstatt sie loszuwerden.

Die Elektrifizierung eines möglichst großen Teils der Wirtschaft ist eine der Schlüsselstrategien, um tiefgreifende Reduktionen von Emissionen zu erreichen. Diese sogenannte Sektorkopplung setzt jedoch voraus, dass

⁷ Diesen Prozentsatz nennt man den Kapazitätsfaktor oder auch Jahresnutzungsgrad. Für Windkraft liegt dieser Faktor zwischen 25 und 45 %, je nach Technologie und Standort.

Strom billig ist, vorzugsweise billiger als die Alternativen (fossile Brennstoffe). In Deutschland ist er jedoch teurer als die Alternativen. Selbst wenn ein deutscher Verbraucher Strom am Intraday-Spotmarkt zum Nulltarif kaufen würde, müsste er für jede Kilowattstunde eine beträchtliche Summe für Netze, Steuern, Gebühren und Umlagen zahlen. Das ist so viel, dass es selbst verglichen mit einer effizienten Wärmepumpe wirtschaftlich sinnvoller wäre, mit Erdgas statt mit Strom zu heizen. Hohe Stromkosten verzögern und erschweren die Sektorkopplung und damit auch die Dekarbonisierung unserer Energienutzung.

Deutschland steht in den nächsten 10, 20, 30 Jahren vor einer gewaltigen Aufgabe, auch ohne Atomausstieg. Das Land versucht etwas zu vollbringen, was noch nie ein Land zuvor geschafft hat, und bindet sich dabei auch noch selbst die Hände⁸. Das mag zwar inspirierend und motivierend klingen, aber erhöht unnötigerweise die Risiken und Kosten eines Projekts, welches deutlich kritischer ist als zum Beispiel die Mondlandung. Wahrscheinlich haben wir diesmal nur einen Versuch, erfolgreich zu sein. Hier zu schei-

tern kann für unsere ganze Zivilisation bedrohlich werden⁹. Das Risiko dieser Aufgabe erheblich zu steigern, ist ein Zeichen von Unverantwortlichkeit.

Darüber hinaus ist klar geworden, dass das Erreichen von Netto-Null-Emissionen weltweit um die Jahrhundertmitte nur der erste Schritt ist, wenn auch ein großer. In der Atmosphäre haben wir bereits zu viel CO₂ und andere Treibhausgase. Wir müssen Wege finden, diese Konzentrationen zu reduzieren, um unser Klimasystem zu stabilisieren. Dazu brauchen wir negative Emissionen in signifikanter Höhe. Das wird wahrscheinlich viel mehr Energie verbrauchen, zum Beispiel für Maschinen, die Kohlenstoff aus der Atmosphäre abscheiden. In diesem Bericht schließen wir alle Treibhausgase als CO₂-Äquivalente ein, wenn wir uns auf CO₂-Emissionen beziehen.

Dieser Bericht erörtert, wie Deutschlands Energiewende viel effektiver sein könnte, wenn die Kernenergie in den Mix einbezogen würde. Im folgenden Abschnitt wird erörtert, warum die Kernkraft viel besser ist, als ihr Ruf in Deutschland vermuten ließe.

⁸ Wenn man bedenkt, dass eine weitere wichtige Technologie, Carbon Capture and Storage (CCS), ebenfalls praktisch verboten ist, könnte man auch sagen, dass sich Deutschland nicht nur die Hände, sondern auch die Füße gebunden hat.

⁹ Siehe zum Beispiel Mark Lynas "6 Grad mehr: Die verheerenden Folgen der Erderwärmung" (2021, Rowohlt)



Die Analysen ergaben keine wissenschaftlich fundierten Beweise dafür, dass die Kernenergie der menschlichen Gesundheit oder der Umwelt mehr Schaden zufügt als andere Technologien zur Stromerzeugung, die bereits in der Taxonomie als Maßnahmen zur Unterstützung des Klimaschutzes aufgeführt sind. – Joint Research Centre, 2021¹⁰

Die Kernenergie hat sich immer wieder als sicher und weniger umweltschädlich als die meisten anderen Energiequellen erwiesen. Dennoch gilt es in Deutschland als Allgemeinwissen, dass Atomkraft schrecklich und gefährlich sei. Dieser Glaube ist in der Gesellschaft so weit verbreitet, dass Zweifel daran kaum denkbar scheinen. Und wenn man doch Skepsis äußert, dann sorgt der Druck aus dem sozialen Umfeld dafür, dass man das Thema nur ungern in der Öffentlichkeit anspricht. Es scheint aber einen großen Unterschied zu geben zwischen dem, was die Deutschen denken, und dem, was sie sich öffentlich zu sagen trauen. Aktuellen Umfragen zufolge ziehen die meisten Deutschen die Kernkraft der Kohle vor und akzeptieren die Kernenergie als Lösung zur Bekämpfung des Klimawandels¹¹.

Auch die deutschen Medien haben ihren Teil dazu beigetragen, die Panikmache vor der Atomkraft zu schüren und sogar anzuführen¹². Gegen Angst haben Wissenschaft und Fakten einen schweren Stand. Es gibt wenig, was eine Sammlung von statistischen Daten und eine Bibliothek wissenschaftlicher Studien gegen Gefühle, Hörensagen und lange gehegte Überzeugungen ausrichten können.

Dennoch müssen wir es versuchen. Es steht zu viel auf dem Spiel. Die deutsche Energiewende, lange Zeit eine Quelle nationalen Stolzes und ein Vorzeigeprojekt klimaa- und umweltpolitischer Fortschrittlichkeit, hat ernsthafte Probleme mit ihren Grundlagen und Prioritäten. Sie wurde teilweise auf Volksglauben und Vorurteilen aufgebaut, statt auf solider Wissenschaft

und Fakten. Die Atomkraft wurde zum größten Gegner erklärt und ihre Abschaltung zur obersten Priorität. Tatsächlich ist der Ausstieg aus der Kernenergie das einzige Ziel der Energiewende, das erfolgreich ist. Aber dieser Erfolg beim Ausstieg aus der Kernkraft wird um den Preis erkauft, dass das wichtigste Ziel der Energiewende verfehlt wird: die Bekämpfung des Klimawandels durch einen schnellstmöglichen Umstieg der deutschen Gesellschaft auf Netto-Null-Emissionen.

In diesem Kapitel wird erörtert, warum die Kernenergie nicht als Gegner gesehen werden sollte. Sie sollte vielmehr ein wertvolles Instrument sein, um das wichtige Ziel zu erreichen, die Emissionen fossiler Brennstoffe zu reduzieren. Vieles von dem, was man über die Kernenergie hört, ist unwahr, irreführend oder lässt wesentlichen Kontext und Vergleiche missen. Das obige Zitat des JRC ist aufschlussreich: Die Kernenergie ist genauso nachhaltig, sicher und umweltfreundlich wie alles andere, was wir als nachhaltig bezeichnen. In vielen Fällen ist sie es sogar noch mehr.

Das obige Zitat des JRC ist aufschlussreich: Die Kernenergie ist genauso nachhaltig, sicher und umweltfreundlich wie alles andere, was wir als nachhaltig bezeichnen. In vielen Fällen ist sie es sogar noch mehr.

¹⁰ Siehe https://ec.europa.eu/info/sites/default/files/business_economy_euro/banking_and_finance/documents/210329-jrc-report-nuclear-energy-assessment_en.pdf

¹¹ Siehe <https://nuklearia.de/2021/06/16/umfragen-mehrheit-der-deutschen-will-kernkraft-fuer-den-klimaschutz-2/>

¹² Siehe Kepplinger 2015, <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10584609.2015.1022240>



Kernenergie, Klima und die Ziele für nachhaltige Entwicklung

„Kernenergie ist ein 'unverzichtbares Werkzeug' zur Erreichung der Ziele für nachhaltige Entwicklung. Sie spielt eine entscheidende Rolle bei der Versorgung mit bezahlbarer Energie und beim Klimaschutz, sowie bei der Bekämpfung von Armut, der Beendigung von Hunger, der Versorgung mit sauberem Wasser, bei wirtschaftlichem Wachstum und bei industrieller Innovation.“

– Expertengruppe für Ressourcenmanagement der Wirtschaftskommission für Europa der Vereinten Nationen (2021)

Ein kürzlich von der Wirtschaftskommission für Europa der Vereinten Nationen (UNECE) veröffentlichter Bericht erörtert, wie Kerntechnik zu den 17 von den Vereinten Nationen definierten Zielen für nachhaltige Entwicklung beiträgt.¹³ Der Bericht stellt fest, dass die Kernenergie zu jedem einzelnen dieser Ziele etwas beiträgt, und bei vielen ist das Zutun sogar erheblich. Die Kernkraft ist ein wertvolles Werkzeug auf dem Weg zu mehr Nachhaltigkeit und menschlichem Wohlergehen.

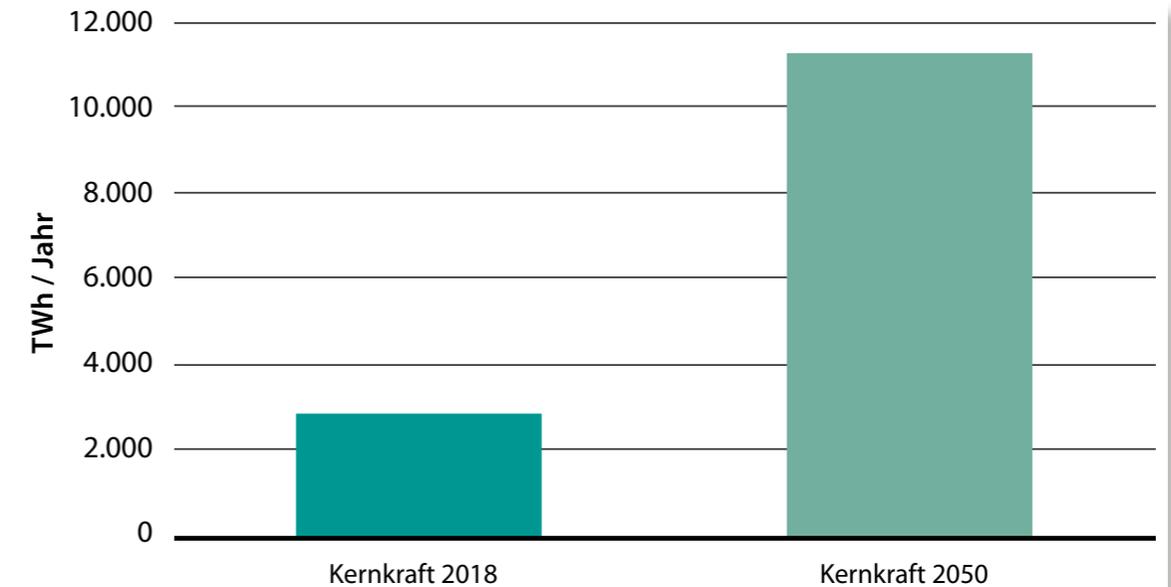
Kein Wunder also, dass der Weltklimarat der Kernenergie eine bedeutende Rolle einräumt, in seinen vier Hauptszenarien des Sonderberichts 1,5 °C globale Erwärmung aus dem Jahr 2018.¹⁴ Wie in Abbildung 4 ersichtlich ist, sehen die vier Hauptszenarien ein durchschnittliches Wachstum der Kernenergie um mehr als das Vierfache bis 2050 gegenüber dem Stand von 2018 vor. Diese

Szenarien machen Annahmen zu enormen Effizienzsteigerungen, dem Einsatz von Solarenergie, dem Zubau von Windenergie und sogar dem Ausbau der Bioenergie, der aus Sicht der Biodiversität nicht nachhaltig scheint. Die Abscheidung und Speicherung von Kohlendioxid spielt in den meisten dieser Szenarien ebenfalls eine wichtige Rolle, obwohl dessen Skalierbarkeit noch nicht bewiesen ist. In einigen der Szenarien geht der Energieverbrauch sogar deutlich zurück, obwohl die Weltbevölkerung auf 9 bis 10 Milliarden Menschen anwachsen wird. Außerdem werden die Entwicklungsländer ihre Wirtschaft zusammen mit ihrem Energieverbrauch ausweiten - wie sie es in der Vergangenheit getan haben. Die Annahmen sind also gewagt. Wir könnten auch vor einer Situation stehen, in der noch mehr saubere Energie benötigt wird als hier angenommen.

¹³ Siehe UNECE 2021, <https://unece.org/sustainable-energy/publications/nuclear-entry-pathways>

¹⁴ Siehe <https://www.ipcc.ch/sr15/>

Abbildung 4: Erzeugung von Kernenergie im Jahr 2018 und im Jahr 2050 - Die Zahl für 2050 ist der Durchschnitt der vier Hauptszenarien aus der Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger aus dem Sonderbericht 1,5 °C globale Erwärmung des Weltklimarats. Die Zahl für 2018 stammt aus dem BP Report 2020.



Quelle: IPCC (2018)

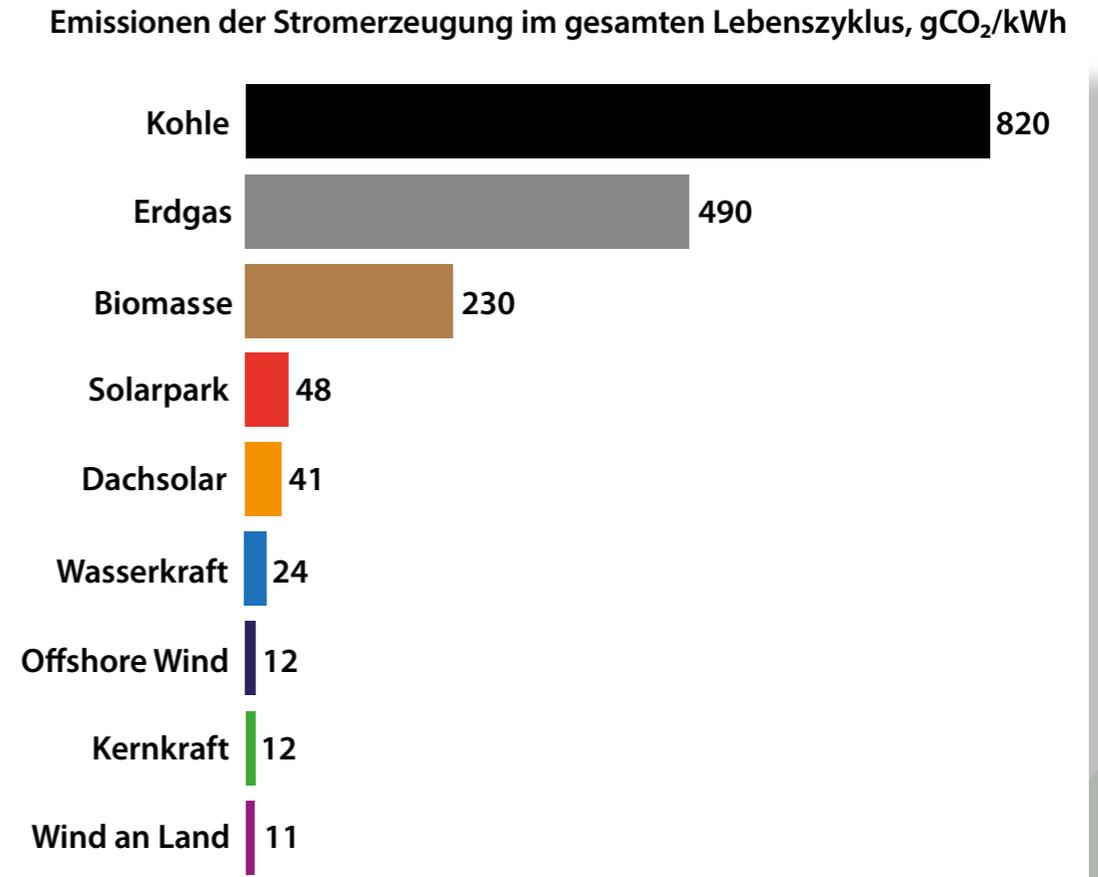
Kernenergie hat niedrige CO₂-Emissionen

Es gibt viel Fehlinformation zu einem eigentlich offensichtlichen Fakt: Eine Energiequelle, die ohne Verbrennung von chemischen Brennstoffen Energie erzeugt, gilt als CO₂-arm. Von allen unseren Energieerzeugern hat die Kernenergie mit am niedrigsten CO₂-Emissionen. Das gilt selbst dann, wenn man den gesamten Lebenszyklus berücksichtigt - Bau, Ressourcenförderung, Transport, Anreicherung, Rückbau, Abfallentsorgung und so weiter. Wenn es um versorgungssichere Energie für die Gesellschaft geht, ist Kernkraft sogar die Technologie mit den geringsten CO₂-Emissionen. Andere CO₂-arme Optionen sind entweder nicht skalierbar (z. B. Wasserkraft und Biomasse) oder sie benötigen große Mengen an Infrastruktur und Back-up, um Energie bedarfsgerecht und zuverlässig anbieten zu können (z. B. Wind und Solar). Es ist außerdem wichtig, die Auswirkungen der verschiedenen Erzeuger über ihre gesamte Lebensdauer zu betrachten. Die Klimabelastung über den Lebenszyklus von Energiequellen wird oft in Gramm Kohlendioxid pro erzeugter Kilowattstunde Strom gemessen - also gCO₂ /kWh. Wie in

Abbildung 5 zu sehen ist, hat die Kernenergie einen sehr niedrigen CO₂-Fußabdruck über den Lebenszyklus.

Abbildung 5 bezieht sich auf eine Meta-studie (eine Zusammenfassung der wissenschaftlichen Studienlage zu einem Thema), also eine recht gute Referenz. Diese Studie des Weltklimarats wurde 2014 veröffentlicht. Die Daten in den untersuchten Studien sind also sogar noch älter. Wahrscheinlich haben sich die Zahlen durch die technologischen Fortschritte des letzten Jahrzehnts verbessert. Andererseits beschreiben diese Lebenszyklusemissionen nur die Energieproduktion, nicht die Bereitstellung von versorgungssicherer Energie, wie wir sie brauchen. Die variable Produktion von Wind- und Solarenergie muss irgendwie bewältigt werden. Die Lösung dafür ist entweder Wasserkraft, wenn diese verfügbar ist, oder Erdgas. Alle anderen Optionen sind derzeit noch in ihrem Umfang begrenzt oder teuer. Ein Stromnetz mit einem Drittel Solarenergie, einem Drittel Windkraft und einem Drittel Erdgas hätte nach den oben genannten Zahlen des Weltklimarats Emis-

Abbildung 5: Mittelwert der CO₂-Emissionen über den Lebenszyklus für die Erzeugung von Elektrizität nach IPCC 2014.



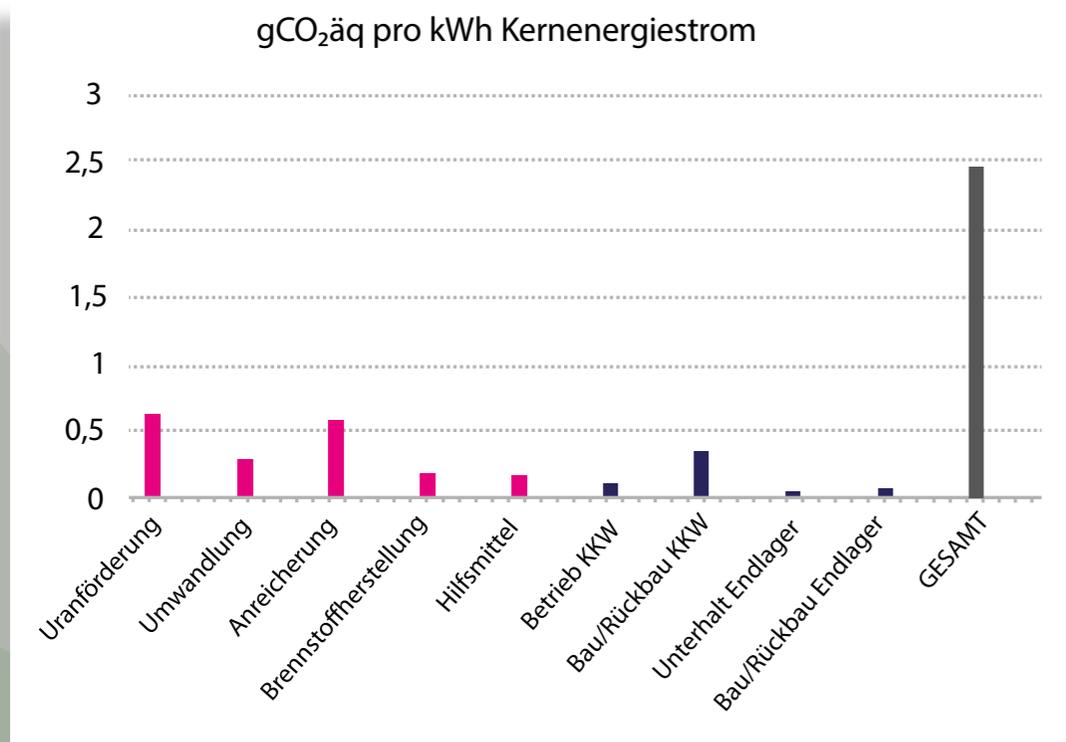
sionen von etwa 180 gCO₂/kWh, was mindestens viermal zu hoch ist, um als CO₂-arm zu gelten.

Einzelne Studien kamen auch für die Kernenergie auf höhere Zahlen, aber sie stützen sich oft auf alte und unzuverlässige Daten und sogar verzerrte Annahmen. Zum Beispiel wird Uran heute mit Zentrifugen angereichert, was 50 Mal energieeffizienter ist als die Gasdiffusion. Dennoch gehen viele der Studien, die höhere Emissionen

für die Kernenergie feststellen, davon aus, dass die Anreicherung per Gasdiffusion stattfindet. Die jüngste ISO-zertifizierte Umweltbewertung weist für Vattenfalls bestehende Kernkraftwerksflotte einen Wert von 2,5 gCO₂/kWh aus.¹⁵ Abbildung 6 zeigt, wie sich diese Emissionen auf die verschiedenen Schritte im Lebenszyklus verteilen. Kernenergie ist ganz eindeutig eine unserer Energiequellen mit den niedrigsten CO₂-Emissionen.

¹⁵ Siehe <https://www.environdec.com/library/epd923>

Abbildung 6: CO₂-Emissionen über den Lebenszyklus der Reaktorflotte von Vattenfall, nach Verursacher.



Kernenergie hat einen geringen ökologischen Fußabdruck

Ein Kernkraftwerk erbringt zwei wertvolle Leistungen: jederzeit versorgungssichere Energie, die außerdem die Netzfrequenz stabilisiert, und eine große Menge sauberer Elektrizität über die Lebenszeit. Ein einziger großer Reaktor kann über zehn Terawattstunden Strom pro Jahr erzeugen - genug, um Millionen von Haushalten zu versorgen.¹⁶ Kraftwerksstandorte können wiederum mehrere Reaktoren beherbergen. Wenn man das gesamte Betriebsgelände zählt, kann ein 5 km² großes Kernkraftwerk bis zu 10 Gigawatt (GW) Leistung liefern. Das summiert sich zu 80 TWh sauberen Stroms, der in einem Jahr erzeugt wird. Kernkraftwerke haben also eine sehr hohe Leistungsdichte.

Zur Veranschaulichung: Deutschland verbraucht etwa 600 TWh Strom pro Jahr. Theoretisch könnte dies von einem Dutzend großer Standorte mit mehreren Reaktoren auf einer Gesamtfläche von etwa 60 km² erzeugt werden. Ein Großteil dieser Fläche kann (und wird) als Naturschutzgebiet

fungieren. So werden Arten geschützt und die lokale Biodiversität gefördert. Menschliche Aktivitäten innerhalb der Anlagengrenzen sind limitiert und die Gebäude und Straßen belegen nur einen kleinen Teil der Gesamtfläche. Ähnliches gilt für Windkraftanlagen an Land: die Gesamtfläche umfasst einen viel größeren Bereich als die Windräder, Stromleitungen und Zugangsstraßen. Kernkraftwerke haben in der Praxis meistens nur 2 - 4 Reaktoren, so dass die mittlere Leistungsdichte geringer ist als das oben genannte theoretische Maximum.

Laut einer aktuellen Meta-Analyse zur Leistungsdichte verschiedener Energiequellen hat die Kernkraft die zweithöchste mittlere Leistungsdichte von 241 W/m².¹⁷ Erneuerbare Energien (einschließlich Windkraft an Land, Photovoltaik, Solarwärmekraftwerke und Biomasse) haben eine mittlere Leistungsdichte von 0,23 W/m² - drei Größenordnungen niedriger als die der Kernkraft. Biomasse hat mit 0,08 W/m² die niedrigste Leistungsdichte, was auf den

¹⁶ Dies hängt davon ab, wie hoch man den Jahresverbrauch eines "Haushalts" ansetzt, was stark abweichen kann.

¹⁷ Siehe Zalk et al 2018, <https://doi.org/doi:10.1016/j.enpol.2018.08.023>

geringen Wirkungsgrad der Photosynthese zurückzuführen ist. Photovoltaik und Solarthermiekraftwerke haben mit $6,6 \text{ W/m}^2$ und $9,7 \text{ W/m}^2$ die höchsten mittleren Leistungsdichten unter den erneuerbaren Energien. Wind an Land liegt bei 2 W/m^2 . Siehe durchschnittliche Stromerzeugung nach Quelle in Abbildung 7.

Windkraft. Als Praxis-Beispiel für Offshore-Wind können wir das bisher größte Bauprojekt untersuchen, den Offshore-Windpark Dogger Bank in der Nordsee.¹⁸ Dogger Bank hat eine geplante Nennleistung von $3,6 \text{ GW}$ und eine Ausdehnung von 1.674 km^2 . Geht man von einem durchschnittlichen jährlichen Kapazitätsfaktor der Windturbinen von 48% aus, wird der gesamte Offshore-Windpark Dogger Bank etwas mehr als 15 TWh pro Jahr erzeugen. Würde man einen solchen Windpark mehrfach kopieren, um den deutschen Strombedarf von 600 TWh zu decken, wären 40 davon erforderlich, die eine Fläche von etwa 67.000 km^2 einnehmen. Daraus folgt für Dogger Bank eine Energieproduktion von etwa $9 \text{ GWh/km}^2/\text{Jahr}$. Das ist halb so groß wie bei Wind an Land, wie Abbildung 7 zeigt.

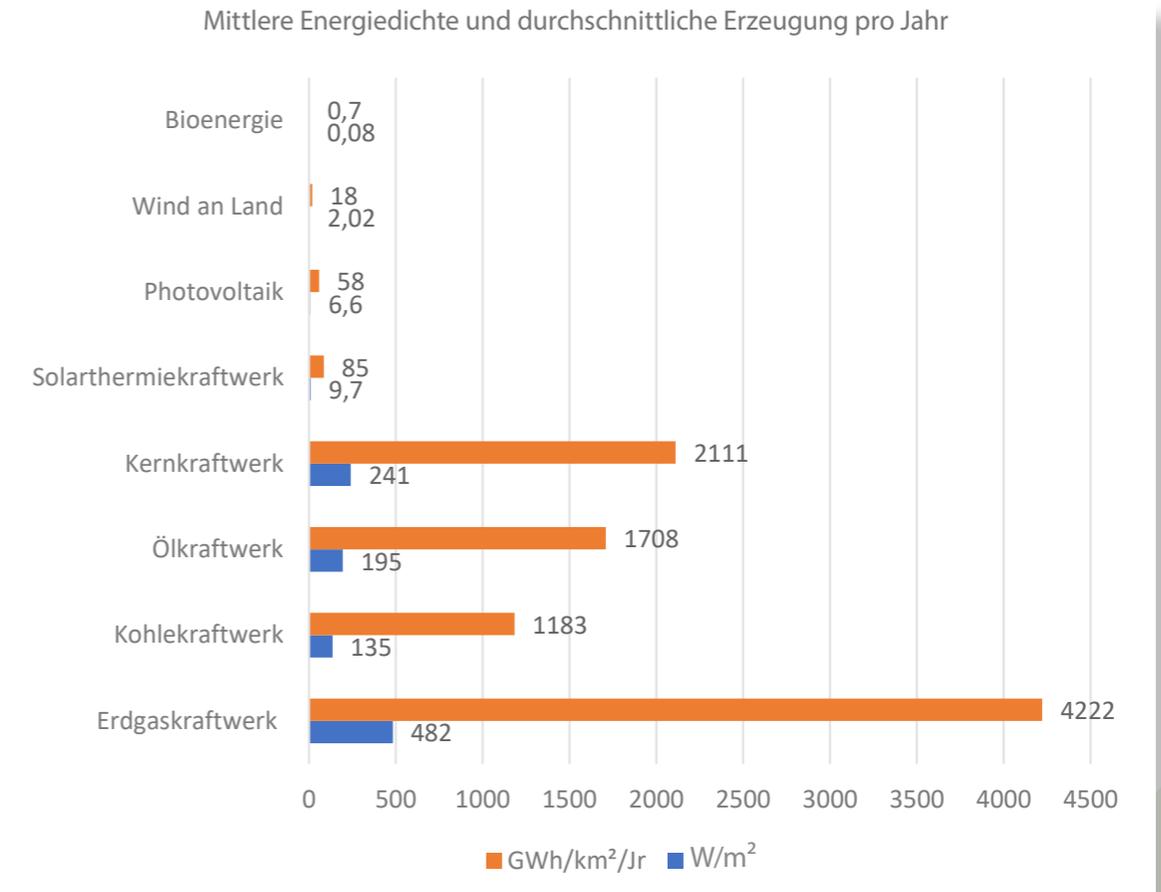
¹⁸ Siehe <https://doggerbank.com/>

Solarenergie. Die Solarenergie braucht weniger Platz als die Windenergie, nutzt diesen Platz aber komplett für sich. Bei Installationen auf Dächern und an Mauern spielt dies keine Rolle, da es keine andere Verwendung für die Fläche gibt. Aber Solaranlagen auf Dächern sind viel teurer als großflächige Solarparks am Boden. Hier wiederum zerstört es das lokale Ökosystem, wenn man die Natur plattwalzt und sie mit Solarpanels bedeckt. Bei einer durchschnittlichen Jahresproduktion von $58 \text{ GWh/km}^2/\text{Jahr}$ bräuchte man über 10.000 km^2 Solarmodule, um den deutschen Strombedarf von 600 TWh/Jahr zu decken. Bei 83 Millionen Deutschen bedeutet das für jeden Bürger etwa 124 m^2 Sonnenkollektoren.

Bioenergie. Mit Bioenergie würde man etwa 850.000 km^2 benötigen, um den deutschen Strombedarf zu erzeugen. Die deutsche Waldfläche beträgt ca. 114.000 km^2 , man bräuchte also fast die achtfache Fläche der deutschen Wälder, um den Stromverbrauch von 600 TWh zu decken. Das ist etwa das 2,5-Fache der deutschen Gesamtfläche.

Zusammenfassend kann ein Mix aus er-

Abbildung 7: Mittlere Leistungsdichten und durchschnittliche Stromerzeugung für verschiedene Stromerzeuger nach Zalk et al. (2018)



neuerbaren Energien etwa 100 Mal mehr Fläche beanspruchen als die Kernkraft. Das ist wichtig, da sowohl Menschen als auch die Natur durch unsere Energieinfrastruktur beeinträchtigt werden. Je mehr Land beansprucht wird, desto größer ist die Störung. Solarenergie auf dem Dach ist eine großartige Idee, ebenso wie die Nutzung des Windes in Gebieten, in denen Mensch und Natur nicht stark gestört werden. Aber diese Flächen sind begrenzt. Wir müssen den gesamten Energiemix dekarbonisieren, also die Produktion von Wärme, Wasserstoff und synthetischen Kraftstoffen in großem Maßstab. Das würde bedeuten, dass Wind- und Solarkraftwerke Flächen bräuchten, die um eine Größenordnung größer sind als heute. Mit einer zuverlässigen Basisversorgung durch Kernkraft, um einen Teil der Energie zu liefern, wäre dieser Flächenverbrauch viel kleiner. So blieben Menschen und Ökosysteme ungestört.



Mit einer zuverlässigen Basisversorgung durch Kernkraft, um einen Teil der Energie zu liefern, wäre dieser Flächenverbrauch viel kleiner. So blieben Menschen und Ökosysteme ungestört.



Kernenergie ist unsere zuverlässigste Energiequelle

Der Betrieb eines Kernreaktors ist stark reguliert und jede unnötige Ausfallzeit bedeutet finanzielle Verluste. Die Kernkraftwerksbetreiber haben also ein großes Interesse daran, die Anlagen so lange wie möglich in einem guten Zustand und in Betrieb zu halten. Aus diesem Grund laufen viele Kernkraftwerke mehr als 90 % der Zeit mit voller Leistung. Und selbst von den 10 % Auszeit entfällt der weitaus größte Teil auf geplante Wartungsarbeiten und Brennelementwechsel. Diese Revisionen werden in der Regel einmal im Jahr durchgeführt, zu Zeiten mit geringem Energiebedarf.

Zuverlässigkeit ist für unsere Gesellschaft äußerst wichtig. Unsere hohe Produktivität und unser Lebensstandard hängen von der bedarfsgerechten Verfügbarkeit von Energie ab (Strom, Wärme, Transport und andere Energienutzung). Versorgungssicherheit ist auch etwas, das moderne Menschen als selbstverständlich ansehen, weil fossile Brennstoffe uns seit Generationen mit zuverlässiger Energie versorgt haben.

Wind- und Solarenergie sind wetterabhängig. Das heißt, sie sind nicht nach Bedarf ab-

rufbar wie die meisten anderen Energiequellen. Natürlich kann man die Verlässlichkeit steigern, indem man zusätzliche Kapazität, Nachfrageflexibilität, Energiespeicherung usw. hinzufügt, aber dies ist mit steigenden Kosten verbunden - sowohl finanziell als auch ökologisch als auch beim Ressourcenverbrauch. Die Kosten für die Schaffung eines zuverlässigen Energiesystems werden als Systemkosten bezeichnet. Sie hängen von den lokalen Gegebenheiten und der Infrastruktur, der Technologie, den Gegebenheiten der Nachbarländer und vielem mehr ab.

Zuverlässige Energie ist für unsere Gesellschaft äußerst wertvoll.

Kernenergie ist eine unserer sichersten Energiequellen

Wenn man bedenkt, wieviel in den deutschen Medien über die Risiken und Gefahren der Kernenergie berichtet wird, fällt es natürlich schwer zu glauben, dass die Kernenergie eine unserer sichersten Möglichkeiten der Energieerzeugung ist. Selbst wenn bei der Kernenergie etwas schief läuft, ist das keine auch nur annähernd so große Gefahr für die öffentliche Gesundheit wie oft angenommen wird. Dies lässt sich am Beispiel des Unfalls von Fukushima zeigen. Der japanische Atomunfall ereignete sich unter schrecklichen Voraussetzungen. Ein Großteil der Infrastruktur, der Straßen und Gebäude war zerstört durch das Erdbeben und den dadurch ausgelösten Tsunami. Dadurch wurden alle Rettungsarbeiten extrem herausfordernd. Hauptsächlich dadurch kam es im Kernkraftwerk Fukushima Daiichi in drei Reaktoren zur schwersten Art von Unfall, die in einem Leichtwasser-Kernreaktor möglich ist: eine Kernschmelze. Dabei wird der Uranbrennstoff so heiß, dass er schmilzt. Bei einer Kernschmelze wird ein Teil der im Kern enthaltenen radioaktiven Stoffe in die Umwelt abgegeben.

Diese dreifache Kernschmelze führte, trotz der zerstörten Infrastruktur und den chaotischen Zuständen in ganz Japan, zu geschätzten null Todesfällen durch Radioaktivität. Die größten Gesundheitsgefahren wurden hingegen durch die Angst vor der Radioaktivität verursacht. Diese hat zu überstürzten (und weitgehend unnötigen) Evakuierungen von Krankenhäusern und ähnlichen Einrichtungen in der Umgebung geführt. Für die Gesundheit der Bevölkerung wäre es besser gewesen, drinnen zu bleiben, Türen und Fenster zu schließen und Jodtabletten zu nehmen.

Das Gefährlichste an Atomkraft und Radioaktivität ist vielleicht unsere Angst davor. Sie führt dazu, dass Kernkraftwerke vorzeitig geschlossen oder gar nicht erst gebaut werden. Stattdessen wird also ein Ersatz gebaut - oft fossile Kraftwerke. Fossile Brennstoffe sind um mehrere Größenordnungen tödlicher und gefährlicher als die moderne Atomkraft.

Aber was ist mit Tschernobyl? Der Unfall in der Ukraine führte tatsächlich zu Todesfällen durch Strahlung. Etwa 60 Todesopfer sind bestätigt, und die Möglichkeit von ins-

gesamt bis zu 4.000 potenziellen Todesfällen wurde statistisch modelliert.¹⁹ Aber Tschernobyl hat nichts mit moderner, westlicher Atomkraft zu tun. Das RBMK-Design von Tschernobyl wurde im Westen aufgrund der inhärenten Sicherheitsprobleme des Designs nie gebaut. Diese Probleme trafen auf menschliches Versagen und die schlechte Sicherheitskultur in der Sowjetunion. So wurde der Unfall und die relativ große Freisetzung von radioaktivem Material aus dem Unfallreaktor erst möglich. Doch selbst die gesundheitlichen Auswirkungen von Tschernobyl werden so gering sein, dass sie im Hintergrundrauschen der Gesundheitsstatistiken nicht auffallen. Rauchen, der Verzehr von rotem Fleisch, Alkohol, das Verbrennen von Kohle zur Energiegewinnung und viele andere alltägliche Dinge haben um Größenordnungen schlimmere Auswirkungen auf unsere Gesundheit als selbst der katastrophalste Atomunfall unserer Geschichte.

¹⁹ Siehe Wissenschaftlicher Ausschuss der Vereinten Nationen zur Untersuchung der Auswirkungen atomarer Strahlung für aktuelle Informationen zu Tschernobyl: <https://www.unscear.org/unscear/en/chernobyl.html>

Kernenergie ist eine der sichersten Möglichkeiten der Energiegewinnung.



Atommüll und Strahlung sind kein Problem für die Gesundheit der Bürger

Die Entsorgung von Atommüll wird oft als "ungelöstes Problem" dargestellt. Das Bild, das die meisten Menschen von Atommüll haben, ist ebenso vage wie erschreckend. Aber die meisten von uns wissen nicht, was abgebrannte Brennelemente (hochradioaktiver Atommüll) überhaupt sind. Noch weniger von uns haben sie gesehen, nicht einmal auf Bildern. Diese Informationslücke wurde mit erschreckenden Bildern, Fehlinformationen, Misstrauen und sogar Verschwörungstheorien gefüllt.

Dabei hat der zivile Atommüll in den mehr als 60 Jahren seiner Existenz praktisch niemandem geschadet. Es gibt viele gründliche Studien über die Strahlungsmenge, die wir von der Kernkraft und den damit verbundenen Aktivitäten erhalten, und über die gesundheitlichen Auswirkungen ionisierender Strahlung insgesamt.²⁰ Verglichen mit all den Sorgen und der Panikmache ist die Wahrheit eher banal. Oder man könnte auch sagen, sie ist inspirierend.

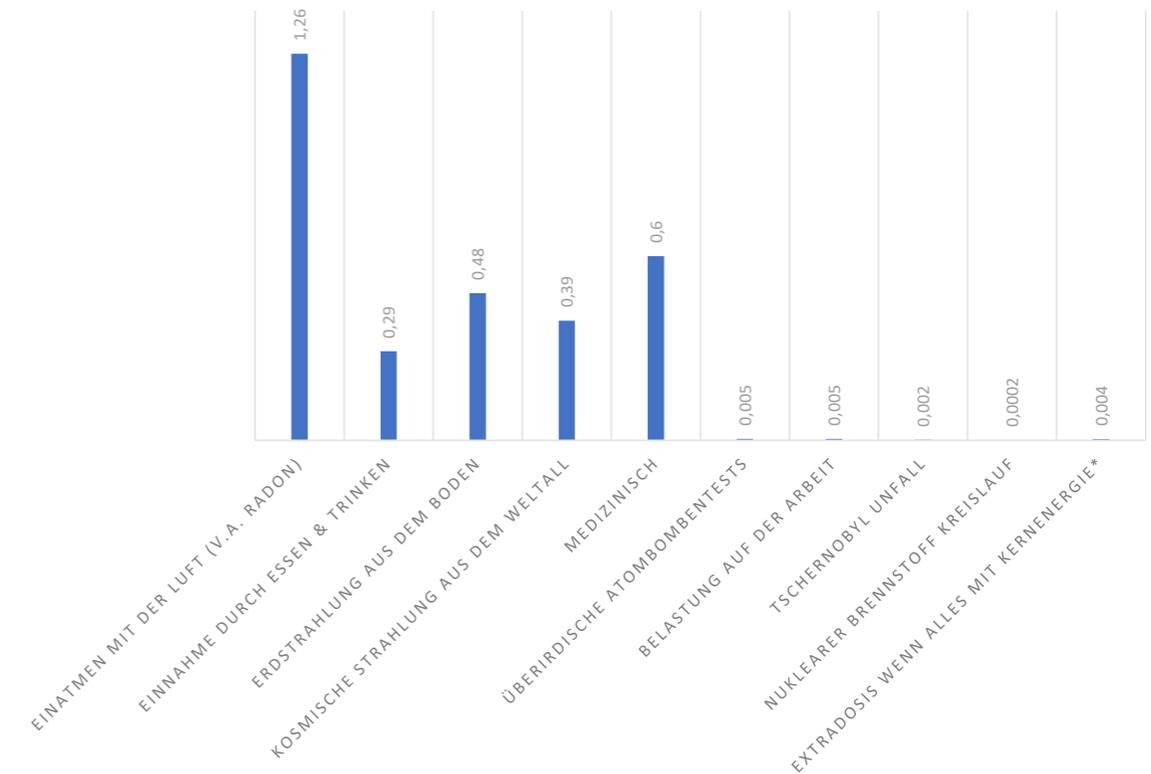
Abbildung 8 zeigt die Dosen an Radioaktivität, die wir Menschen im Durchschnitt aus natürlichen und künstlichen Quellen abbekommen. Selbst die durchschnittliche Gesamtdosis von etwa drei Millisievert (mSv) ist weit davon entfernt, gesundheitsschädlich zu sein. Lokale Schwankungen der Hintergrundstrahlung können das Zehn- oder gar Hundertfache betragen, je nach Ort. Selbst bei solchen großen Differenzen gibt es kaum statistische Hinweise auf signifikante gesundheitliche Auswirkungen. Alltägliche Entscheidungen, wie der Verzehr von Speck oder anderem roten Fleisch, Rauchen oder Alkoholkonsum stellen ein weitaus größeres Risiko für die eigene Gesundheit und die Wahrscheinlichkeit dar, im Laufe des Lebens an Krebs zu erkranken. Viele Menschen baden in natürlichen heißen Quellen, wegen ihrer positiven gesundheitlichen Wirkung. Die Mitarbeiter dieser Bäder erhalten laut einer Studie aus dem Jahr 2021 eine mittlere Dosis von 0,6 mSv.²¹ Das ist eine 3.000 Mal so hohe Dosis wie der gesamte Kernbrenn-

²⁰ Siehe Wissenschaftlicher Ausschuss der Vereinten Nationen zur Untersuchung der Auswirkungen atomarer Strahlung (2008), https://www.unscear.org/unscear/en/publications/2008_1.html und Nationaler Rat für Strahlenschutz und Strahlenmessungen <https://ncrponline.org/publications/reports/ncrp-report-160-2/> (mit einer Übersicht der Umweltschutzbehörde der Vereinigten Staaten hier: <https://www.epa.gov/radiation/radiation-sources-and-doses>)

²¹ Siehe Nugraha, E.D., et al, Radon Activity Concentrations in Natural Hot Spring Water: Dose Assessment and Health Perspective. Int. J. Environ. Res. Public Health 2021, 18, 920. <https://doi.org/10.3390/ijerph18030920>

Abbildung 8: Die Strahlungsmenge aus dem Kernbrennstoffkreislauf ist nicht höher als ein Rundungsfehler. Hier wird der komplette Lebenszyklus betrachtet, vom Abbau zur Anreicherung, Verwendung und Verwahrung von neuen und verbrauchten Kernbrennstoffen (*) unter der Annahme, dass all unsere Elektrizität für die nächsten 80 Jahre mit Kernkraftwerken französischen Typs erzeugt wird. Rabl A, J. V. Spadaro, M. Holland. 2014. How Much is Clean Air Worth: Calculating the Benefits of Pollution Control. Cambridge University Press. ISBN 978-1-10-704313-8

DURCHSCHNITTliche STRAHLENBELASTUNG NACH QUELLE



stoffkreislauf am Menschen verursacht.²² Zur Einordnung: Bei jährlichen Dosen unter 100 mSv ist es sehr schwer, überhaupt statistische Auswirkungen auf die Gesundheit von Menschen zu finden. Daher ist der Besuch natürlicher heißer Quellen zur Entspannung und Erholung völlig in Ordnung.

Das im Bau befindliche finnische Endlager ist gründlich untersucht und analysiert worden. Die Ergebnisse zeigen, dass es eine Sicherheitsmarge von mindestens 1 : 1.000.000 hat. Selbst im absolut schlimmsten Fall käme es zu einer Maximaldosis für Betroffene von 0,00018 mSv²³ Zum Vergleich: 0,00018 mSv entspricht in etwa der radioaktiven Belastung durch den Verzehr von ein paar Bananen oder dem Schlafen neben einer anderen Person. Für dieses Worst-Case-Szenario müsste der Abfallbehälter aus Kupfer und auch der Bentonit-Ton darum herum nach nur 1.000 Jahren auf mysteriöse Weise verschwinden. Außerdem müsste eine Person, um die Maximaldosis zu erhalten, ihr ganzes Leben auf dem am stärk-

sten kontaminierten Quadratmeter leben, nur das Grundwasser von dieser Stelle trinken und nur dort angebaute Lebensmittel essen. Das ist praktisch unmöglich.

Es ist überdeutlich, dass wir gute Lösungen für den langfristigen Umgang mit abgebrannten Kernbrennstoffen haben. Das "unlösbare Problem" ist hauptsächlich auf zwei Umstände zurückzuführen. Erstens haben wir noch kein betriebsbereites Endlager benötigt, da die abgebrannten Brennelemente noch abkühlen. Zweitens haben es unsere Politiker versäumt, eine Entscheidung zu treffen und den Bau eines Endlagers zu ermöglichen. Das finnische Beispiel bietet einige Lektionen, wie man es machen kann. In der dortigen Endlagersuche konkurrierten sogar zwei Gemeinden um den Endlagerstandort.

Wie kann sich unser Bild von Atommüll so sehr von der Realität unterscheiden? Die Antworten auf diese Frage können je nach Land und Person unterschiedlich ausfallen. Im Laufe der Jahre und Jahrzehnte haben

²² Dosen und Millisievert (mSv) werden verwendet, um den erwarteten Effekt auf die Gesundheit durch ionisierende Strahlung zu beschreiben.

²³ Siehe Szenario PD-BC auf Seite 137 der Studie: Hjerpe, T., Ikonen, A. T. K., Broed, R. (2010). Biosphere Assessment Report 2009. Posiva 2010-03, ISBN: 978-951-652-174-2. Ein weiteres, aktuelleres Paper mit noch geringeren zu erwartenden Dosen ist Posiva (2013), Safety Case for the Disposal of Spent Nuclear Fuel at Olkiluoto–Biosphere Assessment 2012. Posiva 2012-10, ISBN: 978-951-652-191-9.

sich in der Gesellschaft Geschichten über Kernenergie und Atommüll ausgebreitet. Die Informations- und Propagandakampagnen des Kalten Krieges verursachten eine starke mentale Assoziation zwischen Nukleartechnik und Gewalt. Und das obwohl moderne Kernreaktoren nukleare Waffen abbauen und daraus Energie gewinnen können. Das "Megatons to Megawatts"-Programm half

Kernenergie ist kostengünstig

Existierende und bereits amortisierte Kernreaktoren sind eine äußerst kostengünstige Möglichkeit, sauberen und zuverlässigen Strom zu erzeugen. Die Kosten für Betrieb, Wartung, Brennstoff und Stilllegung/Entsorgung belaufen sich auf etwa 20 Euro pro Megawattstunde – unter Schaffung vieler gut bezahlter Arbeitsplätze nach Tarifvertrag für die lokale Bevölkerung. Zum Vergleich: Ein deutscher Haushalt zahlt für seinen Strom rund 300 Euro pro Megawattstunde, wobei darin eine Menge Netzgebühren, Zuschläge und Steuern enthalten sind. Aus ökonomischer Sicht ist das Abschalten bestehen-

dabei, Waffenmaterial in der Größenordnung von etwa 20.000 Atomsprengköpfen zu demontieren und daraus saubere, klimafreundliche Energie zu gewinnen.²⁴ Kernkraftwerke gehören zu den besten Möglichkeiten, Atomwaffen loszuwerden und etwas Nützliches daraus zu machen.

der, gut laufender Kernkraftwerke Irrsinn. Aus Perspektive des Klimaschutzes ist es geradezu kriminell.

Kernkraftwerke werden so modular gebaut, dass fast alle Bauteile bei Abnutzung gegen neue ausgetauscht werden können. Das bedeutet, dass wassergekühlte Kernreaktoren, die in den 1970er bis 1980er Jahren gebaut wurden, in der Regel 60 oder sogar 80 Jahre lang gewartet und sicher betrieben werden können. Einige dieser Kraftwerke sind bereits für derartige Laufzeiten genehmigt worden. Sogar noch längere Laufzeiten sind denkbar. Ob es dazu kommt, werden

²⁴ Siehe <https://www.centrusenergy.com/who-we-are/history/megatons-to-megawatts/>

wir aber erst herausfinden, wenn es soweit ist. Letztendlich ist es vor allem eine wirtschaftliche Frage. Laut einer aktuellen Studie der IEA ist der Langzeitbetrieb von Kernreaktoren die kostengünstigste Möglichkeit einer CO₂-armen Energieerzeugung. In dem Bericht empfiehlt die IEA allen Ländern und Energieversorgern, die Zeit der sicheren Nutzung der Kernkraftwerke zu maximieren. Die deutsche Kernkraft-Flotte ist eine der am besten gewarteten und betriebenen der Welt. Diese Reaktoren sind hervorragende Kandidaten für den Langzeitbetrieb.²⁵

Selbst der Neubau von Kernkraftwerken ist in der Regel nicht besonders kostspielig. Leider sind in Westeuropa und Nordamerika die Kosten der jüngsten Projekte gestiegen und die geplanten Budgets wurden nicht eingehalten. Die aktuellen Preise für Kernkraftwerkskapazitäten schwanken zwischen dem europäischen Kostenniveau von 5.500 \$/kW und dem chinesischen Kostenniveau von 3.500 \$/kW. Eine umfangreiche Studie zu den Kostentreibern von Reaktorbauprojekten hat folgende Hauptgründe für die Preisunterschiede herausgefunden:²⁶

- Bau von Prototypen, nach einer Generation ohne Bauprojekte: Europa hat in den 1990er Jahren aufgehört, Kernkraftwerke zu bauen. Es ist also kein Wunder, dass der Wiederaufbau des Fachwissens, die Schaffung von Lieferketten und das Entwickeln von Routine Zeit und Geld kosten.
- Baubeginn trotz unfertiger Baupläne: Der französische EPR war erst zur Hälfte entworfen, als der Bau in Finnland und Frankreich begann. Dies führte zu einer großen Flut an Nachbesserungen und einem teurem Hin und Her zwischen dem Planungsbüro, den Bautrupps und der Aufsichtsbehörde. Auch der US-amerikanische AP1000 war bei Baubeginn noch nicht einmal zur Hälfte fertig geplant.
- Einzelproduktion statt Serienproduktion: Mehrere Reaktoren desselben Typs an einem Standort in Serie statt jeden Reaktor als einmaliges Projekt zu bauen.

Ein Gegenbeispiel ist das Neubauprojekt des Kernkraftwerks Barakah in den Vereinigten Arabischen Emiraten. Hier wurde ein

²⁵ Siehe <https://www.iea.org/reports/nuclear-power-in-a-clean-energy-system>

²⁶ Siehe <https://es.catapult.org.uk/reports/nuclear-cost-drivers/>

fertiges Reaktor-Design genutzt, das bereits mehrfach vorher gebaut worden war. Sowohl das Projektmanagement als auch die Arbeitsmannschaft waren bereits erfahren im Kraftwerksbau. Alle 4 Reaktoren wurden nacheinander an einem Standort gebaut.²⁷

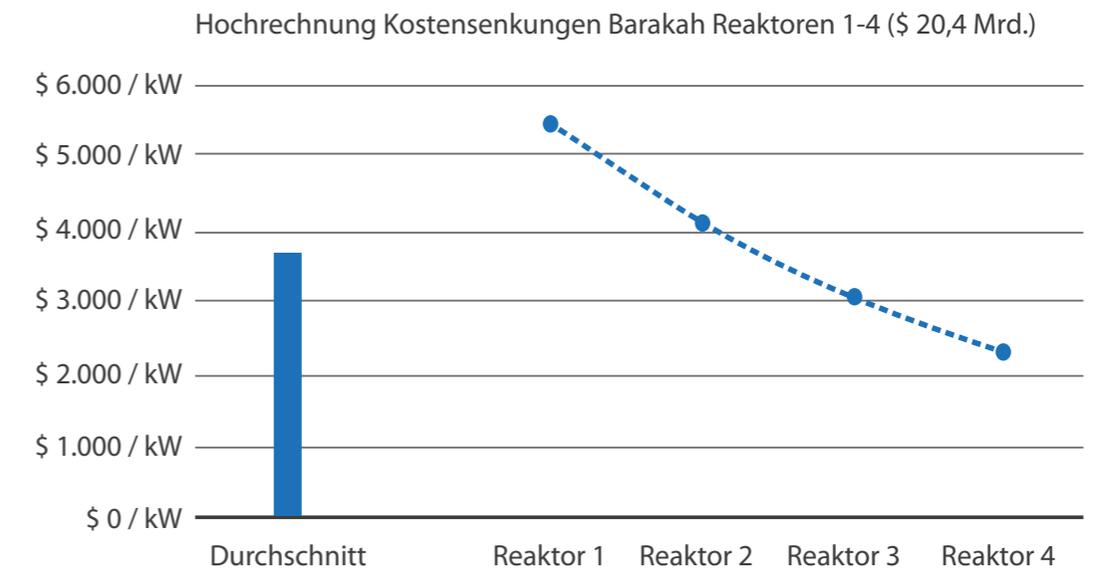
Die durchschnittlichen Kosten pro Reaktor für das Projekt lagen am Ende deutlich unter den Kosten für den ersten der vier Reaktoren. In Abbildung 9 ist zu sehen, wie die Kosten zwischen dem ersten, zweiten, dritten und vierten Reaktor schrittweise gesenkt wurden. Beim vierten Reaktor sanken die Kapitalkosten auf weniger als die Hälfte der

Kapitalkosten des ersten Reaktors.

Der zuverlässigste Weg, Kernkraftwerke oder andere Bauprojekte zu verteuern, ist eine Generation auszusetzen. Nach einem solchen Baustopp muss man bei Null anfangen und das ganze Fachwissen und die Liefernetzwerke wieder aufbauen. Der beste Weg, die Kosten zu senken, besteht hingegen darin, sich auf ein einziges Design festzulegen. Wenn man viele Reaktoren eines Typs baut und den Bauprozess ständig wiederholt, kann man gut aus den Erfahrungen lernen.

²⁷ Siehe Lovering et al, 2016, Historical construction costs of global nuclear power reactors, Energy Policy, <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2016.01.011>

Abbildung 9: Kostenreduktionen von einem Reaktor zum jeweils nächsten wurden deutlich beim Bau des Barakah Kernkraftwerks in den Vereinigten Arabischen Emiraten.



Kernkraft ist schnell zubaubar

Der Bau von einzelnen Kernkraftwerken kann lange dauern. Aber der Grund dafür ist hauptsächlich ihre enorme Größe. Es braucht Zeit, große Dinge zu bauen. Das gilt um so mehr angesichts der strengen Vorschriften, die für den Bau von Kernkraftwerken gelten. Im Westen haben die Verzögerungen bei dem halben Dutzend Neubauprojekten (Flamanville, Olkiluoto, Vogtle) auch andere Gründe, die im obigen Kapitel diskutiert wurden. Im Durchschnitt liegt die weltweite Bauzeit neuer Kernkraftwerke aber bei etwa sieben Jahren.²⁸ Der schnellste jemals gebaute große Kernreaktor ist der japanische Kashiwazaki-Kariwa-Reaktor-Block 6. Der 1315-MW-Siedewasserreaktor benötigte vom ersten Beton bis zur ersten Kritikalität nur etwas mehr als drei Jahre.

Aber auch gescheiterte Neubauprojekte sind nicht gerade langsam. Das gilt sogar für Olkiluoto 3 mit seinen 16 Jahren von Baubeginn bis zur Fertigstellung. Dieser Zubau war pro Kopf im Ländervergleich im-

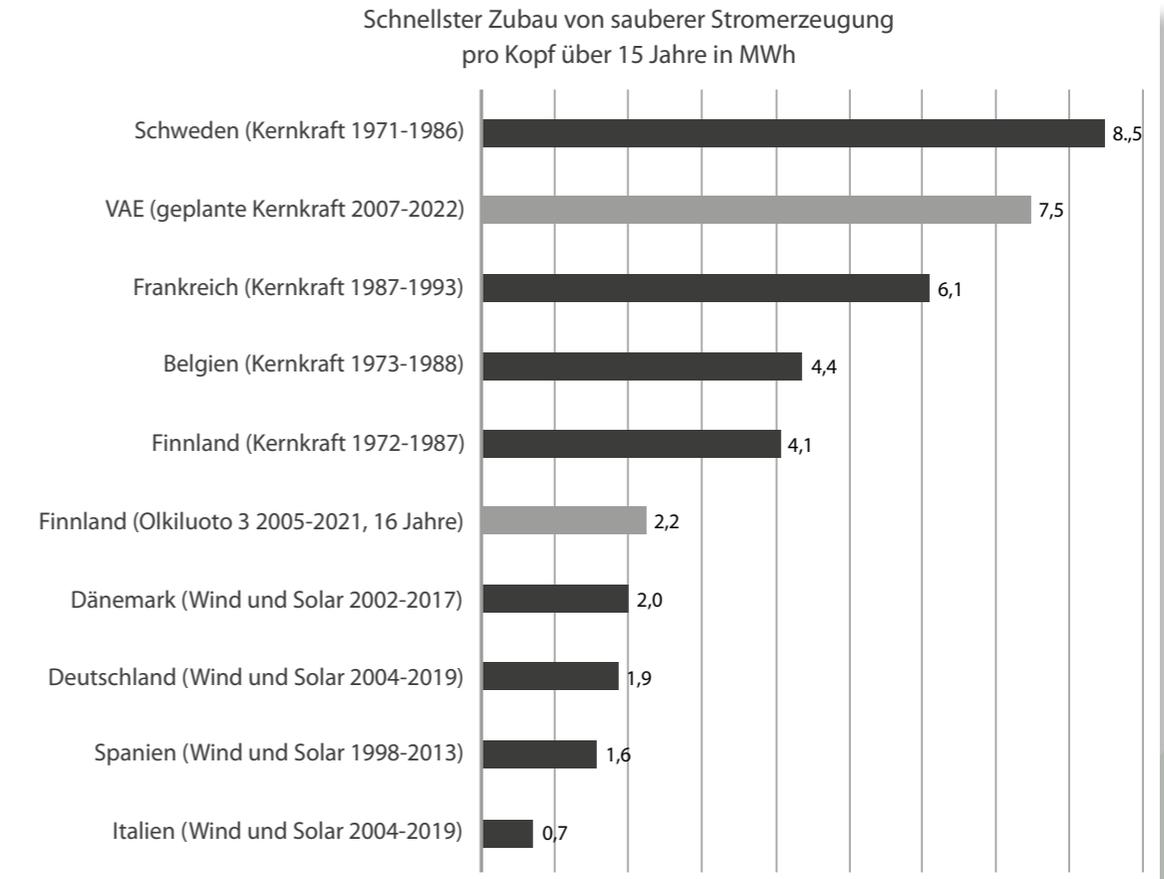
mer noch schneller als der schnellste Zubau von Wind- und Solarenergie zusammen in anderen Ländern im gleichen Zeitraum, siehe Grafik. Es kann zwar viele Jahre dauern, bis ein Kernreaktor ans Netz geht. Aber der Nutzen eines einzigen Reaktors ist enorm und das Warten durchaus wert.

Natürlich sollten wir auch Wind- und Solaranlagen bauen. Diese Technologien sind mit zunehmender Reife schneller im Zubau geworden. Neben den Kosten sind auch die Installationszeiten gefallen. Aber zu behaupten, Atomkraft sei "zu langsam", bedeutet, dass Wind- und Solarkraftwerke erst recht zu langsam sind. Einzelne Anlagen können zwar schneller errichtet werden. Aber wenn eine einzelne Anlage tausendmal kleiner ist als ein großer Kernreaktor, müssen tausendmal mehr Anlagen gebaut werden, um die gleiche Energie zu erzeugen. Natürlich ist es auch möglich, mehrere Kernreaktoren gleichzeitig zu bauen.

²⁸ Siehe <https://www.statista.com/statistics/712841/median-construction-time-for-reactors-since-1981/>



Abbildung 10: Die schnellsten Zubauraten für klimafreundliche Energie wurden mit dem Bau von Kernkraftwerken erzielt. Wasserkraft ist nicht berücksichtigt, weil sie in OECD-Ländern nicht mehr signifikant ausgebaut werden kann. Quelle: BP 2021



Die Zukunft der Kernenergie ist voller Chancen

Die Kernkraftbranche entwickelt sich heute rasant. Neue Reaktortypen und -größen werden von Dutzenden von Start-ups und großen staatlichen Atomkonzernen weltweit entwickelt. Diese neuen Designs bieten viele aufregende Funktionen. Dazu gehört zum Beispiel die Erzeugung von Hochtemperaturdampf für die industrielle Prozesswärme (die heute zu fast 100 % durch die Verbrennung von fossilen Energieträgern erfolgt). Auch interessant ist der Betrieb bei normalem Luftdruck, wodurch schwere und teure Druckbehälter überflüssig werden. Es gibt Designs, die auf Heliumgas, geschmolzenem Salz oder flüssigem Metall als Kühlmittel oder Brennstoff basieren. Einige von ihnen können einen großzügig dimensionierten Hochtemperatur-Energiespeicher für zusätzliche Flexibilität nutzen. Einige Entwürfe verwenden sogar unsere "verbrauchten Brennelemente" (die noch etwa 95 % des nutzbaren Kernbrennstoffs enthalten), um mehr Energie zu erzeugen. In diesem Prozess werden außerdem viele der langlebigen radioaktiven Elemente vernichtet.

Einige dieser Reaktoren sind winzig. Sie

sind für abgelegene, netzferne Gemeinden gedacht, wie Bergbaustädte oder Inseln. Dies wäre eine kostengünstigere, saubere und zuverlässigere Energiequelle als die heute verwendeten Dieseldiesgeneratoren. Einige Reaktoren erzeugen kostengünstige und klimafreundliche synthetische Kraftstoffe für die Verwendung in der Luftfahrt, im Fernverkehr oder in der Schifffahrt. Einige Reaktoren sind so konstruiert, dass sie sicher automatisch arbeiten und auf menschliches Bedienpersonal verzichten können

Aber bei der Kerntechnik geht es nicht nur um Energie. Die Nuklearmedizin hat Millionen von Menschen durch die Diagnose und Behandlung von Krankheiten gerettet und tut dies auch heute noch jeden Tag. Wir haben sogar Reaktordesigns für die Erkundung des Weltraums mit Konzepten für nukleare Raketen, die für interplanetare Reisen geeignet sind. In Industrieanlagen wird radioaktives Material routinemäßig eingesetzt, um Mikrobrüche in Rohrleitungen und Behältern zu erkennen, bevor sie zu einem Problem werden. Diese Anwendungen sind möglich, weil Radioaktivität mit einfachen

Geräten extrem leicht zu erkennen ist. Das macht es auch einfach, Probleme in Kernkraftwerken zu erkennen, lange bevor sie zu echten Gefahren eskalieren. Dies spielt eine große Rolle für die nukleare Sicherheit. Die Anwendungsfälle und Möglichkeiten für die friedliche Nutzung der Kernenergie sind enorm, und sie werden von Tag zu Tag größer.

Wir Deutschen müssen uns fragen, ob wir wirklich auf all die Vorteile verzichten wollen, die die Kernenergie der modernen Gesellschaft bietet. Und das nur, weil viele Bürger die Fakten zur Kernkraft nicht kennen. Die Nukleartechnologie entwickelt sich weltweit mit großer Geschwindigkeit und kann zur Lösung vieler unserer aktuellen und zukünftigen Probleme eingesetzt werden. Sie kann mit klimafreundlichen erneuerbaren

Energiequellen zusammenarbeiten. Sie kann uns eine Zukunft mit sauberer, sicherer und zuverlässiger Energie zu geringeren Kosten bieten. Es gibt Dutzende von Ländern, die neu einsteigen und ihre ersten Reaktoren planen oder bereits bauen. Nur eine Handvoll Länder plant, ihre Atomindustrie abzuschalten. Einige davon, wie zum Beispiel die Niederlande und Schweden, haben ihre ablehnende Position in den letzten Jahren wieder revidiert, als die Größe des Problems effektiven Klimaschutzes immer deutlicher wurde. Ein Großteil der Welt setzt auf Kernkraft, mit oder ohne Deutschland. Wollen wir Deutsche uns in Zukunft wirklich selbst aus der internationalen Atomgemeinschaft ausschließen?

Die Nukleartechnologie entwickelt sich weltweit mit großer Geschwindigkeit und kann zur Lösung vieler unserer aktuellen und zukünftigen Probleme eingesetzt werden. Sie kann mit klimafreundlichen erneuerbaren Energiequellen zusammenarbeiten. Sie kann uns eine Zukunft mit sauberer, sicherer und zuverlässiger Energie zu geringeren Kosten bieten.



In diesem Teil werden die Szenarien und Ergebnisse dieses Berichts beschrieben und diskutiert. Ausgangsbasis dafür ist das Szenario "Klimaneutrales Deutschland 2050" von Agora Energiewende (AEW). Es zielt darauf ab, bis 2050 Deutschland zu einer wirklich CO₂-neutralen Gesellschaft zu machen. Zu beachten ist, dass von AEW mittlerweile ein neues Szenario "Klimaneutrales Deutschland 2045" veröffentlicht wurde. Während dieser Bericht entstand, waren die detaillierten Daten dieses Nachfolger-Szenarios aber noch nicht verfügbar.

Unser Hauptszenario lässt die aktuell laufenden sechs Kernreaktoren in Betrieb und geht davon aus, dass sie fossile Kohle und fossiles Gas ersetzen. Diese Annahme und die meisten Emissionsreduktionen bleiben auch gegenüber dem AEW 2045 Szenario erhalten, weil hier immer noch von einem Atomausstieg ausgegangen wird. Unser Szenario senkt die Emissionen und die Kosten. Ebenso fällt das Risiko des Scheiterns im Vergleich zum Szenario "Klimaneutrales Deutschland 2045" von AEW.

Einführung in die Szenarien

Zunächst werden wir das Hauptszenario diskutieren, bei dem die derzeitige Flotte von 6 großen Kernreaktoren in Betrieb bleibt. Stattdessen werden fossile Kohle- und Gaskraftwerke in ähnlichem Umfang stillgelegt. Was wären die Auswirkungen auf die jährlichen und kumulativen Emissionen? Wieviel schneller könnte Deutschland seine Kohlekraftwerke schließen, und wieviel schneller könnte die deutsche Abhängigkeit von (russischem) Erdgas reduziert werden?

Im zweiten Szenario machen wir einen weiteren Schritt, um die Emissionen schneller und effizienter zu senken. Ab den frühen 2030er Jahren soll nun eine neue Flotte fortschrittlicher Kernreaktoren gebaut werden. Diese flexiblen "fortschrittlichen Wärmequellen" werden die verbleibenden fossilen Brennstoffe ersetzen. So wird sichergestellt, dass innerhalb der Landesgrenzen genügend saubere Energie zur Verfügung steht. Ziel ist es, massive Importe von sauberem Wasserstoff und synthetischen Brennstoffen aus Nachbarländern wie im AEW-Szenario zu verhindern. Andere Länder werden selbst alle Hände voll zu tun haben und setzen

womöglich ebenfalls darauf, saubere Energie und Wasserstoff von ihren Nachbarn zu importieren.

Das Motto des dritten und letzten Szenarios ist "Energieüberfluss statt Energieknappheit". Die Erwartungshaltung des AEW-Szenarios "Klimaneutrales Deutschland 2050", dass es zu einem radikalen Rückgang des Energiebedarfs kommt, ist ein riskantes Unterfangen. Es hat in der Geschichte nichts Vergleichbares gegeben. Anstatt wie im AEW-Szenario um die Hälfte zu schrumpfen, wird der Energieverbrauch in unserem Szenario bis 2050 nur um ein Viertel gesenkt, um die Gefahr des Scheiterns zu verringern.

Wir orientieren uns dabei an der Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger aus dem Sonderbericht 1,5 °C globale Erwärmung des Weltklimarats. Dort wird eine Erhöhung der globalen Energieproduktion aus Kernkraft erwartet. In den nächsten zehn Jahren soll ungefähr eine Verdopplung und bis 2050 sogar eine Vervierfachung stattfinden. Deutschland baut in diesem Szenario also seine Nuklearflotte bis 2050 auf das Vierfache des Niveaus von 2010 aus. Dies geschieht durch ein nationales Programm

zum Bau fortschrittlicher Wärmequellen in Serienproduktion. Die Ausbaupläne zu erneuerbaren Energien werden beibehalten.

Im Anhang befindet sich ein Bonus-Szenario nach dem Motto "Was wäre, wenn der Fukushima-Unfall nicht passiert wäre". Wie würde unsere Energieversorgung heute aussehen, wenn Deutschland nicht vor 10 Jahren in Panik geraten wäre und einen Großteil seiner Kernreaktorflotte abgeschaltet hätte? Was, wenn stattdessen Kohlekraftwerke stillgelegt worden wären? Wir gehen noch einen Schritt weiter und spekulieren, dass Deutschland neue Kernreaktoren gebaut hätte. Wir gehen von einer Finanzierung in ähnlicher Höhe aus, wie durch die EEG-Umlage, die von Bürgern und Unternehmen querfinanziert wird. Wie hoch wäre der CO₂-Ausstoß heute und wieviele CO₂-Emissionen wären im vergangenen Jahrzehnt vermieden worden?

Unser Szenario hat geringere Emissionen, geringere Kosten und ein geringeres Ausfallrisiko als das Szenario Klimaneutrales Deutschland 2045 von Agora Energiewende.

CLIMATE CHANGE

CO₂

Was ist mit den bereits stillgelegten Reaktoren?

In Deutschland gibt es eine Handvoll Kernreaktoren, die abgeschaltet wurden und deren Brennstoff entfernt wurde. Mit ihrem Rückbau wurde aber noch nicht in größerem Umfang begonnen.²⁹ Wäre es möglich, einige von ihnen wieder ans Netz zu nehmen? Das ist zwar aktuell nach Atomgesetz verboten, aber Gesetze können geändert werden. An welchem Punkt des Rückbaus gibt es kein Zurück mehr? Was sind die rechtlichen und regulatorischen Hürden, um einen "kalten" Reaktor sicher wiederzubeleben? Und was sind die potenziellen Vorteile und Lehren, die man aus einem solchen Programm ziehen könnte?

Diese Fragen sind schwer zu beantworten, da es sich weitgehend um Neuland handelt. Unsere Befragungen von Branchenexperten kamen zu dem Schluss, dass "es schwer zu sagen sei, da wir nur minimale Erfahrung mit einem solchen Vorgehen haben. Aber wenn es möglich wäre, müsste man wahrscheinlich 2 - 6 Jahre Arbeit pro Reaktor veranschlagen." Zu den Vorteilen gehören die vorhandene Infrastruktur und Kühlsysteme,

teme, bereits vorhandene Standortgenehmigungen sowie die öffentliche Akzeptanz und Expertise im lokalen Umfeld.

Unsere Empfehlung ist, dass Deutschland zusammen mit der internationalen Gemeinschaft (IAEA, NEA und anderen) eine gründliche Untersuchung startet, um diese Hürden unter allen relevanten Aspekten zu untersuchen - technisch, sicherheitstechnisch, regulatorisch, rechtlich, wirtschaftlich und menschlich (Fachwissen). Eine solche Studie könnte zu dem Schluss kommen, dass keiner der Reaktoren es wert ist, wieder in Betrieb genommen zu werden. Aber sie würde uns Gründe dafür liefern und zeigen, was als "Punkt ohne Wiederkehr" angesehen werden kann. Sie würde wertvolle Informationen für die globale Gemeinschaft liefern. Sie würde zukünftigen Politikern und Energieversorgern helfen, fundiertere Entscheidungen zu treffen, wie sie ihre Nuklearflotten behandeln, sowohl aus politischer, regulatorischer als auch betrieblicher Sicht.

Versorgungsunternehmen haben zum Beispiel bestimmte Fristen, bis zu denen sie

entscheiden müssen, ob sie in den Langzeitbetrieb ihrer Kernkraftwerke investieren wollen. Diese Fristen können je nach Fall hart oder weich sein. Aber die dahinter stehenden Überlegungen sind für Nicht-Experten wie politische Entscheidungsträger oft nur schwierig zu verstehen. Dennoch treffen politische Entscheidungsträger kritische Entscheidungen in solchen Angelegenheiten.

Für die meisten von uns ist es nicht intuitiv, dass die Zukunft einer Flotte von Reaktoren in 5 oder 10 oder sogar 20 Jahren stark von dem Weg abhängt, den wir heute beschreiten. Welche Art von Wartung wird zum Beispiel dieses Jahr oder in fünf Jahren durchgeführt? Welche Art von Maßnahmen sollen sicherstellen, dass qualifiziertes Personal zur Verfügung steht, wenn das heutige Personal in den Ruhestand geht? Wie wird die Verfügbarkeit von lizenzierten Ersatzteilen und Brennstoffmaterial in der Zukunft garantiert? Ist die Flotte in der Lage, in 5 oder 10 Jahren eine langfristige Laufzeitverlängerung zu beantragen? Die Kernenergiebranche unterscheidet sich von vielen anderen Bereichen durch ihre strengen Vorschriften und sehr langen Zeithorizonte für Projektierung und Betrieb.

Um konservativ zu sein, gehen wir in unseren Szenarien nicht davon aus, dass einer dieser Kernreaktoren wieder angefahren werden kann. Sollte es sich als machbar und sicher erweisen, würde die Wiedereinbetriebnahme einiger kalter Reaktoren nach der Mitte der 2020er Jahre eine wertvolle Brücke für ausgebildetes Personal und die Ausbildung neuer Fachkräfte darstellen. Dies würde dazu beitragen, die neue Flotte fortschrittlicher Reaktoren in Deutschland in den frühen 2030er Jahren für unser Szenario mit fortschrittlichen Wärmequellen ans Netz zu bringen.

²⁹ Gemäß der spärlichen Informationen, die wir vorliegen haben.

Deutschland sollte eine internationale Studie anstoßen, welche Bedingungen und Möglichkeiten es gibt, um stillgelegte Reaktoren weiter zu nutzen.

Sie würde wertvolle Informationen für die globale Gemeinschaft liefern.

CLIMATE
CHANGE

CO₂

Allgemeine Annahmen und Erläuterungen

Alle Modellierungen von Szenarien liefern Ergebnisse, die von den getroffenen Annahmen abhängen. Dieser Bericht soll keine komplexe akademische Modellierungsübung sein, sondern ein alternatives Szenario, das leicht zu verstehen ist. Wir verwenden relativ einfache Modelle mit überschaubaren Annahmen. Dieser Unterpunkt versucht unsere wichtigsten Annahmen zu begründen.

Kohle, Erdgas und Kernkraft 1:1

Kohle- und Kernkraftwerke spielen eine recht ähnliche Rolle im Stromsystem. Beide liefern überwiegend stabile Grundlast und rotierende Massen für das Netz, die zur Netzstabilität beitragen. Flexibilität und Lastfolge sind von geringer Priorität. Dazu sei gesagt, dass Kernkraftwerke in Deutschland Flexibilitätsleistungen für das Netz erbringen, indem sie die Produktion je nach Bedarf hoch- und runterfahren - mit bestimmten Einschränkungen. Unter diesen Voraussetzungen gehen wir davon aus, dass die Kernenergie die Kohle 1 : 1 ersetzt und umgekehrt - solange es Kohlekraftwerke zu ersetzen gibt. Wenn ein Kernkraftwerk

geschlossen wird, kann gleichzeitig eine ähnliche Menge an Kohleproduktion nicht stillgelegt werden. Und wenn die Kernkraft weiterläuft, kann die gleiche Menge an Kohleproduktion abgeschaltet werden. Im Fall von fossilem Gas gehen wir davon aus, dass die heutigen Kernreaktoren den Erdgasverbrauch 1 : 1 ersetzen können, bis zum maximalen Grad von etwa einem Drittel des jährlichen Erdgasverbrauchs bis 2040.

In den Szenarien "Fortschrittliche Wärmequellen" und "Energieüberfluss statt Energieknappheit" verwenden wir neue, kleine und fortschrittliche Kernreaktoren, die so ausgelegt werden können, dass sie eine ähnliche Rolle wie Gasturbinen im Stromsystem spielen. Sie können zum Beispiel die doppelte oder dreifache Stromerzeugungskapazität im Vergleich zur Leistung des Kernreaktors haben und in Verbindung mit thermischen Speichern wie zum Beispiel Salzschnmelzen ihre Leistung zwischen 0 und 300 % der Reaktorleistung regeln. Sie können auch direkt Prozesswärme für die Industrie erzeugen. Um es einfach zu halten, nehmen wir an, dass diese Reaktoren Erdgas 1 : 1 ersetzen können.

Power-to-X, PtX

Wir gehen davon aus, dass Elektrizität aus Kernkraft, die nach dem Ersatz von Kohle und Erdgas übrig bleibt, mit einem Gesamtwirkungsgrad von 60 % (vom Strom zum Brennstoff) in synthetische CO₂-arme PtX-Kraftstoffe umgewandelt werden kann. Dieser recht hohe Wirkungsgrad fußt auf der effizienten Hochtemperatur-Dampfelektrolyse (HTSE), die mit fortschrittlichen Wärmequellen wie Kernreaktoren der nächsten Generation möglich ist. HTSE kann einen Wirkungsgrad von über 90 % bei der Umwandlung von Strom in Wasserstoff erreichen. Dieser kann dann weiter in andere synthetische Brennstoffe wie Ammoniak, Methan oder Methanol umgewandelt werden. Wir gehen davon aus, dass PtX im ursprünglichen Basis-szenario importiert wird (synthetische Kraftstoffe werden dort als Netto-Energiequelle für Deutschland aufgeführt).

Lebenszyklus-Emissionen

Beim Ersetzen von Kohlekraftwerken gehen wir von einem groben Mix aus 2/3 Braunkohle (~1.100 gCO₂/kWh) und 1/3 Steinkohle

(~800 g CO₂ in modernen Kohlekraftwerken) aus, was uns vermiedene Emissionen von 1.000 gCO₂/kWh beschert. Dies entspricht in Näherung dem Erzeugungsmix zwischen diesen beiden Kohlesorten in Deutschland in den letzten Jahren. Für Kernkraft (12 gCO₂/kWh) und Erdgas (490 gCO₂/kWh) verwenden wir die mittleren Lebenszyklus-Emissionswerte des Weltklimarats von 2014. Direkt emittiert Erdgas eigentlich weniger, wenn es in hocheffizienten Turbinen verbrannt wird. Doch es entweicht Methan bei der Produktion, beim Transport, bei der Lagerung und bei der Verbrennung. Die Emissionen über den Lebenszyklus sind also höher.

Es ist unwahrscheinlich, dass diese Zahlen für jedes einzelne Kraftwerk oder jeden einzelnen Bergbau genau stimmen. Genauso unwahrscheinlich ist es aber, dass sie signifikant falsch sind. Für Kernkraftwerke ist die Zahl sogar konservativ hoch. In einer kürzlich veröffentlichten ISO-zertifizierten Umweltproduktdeklaration von Vattenfall wird die Stromproduktion der bestehenden Kernkraftwerksflotte mit 2,5 gCO₂/kWh veranschlagt.³⁰

³⁰ Siehe <https://portal.environdec.com/api/api/v1/EPDLibrary/Files/8371d0c5-faa0-47e9-aafd-61fdd1b0dc81/Data>

CARBON
NEUTRAL

CLIMATE
CHANGE

CO₂

Kernenergieproduktion vor der Abschaltung

Um eine Ausgangszahl für die Produktion der deutschen Kernenergieflotte vor der Abschaltung im Jahr 2011 zu erhalten, haben wir die durchschnittliche Produktion zwischen 2000 und 2010 aus dem BP Statistical Energy Review 2020 berechnet. Wir kommen auf 157,6 TWh/Jahr.

Todesfälle bei der Energieerzeugung

Um die gesundheitlichen Auswirkungen von Kohle- und Kernkraft zu vergleichen, haben wir Daten von Our World in Data verwendet.³¹

Demnach verursacht Kohle 24,6 vorzeitige Todesfälle pro TWh Energie. Kernkraft verursacht 0,07 Todesfälle pro TWh, einschließlich aller Unfälle. Bei den in Deutschland verwendeten Leichtwasserreaktoren geht die Opferstatistik für die Kernenergie sogar gegen Null. Wir haben außerdem die weltweit zu erwartenden Todesfälle durch Erhitzung bis zum Jahr 2100 berücksichtigt. Die Mortalität pro Millionen Tonnen CO₂-Ausstoß beträgt 226, laut einer aktuellen Studie aus Nature Communications über die "mortality cost of carbon".³²

31 <https://ourworldindata.org/safest-sources-of-energy> zitiert Quellen und deren Gedankengang hinter den Zahlen.

32 Siehe R. Daniel Bressler, (2021), <https://doi.org/10.1038/s41467-021-24487-w>

CARBON NEUTRAL

Hauptszenario - Eine Milliarde Tonnen

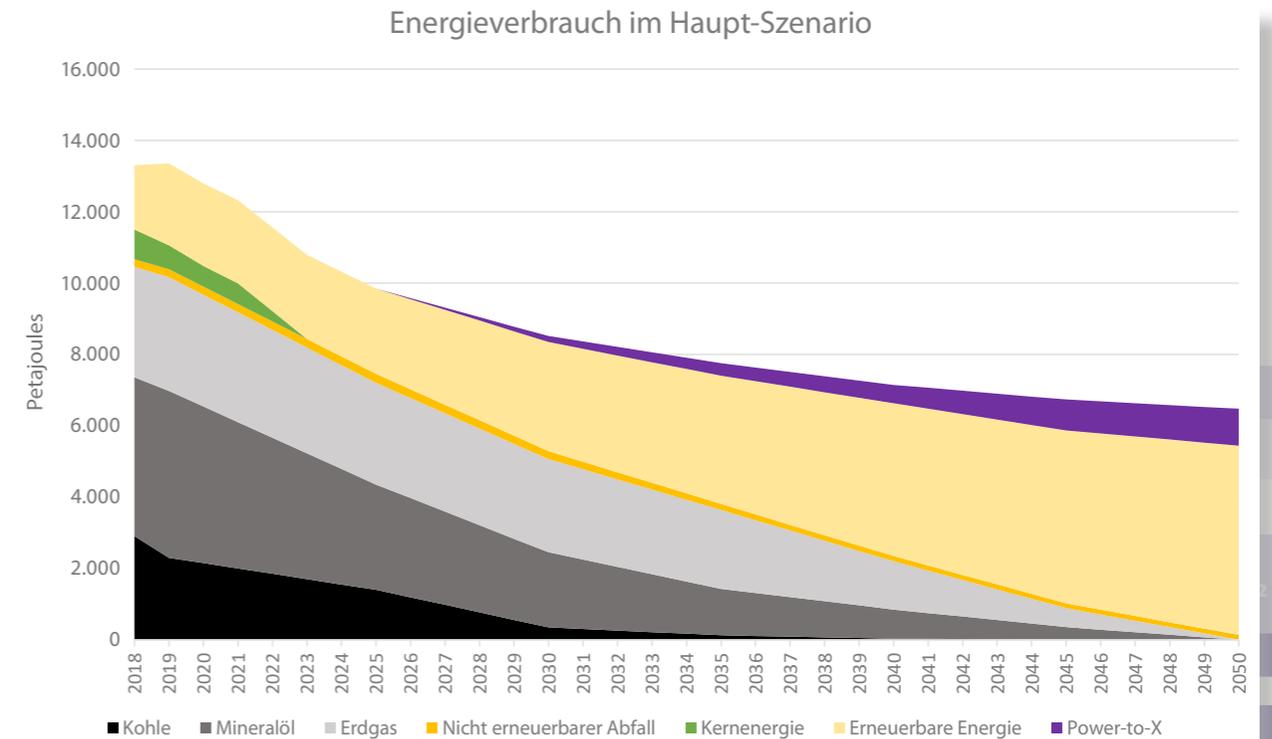
Wir verwenden das Szenario "Klimaneutrales Deutschland 2050" von Agora Energiewende als unsere Ausgangsbasis für Prognosen. Der Hauptunterschied besteht darin, dass wir in unserem Hauptszenario auf den weiteren Atomausstieg verzichten und Folgendes annehmen:

- Anstelle von Kernkraftwerken wird der gleiche Anteil an Kohleverstromung stillgelegt.

- Wenn keine Kohlekapazitäten mehr übrig sind, werden Gaskraftwerke geschlossen.

Historisch gesehen hat Deutschland seine CO₂-Emissionen seit 1990 um 17 Mt pro Jahr reduziert. Ein großer Teil davon geschah in den Jahren nach der Wiedervereinigung. Deutschland legte die weniger effiziente und umweltschädlichere Energie- und Industrieinfrastruktur in der ehemaligen DDR still. Um das neue Ziel der CO₂-Neutralität

Abbildung 11: Energienutzung nach Erzeuger im Szenario "Klimaneutrales Deutschland 2050" von Agora Energiewende.



bis 2045 zu erreichen, müssten die Emissionen laut Agora Energiewende um 30 Mt pro Jahr reduziert werden. Die durchschnittliche Reduktionsgeschwindigkeit in diesem Jahrhundert müsste sich mindestens verdoppeln. Da die einfacheren Reduktionen zuerst angegangen wurden, wird die CO₂-Vermeidung jedes Jahr schwieriger.

Derzeit plant Deutschland, die sechs noch laufenden Kernkraftwerke Ende 2021 und Ende 2022 abzuschalten, jeweils drei pro Jahr. Die verbleibenden Kernkraftkapazitäten nicht abzuschalten und stattdessen die Kohleproduktion um einen ähnlichen Betrag zu reduzieren, würde erheblich zur Emissionsreduzierung beitragen. Es gäbe sogar einen doppelten Nutzen: Anstatt zuerst erneuerbare Energien auszubauen, um die stillgelegten Kernkraftwerke zu ersetzen, und dann noch mehr zu bauen, um eine ähnliche Menge an Kohlekraftwerken abzuschal-

ten, könnte man einfach die Kernkraft weiterlaufen lassen und sie nutzen, um die Kohle abzuschalten.

Das kürzlich verkündete Verfassungsgerichtsurteil hat sowieso festgestellt, dass Deutschlands Emissionsminderungen in den 2030er Jahren und danach zu stark gewichtet sind und bereits in den 2020er Jahren mehr getan werden sollte. Ein einfacher Weg, die Emissionen in den 2020er Jahren deutlich zu reduzieren, wäre es, die derzeitige Kernkraftwerksflotte in Betrieb zu halten, anstatt sie vorzeitig abzuschalten.

Die derzeit noch laufenden sechs Kernkraftwerke erzeugen jedes Jahr etwa 65 TWh sauberen, CO₂-armen Strom. Indem sie eine ähnliche Menge an Kohleverbrennung ersetzen, vermeiden diese Reaktoren etwa 64 Millionen Tonnen CO₂-Emissionen pro Jahr.³³ Greenpeace hat hierzu eine Liste von Braunkohlekraftwerken mit den geplanten

33 Ungefähr die Hälfte der deutschen Kohlekraftwerke sind tatsächlich Braunkohle-Kraftwerke mit deutlich höheren Emissionen als der IPCC 2014 Mittelwert, den wir hier verwenden. Die Reduktion können in der Praxis sogar noch höher sein.

Tabelle 1: Die noch laufende Reaktorflotte in Deutschland setzt sich aus großen, jüngeren Anlagen zusammen.

Quelle: <https://world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-g-n/germany.aspx>

Kraftwerk	Art	MWe (netto)	Inbetriebnahme	Betreiber	Laufzeitende von 2010	Laufzeitende (nach Fukushima Unfall)
Gundremmingen C	SWR	1.288	11/1984	RWE	2030	2021
Grohnde	DWR	1.360	9/1984	E.ON	2031	2021
Brokdorf	DWR	1.410	10/1986	E.ON	2033	2021
Isar 2	DWR	1.410	1/1988	E.ON	2034	2022
Emsland	DWR	1.335	4/1988	RWE	2035	2022
Neckarwestheim 2	DWR	1.310	1/1989	EnBW	2036	2022
Gesamt am Netz (6)		8.113				

Abschaltjahren nach Kohleausstiegsgesetz veröffentlicht.³⁴ Nachdem Deutschland komplett aus der Kohle ausgestiegen ist, können die Kernreaktoren nun Erdgas in der Stromproduktion ersetzen. Fossile Gaskraftwerke haben zwar im Vergleich mit Kohle geringere, aber immer noch signifikante Emissionen.

Im Basisszenario "Klimaneutrales Deutschland 2050" von Agora Energiewende wird die Kohle zur Energieerzeugung bis in die 2030er Jahre weiter genutzt, wenn auch nur

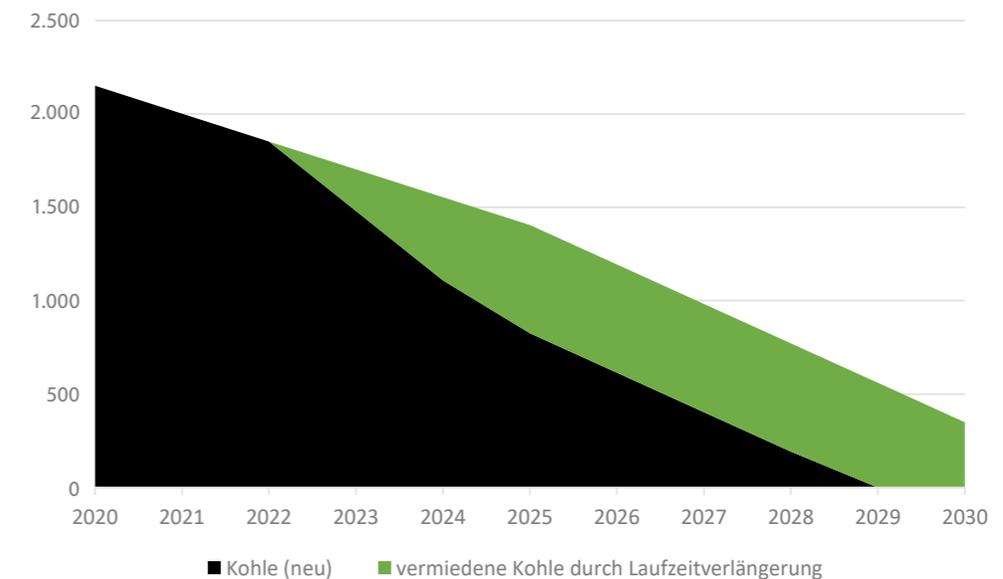
in geringen Mengen nach 2030. Mit einer Laufzeitverlängerung der Kernkraftwerke kann ein vollständiger Kohleausstieg im Jahr 2028 erfolgen. In Abbildung 12 werden alle anderen Erzeuger als unverändert angenommen, deshalb sind nur Kohle und Kernenergie als Ersatz für Kohle dargestellt.

Nach dem Kohleausstieg können die Kernkraftwerke weiterhin äußerst wertvollen, zuverlässigen und flexiblen Strom ins Netz einspeisen. Die deutsche Kernreaktorflotte

34 Siehe <https://www.greenpeace.de/sites/www.greenpeace.de/files/publications/kohleausstiegsgesetz-abschaltliste-kohlekraftwerke.pdf>

Abbildung 12: Die Laufzeitverlängerung der Kernkraftwerke ermöglicht den Kohleausstieg bis 2028.

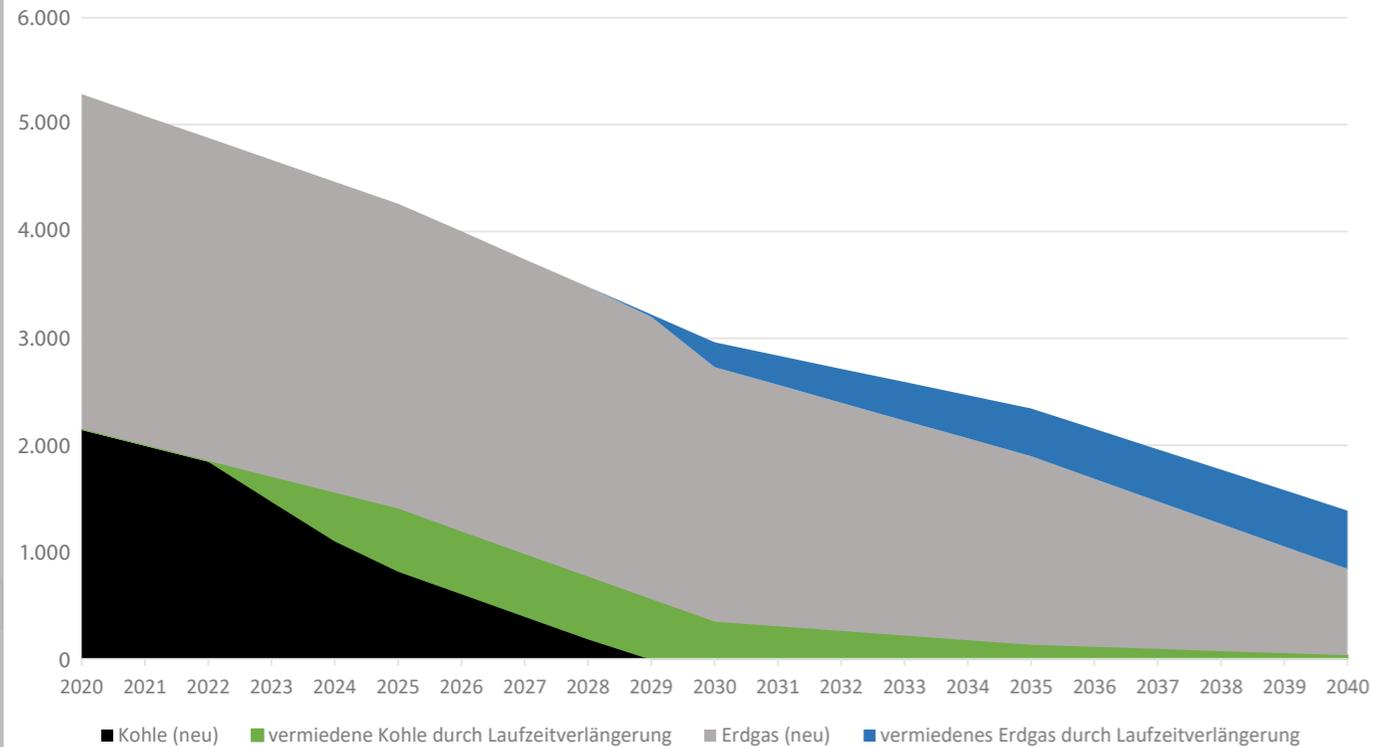
Kohleausstieg bis Ende 2028 durch Laufzeitverlängerung



CO₂

Abbildung 13: Zusätzlich zum Kohleausstieg können die deutschen Kernkraftwerke ab 2029 den Einsatz von Erdgas senken.

Ersetzen von Kohle und Gas durch Laufzeitverlängerung



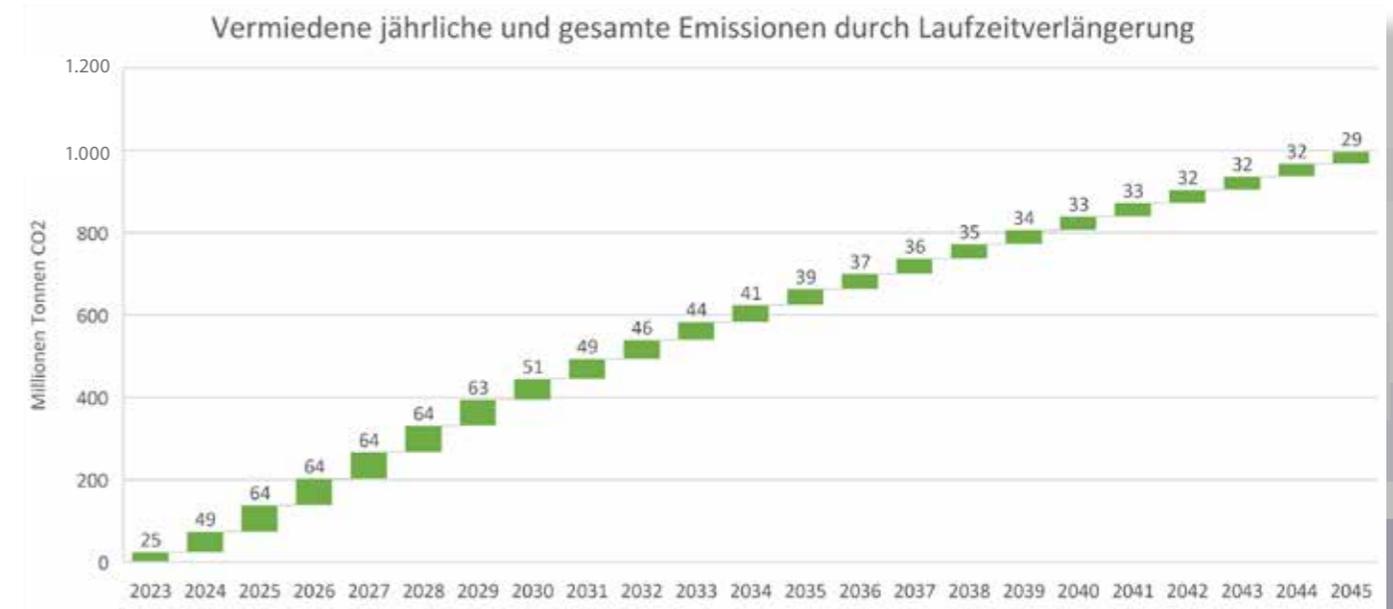
Ein einfacher Weg, die Emissionen in den 2020er Jahren deutlich zu reduzieren, wäre es, die derzeitige Kernkraftwerksflotte in Betrieb zu halten, anstatt sie vorzeitig abzuschalten.

CARBON NEUTRAL

wird bereits heute flexibel betrieben. Im Jahr 2029, wenn die Kohle vollständig von den erneuerbaren Energien und der Kernenergie verdrängt worden ist, gibt es immer noch viel Erdgas im Energiesystem, das teilweise durch den Weiterbetrieb der verbleibenden Kernkraftflotte ersetzt werden kann. Ab 2029 beginnt die Kernenergie, Erdgas zu ersetzen. Dadurch wird im Jahr 2040 etwa ein Drittel weniger fossiles Gas verbraucht. Wie in Abbildung 14 zu sehen ist, können durch die Laufzeitverlängerung der noch

laufenden sechs Kernkraftwerke bis 2045 insgesamt etwa **eine Milliarde Tonnen CO₂-Emissionen vermieden werden**. Diese Emissionsreduktion entspricht in etwa dem Wegfall von 10 Millionen Autos mit Verbrennungsmotor im gleichen Zeitraum. Die Modernisierung der Reaktoren für einen weiteren Betrieb von 20 - 30 Jahren wird natürlich Geld kosten. Trotzdem ist dies sicher die Klimaschutzmaßnahme in Deutschland mit den geringsten Vermeidungskosten.

Abbildung 14: Aufsummiert vermeidet die Reaktorflotte rund eine Milliarde Tonnen CO₂-Emissionen bis 2045.



Auswirkungen auf das Gesundheitswesen

Wie bereits erwähnt, ist die Kernenergie eine äußerst sichere Energiequelle. In diesem Abschnitt erörtern wir, wie sich das in der Praxis zeigt. Feste Brennstoffe wie Kohle und Biomasse und flüssige Brennstoffe wie Benzin und Dieselöl setzen bei der Verbrennung Feinstaub frei. Dessen bekannte gesundheitliche Schäden können statistisch modelliert werden, was uns eine Schätzung der vorläufigen Todesfälle bei einer bestimmten Luftverschmutzung ermöglicht.

Die Laufzeitverlängerung der noch laufenden Kernkraftwerke in Deutschland verhindert jährlich etwa 1.800 vorzeitige Todesfälle durch Feinstaubbelastung verursacht durch die Kohleverbrennung. Der Betrieb der Reaktoren für weitere 25 Jahre, mit Zustimmung der Sicherheitsbehörde, vermeidet 18.000 bis 35.000 Todesopfer in Deutschland und Europa durch Atemwegserkrankungen aufgrund von Luftverschmutzung.³⁵

Aber das ist nur ein kleiner Teil der Auswirkungen auf das Gesundheitswesen. Ein anderer, größerer Teil ist die Mortalität durch erhöhte Temperaturen. Wie bereits erwähnt,

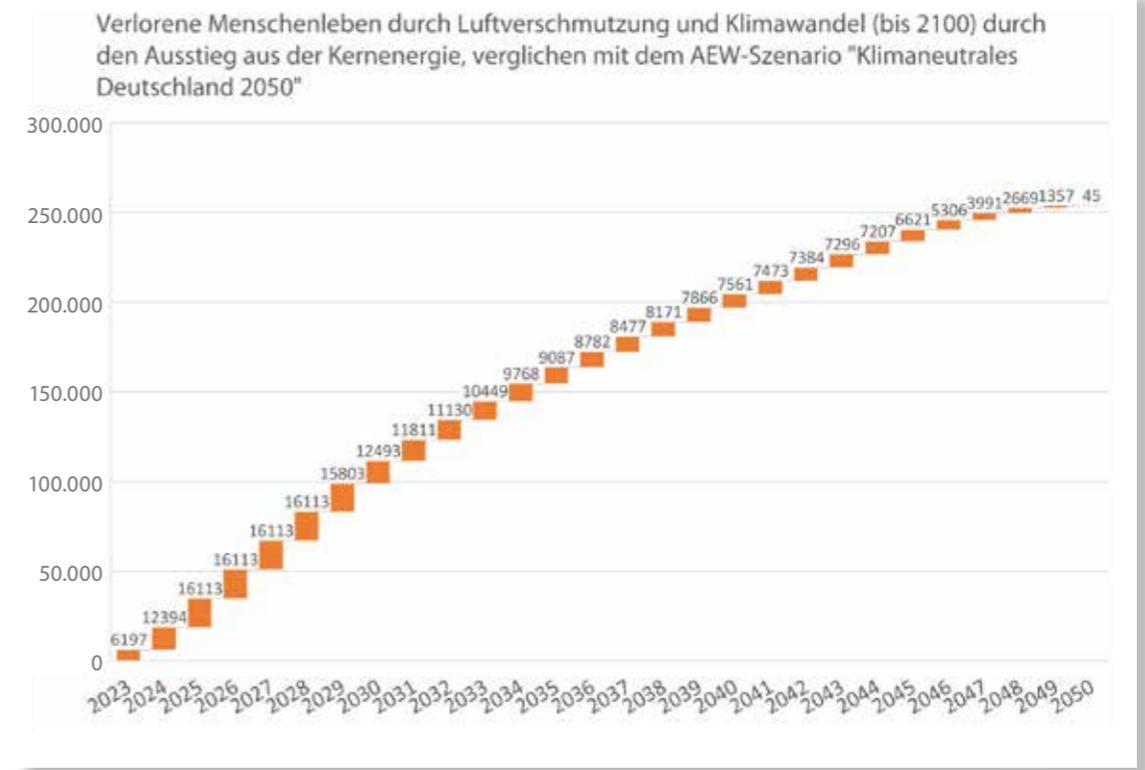
geht eine kürzlich in Nature Communications veröffentlichte Studie von 226 zusätzlichen vorzeitigen Todesfällen bis zum Jahr 2100 pro einer Million Tonnen CO₂ aus. Da die sechs verbleibenden Reaktoren bis Mitte des Jahrhunderts etwa eine Milliarde Tonnen CO₂-Emissionen vermeiden können, würden sie bis zum Jahr 2100 auch etwa 226.000 vorzeitige Todesfälle verhindern.

Natürlich können und sollen wir die direkten gesundheitlichen Auswirkungen der zusätzlichen Erwärmung bis zu einem gewissen Grad abmildern, beispielsweise durch den Einbau von Klimaanlageanlagen. In der oben genannten Zahl sind aber viele der indirekten gesundheitlichen Auswirkungen einer sich erwärmenden Welt gar nicht berücksichtigt. Dazu gehören die Auswirkungen der durch den Klimawandel verursachten Ernteauffälle und die daraus folgenden lokalen Unruhen und Gewalt. Dies führt zu Hungertoten, Krankheiten und der Destabilisierung von Regierungen. Selbst Massmigrationen mit all ihren Folgen können so verursacht werden.

³⁵ Siehe <https://ourworldindata.org/grapher/death-rates-from-energy-production-per-twh>

CARBON NEUTRAL

Abbildung 15: Todesopfer bis zum Jahr 2100 durch die Stilllegung der sechs verbleibenden Reaktoren in Deutschland, indem fossile Brennstoffe ersetzt werden. Die Gesamtzahl der vermiedenen Todesfälle wäre noch viel höher, wenn die gesamte Reaktorflotte 2011 in Betrieb geblieben wäre und bis 2050 weiter betrieben worden wäre.



CLIMATE CHANGE

CO₂

Auswirkungen auf die Umwelt

Die derzeitige Flotte von sechs Kernreaktoren erzeugt 65.000 GWh Strom pro Jahr. Dafür benötigt sie eine relativ kleine Fläche mit ein paar Dutzend km². Nehmen wir an, wir würden einen Mix aus 20 % forstbasierter Biomasse, 40 % Sonnenenergie und 40 % Windkraft verwenden, um diese Kernkraftwerke zu ersetzen.

	GWh	GWh/km ²	Flächenbedarf
Wind	26.000	18	1.440 km ²
Solar	26.000	58	450 km ²
Biomasse	13.000	0,7	18.570 km ²
GESAMT	65.000		20.460 km ²

Unter diesen Annahmen würde man 20.000 Quadratkilometer (2.000.000 ha) benötigen, um genauso viel Strom zu erzeugen wie die sechs Kernkraftwerke. Die Projektion von Agora Energiewende für 2050 sieht für Deutschland mehr als eine Verdopplung der erneuerbaren Energien gegenüber dem heutigen Stand vor. Fraglich ist, ob die lokale Bevölkerung und Umweltschützer diese Flächenausdehnung einfach so akzeptieren. Der Widerstand von Bürgern gegen lokale Energie-Infrastrukturprojekte in Deutschland ist bereits gewachsen. Leider fehlt eine

³⁶ Siehe <https://www.iea.org/reports/nuclear-power-in-a-clean-energy-system>

³⁷ Preise am Terminmarkt im Juli 2021. Aktuelle Preise: <https://www.eex.com/de/marktdaten/strom/futures/#%7B%22snippetpicker%22%3A%22EEX%20German%20Power%20Future%22%7D>

entsprechende Risikoanalyse in Studien wie der von Agora Energiewende.

Wirtschaftliche Aspekte der Laufzeitverlängerung der Kernenergie

Wie bereits erörtert, ist die Laufzeitverlängerung für bestehende Kernkraftwerke die kostengünstigste Möglichkeit, eine saubere, zuverlässige Energieversorgung zu ergänzen. Je nach Projekt liegen die Kosten laut Internationaler Energieagentur zwischen 33 - 45 €/MWh (40 - 55 USD/MWh).³⁶ Die Kernkraftwerke in Deutschland sind mit bekanntem Abschaltdatum in Betrieb, so dass die Kosten wahrscheinlich am oberen Ende der Preisspanne liegen. Es wäre aber trotzdem von großem Wert, sie in Betrieb zu halten. Die EEG-Umlage, mit der die Einspeisevergütungen für erneuerbare Energien bezuschusst werden, liegt heute bei weit über 100 €/MWh erzeugten Stroms aus erneuerbaren Energien. Das ist mehr als das Doppelte der wahrscheinlichen Kosten für die Sanierung und Verlängerung des Betriebs der Reaktorflotte. Auf dem deutschen Terminmarkt liegen die Preise für Elektrizität bei über 70 bis zu 80 €/MWh.³⁷

Ein weiterer Aspekt ist der CO₂-Preis im

Emissionshandelssystem (ETS). Die Kosten pro Tonne CO₂-Emissionen sind in den letzten Jahren stark angestiegen und liegen im Sommer 2021 bei etwa 50 €/Tonne. Das bedeutet, dass die bestehende Reaktorflotte den Deutschen allein durch die ETS-Kohlensstoffpreise rund 3 Milliarden Euro pro Jahr einsparen kann, wenn sie die Kohleproduktion ersetzen würde. Die ETS-Preise werden in den kommenden Jahren nur noch steigen, da europäische Länder ihre Politik stärker an dem von ihnen unterzeichneten Pariser Abkommen ausrichten. Diese Einsparung bei den CO₂-Preisen allein würde sogar schon die Kosten für die Laufzeitverlängerung und die Sanierung der Kernkraftwerke decken.

Darüber hinaus würden die Einsparungen bei den Gesundheitskosten (verlorene Arbeitsstunden, vorzeitige Todesfälle, Krankheitskosten und andere soziale Kosten der Umweltverschmutzung) wahrscheinlich im Bereich von zehn Milliarden Euro pro Jahr liegen. Aus einer aktuellen Studie: "Die sozialen Kosten des Umstiegs von Atomkraft auf Kohle belaufen sich auf etwa 12 Milliarden Dollar pro Jahr. Über 70 % dieser Kosten entstehen durch das erhöhte Sterberisiko, das mit der Erzeugung lokaler Luftverschmutzung bei der Verbrennung fossiler Brennstoffe verbunden ist."³⁸ Diese Aussage bezieht sich auf

³⁸ Siehe https://www.nber.org/system/files/working_papers/w26598/w26598.pdf

die Modelle und Berechnungen der Autoren zu den Auswirkungen der 2011 erfolgten sofortigen Schließung mehrerer Kernkraftwerke in Deutschland. Diese Kosten sind viel höher als selbst die katastrophalsten Schätzungen zu den nuklearen Risiken und der Abfallentsorgung.

Die sowohl direkten als auch indirekten Einsparungen durch eine Laufzeitverlängerung der Kernkraftwerke für weitere 30 Jahre wären signifikant, wahrscheinlich im zweistelligen Milliarden-Euro-Bereich pro Jahr.

Zusammenfassung

Es lässt sich nicht leugnen, dass die Laufzeitverlängerung der aktuellen Reaktorflotte eine Herausforderung darstellt. Sie erfordert sowohl politisch als auch technisch einen entschlossenen Vorstoß, sowie erhebliche Investitionen in die Kernkraftwerke. Wahrscheinlich werden umfangreiche Modernisierungen und andere Maßnahmen erforderlich sein. Die Reaktoren werden für ein oder zwei Jahre abgeschaltet werden müssen, um all dies durchzuführen. Außerdem muss qualifiziertes Personal gefunden werden, und das wird wahrscheinlich nicht billig sein.

Aber dabei muss berücksichtigt werden, dass dies immer noch mindestens eine Grö-

CLIMATE CHANGE

CO₂

Benennung einfacher ist, als es die Energiewende ohne Kernkraft wäre. Es ist sehr schwer, ein Energiesystem aufzubauen, welches fast vollständig von variabler erneuerbarer Energie abhängig ist. Die Reaktoren noch 30 Jahre am Netz zu halten, mag eine Herausforderung sein, aber im Vergleich zu dem, was ohne Kernenergie getan werden

Szenario - Fortgeschrittene Wärmequellen

Das Ziel des Szenarios "Fortgeschrittene Wärmequellen" ist es, zu zeigen, wie die vielfältige Nutzung von Erdgas ersetzt werden kann. Außerdem soll eine kostengünstigere Wasserstoffproduktion ermöglicht werden, um die Wasserstoff-Importe im Basisszenario von Agora Energiewende "Klimaneutrales Deutschland 2050" (oder 2045) zu ersetzen. Dieses Szenario ersetzt keine der erneuerbaren Energien im AEW-Szenario. Es ergänzt lediglich ein zusätzliches Bauprogramm für Technologien, die Erdgas als flexiblen Energieträger ersetzen und Wasserstoff und synthetische Kraftstoffe (PtX) erzeugen können.

Das Szenario geht davon aus, dass es keine Änderungen beim Ausbau der erneuerbaren Energieerzeugung gibt. Ganz im Gegenteil,

muss, ist es ein Kinderspiel. Wenn die Kernenergie ihren Teil dazu beiträgt, wird die Dekarbonisierung deutlich schneller, risikoärmer, kostengünstiger und mit geringeren Auswirkungen auf die Umwelt und die Gesellschaft erfolgen. Das sind äußerst wünschenswerte Ergebnisse.

es wird eine große Nachfrage nach dem Bau von Wind- und Solaranlagen angenommen. Der derzeitige Bestand muss bis 2050 mindestens einmal komplett ersetzt werden und die Kapazität von erneuerbaren Energien wird sich gegenüber heute mehr als verdoppeln. Deutschland muss in Zukunft sogar pro Jahrzehnt mehr erneuerbare Erzeugungskapazität zubauen als heute existiert. Das meiste davon wird Wind- und Solarenergie sein. Wasserkraft und Biomasse können gegenüber dem heutigen Stand nicht nachhaltig ausgebaut werden.

Global gesehen gibt es viel Forschung und Entwicklung zu verschiedenen Arten von fortschrittlichen Wärmequellen. Die am weitesten entwickelten davon gehen bereits

in Betrieb (wie zum Beispiel der HTR-PM in China). Viele weitere Projekte rechnen mit einer Inbetriebnahme von Prototypen irgendwann in diesem Jahrzehnt und bald danach mit einer kommerziellen Auslieferung in vollem Umfang. Das Hauptprodukt dieser Anlagen ist nicht so sehr die reine Elektrizität. Im Vordergrund stehen andere Energiedienstleistungen, die wir wahrscheinlich bis in die 2030er Jahre hinein benötigen werden. Dazu gehören:

- Erhöhte Flexibilität und Regelenergie für die Stromnetze (als klimafreundliche Alternative zu Erdgasturbinen)
- Versorgungssichere, erschwingliche Hochtemperatur-Prozesswärme für industrielle Anwendungen
- Kombinierte Erzeugung von Strom und (Niedertemperatur) Wärme, die für Fernwärme/-kühlung oder Meerwasserentsalzung genutzt werden kann

- Flexible und effiziente Produktion von sauberem Wasserstoff durch Hochtemperatur-Dampfelektrolyse – eine Kombination von Hochtemperaturwärme aus der Wärmequelle mit überschüssigem erneuerbaren Strom aus dem Netz

Dies sind äußerst wertvolle Bausteine für unser zukünftiges Energiesystem. Und je mehr variable erneuerbare Energie wie Wind- und Solarstrom im System vorhanden ist, desto wertvoller werden viele dieser Dienstleistungen. Es gibt Dutzende technologische Wege, Konfigurationen und Optionen für diese fortschrittlichen Wärmequellen. Alle davon durchzugehen sprengt den Rahmen dieses Berichts. Dennoch ist es hilfreich, einige der hervorstechenden technologischen Pfade samt ihrer Vorteile und Optionen zu erwähnen (siehe Tabelle 2).

Dieses Szenario zeigt, wie Deutschland ein führendes Land für eine effektive Dekarbonisierung werden könnte. Es könnte Vorreiter

Tabelle 2: Verschiedene Typen von fortschrittlichen Reaktortechnologien und einige ihrer Eigenschaften.

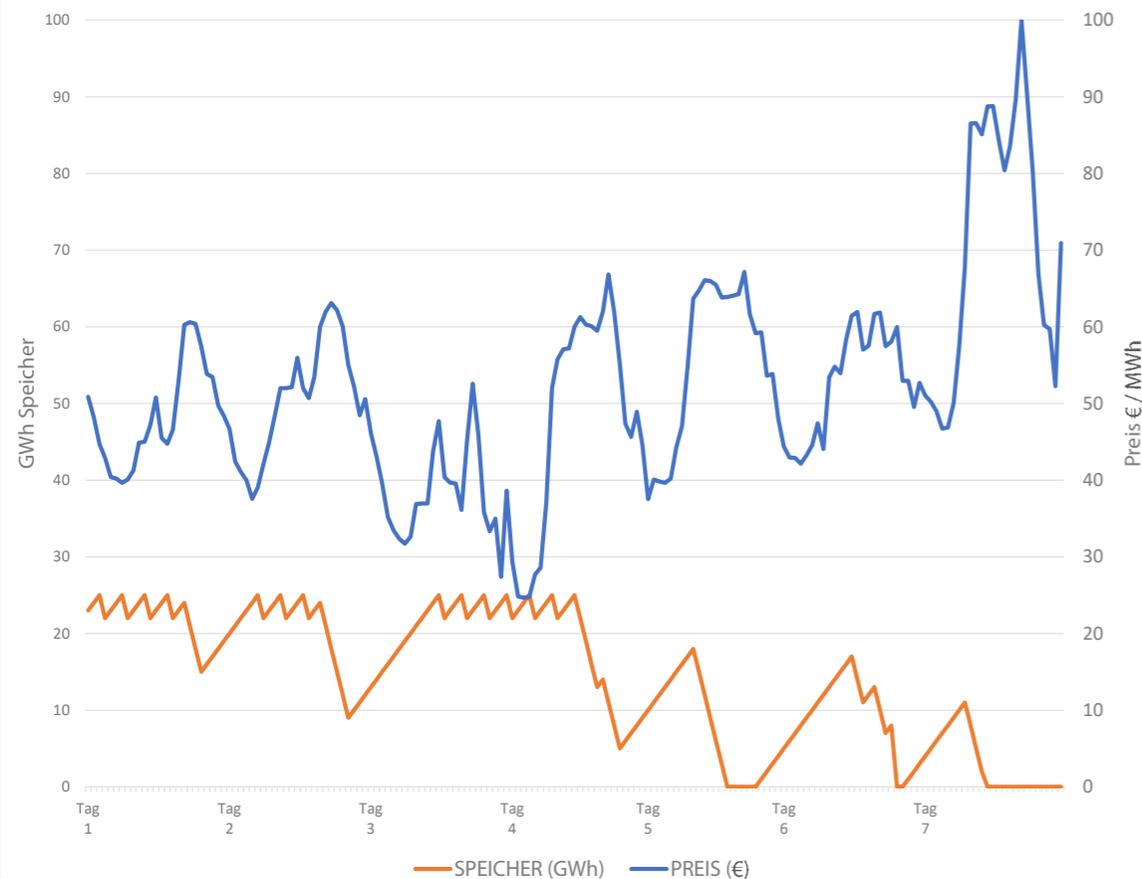
	Leichtwasser-Kühlung	Flüssigsalz-Kühlung	Flüssigmetall-Kühlung	Gas-Kühlung
Mittlere Temp (unter 300°C)	Ja	Ja	Ja	Ja
Hohe Temp (unter 600°C)	Nein	Ja	Ja	Ja
Sehr hohe Temp (über 600°C)	Nein	Manchmal	Nein	Manchmal
Reaktordruckbehälter nötig	Ja	Nein	Nein	Ja
Flexibler Betrieb	Ja	Ja	Ja	Ja
Wärmespeicher für erhöhte Flexibilität	Möglich	Oft	Möglich	Möglich
Inhärente / passive Sicherheit	Manchmal	Ja	Ja	Ja
Kann "abgebrannte Brennstäbe" nutzen	Nein	Manchmal	Oft	Nein

CARBON NEUTRAL

CO₂

Abbildung 16: Ein lokales Hochtemperatur-Wärmespeichersystem wird mit einer fortschrittlichen Wärmequelle gekoppelt. An den Speicher ist eine Turbine angeschlossen. Der Energiespeicher wird entweder geladen oder entladen, je nach Strompreis.

Ergebnisse der Simulation zu fortgeschrittenen Wärmequellen mit Speicher



bei der Kombination von variablen erneuerbaren Energien mit modernen Wärmequellen werden in einem kostengünstigen, CO₂-armen und zuverlässigen Energiesystem. Genau das wollen alle Länder so schnell wie möglich.

Flexibilität von fortschrittlichen Wärmequellen

Zur Veranschaulichung zeigt Abbildung 16 eine fortschrittliche Wärmequelle mit 1 GW Leistung. Sie ist mit einem lokalen Hochtemperatur-Wärmespeichersystem und zusätzlicher Turbinenkapazität (mit 3 GW Leistung) gekoppelt. Sie kann in Lastfolge gehen, indem sie die 24-GWh-Speicherkapazität auflädt, wenn der Strompreis niedrig ist. Wenn der Strompreis hoch ist, entlädt sie den Speicher durch Stromerzeugung. 24-GWh-Speicherkapazitäten erlauben den Betrieb der Turbine mit voller Leistung für 8 Stunden. Dadurch kann sie den täglichen Veränderungen der Solar- und Winderzeugung sowie den Veränderungen der Nachfrage folgen. Diese Art der thermischen Hochtemperatur-Speicherung ist relativ kostengünstig. Sie kann eine erschwingliche Möglichkeit sein, den Anteil der variablen erneuerbaren Energieerzeugung im Energiesystem zu er-

höhen. Wie in der Abbildung 16 zu sehen ist, wird der Strom nachmittags erzeugt (der Speicher entlädt sich). Dann ist die Nachfrage hoch und die Sonneneinstrahlung sinkt, wodurch der Marktpreis steigt. Nachts, wenn die Nachfrage niedriger ist, und entsprechend auch der Strompreis, wird der Speicher geladen. Eine weitere Optimierung könnte vorgenommen werden, wenn die Preisspitze am siebten Tag schon ein oder zwei Tage vorhergesehen werden kann.

Annahmen

Das Szenario geht davon aus, dass die aktuelle Reaktorflotte am Netz gehalten wird und Kohle sowie etwas Erdgas ersetzt. Es geht außerdem davon aus, dass Deutschland im Jahr 2030 die ersten 500 MW Leistung und im Jahr 2031 weitere 1.000 MW Leistung fortschrittliche Wärmequellen ans Netz bringt. Ab 2032 sollen jedes Jahr in seriellen und parallelen Projekten fortschrittliche Wärmequellen in Betrieb gehen, mit einer Leistung von jeweils 1.500 MW (elektrisch, etwa 4.000 MW thermische Leistung). Diese würden in erster Linie an aktuellen Kernkraftwerks-Standorten angesiedelt werden, um die Lizenzierung und Zonierung zu vereinfachen. Auch können so die bereits am

Standort vorhandene Infrastruktur und Netze sowie das Know-how und die Erfahrung der lokalen Bevölkerung genutzt werden. Einige davon könnten vielleicht auch auf Offshore-Plattformen angesiedelt werden.³⁹ In diesem Szenario trennen wir nicht zwischen verschiedenen Technologien und machen keine Annahmen über die Größe der einzelnen fortschrittlichen Wärmequellen. Da dieses Szenario bis ins Jahr 2050 plant, wird bis dahin auch die aktuelle Reaktorflotte in den Ruhestand gehen. Sie wird beginnend im Jahr 2046 durch fortschrittliche Wärmequellen ersetzt.

Aufgrund ihrer zusätzlichen Flexibilität und der Möglichkeit der lokalen Hochtemperatur-Energiespeicherung ersetzen die fortschrittlichen Wärmequellen in diesem Szenario Erdgas 1 : 1. Im Gegensatz dazu ist die Fähigkeit der aktuellen Kernenergie, Erdgas zu ersetzen, begrenzter. Nachdem es kein Gas und keine Kohle mehr zu ersetzen gibt, beginnen sie, Power-to-X-Importe zu ersetzen, was die Energiesicherheit erhöht. Dadurch wird es Deutschlands Nachbarn möglich, ihre heimische PtX-Produktion zu

³⁹ Siehe <https://www.lucidcatalyst.com/hydrogen-report> für mehr Informationen zu Offshore-Plattformen

nutzen, um ihren Energiemix schneller zu dekarbonisieren. Strom aus Kernenergie wird mit einem durchschnittlichen Wirkungsgrad von 60 % in PtX umgewandelt.

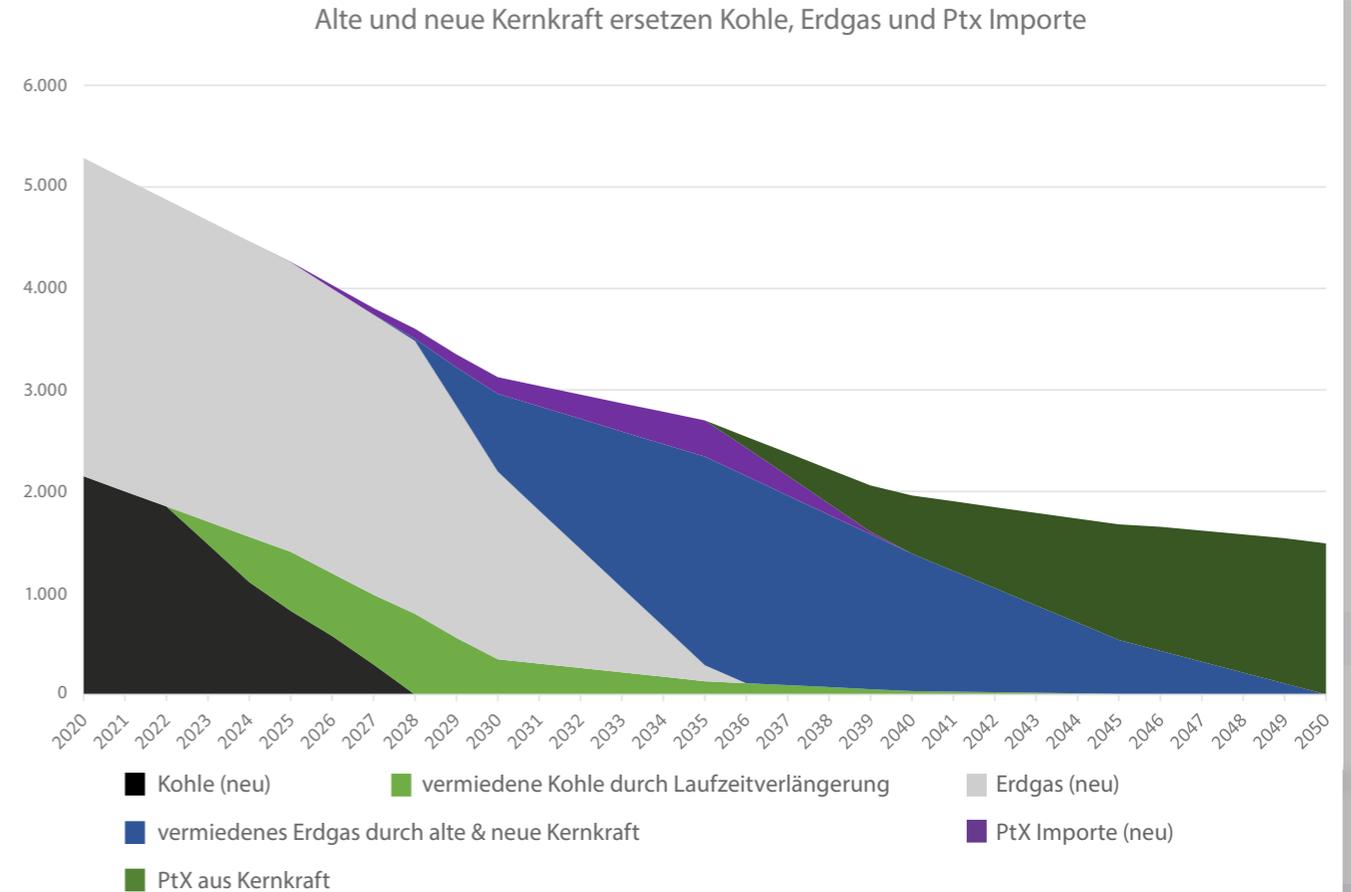
Ergebnisse

Wie im Hauptszenario, in dem nur die aktuelle Reaktorflotte in Betrieb bleibt, erfolgt der Ausstieg aus der Kohle bis Ende 2028. Das ist zehn Jahre schneller als das aktuelle Regierungsziel von 2038. Dank der zusätzlichen fortschrittlichen Wärmequellen erfolgt der Ausstieg aus fossilem Gas bis Ende 2039, anstatt bis 2050 wie im Basisszenario von AEW. Darüber hinaus ersetzen in Deutschland hergestellte PtX-Kernbrennstoffe ab 2040 importierte Brennstoffe, und ab 2045 wird Deutschland zum Nettoexporteur von PtX-Brennstoffen.

In Summe würde dieses Szenario bis 2050 fast 2 Milliarden Tonnen CO₂-Emissionen vermeiden.

Im ersten Jahrzehnt stammen die Emissionseinsparungen hauptsächlich aus der Kompensation der Kohleverbrennung durch die Laufzeitverlängerung der existierenden Kernkraftwerke. Im zweiten Jahrzehnt

Abbildung 17: Laufzeitverlängerte Kernkraftwerke und fortschrittliche Wärmequellen ersetzen alle fossilen Erzeuger bis 2040 und PtX aus Kernkraft ersetzt PtX Importe bis 2045.



stammen die Einsparungen zusätzlich aus fortgeschrittenen Wärmequellen, die Erdgas ersetzen. Gegen Ende der 2030er und in den 2040er Jahren kommen die meisten vermiedenen Emissionen von sauberen PtX-Brennstoffen, die fossile Brennstoffe

(Erdgas und flüssige Brennstoffe) ersetzen. **Diese Emissionsminderungen kommen zu den signifikanten Reduktionen des Basiszenario "Klimaneutrales Deutschland 2050" noch hinzu.**

Abbildung 18: Vermiedene Emissionen pro Jahr und insgesamt mit einer Laufzeitverlängerung plus einem Bauprogramm für flexible fortgeschrittene Wärmequellen.

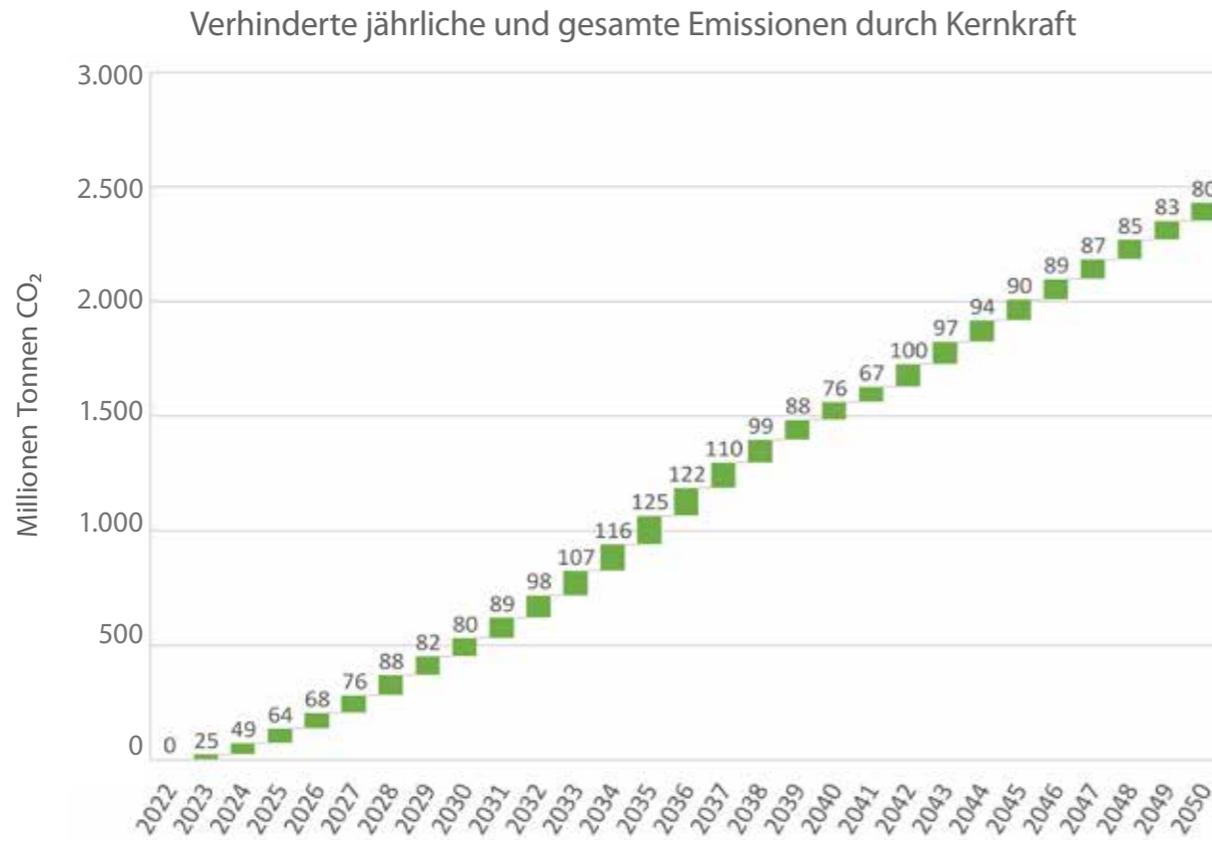
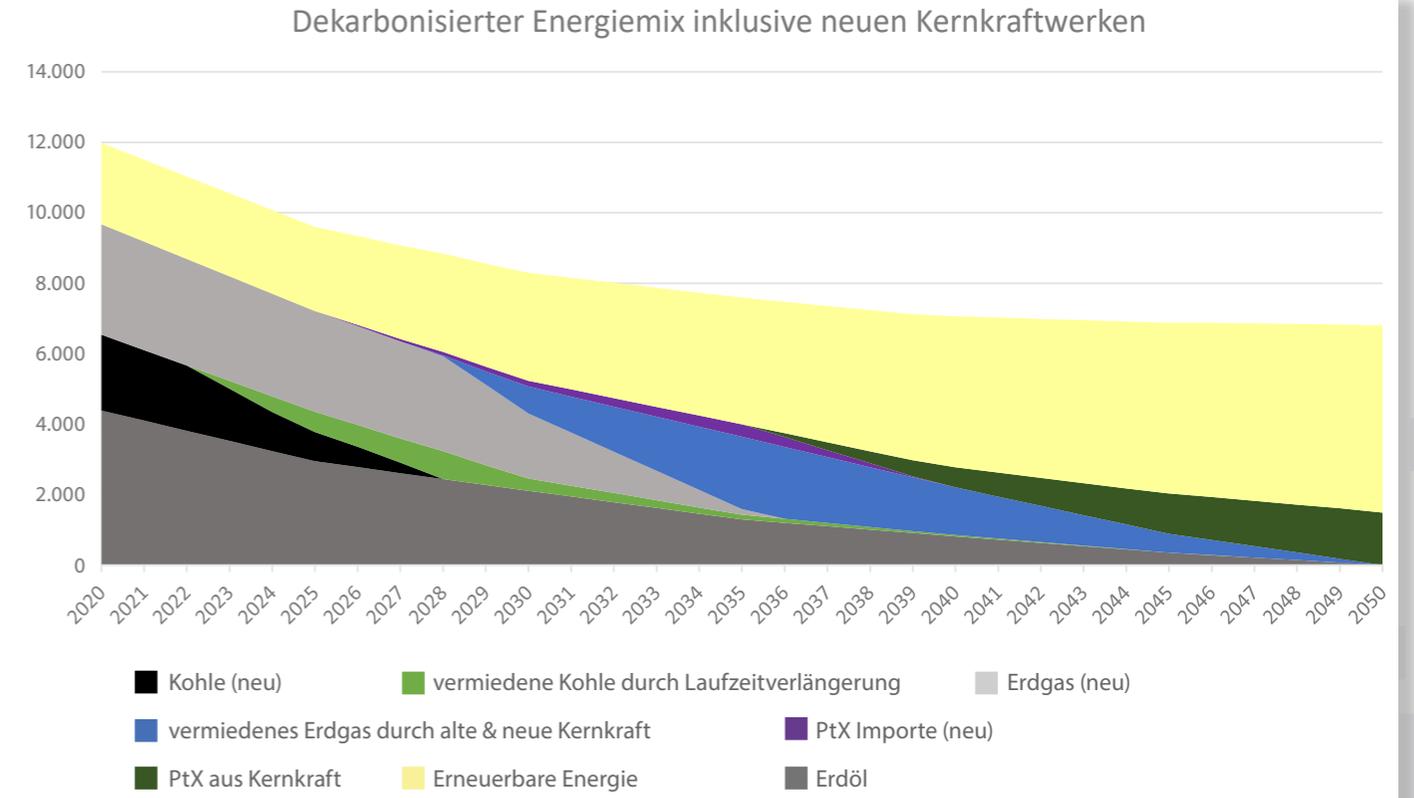


Abbildung 19: Energiemix, der fossile Erzeuger und PtX Importe durch erneuerbare Energien, die aktuelle Reaktorflotte und fortgeschrittene Wärmequellen ersetzt.



In Summe würde dieses Szenario bis 2050 fast 2 Milliarden Tonnen CO₂-Emissionen vermeiden.

CLIMATE CHANGE

CO₂

Szenario: Energieüberfluss statt -knappheit

Unser letztes Szenario ist eine Kombination aus zwei Anliegen. Erstens könnte der schnelle Rückgang des Energieverbrauchs, von dem das AEW-Basiszenario ausgeht, eine gewagte Annahme sein. Die Bürger sind schließlich generell nicht bereit, ihren Lebensstandard deutlich zu senken. Auch Effizienzsteigerungen der Wirtschaft, auf die gesetzt werden, haben ihre Grenzen.

Zweitens erwartet der Sonderbericht 1,5 °C globale Erwärmung des Weltklimarats ein sehr deutliches globales Wachstum der Kernenergie. In der Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger gehen die vier Hauptszenarien von einem durchschnittlichen Wachstum der Kernenergie um das Vierfache bis 2050 aus.

In Kombination kann man annehmen, dass Deutschland zusätzlich zum Ausbau der erneuerbaren Energien und der Laufzeitverlängerung der aktuellen Kernkraftwerke ein Programm startet, um seine Kernkraftflotte bis 2050 etwa um das Vierfache des Niveaus von 2010 auszubauen. Das entspricht dem globalen Durchschnitt, der in den Szenarien des Weltklimarats beschrieben wird.

Wird der Energieverbrauch um die Hälfte sinken?

Obwohl wir das Szenario "Klimaneutrales Deutschland 2050" von Agora Energiewende ohne Änderungen verwendet haben, müssen wir die Höhe des Gesamtenergieverbrauchs und seinen schnellen Rückgang in der Studie diskutieren. Während es einige Gründe gibt, die für ein Sinken des Energieverbrauchs sprechen könnten, gibt es auch mehrere Gründe, die dagegen sprechen. Es ist zumindest möglich, dass der Verbrauch nicht so schnell sinkt oder dies nicht ohne schlimme Folgen für die Menschen und Unternehmen in Deutschland geschieht.

Wirtschaftliche Aktivität findet statt, wenn Energie eingesetzt wird, um Güter und Dienstleistungen zu erwirtschaften. Dies können Kalorien sein, die von Arbeitern oder Arbeitstieren verzehrt werden. Oder es können externe Energieträger sein (Brennstoffe, Elektrizität, Prozesswärme), die von Maschinen und Prozessen verwendet werden. Wirtschaftswachstum entsteht hauptsächlich durch Produktivitäts- und Bevölkerungswachstum. Produktivitätswachs-

Der schnelle Rückgang des Energieverbrauchs, von dem das AEW-Basiszenario ausgeht, eine gewagte Annahme sein.

tum bedeutet, dass pro Arbeitsstunde mehr Güter und Dienstleistungen produziert werden. Dies geschieht vor allem durch den Einsatz von Maschinen und Industrieanlagen, die wiederum externe Energie verbrauchen. Vereinfacht ist dies also folgende Kausalkette: Um die Wirtschaft wachsen zu lassen, muss die Produktivität steigen. Und um die Produktivität zu steigern, muss der Energieverbrauch steigen.

Der Wert des Bruttoinlandsproduktes in Euro, der pro Einheit eingesetzter externer Energie erzeugt wird, ergibt sich aus der Energieeffizienz der Wirtschaft. Die wird gemessen in Euro pro kWh (oder Gigajoule). Diese Effizienz hat sich über die Jahrzehnte hinweg stetig um ca. 2 % pro Jahr (+/- 1 %) verbessert.⁴⁰ Wenn man davon ausgeht, dass die Wirtschaft pro Kopf um 2 % pro Jahr wächst und sich die Energieeffizienz der Wirtschaft mit einer ähnlichen Rate von 2 % pro Jahr verbessert, dann bleibt der Energieverbrauch der Wirtschaft (bei gleichbleibender Bevölkerung) auf dem gleichen Niveau. Um in den 29 Jahren, die uns bis 2050 zur Verfügung stehen, eine Reduktion um etwa 50 % zu erreichen, müsste der Primärenergieverbrauch der Wirtschaft im

⁴⁰ Siehe <https://www.iea.org/reports/energy-efficiency-2020>

Durchschnitt um etwa 2 % pro Jahr sinken. Entweder wächst die Wirtschaft also nicht (was die Struktur unserer heutigen Gesellschaft nicht verkraften würde). Oder wir finden und investieren in neue Wege, um die Energieeffizienz viel schneller zu verbessern, als dies bisher der Fall war. Außerdem müssen wir diese Effizienzverbesserungen als Einsparungen realisieren, anstatt mehr mit dieser höheren Effizienz zu produzieren (Rebound-Effekt).

Fast die gesamte Geschichte seit der industriellen Revolution ist eine Geschichte der Effizienzsteigerung, die zu schnellerem Wirtschaftswachstum und noch mehr Energie- und Materialverbrauch geführt hat. Eine Umkehrung dieses Rebound-Effekts ist möglich, zumindest teilweise. Aber wir wissen nicht, bis zu welchem Grad. Bisher wurde eine nachhaltige Umkehr nicht über längere Zeiträume auf nationaler Ebene geschafft. Während also eine Halbierung des Energieverbrauchs im Bereich des Möglichen liegt, ist sie keineswegs sicher. Es ist nicht einmal wahrscheinlich - zumindest wenn man den fehlenden Präzedenzfall in der Vergangenheit bedenkt. Anzunehmen, dass dies geschehen muss, ist eine gewagte,

CARBON
NEUTRAL

CLIMATE
CHANGE

CO₂

eventuell unverantwortliche Strategie. Wenn diese Effizienzziele nicht erreicht werden, könnten die geplanten Maßnahmen und Investitionen viel zu klein sein im Vergleich zu dem Energiebedarf, den wir am Ende decken müssen. Dies kann zu einem verstärkten Einsatz von fossilen Brennstoffen führen, da diese leicht verfügbar und auch schnell zu installieren und zu nutzen sind. Dies wiederum würde eine Beschleunigung des Klimawandels und ein Verfehlen der Emissionsminderungsziele bedeuten.

Außerdem müssen wir uns fragen, wieviel von unserem Rückgang des Energieverbrauchs und der Emissionen darauf zurückzuführen ist, dass wir die industrielle Produktion aus Europa in andere Länder verlagert haben, um die Waren von dort zu importieren. Die globalen Emissionen sind gestiegen, trotz unserer Bemühungen, die nationalen Emissionen zu reduzieren. Wir müssen ehrlich und transparent mit der Möglichkeit umgehen, dass wir einen Teil unserer Emissionen in Entwicklungsländer "exportiert" haben, die sogenannte Carbon Leakage.

41. Siehe <https://www.ipcc.ch/sr15/>

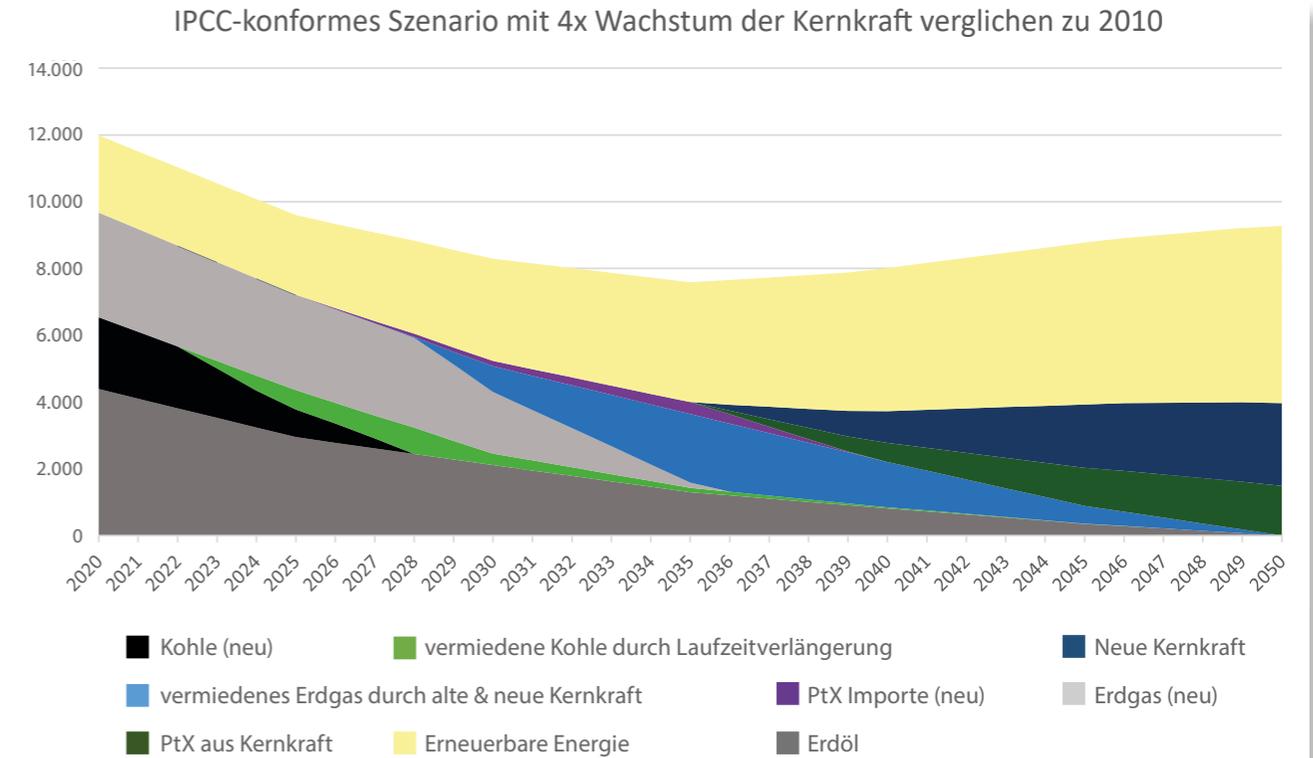
Weltklimarat und 1.5°C

Der Weltklimarat geht in seinem Sonderbericht 2018 zur globalen Erwärmung von 1,5°C in seinen vier Hauptszenarien davon aus, dass die globale Endenergienachfrage bis zum Jahr 2050 gegenüber dem Stand von 2010 leicht ansteigt (8,75 %) und gegenüber dem Stand von 2018 in etwa gleich bleibt.⁴¹ Der größte Teil dieses Wachstums wird aus den Entwicklungsländern kommen, die mehr Energie verbrauchen.

In diesem Szenario der Sensitivitätsanalyse gehen wir davon aus, dass Deutschland mit der Kernenergie das tut, was die vier Hauptszenarien der Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger aus dem Sonderbericht 1,5 °C globale Erwärmung des Weltklimarats im Durchschnitt annehmen. Bis 2050 soll die Energieerzeugung aus Kernkraft demnach gegenüber 2010 um das Vierfache erhöht werden. Dies geschieht zusätzlich zu einer Steigerung der erneuerbaren Energien um das Elffache gegenüber 2010 - ohne Biomasse.

Die globale Nachfrage unterscheidet sich von der deutschen, so dass der Vergleich

Abbildung 20: Das Szenario mit einem Wachstum der Kernkraft in Deutschland im Durchschnitt der vier Hauptszenarien des IPCC (2018) und einer Schrumpfung des Energieverbrauchs bis 2050 nur um ein Viertel, statt auf die Hälfte.



CARBON NEUTRAL

CLIMATE CHANGE

CO₂

nicht ganz unproblematisch ist. Aber es hilft, sich das notwendige Ausmaß des Ausbaus der erneuerbaren Energien und der Kernenergie zu veranschaulichen. Ebenso wichtig ist es zu realisieren, dass Deutschlands vielleicht fortschrittlichstes Klimaszenario das signifikante globale Wachstum der Kernenergie nicht berücksichtigt, um die Klimaerwärmung auf etwa 1,5 °C zu begrenzen. Man kann darüber diskutieren, wie realistisch wiederum die Dekarbonisierungsszenarien des Weltklimarat-Berichts sind. Sie sind jedenfalls durch die deutsche Energiewende viel weniger realistisch geworden. Diese entscheidet sich, essentielle Technologien außen vor zu lassen, namentlich Kernkraft sowie Kohlenstoffabscheidungs- und -speicherung. Wenn ein scheinbar engagiertes Land wie Deutschland dies nicht schafft, wie können wir dann annehmen, dass andere Länder es können? Und wenn nicht, müssen wir entweder unseren Blick auf die Kernenergie ändern oder unsere Erwartungen an das, was ohne sie möglich ist. Das bedeutet, dass wir ein viel höheres Maß an globaler Erwärmung in Kauf nehmen und die damit verbundenen schädlichen Auswirkungen für uns als auch für zukünftige Generationen.

Eine Vervierfachung der deutschen Kernenergie gegenüber 2010 ist eine Herausforderung. Deutschland hat sich schließlich bei der Kernkraft in die falsche Richtung bewegt. Um dieses Ziel zu erreichen, bräuchte Deutschland so etwas wie das in Abbildung 20 gezeigte nukleare Programm. Deutschland startet dabei zur Mitte der 2020er Jahre ein Neubauprogramm und steigert den jährlichen Zubau schnell auf ein Niveau von etwa 3 GW (~24 TWh neues Produktionsvolumen pro Jahr). Dieses Szenario hat den zusätzlichen Vorteil, dass eine Halbierung des deutschen Primärenergieverbrauchs, wie zuvor diskutiert, nicht notwendig ist. Der Zubau an erneuerbaren Energien bleibt gleich wie im ursprünglichen Szenario von Agora Energiewende, das wir als Basis verwendet haben. Die Gesamtnachfrage sinkt immer noch (und es gibt einen unerklärten Nachfrageeinbruch in den 2030er Jahren). Aber sie sinkt nur um ein Viertel bis 2050, nicht um die Hälfte. Wenn Deutschland es irgendwie schafft, die Inlandsnachfrage trotzdem zu halbieren, kann die zusätzliche Energie in die Nachbarländer exportiert oder das Bauprogramm verringert werden.

CARBON
NEUTRAL

Das ist ehrgeizig. Aber es basiert lediglich auf den Erwartungen der vier Hauptszenarien des Weltklimarats bis 2050. Um den Klimawandel rechtzeitig abzumildern, müssen wir ehrgeizig handeln. Das gilt für erneuerbare Energien, Energieeffizienz und Kernkraft. Wir kommen schon so lange viel zu langsam voran, auch in Deutschland. Weltweit haben wir es nicht einmal geschafft, den jährlichen Anstieg des atmosphärischen CO₂-Anteils zu verlangsamen, trotz 30 Jahren Verhandlungen, Politik und Klimaschutzmaßnahmen. Diese Unfähigkeit, sich zu bewegen, bedeutet, dass wir uns jetzt viel schneller bewegen müssen. Einer der schnellsten Wege, um in Schwung zu kommen, besteht darin, keine CO₂-arme Stromerzeugung vorzeitig abzuschalten.

Um den Klimawandel rechtzeitig abzumildern, müssen wir ehrgeizig handeln. Das gilt für erneuerbare Energien, Energieeffizienz und Kernkraft.

CLIMATE
CHANGE

CO₂



Wie wir sehen, ist ein technologieoffener Ansatz der mit Abstand effektivste Weg zur Lösung des Klimaproblems. Im Fall von Deutschland könnte der Energiesektor mit Kernenergie um Jahrzehnte schneller CO₂-neutral sein als ohne sie. Wir müssen sehr schnell handeln und die Emissionen besonders in den 2020er Jahren deutlich reduzieren. Die Laufzeitverlängerung der noch betriebenen Kernkraftwerke ist der schnellste und sicherste Weg, dies zu erreichen. So könnten rund eine Milliarde Tonnen CO₂-Emissionen vermieden werden.

Die deutsche Haltung zur Kernenergie zu ändern, ist eine Herausforderung, aber eine machbare. Die Lösung des Klimaproblems hingegen in der notwendigen Zeit und Größenordnung könnte sich ohne eine unserer leistungsfähigsten Technologien als praktisch unmöglich und politisch nicht durchsetzbar erweisen. Zumindest ist ein unnötiger Verzicht auf Kernkraft höchst riskant und unverantwortlich gegenüber zukünftigen Generationen. Aber darüber können nur das deutsche Volk und deutsche PolitikerInnen entscheiden. Wir hoffen lediglich, dass diese Entscheidung mit so viel sachlicher Information wie möglich getroffen wird. Das ist um so wichtiger angesichts der Fehlinformation zur Kernkraft, die aktuell in der deutschen Gesellschaft vorherrscht.

Noch beunruhigender ist die aktuelle Tendenz Deutschlands, seine Energiepolitik

und seine Ansichten anderen Nationen aufzuzwingen, sowohl direkt als auch indirekt. Egal ob Deutschland letztendlich aus der Kernenergie aussteigt oder nicht. Kein Land hat ein Recht, andere Länder zu zwingen, ihm zu folgen. Dies untergräbt die Souveränität anderer Nationen, den Gründungsgedanken der Europäischen Union und den globalen Fortschritt bei der Eindämmung des Klimawandels und der Bekämpfung der Armut. Wenn Deutschland die wachsende Gruppe der Länder mit ziviler Kernkraft verlassen will, ist das seine Entscheidung. Aber es täte gut daran, andere Nationen ihre Entscheidungen selbst treffen zu lassen, um unser aller willen.

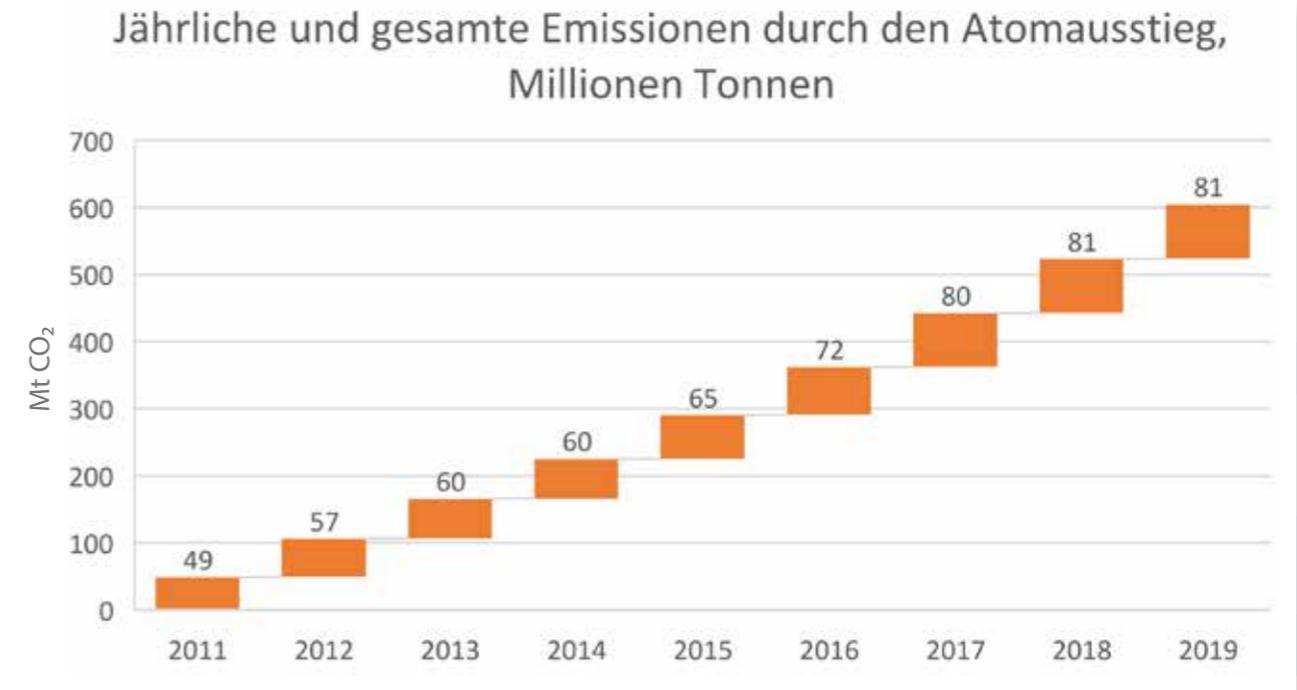
Wir empfehlen und hoffen, dass Deutschland vielleicht mit Hilfe dieses Berichts eine neue öffentliche Diskussion über sein Verhältnis zur Kerntechnik beginnen kann. Insbesondere geht es um seine mögliche Rolle bei der Abschwächung des Klimawandels und der Vermeidung von Luftverschmutzung heute und in Zukunft. Wir hoffen, dass sich Wissenschaft und Fakten durchsetzen werden. Es wäre schön, wenn wir als Menschheit unserer gemeinsamen Zukunft zusammen mit Deutschland entgegensehen können, mit Deutschlands talentierten WissenschaftlerInnen und außerordentlich fähigen IngenieurInnen - auch auf dem Gebiet der Kerntechnik und ihrer vielen Anwendungen.



Angenommen, Deutschland hätte nach dem Fukushima-Unfall im Jahr 2011 einmal tief Luft geholt und dann entschieden, Kohlekraftwerke statt Kernkraftwerke abzuschalten. Dann hätten die bis Ende 2019 abgeschalteten Kernkraftwerke 495 Mil-

lionen Tonnen CO₂-Emissionen eingespart zwischen 2011 und 2019, wenn alles andere gleich geblieben wäre. Pro Jahr sind das 55 Millionen Tonnen CO₂ an zusätzlichen Emissionen. Das ist mehr als Schweden in einem Jahr ausstößt.

Abbildung 21: CO₂-Emissionen durch die Stilllegung der Kernkraftwerke nach 2011 pro Jahr und kumulativ.



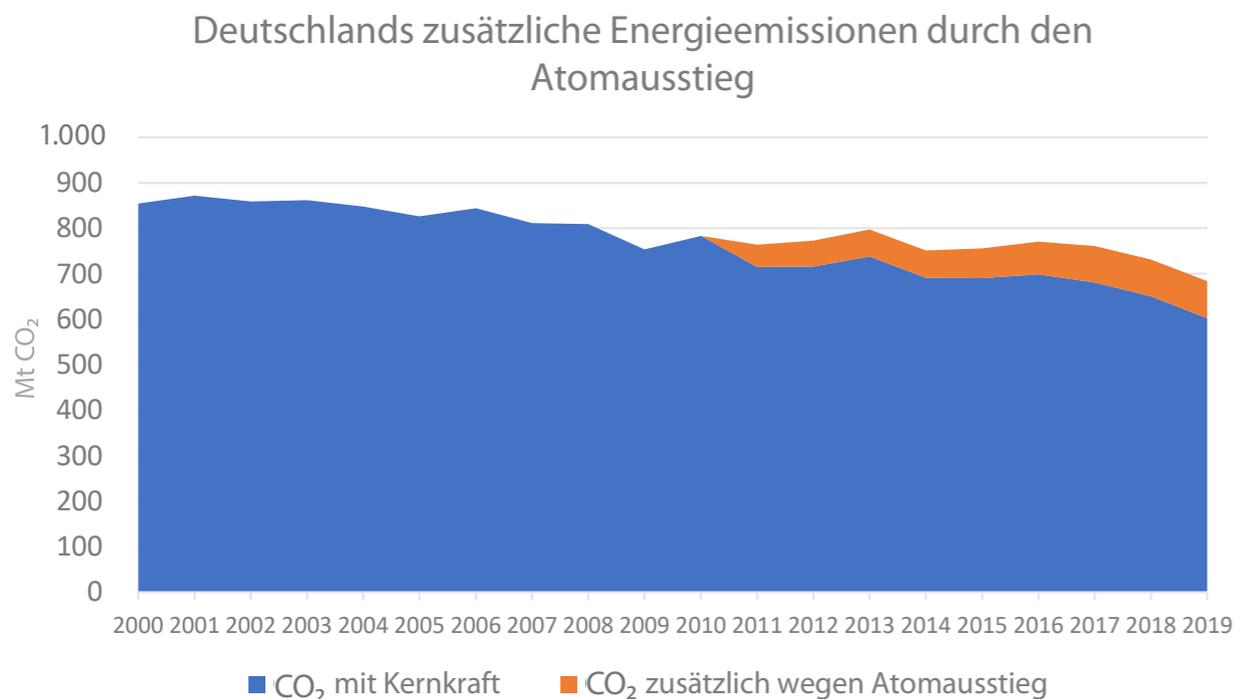
CLIMATE CHANGE

CO₂

Wie in Abbildung 22 zu sehen ist, wären die deutschen Energieemissionen heute schon um etwa 10 % niedriger, wenn Kohlekraftwerke statt Kernkraftwerken stillgelegt worden wären. Das ist nicht unbedeutend. Das entspricht sogar ungefähr der Spanne, um die die deutschen Emissionsreduktionsziele verfehlt werden. Deutschland opfert im wahrsten Sinne des Wortes den Klimaschutz, um die Kernenergie abzuschalten.

Menschenleben sind wichtig
 Durch das Vermeiden der schädlichen Feinstaub- und Stickstoff-Belastung der Kohlekraftwerke, hätten zwischen 2011 und 2019 rund 15.000 Menschenleben in Deutschland und den angrenzenden Ländern gerettet werden können. Tausende von Kindern wären in diesen Jahren nicht an Asthma erkrankt. Millionen von Arbeitstagen wären nicht durch Krankheit und niedrige Produk-

Abbildung 22: Zusätzliche CO₂-Emissionen durch die Stilllegung der Kernkraftwerke nach dem Unfall von Fukushima im Jahr 2011 verglichen mit den Gesamtemissionen.



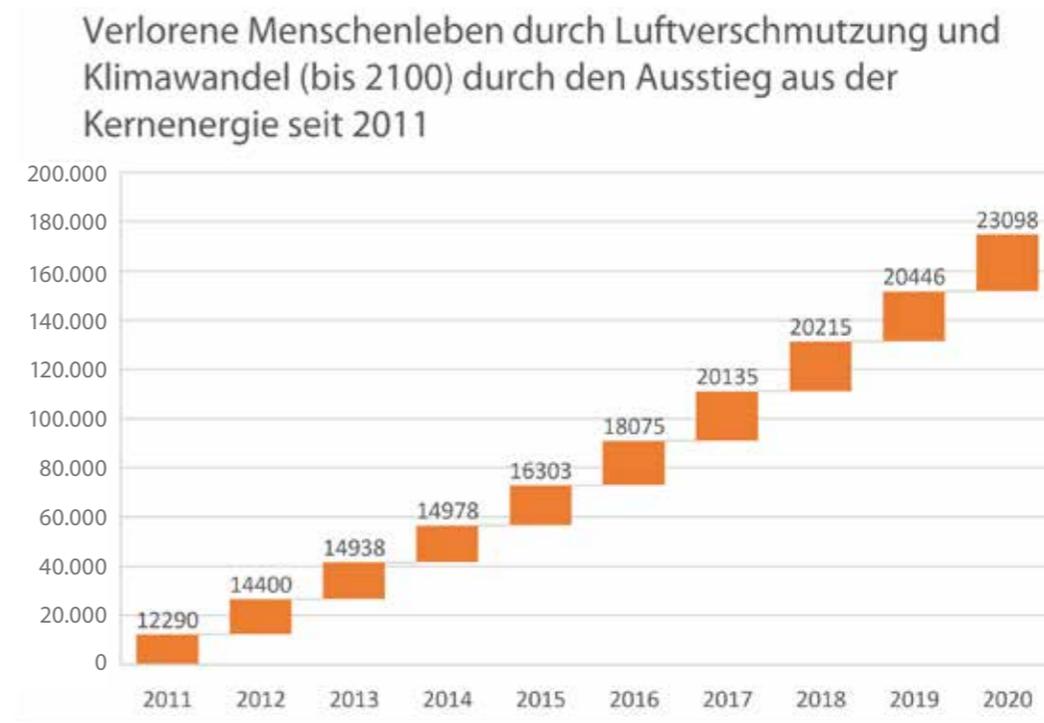
ktivität verloren gegangen. Da die Kernenergie eine unserer sichersten Energiequellen ist, wäre praktisch niemand wegen der Kernenergie vorzeitig gestorben (auch nicht langfristig).

Wie bereits erörtert, lässt sich außerdem die Mortalität durch CO₂-Emissionen infolge des Klimawandels berücksichtigen. In Summe hat der Ausstiegsbeschluss zwischen 2011 und 2020 bereits zum vorzeitigen Tod

von fast 180.000 Menschen geführt. Die Todesursachen sind vor allem die Luftverschmutzung und die Erderwärmung bis zum Jahr 2100. Und wie bereits erwähnt, sind dabei noch nicht alle gesundheitlichen Auswirkungen der globalen Erwärmung enthalten.

Die Vergangenheit ist vergangen und kann nicht mehr geändert werden. Aber dennoch lohnt es sich, die Folgen von historischen Entscheidungen zu analysieren. Nur so kön-

Abbildung 23: Vorzeitig verlorene Menschenleben durch die seit 2011 geschlossenen Kernkraftwerke, stattdessen mit dem Weiterbetrieb von Kohlekraftwerken.



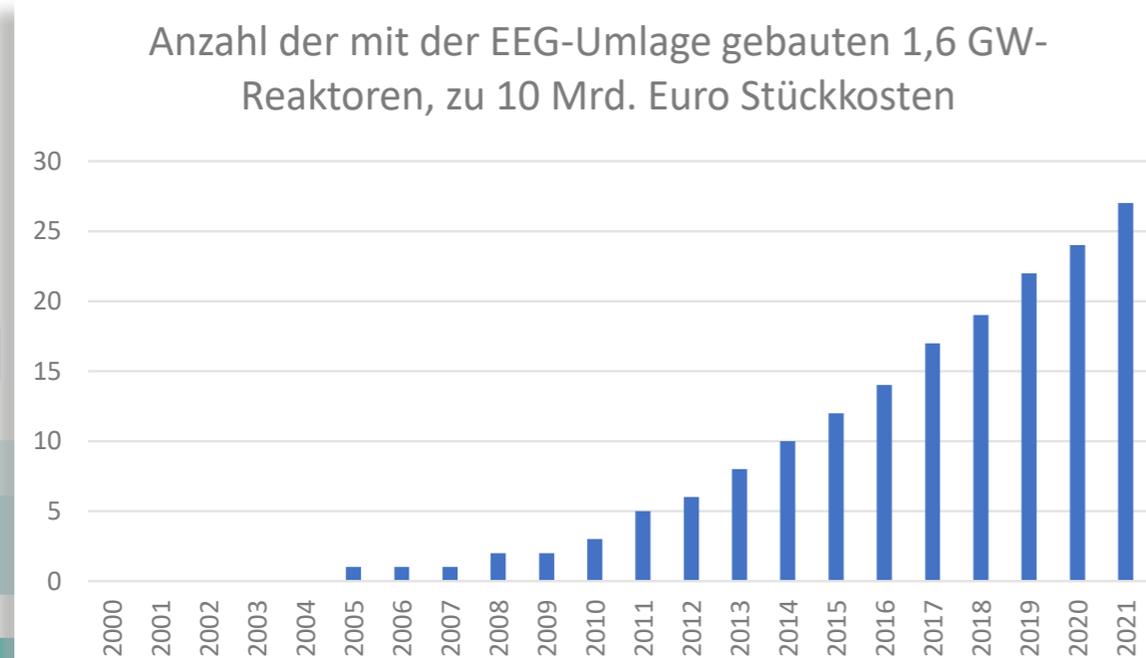
nen uns Entscheidungen besser gewahr werden, die wir in der Gegenwart treffen. Für den Klimaschutz sowie die Sicherheit und Gesundheit der Menschen war der Atomausstiegs in Deutschland eine katastrophale Entscheidung.

Opportunitätskosten - Mehr Kernkraftwerke bauen?

In unserem obigen Zeitmaschinen-Szenario haben wir die Folgen des politischen Atomausstiegs diskutiert, der in den letzten zehn

Jahren in Deutschland stattgefunden hat. Um das Konzept der Opportunitätskosten und seine Bedeutung zu verdeutlichen, stellen wir eine weitere "Was wäre wenn"-Frage. Deutschland gab und gibt infolge des Erneuerbare Energien Gesetz (EEG) jedes Jahr Milliarden von Euro aus, um die Einspeisetarife für die Erzeugung aus Windkraft, Solar und Biomasse zu bezahlen. Diese Einspeisevergütung ist wie ein garantierter Preis, den die Erzeuger für produzierte Strommengen bekommen, unabhängig davon, wie der Preis

Abbildung 24: Wieviele Kernkraftwerke hätten gebaut werden können, wenn man die EEG-Umlage für den Ausbau der Kernenergie verwendet hätte?



auf dem Markt ist. Im Wesentlichen kann dies genutzt werden, um Anreize für Investitionen in bestimmte Technologien zu schaffen, da der garantierte Preis Gewinne sichert und Markt- und Technologierisiken für den Investor übernimmt. Man kann diese sogenannte EEG-Umlage wohl als ein "stumpfes Instrument" bezeichnen, um einen Markt in eine bestimmte Richtung zu treiben. In Deutschland ging diese Richtung hin zu mehr erneuerbaren Energien und weg von der Kernenergie.

Als stumpfes Instrument hat die EEG-Umlage ihren Zweck erfüllt. Deutschland hat einen Anteil von 19 % an erneuerbaren Energien im Energiemix, und dieser Anteil wächst weiter. Aber die Einspeisevergütungen sind ziemlich teuer und fördern den technologischen Fortschritt nicht wirklich. Wenn es darum geht, öffentliche Gelder auszugeben, sollte man immer über Opportunitätskosten nachdenken. Was kann man mit der gleichen Geldsumme stattdessen machen?

Was wäre passiert, wenn die EEG-Umlage der letzten Jahrzehnte in den Ausbau der Kernkraft investiert worden wäre statt in den

Ausbau Erneuerbarer Energien? Dies ist ein Vergleich von Äpfeln mit Birnen, aber er kann trotzdem einen Standpunkt verdeutlichen.

In diesem speziellen Szenario gehen wir davon aus, dass Deutschland mit dem Bau von 1,6-GW-Reaktoren begonnen hätte, die jeweils 10 Mrd. € gekostet hätten. Der Einfachheit halber nehmen wir außerdem an, dass jedes Mal, wenn die kumulierte EEG-Umlage 10 Mrd. € erreicht, ein Reaktor ans Netz geht.⁴²

Im Jahr 2021 hätte Deutschland bereits 27 neue Reaktoren gebaut. Jedes Jahr würden zwei neue Reaktoren durch die 20+ Milliarden Euro jährlicher EEG-Umlage ans Netz gehen. Kernkraftwerke sind deutlich langlebiger als Wind- und Solaranlagen. Die heutigen Anlagen, die durch das EEG finanziert wurden, werden aufgrund der begrenzten Betriebsdauer bis 2050 größtenteils rückgebaut sein. Bereits heute ist Deutschland mit einer sich zuspitzenden Situation konfrontiert, in der neue Wind- und Solaranlagen erst einmal die steigende Zahl von stillgelegten Windturbinen und Solarpaneelen ersetzen müssen.

⁴² EEG-Umlage-Summen, siehe: <https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Downloads/eeg-in-zahlen.xls.html>

CLIMATE CHANGE

CO₂

Abbildung 25 zeigt die Menge an sauberer Stromproduktion, wenn man zu den neu gebauten Kernkraftwerken die bereits erwähnte existierende Reaktorflotte von 17 Reaktoren hinzu rechnet. Dies wird verglichen mit der tatsächlichen historischen Stromproduktion durch erneuerbare Energien.

Mit diesem Tempo hätte die Kernenergie bis 2025 Deutschlands gesamten Stromverbrauch von 600 TWh/Jahr decken können. Dies wäre eine wahre Heldentat für den Klimaschutz gewesen.

Aus Perspektive des Klimaschutzes und der menschlichen Gesundheit wäre die Kernenergie deutlich effektiver gewesen als die real existierende Energiewende. Das gilt sowohl für eine Laufzeitverlängerung der bestehenden Kernkraftwerke als auch für den Neubau von modernen Reaktoren. Die Frage ist nun, ob Deutschland dies anerkennt und etwas daran ändert, oder ob es trotz der steigenden Kosten weitermacht.

Abbildung 25: Erzeugte Menge an Atomstrom, falls mit der EEG-Umlage Kernkraftwerke gebaut worden wären.

Spekulatives Kernkraftprogramm und historische erneuerbare Erzeugung

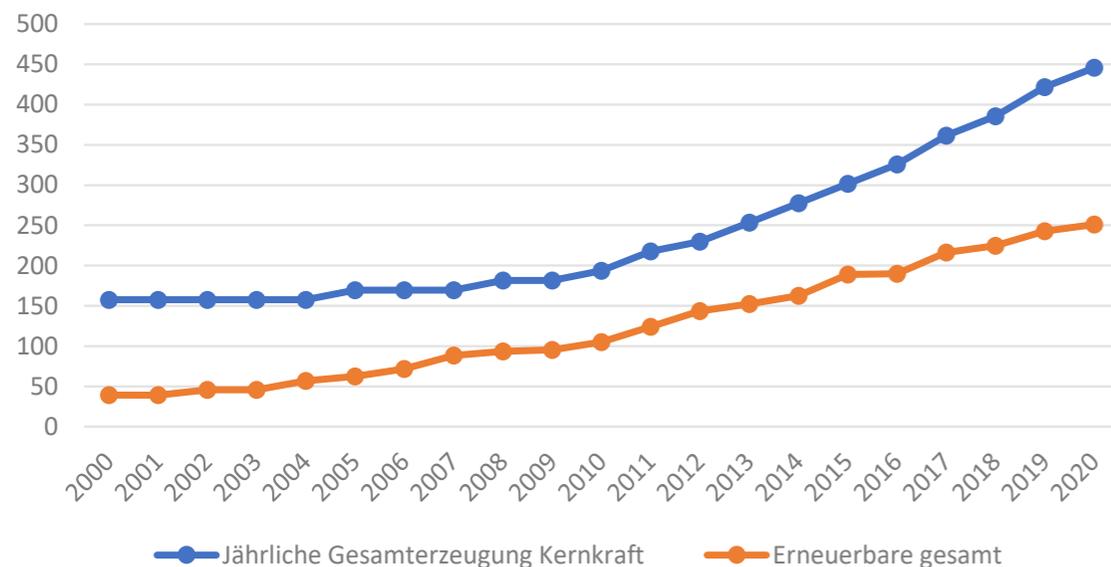
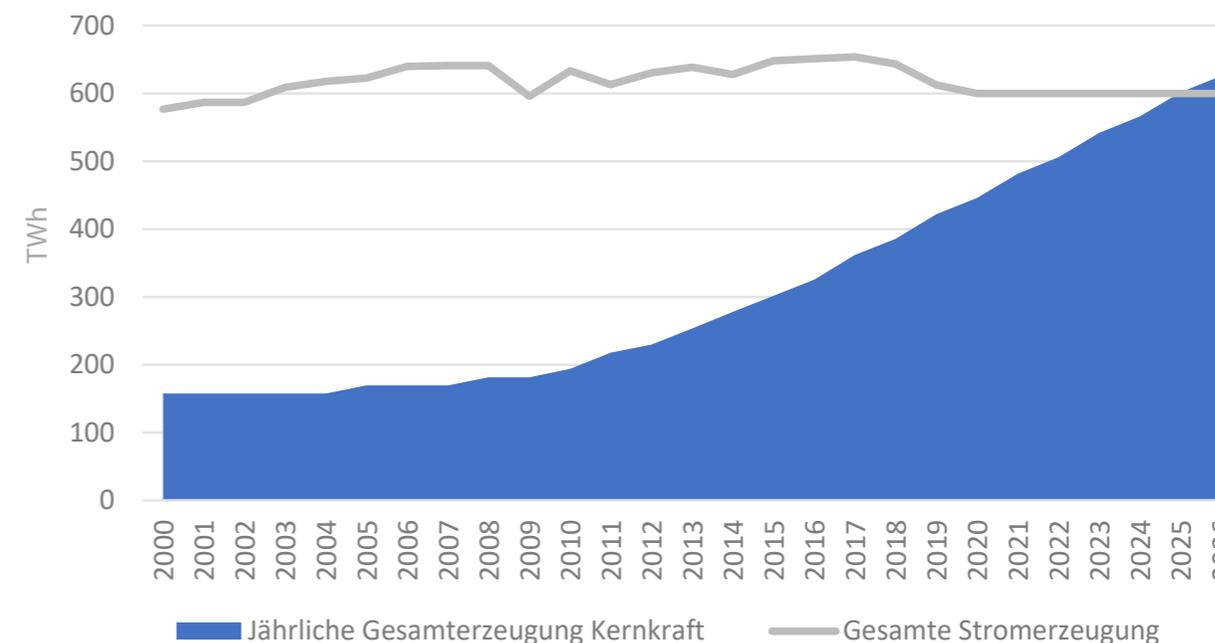


Abbildung 26: Ein Neubauprogramm von Kernkraftwerken im Rahmen der Energiewende hätte Deutschlands Stromsektor bis 2025 dekarbonisiert.

Spekulatives Kernkraftprogramm und deutsche Stromerzeugung



Die Vergangenheit ist vergangen und kann nicht mehr geändert werden. Die Analyse der Folgen von historischen Entscheidungen kann uns aber helfen heute Entscheidungen zu treffen.

CLIMATE CHANGE

CO₂



Rauli Partanen

Rauli Partanen ist ein unabhängiger, preisgekrönter Wissenschaftsautor und -kommunikator, der mit seiner Frau und seinen drei Kindern in Finnland lebt. Er begann vor über zehn Jahren, sich mit Energie und Umwelt zu beschäftigen. Er schrieb zunächst darüber in seinem Blog, dann in Büchern, Artikeln und Studien.

Sein erstes Buch "**Finland After Oil**" (2013) kam in die engere Auswahl für die beiden größten Sachbuchpreise in Finnland und wird seitdem auf Englisch bei Routledge verlegt (**World After Cheap oil**, 2014). Es wurde auch ins Deutsche übersetzt unter dem Namen "Die Welt nach dem billigen Öl". Im Jahr 2015 veröffentlichten er und sein Co-Autor Janne M. Korhonen "**Climate Gamble - Is Anti-Nuclear Activism Endangering Our Future**", das inzwischen in 7 Sprachen erschienen ist. Rauli und Janne M. Korhonen verfassten auch "**Musta Hevonen - Ydinvoima ja Ilmastonmuutos**", das 2016 veröffentlicht wurde und 2020 auf Englisch als "**The Dark Horse - Nuclear Power and Climate Change**" erschien. 2017 schrieben Rauli und Aki Suokko "**Energian Aika - Avain talouskasvuun, hyvinvointiin ja ilmastonmuutokseen**" oder "**The Age of Energy**", das in Finnland als Wissenschaftsbuch des Jahres ausgezeichnet wurde und bald auch auf Englisch erscheinen wird.

Rauli hat zahlreiche Studien und Berichte zu den Themen Energie und Klima verfasst, sowie Dutzende von Artikeln in zahlreichen nationalen und internationalen Publikationen. Er tritt häufig als Redner bei Klima- und Energieseminaren und -konferenzen auf. Als einer der Mitbegründer der Ecomodernist Society of Finland hat er selbst einige internationale Seminare organisiert. Im Jahr 2018 hat er Think Atom mitbegründet (thinkatom.net), ein unabhängiges und gemeinnütziges Forschungsinstitut, dessen Leiter er seither ist.

Olli Soppela

Olli Soppela hat einen Bachelor in Umwelttechnik und einen Master in Elektrotechnik. Er konzentriert sich auf die Untersuchung und Erforschung fortschrittlicher Energiesysteme. Olli hat gerade seine Masterarbeit an der Aalto-Universität zum Thema "Möglichkeiten der Wasserkraft zum Ausgleich der nordischen Strommärkte" abgeschlossen, in der die Systemauswirkungen einer zunehmenden Erzeugung durch volatile Erneuerbare und damit einhergehender Nachfrage nach Wasserkraft modelliert wurden.

Sein beruflicher Hintergrund umfasst internationale Projekte zur Ressourceneffizienz und das Baumanagement von Infrastrukturprojekten, wobei sich sein Interesse mehr und mehr auf die Förderung der Nutzung nuklearer Erzeugungstechnologien richtet.



Eine Milliarde Tonnen

CO₂ -Ausstoß senken und Deutschlands Kohleausstieg beschleunigen

Deutschland kann sage und schreibe 60 Millionen Tonnen CO₂-Emissionen pro Jahr vermeiden. Und wie? Indem man Steinkohle- und Braunkohlekraftwerke stilllegt, statt der verbleibenden 6 Kernkraftwerke.

Trotz aller Ambitionen und Versprechen verfehlt Deutschland seine eigenen Klimaziele. Das ist kein Wunder, denn das Land hat seine CO₂-neutralen Kernkraftwerke stillgelegt. Die letzten davon sollen im Jahr 2022 endgültig abgeschaltet werden. Die verbleibenden sechs Reaktoren könnten jedoch noch 20 Jahre oder länger betrieben werden - bis weit in die 2040er Jahre hinein. Dies würde bis zu einer **Milliarde Tonnen CO₂**-Emissionen vermeiden. In diesem Bericht werden die Daten und Gründe für die Senkung der CO₂-Emissionen durch Kernenergie dargelegt.

“Wir brauchen in den nächsten zehn Jahren und darüber hinaus sowohl erneuerbare Energien als auch Kernenergie, um unsere Klimaziele zu erreichen. Aber unser erstes und wichtigstes Anliegen ist die dringende Rettung der verbleibenden sechs deutschen Kernkraftwerke vor der Abschaltung.

Der vorliegende Bericht geht auf die Folgen ein. Er liefert viele überzeugende Argumente für den Weiterbetrieb der sechs Reaktoren und die Beendigung der Kohleförderung. Darüber hinaus stellen wir weitere Szenarien vor, die unter Einbeziehung der Kernenergienutzung denkbar wären.”

aus dem Vorwort von Dr. Anna Veronika Wendland, Nukleartechnik-Historikerin,
Dr. Rainer Moormann, Experte für Reaktorsicherheit
Autoren des Memorandums "Warum wir die deutschen Kernkraftwerke jetzt noch
brauchen" (2020)

ISBN 978-952-94-5189-0
ISBN 978-952-94-5190-6 (PDF)