



STROMERZEUGUNG

Orientierungsrahmen für Unternehmensdialoge



Inhalt

PATHWAYS TO PARIS	3
VORWORT: GEMEINSAM FÜR DEN KLIMASCHUTZ	4
DIE AUSGANGSLAGE IM STROMERZEUGUNGSSEKTOR	6
DIE AUSGANGSLAGE IM STROMERZEUGUNGSSEKTOR	8
SCHRITTE DER TRANSFORMATION IN DER STROMPRODUKTION	10
Erdgaskraftwerke: Reduktionen bis zum Phase-out	11
Auf- und Ausbau von Windkraft	12
Auf- und Ausbau von Photovoltaik (PV)	13
Einsatz von (grünem) Wasserstoff	14
Einsatz von Biogas	15
Wasserkraft	15
Ausbau der Speicherkapazität und Flexibilitätsoptionen	16
CO ₂ -Abscheidung und Speicherungstechnologien	17
Kohlekraftwerke: verstärkte Nutzung von Biomasse bis zum Phase-out	18
AUSBLICK UND IMPULSE FÜR DEN DIALOG	19
LITERATURVERZEICHNIS	20

Pathways to Paris

Das Projekt hat zum Ziel, die Transformation der deutschen Wirtschaft hin zur Klimaneutralität in Deutschland zu unterstützen und zu beschleunigen. Dafür wurden verschiedene Werkzeuge erarbeitet, die helfen, die notwendigen Veränderungsbedarfe für die Paris-kompatible¹ Emissionsreduktion in verschiedenen Sektoren und Subsektoren zu verstehen und strategisch umzusetzen. Auf dieser Basis können Unternehmen und Finanzmarktakteure gemeinsam Transformationsstrategien und -maßnahmen diskutieren, Investitionsbedarfe identifizieren und Finanzierungslösungen erarbeiten. Zudem wird es den Finanzmarktakteuren ermöglicht, transformationsbasierte Risiken und Chancen der einzelnen Sektoren besser zu verstehen und in ihren Risikosystemen zu berücksichtigen.

Diese drei Instrumente sind:

- 1** Mit dem webbasierten [Transformationstool](#) können Unternehmen aus den abgedeckten zehn Sektoren in drei Schritten ihre eigenen Pläne zur Emissionsreduktion konkretisieren.
- 2** Eine [Bewertungsmatrix](#) bestehend aus sektorübergreifenden und sektorspezifischen Indikatoren, hilft Finanzinstituten, diese Konkretisierungen und ihre Fortschritte zu bewerten.
- 3** Ergänzende [sektorspezifische Orientierungsrahmen](#) erläutern die zentralen Maßnahmen, die Unternehmen auf dem Weg zur Treibhausgasneutralität umsetzen müssen, und liefern den Finanzmarktakteuren eine fundierte Basis für lösungsorientierte Dialoge mit den Unternehmen.



Bei der **Betrachtung des Sektors Stromerzeugung** wurde im Rahmen des Projektes auf die THG-Emissionen, die durch die Erzeugung des Stroms entstehen, abgestellt. Indirekte Emissionen oder vorgelagerte Elemente in der Kette wurden nicht primär analysiert.

¹ Paris-kompatible Emissionsreduktionspfade sind Treibhausgasreduktionspläne für Unternehmen, die im Einklang mit den Pariser Klimazielen stehen. Sie sind also an einem Ambitionsniveau ausgerichtet, das die Begrenzung des Anstiegs der globalen Durchschnittstemperatur auf deutlich unter 2 °C, wenn möglich auf 1,5 °C relativ zum vorindustriellen Niveau ermöglicht. Wichtig ist zu beachten, dass das Pariser Klimaabkommen neben den Temperaturlimits noch weitere Ziele festlegt: Die Anpassungsfähigkeit an die globale Erwärmung soll erhöht und die globalen Finanzströme sollen so gelenkt werden, dass sie mit den Zielen des Abkommens vereinbar sind. Da der Fokus dieses Leitfadens auf der Treibhausgasreduktion liegt, wird hier Paris-Kompatibilität im Sinne von „im Einklang mit dem Temperaturlimit des Pariser Abkommens“ verwendet.

Vorwort: Gemeinsam für den Klimaschutz



Vanessa Bolmer, Senior Policy Advisor, Sustainable Finance, WWF Deutschland

Beim Klimaschutz geht es längst nicht mehr um das Ob, sondern um das Wie. Viele Unternehmen, ob klein, mittel oder groß, haben bereits Transformationsmaßnahmen eingeleitet. Sie setzen sich mit ihren Prozessen und Geschäftsmodellen auseinander, testen den Einsatz nachwachsender Rohstoffe oder setzen sich für den Aufbau entscheidender Infrastruktur ein. Altbekanntes kritisch zu hinterfragen, birgt Chancen für das Klima. Um die Wettbewerbs- und Zukunftsfähigkeit der deutschen Wirtschaft zu sichern, müssen diese Prozesse beschleunigt und tatsächlich umgesetzt werden. Dafür braucht es eine mutige, zukunftsorientierte Politik, die sich ohne weitere Umschweife für den Klimaschutz und die notwendige Transformation entscheidet und einen verlässlichen Rahmen für die Wirtschaftsakteure setzt. Und es braucht natürlich entsprechendes Kapital.



Dr. Nicole Röttmer, Global Lead Climate Clients & Industries, PWC Deutschland

Die Liquidität ist vorhanden. Doch wie finden die nach zukunftsfähigen Investitionen suchenden Gelder des privaten Finanzsystems den Weg zu gesellschaftlich sinnvollen und zukunftsweisenden Projekten? Eine zentrale Voraussetzung ist, dass entsprechende Investitionen ein wettbewerbsfähiges Risiko-Rendite-Profil haben müssen – auch und gerade im Vergleich zu nicht nachhaltigen, z. B. fossil-basierten Alternativen. Drei Lösungsfelder zeichnen sich ab, die Kapitalgeber:innen auf der Anlage- wie Kreditseite unterstützen, ihre beschleunigende Wirkung auf die Transformation zu entfalten:

Erstens, neben einem regulatorischen Rahmen, der strukturelle Barrieren beseitigt und transformationspositive Investitionen fördert, müssen zweitens, Kenntnisse über die Herausforderungen in den einzelnen Industrien und systematisches, zielorientiertes Engagement in den Fokus rücken. Drittens müssen die klassischen finanzwirtschaftlichen Kennzahlen ergänzt werden um zukunftsgerichtete sektorübergreifende und sektorspezifische Indikatoren, wenn z. B. das Risiko von Stranded Assets, Wertminderung der Vermögensgegenstände oder Kreditausfälle durch Transformationsprozesse erfasst und minimiert werden soll.

Doch noch steckt eine Bewertungspraxis unter Einbeziehung von Dekarbonisierungsszenarien und passgenauen Transformationsbedarfen in den Kinderschuhen. Der Fortschritt unternehmerischer Transformation ist erst über intelligente Indikatoren bewertbar, die nicht nur den Status quo, sondern zusätzlich Elemente wie Klimaziele sowie bewertete Transformations- und Investitionspläne beinhalten.

Ebenfalls einfließen müssen die individuelle strukturelle Aufstellung von Unternehmen sowie die konkrete Einschätzung technischer Maßnahmen des jeweiligen Sektors. Zukünftig wird es über den reinen THG-Fußabdruck des eigenen Portfolios weit hinausgehen müssen, um einen relevanten Beitrag zu einer realen Reduktion der Treibhausgase in der Wirtschaft zu leisten. Dies wird von regulatorischen Entwicklungen national wie international begünstigt. Von Unternehmen wird u. a. eine umfassende Offenlegung von Nachhaltigkeitsdaten verlangt (Europäische Kommission, 2021). Gleichzeitig werden Finanzakteure verpflichtet, Auskünfte über die Transitionsrisiken und Nachhaltigkeitsauswirkungen ihrer Investments zu geben (ARUG II, 2019; Richtlinie 2014/65/EU; Verordnung (EU) 2019/2088; Verordnung (EU) 2020/852; GFANZ, 2022).

Im Rahmen von [Pathways to Paris](#) entwickelten WWF Deutschland und PwC Deutschland im Sparring mit 90 Vertreter:innen der Industrie und Finanzwirtschaft drei Instrumente, die beide Akteursgruppen dabei unterstützen sollen, den Wandel zur treibhausgasarmen Wirtschaft im Rahmen ihrer Anlage- und Finanzierungsentscheidungen aktiv zu begleiten. Sie sollen als Grundlage für Dialoge dienen, so dass einschätzbar wird, ob Unternehmen auf den strukturellen Wandel zur Klimaneutralität der Wirtschaft vorbereitet sind. Gefördert wurde das Projekt vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK).

Der Überfall Russlands auf die Ukraine und die gesamtwirtschaftlichen Effekte, wie Inflationsverschiebungen, Preisentwicklungen, Rohstoffzugänge, sowie die bereits sicht- und spürbaren Klimawandelauswirkungen, wie Hitzewellen und Dürren, konnten als kurzfristige Sondereffekte nicht explizit berücksichtigt werden. Nach unserer Einschätzung wirken diese Faktoren verstärkend. Effizienterer Energieverbrauch, Reduktion CO₂-intensiver Energieträger, reduzierte Gasnutzung, Elektrifizierung, Dekarbonisierung von Industrieprozessen – all diese Maßnahmen stünden auch ohne russischen Angriffskrieg auf der Tagesordnung. Gerade die Gasknappheit und die aktuellen Sparmaßnahmen zeigen, welche Reduktionspotenziale bislang ungenutzt geblieben sind.



Wir hoffen, dass der vorliegende Orientierungsrahmen² Ihnen hilft, die Anforderungen an die Transformation im sektorspezifischen Kontext nachzuvollziehen und so in einen systematischen und zielorientierten Dialog mit Unternehmen treten zu können. Wir freuen uns auf Ihr Feedback und Ihre Erfahrungsberichte!

2 Sofern nicht anders angegeben, beruhen sämtliche Angaben, Annahmen, Entwicklungen oder Ableitungen in diesem Dokument auf dem von Agora Energiewende beauftragten [Dekarbonisierungsszenario KN 2045](#) (Prognos, 2021). Da es sich hierbei um eines der ambitioniertesten Szenarien für Deutschland handelt, mit einer umfassenden Sektorabdeckung und Dokumentation, wurde es für die Arbeit von Pathways to Paris als Referenz für Paris-kompatible Entwicklungen in Deutschland ausgewählt. Alle Annahmen, die dem Projekt „Pathways to Paris“ zugrunde liegen, können online abgerufen werden. https://pathwaystoparis.com/wp-content/uploads/2022/05/PtP_Annahmen_Entwicklung_Brennstoffkosten.pdf

Die Ausgangslage im Stromerzeugungssektor

Eine verlässliche Energieversorgung ist eine zentrale Grundlage für den Wirtschaftsstandort Deutschland. Um ihre Klimaziele erreichen zu können, setzen viele Sektoren auf die Elektrifizierung ihrer Prozesse auf Basis emissionsarmen Stroms. Spätestens ab 2030 modellieren Dekarbonisierungsszenarien einen entsprechend steilen Anstieg des Strombedarfs. Aktuell ist die Nutzung fossiler Energieträger, insbesondere Stein- und Braunkohle, für seine Erzeugung eine der wesentlichen Ursachen des Klimawandels sowie weiterer gravierender Umwelt- und Gesundheitsprobleme. Die Reaktivierung von Kohlekraftwerken aus dem Reservebetrieb mag auf kurze Sicht notwendig erscheinen. Dies darf nicht zur Dauerlösung werden. Vielmehr muss dem vermehrten Ausstoß an THG-Emissionen schnell entgegen gewirkt werden.



Reduktionseffekte sind im Stromsektor seit 1990 klar vorhanden. Sondereffekte wie die COVID-19-Pandemie führten kurzfristig zu außerordentlichen Emissionsreduktionen – jedoch ist die strukturelle Dynamik nicht ausreichend für die erforderlichen Zielniveaus. 2021 stiegen die Emissionen im Energiesektor sogar wieder an (BMWK, 2022a). Die Bundesregierung hat es schlichtweg in den vergangenen Jahren verpasst, einen zweckgerichteten Umbau des Sektors in die Wege zu leiten.

Die Zielsetzungen sehen THG-Minderungsziele bis 2030 in der Energiewirtschaft um -77 % (im Vergleich zum Jahr 1990) vor (Umweltbundesamt, 2022a). Um die Aufgabe, bis 2045 treibhausgasneutral zu werden, bundesweit bewältigen zu können, muss der Stromerzeugungssektor seinen Teil deutlich früher erledigen. Dazu gehört, dass der gesetzlich formulierte Kohleausstieg bis 2038 trotz der Energiekrise, die im Rahmen des Ukraine-Russland-Konfliktes entstand, deutlich vorgezogen werden muss (BUND, n.d.; Höland, 2022).

Bereits 2030 sollen mindestens 80 % des Bruttostromverbrauchs aus erneuerbaren Energien (EE) stammen. Ihr Anteil lag kumuliert für das Jahr 2021 bei gerade einmal rund 41 % (BMWK, 2022b). Er muss daher innerhalb von weniger als einem Jahrzehnt nahezu verdoppelt werden (Bundesregierung, 2022). Zu beachten ist hierbei, dass auch der Bruttostromverbrauch insgesamt steigt, von derzeit etwa 565 Terawattstunden (TWh) auf mindestens 750 TWh, da mehr Anwendungen elektrifiziert werden – beispielsweise im Verkehrs- und Gebäudesektor (Umweltbundesamt, 2022b).

Die vor langer Zeit identifizierten Trends haben auch heute noch Gültigkeit (WWF Deutschland, 2022a). Ab 2030 sind die Schlüsselmaßnahmen für eine erfolgreiche Transformation in der Industrie und der Energiewirtschaft vor allem:

- 1 die Steigerung der Energieeffizienz und die Senkung des Energiebedarfs im Allgemeinen,
- 2 der Ausbau der erneuerbaren Stromerzeugung und die Elektrifizierung anderer Sektoren,
- 3 die Nutzung von (grünem) Wasserstoff als Energieträger und Rohstoff.

Der Energiewirtschaft kommt damit eine tragende Rolle zu, im Rahmen der Transformation die THG-Emissionen deutlich zu senken und die Basis für einen zukunftsfähigen Wirtschaftsstandort zu bilden. **Abbildung 1** verdeutlicht den Anspruch an den Sektor im Vergleich mit weiteren Industriezweigen.

Laut dem Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft (BDEW) entsteht für die Umsetzung der notwendigen Maßnahmen im Stromsektor ein **Investitionsbedarf** in Höhe von 320 Mrd. Euro. Finanziert werden müssen u. a. der Umbau der Stromerzeugung, der Ausbau der Energienetze, der Aufbau öffentlicher Ladeinfrastruktur sowie der Hochlauf der Wasserstoffwirtschaft (BDEW, 2020).

Begleitet werden muss dieser Prozess durch die Schaffung politischer Rahmenbedingungen, die den notwendigen Auf- und Ausbau unterstützen sowie durch eine Sensibilisierung der Gesellschaft und Akzeptanz am Markt für energieeffizientes Verhalten.

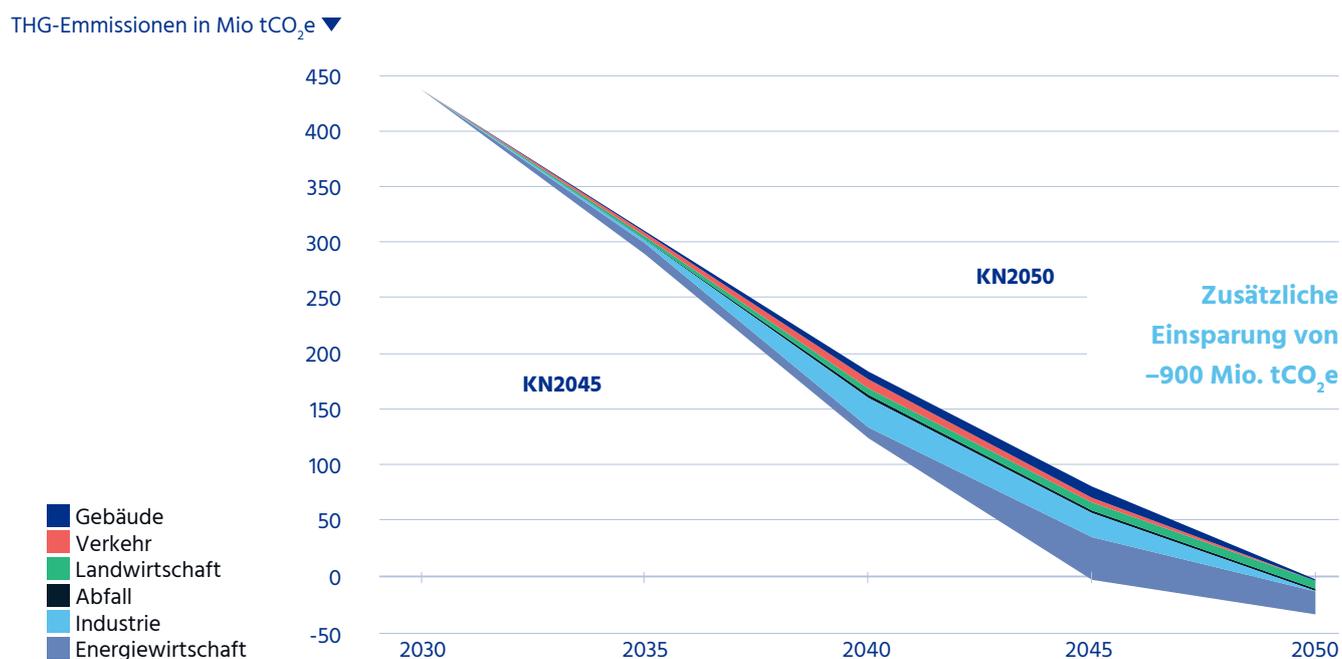


Abbildung 1: Kumulierte Einsparung THG-Emissionen nach Sektoren in Mio. tCO₂e

Die Ausgangslage im Stromerzeugungssektor

Das Dekarbonisierungsszenario³ „Klimaneutralität in Deutschland 2045“, erstellt für Agora Energiewende (im Folgenden KN 2045), modelliert für den Stromerzeugungssektor absolute Reduktionen von -113 % der THG-Emissionen (in MtCO₂e) bis 2045 im Vergleich zu 2018. Die Emissionsintensität in kgCO₂e/kWh liegt bis 2045 bei -104 %. Auch hier gilt: Die Geschwindigkeit der Emissionsreduktionen muss deutlich zunehmen, entsprechend rasant muss der Ausbau regenerativer Energien erfolgen.

Bis 2025 geht die Stromproduktion im Szenario zurück. Zurückzuführen ist dies auf gesteigerte Effizienzen in industriellen Prozessen und dem Gebäudesektor, der durch Effizienzverbesserungen bei Elektrogeräten, Beleuchtung und Ersatz von Nachtspeicherheizungen und Elektroboilern mehr einspart, als die neu installierten Wärmepumpen verbrauchen. Aktuelle Gründe, wie der stark gestiegene Preis, sind im Referenzszenario noch nicht berücksichtigt. Durch die voranschreitende Elektrifizierung, die ab 2030 deutlich an Tempo gewinnt, folgt ein massiver Produktionsanstieg, um mehr als 50 % (**siehe Abbildung 2 und 3**).

▼ THG-Emissionen (MtCO₂e)

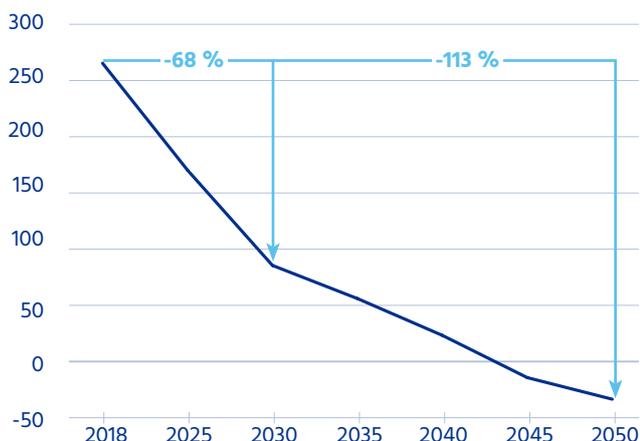


Abbildung 2: Reduktion der THG-Emissionen nach KN 2045

▼ Aktivität (TWh)



Abbildung 3: Anstieg der Aktivität nach KN 2045

Trotz aller Bemühungen wird es 2045 Residualemissionen geben, vor allem im Landwirtschaftssektor und prozessbedingt in der Industrie. Um Klimaneutralität im deutschen Binnenland zu erreichen, müssen diese Restemissionen durch negative Emissionen⁴ ausgeglichen werden.

³ Die Ergebnisse der Klimaszenarien und die ihnen zugrundeliegenden Annahmen bilden eine wichtige Grundlage für die Ableitung von Maßnahmenplänen mit Blick auf die Kalibrierung zwischen Kosten, Nutzen und Wirksamkeit in Bezug auf die Emissionsreduzierung. Wichtige Stellschrauben in der Umsetzungsplanung von Dekarbonisierungsstrategien hängen von einer Reihe makroökonomischer und energiespezifischer Annahmen ab. Preisentwicklungen spielen zur Abwägung und Beurteilung von Dekarbonisierungsmaßnahmen eine wichtige Rolle.

⁴ Negative Emissionen ist ein vom Weltklimarat geprägter Begriff, der Aktivitäten beschreibt, die THG-Emissionen aus der Atmosphäre binden. Dies sind zum Beispiel Aufforstung, Humusaufbau und die technische Fixierung und Speicherung von Kohlenstoff. Da fraglich ist, ob umfangreiche globale Negative Emissionen erreicht werden können (Anderson und Peters, 2016), sind Szenarien, die sie in einem geringeren Ausmaß veranschlagen, als belastbarer anzusehen (Fuss et al., 2014)

Ab Ende der 2040er Jahre leistet die Energieerzeugung vor allem über den Einsatz von Direct Air Carbon Capture und Storage (DACCS) und durch die Abscheidung und Speicherung von Emissionen aus den Abgasen der Biomassefernhelzwerke und Heizkraftwerke (BECCS) Negativemissionen.⁵

Zum Vergleich:

Laut dem 1,5 °C-Szenario der Internationalen Energieagentur (IEA) müssen die globalen Emissionen im Stromerzeugungssektor auf Basis der Daten aus dem Jahr 2020 mindestens um ca. -101 % bis zur Mitte des Jahrhunderts sinken. Auch die IEA legt u. a. einen deutlich beschleunigten Ausbau der regenerativen Energien zu Grunde, verspricht sich für den Stromsektor jedoch einen ambitionierteren Pfad als KN 2045. In der sektorübergreifenden Betrachtung haben beide Szenarien dennoch ein vergleichbares Ambitionsniveau und erreichen beide einen Paris-kompatiblen Temperaturpfad.⁷

KN 2045 setzt maßgeblich auf zwei Erzeugungstechnologien, Windkraft – On- wie Offshore – und Photovoltaikanlagen (PV-Anlagen). Bis 2045 verdreifacht sich die Kapazität insbesondere durch den Zuwachs von PV-Anlagen. Zudem wird von einem hohen Importvolumen THG-armer und -freier Energieträger und von hohen inländischen (grünen) Wasserstoffproduktionen ausgegangen.

Fossile Energieträger (Braunkohle, Steinkohle, Erdgas und Öl) werden ab 2030 vollständig zurückgefahren. Erreicht wird dies durch gesetzliche Vorgaben sowie durch einen deutlichen Anstieg des CO₂-Preises auf einen realistischen Wert.⁶

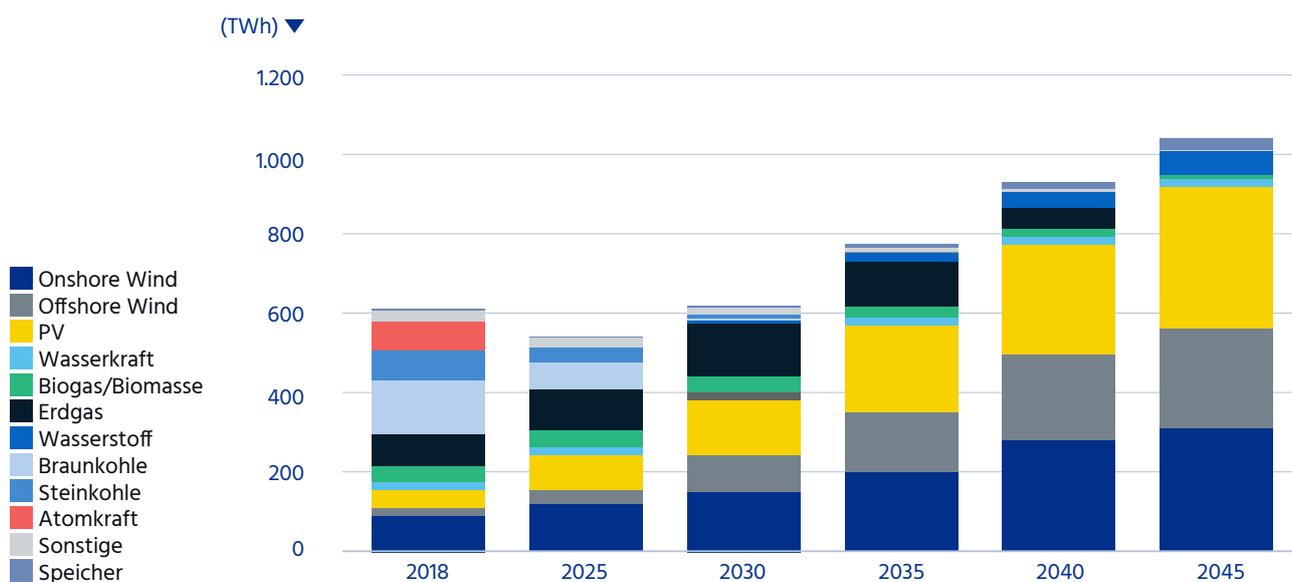


Abbildung 4: Nettostromerzeugung nach KN 2045

- KN 2045 ordnet ca. 21 von insgesamt 65 Mio. tCO₂e der Energiewirtschaft zu. Der Großteil davon bezieht sich auf DACCS, ein kleiner Teil auf BECCS zur Erreichung von Negativemissionen. Wichtig ist, dass nicht davon ausgegangen wird, mit den Anlagen die Lebenszeit von fossilen Kraftwerken zu verlängern, sondern die Verfahren im Rahmen der Müllverbrennung einzusetzen.
- Der interne Schattenpreis eines Unternehmens und dessen Dynamik sollten sich an den vom Umweltbundesamt (UBA) kalkulierten Preis von Klimakosten orientieren. Das UBA empfiehlt für im Jahr 2021 emittierte THG einen Kostensatz von 201 Euro₂₀₂₁ pro Tonne Kohlendioxid (tCO₂) zu verwenden (1 % Zeitpräferenzrate). Bei einer Gleichgewichtung klimawandelverursachter Wohlfahrtseinbußen heutiger und zukünftiger Generationen (0 % Zeitpräferenzrate) ergibt sich ein Kostensatz von 698 Euro₂₀₂₁/tCO₂. (Dabei bezeichnet Euro₂₀₂₁ jeweils die Kaufkraft des Euro im Jahr 2021). Die Kosten infolge der Emission anderer THG können mithilfe des Treibhausgaspotenzials (Global Warming Potential) analog ermittelt werden: Für Lachgas (N₂O) gilt demnach der 265-fache Satz der CO₂-Kosten und für Methan (CH₄) der 28-fache Satz.
- Den Sektorpfaden des Referenzszenarios entsprechend stehen die Pfade im Transformationstool insgesamt im Einklang mit dem Ambitionsniveau einer Erderwärmung von deutlich unter 2 °C. Die Differenz gegenüber dem 1,5-Grad-kompatiblen Net-Zero-Szenario der IEA kommt durch das geringere Ambitionsniveau der Dekarbonisierung des Stromsektors zustande. Für die anderen Sektoren sind die angenommenen Raten zur Reduktion der THG-Emissionen mindestens genauso ambitioniert, für den Zement- und Straßengüterverkehrssektor allerdings erst nach 2030. Die Sektorpfade des Transformationstools entsprechen, analog zu dem von Agora Energiewende beauftragten Dekarbonisierungsszenario KN 2045, weitgehend dem Ambitionsniveau des 1,5-Grad-Szenarios der IEA und damit zugleich dem der SBTi.

Schritte der Transformation in der Stromproduktion

Der globale Ausstieg aus Kohle, Öl und Erdgas bleibt unausweichlich, auch wenn die Schlusserklärung der 26. Weltklimakonferenz in Glasgow lediglich eine Verminderung des Kohleeinsatzes fordert oder aktuelle Ereignisse auf kurze Sicht den weiteren Einsatz von Kohle und Gas im Besonderen attraktiv erscheinen lassen. Um das Ziel der Versorgungssicherheit zu gewährleisten und die Klimaziele weltweit zu erreichen, ist eine deutlich höhere installierte Leistung erneuerbarer Energien erforderlich. Eine erfolgreiche Transformation des Stromerzeugungssektors stellt Anforderungen insbesondere an drei Handlungsfelder⁸:

- » Reduktion und Ausschluss der Nutzung fossiler Energieträger,
- » Ausbau erneuerbarer Energien,
- » Ausbau von Speicherkapazitäten und Flexibilitätsoptionen.



Die zentrale Herausforderung ist der zeitgerechte Ausstieg aus fossilen Energien und der erforderliche Ausbau erneuerbarer Energien. Der konsequente Umstieg unter Wahrung der Versorgungssicherheit erfordert eine entsprechende Kapazitätsentwicklung auch im Übertragungs- und Verteilnetz. Die dezentrale Organisation erneuerbarer Energien, sowie großer Erzeugungskapazitäten im Offshore-Bereich führen zu einer deutlich veränderten örtlichen Erzeugungsstruktur, verglichen mit den fossilen und atomaren Großkraftwerken des bisherigen Systems. Der Transport des Stroms von den Erzeugungs- zu den Industrie- und Verbrauchsstandorten sowie die zukünftig viel höhere Ein- und Ausspeisedynamik stellen neue Anforderungen an die Kapazitäten des Stromnetzes (Bundesnetzagentur, n.d.).

Im Folgenden werden die zentralen Maßnahmen, die Unternehmen im Stromerzeugungssektor auf dem Weg zu Treibhausgasneutralität umsetzen müssen, erläutert und eingeordnet.

⁸ Die im Projekt Pathways to Paris identifizierten Maßnahmen wurden in sektorspezifischen Arbeitsgruppen mit Akteuren aus der Industrie, Finanzwirtschaft und Wissenschaft diskutiert. Mithilfe sogenannter Vermeidungskostenkurven (MACCs) können im Transformations-tool für jede Technologie die Maßnahmen mit den geringsten Kosten und dem größten Potenzial zur Vermeidung von THG-Emissionen betrachtet werden. Neben KN 2045 basieren sie u.a. auf Europäische Kommission (2008), Umweltbundesamt (2019).

Erdgaskraftwerke: Reduktionen bis zum Phase-out

Die Bedeutung von Erdgas zur Energieerzeugung in Deutschland ist gegenwärtig im Bereich der wärmegeführten Versorgung (Kraft-Wärme-Kopplung) und zur Sicherung der Netzstabilität nicht von der Hand zu weisen. Die hohe Flexibilität von erdgasbetriebenen Erzeugungsanlagen spricht für sich. Eine Gasturbine verursacht allerdings Emissionen in Höhe von bis zu 550 gCO₂/kWh. Daher sollten Anstrengungen unternommen werden, die Anlagen umzustellen oder aufzurüsten, um Emissionen zu reduzieren, oder durch alternative Quellen zu ersetzen.

Optimierungen und Retrofit

Auf lange Sicht wird die Umsetzung rein emissionsreduzierende Maßnahmen nicht zu einer Paris-kompatiblen Transformation führen. Die Emissionen einer durchschnittlichen Turbine (**Abbildung 6**) können so jedoch auf 340 gCO₂/kWh gesenkt werden.

Technische Optionen für kurzfristige Sofortschritte sind:

- » Verbesserungen der Betriebsführung
- » Ansaugluftkühlung: Je kühler die Lufttemperatur desto höher die Luftdichte, desto effizienter arbeiten die Turbinen.
- » Schaufel Retrofit: Nachrüstung aerodynamisch-optimierter Schaufelblätter

Im Fall der Stromerzeugung durch eine Gasturbine ermöglicht nur ein kompletter Technologiewechsel die Emissionen tatsächlich auf Null zu senken. Zum Ersetzen der Leistung einer Gasturbine von 50 MW eignen sich Windkraft- und PV-Anlagen, auch wenn ihre Volllaststundenzahl geringer ist.

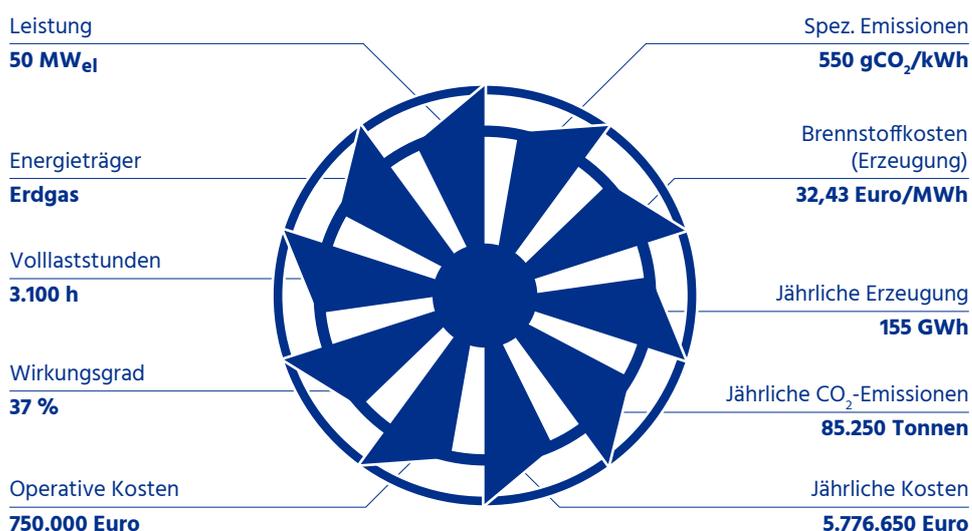


Abbildung 6: Daten einer fiktiven Turbine – heute

Auf- und Ausbau von Windkraft



Projektierungen, insbesondere an Land, sollten begleitet werden durch Möglichkeiten zur Partizipation und offene Kommunikation, um Sorgen direkt zu adressieren und Mitgestaltungsideen aufzunehmen.⁹

Auf dem Meer waren Ende des zweiten Quartals 2022 in Deutschland rund 1.500 Offshore-Windenergieanlagen mit einer Leistung von 7,8 GW in Betrieb (Deutsche WindGuard, 2022). Bis 2030 muss diese Leistung auf 30 GW anwachsen, um den Zielen aus dem aktuellen Koalitionsvertrag gerecht zu werden. An Land wurden im ersten Halbjahr 2022 knapp 240 Windräder mit einer Gesamtleistung von 977 Megawatt installiert („Ausbau von Windkraftanlagen stagniert“, 2022). Tatsächlich müssten es bis 2030 jährlich vier bis sechs Gigawatt sein (Stede und May, 2019). Die Differenz an Land kommt zustande durch fehlende Flächen, langwierige Genehmigungsverfahren, späte Klageoptionen und politische Fehlgriffe in Sachen pauschaler Abstandsregelungen, die für Windkraft vergleichsweise schärfer ausfallen als z. B. für nukleare Kraftwerke. Grundsätzlich genießt Windkraft eine gewisse Akzeptanz in der Bevölkerung. Diese wird jedoch getrübt, sobald ein Windpark im Sichtfeld entstehen soll. Klagen und Proteste können ein Genehmigungsverfahren in die Länge ziehen.

Investitionskosten (exemplarisch)	2020	2030	2040
Offshore	2440 €/kW	2000 €/kW	900 €/kW
Onshore	1150 €/kW	1100 €/kW	1050 €/kW

Windkraftanlagen verursachen im Betrieb zwar keine Brennstoffkosten. Allerdings fallen die Investitionskosten pro installiertem Kilowatt Leistung derzeit noch höher aus als beispielsweise für Gaskraftwerke. Offshore-Anlagen erzeugen im Durchschnitt mehr Strom als Anlagen an Land. Sie benötigen jedoch eine intensivere Infrastruktur, da der Strom nicht dort verbraucht werden kann, wo er erzeugt wird. Durch den deutlich höheren Aufwand beim Bau, die Netzanbindung sowie die erhöhten Umsetzungsrisiken und später im Betrieb bei der Wartung fallen die Investitionskosten und operativen Kosten entsprechend stärker ins Gewicht. Ähnlich wie bei PV-Anlagen folgt die Preisentwicklung einem tendenziell sinkenden Kurs, u.a. bedingt durch technologischen Fortschritt, verbesserte Fertigungsverfahren und Skaleneffekte.

Die Betriebskosten für Windkraftanlagen auf dem Meer belaufen sich auf 80 Euro/kW, an Land auf 29 Euro/kW und für Gaskraftwerke fallen 15 Euro/kW an. Eine verbesserte Logistikinfrastruktur und optimierte Wartungskonzepte lassen auch diese Kosten künftig sinken.



In einigen Fällen sollte geprüft werden, ob ein Repowering eines bestehenden Windparks sinnvoll ist. Das trifft vor allem dort zu, wo die Konzentrationswirkung erneuerbarer Energien verstärkt wird. Der Austausch älterer Anlagen oder einzelner Teile durch Moderne kann die Produktionsleistung steigern. Die zusätzlichen Belastungen für das Umfeld fallen durch in der Regel leisere und fortschrittlichere Anlagen geringer aus. Zudem kann Windenergie per PPA privat nach Ende der Förderung von Bürger:innen weiterbetrieben werden. Zudem können Wind-Komponenten zunehmend in den Stoffkreislauf aufgenommen werden.

⁹ Die Fachagentur Windenergie an Land (2016) hat einige Beispiele zusammengetragen.

Auf- und Ausbau von Photovoltaik (PV)

Allgemein sieht das EEG 2023 für die Bundesrepublik einen Ausbau der Photovoltaikanlagen auf 215 GWp bis 2030 und auf 400 GWp bis 2040 vor. Ende 2021 waren in Deutschland PV-Module mit einer Nennleistung von 59 GW installiert (Fraunhofer ISE, 2022). Die Installation auf Dächern, privat wie industriell, wird zwar von verschiedenen Stellen forciert. Doch das Potenzial ist angesichts der vielen versiegelten Flächen und freien Dächer offensichtlich. Unterstützend für den Ausbau wirkt in Teilen des Landes die Solarpflicht. Sie gilt bereits in einigen Bundesländern für alle neugebauten Nichtwohngebäude sowie teilweise auch für neue Wohngebäude. Es gibt noch keine bundesweit einheitliche Regelung (EnBW, 2022).¹⁰

Bei PV-Anlagen auf Freiflächen sind, wie bei fossilen Kraftwerken, weitere Vorgaben zu berücksichtigen, wie beispielsweise die Genehmigung eines Bebauungsplans sowie Natur- und Umweltschutz oder Vorgaben des Wasser- und Straßenschutzrechts. Nicht nur bei Großprojekten ist es ratsam, auf eine frühzeitige Einbindung der Anwohner:innen zu setzen. Eine finanzielle Einbindung ist nicht immer das entscheidende Motiv, sondern eher die Akzeptanz der sichtbaren Veränderung. Vor- und Nachteile regenerativer Energien sowie die Auswirkungen auf die lokale Wertschöpfung sollten Teil einer transparenten Kommunikationspolitik sein.



Auch für PV-Anlagen gibt es Möglichkeiten für Repowering, die die Anlagen für eine verlängerte oder zweite, teilweise dritte Lebenszeit aufbereiten.

Installationen auf Freiflächen sind mit günstigeren Investitionskosten verbunden als bei PV-Anlagen auf Dächern. Auch die Wartungs- und Instandhaltungskosten fallen geringer aus. Durch die Weiterentwicklung der Technologie und durch Prozessoptimierungen sollten die Investitionskosten auch hier sinken. Allein zwischen 2010 und 2020 fielen die Preise für PV-Module um 90 % (Fraunhofer ISE, 2022). Die operativen Kosten in Höhe von 12 Euro/kWh weisen keine gravierenden Unterschiede zwischen den beiden Typen aus. Die Lebensdauer ist vergleichbar mit jener von Windkraftanlagen (25 Jahre) und somit ebenfalls deutlich geringer als bei Gaskraftwerken (40 Jahre).

Investitionskosten (exemplarisch)	2020	2030	2040
PV-Anlagen auf Dächern	1050 €/kW	750 €/kW	650 €/kW
PV-Anlagen auf Freiflächen	600 €/kW	400 €/kW	350 €/kW

Der Agrophotovoltaik, also die Koppelung von PV mit landwirtschaftlicher Flächennutzung, wird in den zunehmend trockenen und heißen Sommern ein großes Potenzial für den weiteren Ausbau der Photovoltaik, bei gleichzeitigem Schutz vor Verdunstung, zugemessen (Fraunhofer ISE, 2019). Ein Kritikpunkt ist derzeit, dass Kommunen die zugrunde liegenden Naturschutzkriterien für eine Genehmigung selbst definieren können. Auch weitere organisatorische Klärungsbedarfe, wie etwa die Trennung zwischen Solarparkunternehmen einerseits und landwirtschaftlichem Unternehmen andererseits, sind noch zu lösen.

¹⁰ Der WWF Deutschland (2022b) hat dazu Forderungen formuliert.

Einsatz von (grünem) Wasserstoff

Der Betrieb von Gaskraftwerken, Gas-und-Dampfturbinenkraftwerken (GuD-Kraftwerk) sowie Blockheizkraftwerken (BHKW) mit Wasserstoff oder einem Gemisch aus Wasserstoff-Gas ist theoretisch möglich.¹¹ Die notwendigen technischen Umrüstungen der Anlagen sind überschaubar (Burke, 2022). Wichtig ist, dass der eingesetzte Wasserstoff mithilfe regenerativer Energien produziert wird. Ein solcher Wechsel im Stromsektor ist aus heutiger Sicht noch sehr kostenintensiv. Bei gleichem Brennstoffeinsatz betragen die Brennstoffkosten verglichen mit Erdgas das 7- bis 15-fache. Hintergrund ist u. a., dass sich die Klimaschadenskosten nicht in diesem Preis widerspiegeln. Das UBA beziffert diese Klimaschadenskosten auf etwa 200 €/tCO₂ unter der Annahme, dass die Wohlfahrt heutiger Generationen jener künftigen Generationen überwiegt. Würde der Preis angeglichen, stiege er auf 700 €/tCO₂ (Umweltbundesamt, 2021).

Brennstoffkosten (exemplarisch)	2020	2030	2040
Wasserstoff	188 €/MWh	158 €/MWh	144 €/MWh
Erdgasbetrieb	12 €/MWh	20 €/MWh	21 €/MWh

Es ist allerdings davon auszugehen, dass Wasserstoff eine knappe Ressource bleiben wird, die bevorzugt in anderen Sektoren eingesetzt werden wird. Stattdessen wird im Stromsektor diskutiert, Wasserstoff als „Energiespeicher“ für Überschussstrom regenerativer Quellen einzusetzen.

¹¹ Verschiedene Projekte sollen demonstrieren, dass Wasserstoff nicht nur gespeichert, sondern später in Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen eingesetzt werden kann (Siemens Gas and Power, Engie Solutions und Centrax, 2020).

Einsatz von Biogas

Eine weitere Möglichkeit, THG-Emissionen in der Stromerzeugung einzusparen, ist der Betrieb von Gaskraftanlagen, GuD-Kraftwerken und BHKW mit Biogas. Der Wechsel wäre ohne Umrüstungen der Anlagen möglich.

Es ist nur Biogas zu verwenden, welches in vollem Umfang als nachhaltig klassifiziert ist. Für die Produktion der benötigten Biomasse dürfen keine Grünlandflächen mit hoher Biodiversität, Waldflächen oder Torfmoor zu Anbauflächen umgewandelt werden. Ansonsten können negative Skaleneffekte eintreten: Biogas und Biomasse (wie Biokohle) wird in vielen Sektoren als Möglichkeit zur Dekarbonisierung betrachtet, die verfügbare Menge wird jedoch nicht zur Versorgung aller interessierten Sektoren ausreichen. Insgesamt ist Bioenergie als Nischenlösung zu betrachten: Im Referenzszenario sinkt ihr Einsatz in absoluten Zahlen von 38 TWh Nettostromerzeugung im Jahr 2030 auf 10 TWh im Jahr 2050.

Mögliche flüchtige Emissionen von Methan stellen in vielen Fällen ein bisher ungelöstes Problem dar (Umweltbundesamt, 2019) und könnten durch Maßnahmen wie die regelmäßige Wartung und Nutzung von Equipment sowie die Entwicklung angemessener Identifikations- und Reparierungsansätze gemindert werden (Imperial College London, 2022).

Erneuerbare Energien, auch regenerative Energien genannt, basieren auf der nachhaltigen Energiegewinnung aus Ressourcen, die praktisch unendlich zur Verfügung stehen oder sich schnell wieder erneuern. Dies sind zum Beispiel Wind- und Sonnenenergie. Aus Sicht des WWF Deutschlands sind Biomasse und Wasserkraft hingegen nicht zwangsläufig nachhaltige erneuerbare Energiequellen, weil sie nur ein sehr begrenztes nachhaltiges energetisches Potenzial haben sowie sehr schädlich mit Bezug ihrer Klimawirkung und/oder Auswirkungen auf die Biodiversität sein können.

Wasserkraft

Im Jahr 2021 wurden rund 3,4 % des in Deutschland erzeugten Bruttostroms aus Wasserkraft gewonnen (Statista, 2022). Vor allem im Süden der Bundesrepublik werden bisher Wasserkraftwerke zur Stromerzeugung eingesetzt. Wasserkraft steht aufgrund seiner Auswirkungen auf die Biodiversität und die lokale Bevölkerung häufig in der Kritik. Vermehrte Dürreperioden oder Überschwemmungen verringern die Leistung der Kraftwerke stellenweise erheblich.

Auch einige der Wasserkraftwerke in Deutschland könnten durch lange Niedrigwasserphasen und häufigere Hochwasserereignisse zukünftig zu unzuverlässigen Stromversorgern werden. Von den rund 4.250 bestehenden Wasserkraftwerken in Bayern liegen mehr als die Hälfte an Flüssen mit geringer Wasserführung ($<1\text{m}^3/\text{s}$) (WWF Deutschland, 2022c).

Die Stromerzeugung durch Wasserkraft spielt in Deutschland eine untergeordnete Rolle und wurde weder im Referenzszenario noch im Rahmen des Projektes intensiver beleuchtet.

Ausbau der Speicherkapazität und Flexibilitätsoptionen

Die Energieproduktion auf Basis der natürlichen Energiequellen Wind und Sonne unterliegt wetterbedingt starken Schwankungen. Die Sonne scheint nicht kontinuierlich oder in konstanter Intensität und auch der Wind weht nicht ständig. Unregelmäßigkeiten im Strombedarf, z.B. durch Tagesaktivitäten und Nachruhen, gibt es schon heute. Diese Mehr- oder Minderverbräuche können aktuell durch das Hochfahren und Drosseln der Kohle-, Gas- oder Atomkraftwerke ausgeglichen werden. Künftig muss diese Aufgabe auf Stromspeicher übergehen.¹² Ende 2020 standen mindestens rund 175.000 Batteriespeicher, zu großen Teilen Lithium-Ionen-Systeme, mit einer Gesamtkapazität von 1.950 MWh und einer Leistung von 1.400 MW in Deutschland zur Verfügung (Figgener, 2021).

Stationäre Batteriespeicher

Batterien sind Kurzzeitspeicher, die strategisch platziert den Ausbau der Stromnetze entlasten können. Sie speichern überschüssigen Strom zwischen und geben ihn ab, sobald er benötigt wird. Infrage kommen Trockenbatterien, wie Lithium-Ionen-Batterien, oder als Hybridmodelle kombiniert mit Natrium-Schwefel-Batterien, oder Durchflussbatterien, wie Vanadium-Redox-Batterien oder Zink-Brom-Batterien.

Power-to-X: Wasserstoffelektrolyseure

Wasserstoff kann als Stromspeicher genutzt werden. Im Power-to-Gas-Verfahren (PtG), oder auch Elektrolyse, wird Strom dazu eingesetzt, Wasser in seine Bestandteile zu spalten: Wasserstoff und Sauerstoff. Ein Kompressor verdichtet den Wasserstoff, dann wird er eingelagert und kann u. a. in bestehenden Gasinfrastrukturen transportiert und bedarfsgerecht wieder eingesetzt werden. Derzeit wäre es möglich, etwa 200 TWh Energie in unterirdischen Gasspeichern in Deutschland zu lagern (Koberstein, 2022).



¹² Für kurzfristige Schwankungen von einigen Stunden eignen sich Pumpspeicherkraftwerke. Diese kommen heute schon weltweit zum Einsatz. Größere Schwankungen im Bereich von Tagen oder Wochen lassen sich nur mit chemischen Speichern auf der Basis von Wasserstoff, Methan oder anderen Gasen bzw. Flüssigkeiten ausgleichen (vgl. Fraunhofer IWES, 2011).

Wird der Wasserstoff nicht als Gas weiter genutzt, sondern soll verstromt werden, wird der Prozess umgekehrt: In Brennstoffzellen reagiert der Wasserstoff mit Sauerstoff und setzt dabei Energie in Form von Strom frei. Im Nebeneffekt entsteht Wärme, die wiederum in Brennstoffzellenheizungen oder in Blockheizkraftwerken eingesetzt werden kann. Durch die zweifache Umwandlung sinkt der Wirkungsgrad auf 40 %.

Power-to-X gilt als Zukunftstechnologie und hat noch keine Marktreife erlangt. Vereinzelt sind vorkommerzielle Anlagen bereits im Betrieb, werden geplant oder für Pilotierungen und Demonstrationszwecke genutzt.¹³

Immobilien

Im Rahmen von Sanierungen und Neubauten nach Effizienzhaus-Standard werden Stromspeicher für die Eigenstromversorgung (anteilig) von der KfW gefördert. Eine Voraussetzung ist, dass für die betreffende PV-Anlage keine Vergütung für eingespeisten Strom nach EEG in Anspruch genommen wird oder dies geplant ist.

CO₂-Abscheidung und Speicherungstechnologien

Der Vollständigkeit halber sei das Auffangen und permanente Speichern von CO₂-Emissionen genannt. Relevant sind für den Einsatz „Post-Combustion Carbon Capture and Storage“-Technologien (CCS). Sie befinden sich noch in der Erprobung. Der Einsatz der Technologie funktioniert grundsätzlich in jedem Verbrennungssofen und KN 2045 ordnet ihr insbesondere in den Industriesektoren eine große Bedeutung zu. Im Stromsektor wäre der Einsatz von CCU/S grundsätzlich in fossil betriebenen Kraftwerken, z.B. Kohlekraftwerken denkbar. Es wird jedoch kritisiert, dass so die Lebenszeit THG-intensiver Energieträger künstlich verlängert wird und andere Maßnahmen ausgebremst werden. Expert:innen zeigen sich nach ersten Versuchen skeptisch, ob die technische Reife für einen effizienten Einsatz in Kohlekraftwerken erreicht werden kann (Groom, 2020).

CCS-Technologien besitzen zwar theoretisch ein Reduktionspotenzial von 88 bis 92 %, verursachen allerdings sehr hohe operative und Investitionskosten. Aufwendige Post-Combustion-Technologien könnten sich beim Neubau von Kohle- oder Gaskraftwerken lohnen und sind in Deutschland im Rahmen der geplanten Energiewende daher nicht mehr anwendbar. Wichtig ist zudem, dass das eingefangene CO₂ nach seiner Speicherung nicht entweichen darf. Auch ist die Infrastruktur für den Transport noch aufzubauen sowie zuerst Rechtssicherheit zu schaffen.¹⁴

CCS-Anlagen sind äußerst energieintensiv und sollten paradoxerweise mit erneuerbaren Energien betrieben werden. Die zusätzlich benötigte Energie senkt sonst die Wirkungsgrade der Kraftwerke.

¹³ Im Landkreis Uckermark wurde das weltweit erste Hybridkraftwerk projektiert, das Wasserstoffspeicher erprobt (Europäische Kommission, 2015).

¹⁴ Auch wenn seit 2012 das CCS-Gesetz den Rechtsrahmen für die Erprobung und Demonstration der CCS-Technologie in Deutschland auslegt, gibt es noch keinen Rechtsrahmen für die dauerhafte Anwendung. Laut BMWK wird dazu derzeit mit Branchenvertreter:innen beraten. Siehe auch BMWK(2022c).

Kohlekraftwerke: verstärkte Nutzung von Biomasse bis zum Phase-out

Für Kohlekraftwerke gibt es durch den geplanten und terminierten Phase-out keine wirtschaftlich sinnvollen Nachrüstoptionen. Ein Betrieb mit Gas oder Wasserstoff wird ebenso ausgeschlossen. Übergangsweise können Kohlekraftwerke (sowohl Stein- als auch Braunkohle) allerdings mit Biomasse befeuert werden.

Die Brennstoffkosten würden deutlich ansteigen: Derzeit betragen sie bei Braun- und Steinkohlekraftwerken 3 bzw. 8 Euro/MWh. Wird Biomasse eingesetzt, steigen die Kosten bei gleichem Brennstoffeinsatz auf rund 37,5 Euro/MWh an. Zudem erfordert die Umstellung technische Anpassungen an Teilen der Verfeuerungsanlagen, etwa bei Stein- und Braunkohlekesseln.

Theoretisch wäre eine vollständige Umstellung von Kohlekraftwerken auf die Befuerung mit Biomasse denkbar. Allerdings ist Biomasse nicht in der notwendigen Größenordnung verfügbar. Zudem kommt der Anbau von Biomasse zum Zweck einer rein energetischen Nutzung aufgrund der Nutzungskonkurrenz um Anbauflächen für Nahrungsmittel und der negativen Auswirkungen auf Wasser, Boden, Biodiversität und Naturschutz kaum in Betracht. Hinzu kommt, dass eine Verfeuerung von Biomasse in Kohlenkraftwerken die CO₂-Bilanz gar verschlechtert werden kann. Studien fanden heraus, dass „der [CO₂-Speichersaldo](#) Werte von 60 bis 180 gCO₂e/MJ annimmt. Weil die Werte der fossilen Referenz mit etwa 80 gCO₂e/MJ im Bereich Wärme in der gleichen Größenordnung liegen, ist [...] mit einer signifikanten Verschlechterung der Treibhausgasbilanz zu rechnen“ (Öko-Institut, 2022).

Eine andere Option ist der Umbau von Kohlekraftwerken zu Gaskraftwerken, idealerweise so, dass sie, sobald verfügbar, mit Wasserstoff betrieben werden können. Auch in Deutschland sind bereits Projekte zum „Fuel Switch“ geplant (EnBW, 2021). Brennstoffkosten würden hier im Mittel bis 2030 auf rund 20 €/MWh ansteigen. Der spätere Umstieg auf Wasserstoff war bisher noch sehr teuer. Die aktuell stark gestiegenen Energiepreise könnten jedoch dazu führen, dass ein Fuel Switch preislich attraktiver wird.

Ausblick und Impulse für den Dialog

Die Diskussion um die Energieproduktion und die Unabhängigkeit Deutschlands in diesen Fragen bestimmt das Tagesgeschehen. Die geopolitischen Entwicklungen machen nur noch deutlicher, wie rasant der Ausbau erneuerbarer Energien und ihrer Speicherkapazitäten hierzulande längst voranschreiten müsste. Striktere politische und regulatorische Rahmenbedingungen sind ein Muss, um die Dekarbonisierung des Stromerzeugungssektors voranzutreiben und so die Dekarbonisierung der anderen Industrien zu unterstützen. Die derzeitige Neuaufstellung der Energiepolitik Deutschlands sollte die Transformation als Chance begreifen, und vermeiden weiter geopolitische Abhängigkeiten von (fossilen) Energieimporten aus (autokratischen) Nationen herzustellen.

Vor diesem Hintergrund sollte bei der Analyse und Bewertung transformationsbezogener Risiken und Chancen der Sektoren und Unternehmen sowie bei der Vorbereitung, Durchführung und Bewertung von Unternehmensdialogen insbesondere auf folgende Erfolgskriterien einer Paris-kompatiblen Transformation im Sektor Stromproduktion geachtet werden:



Erfolgskriterien einer Paris-kompatiblen Transformation

- » Wie sieht der Ausstiegsplan (Phase-out) für Braun- und Steinkohle sowie Erdgas aus?
- » Ist das Kraftwerk kompatibel mit Wasserstoff?
- » Werden Speicherkapazitäten aufgebaut?
- » Soll die Emissionsintensität in tCO₂e /MWh planmäßig bis 2045 in Richtung Null sinken?

In allen Dialogen sollte nach dem Stand der entsprechenden Maßnahmen bzw. konkreten Zeitplänen und Investitionsvorhaben gefragt werden.

Literaturverzeichnis

Anderson, K., und Peters, G. (2016). The trouble with negative emissions. *Science*, 354(6309), 182–183. <https://doi.org/10.1126/science.aah4567>. Abgerufen am 26. September 2022.

Ausbau von Windkraftanlagen stagniert. (2022). Tagesschau. [https://www.tagesschau.de/wirtschaft/technologie/ausbau-von-windraedern-stagniert-101.html#:~:text=Im%20ersten%20Halbjahr%202022%20wurden,\(BWE\)%20und%20der%20VDMA](https://www.tagesschau.de/wirtschaft/technologie/ausbau-von-windraedern-stagniert-101.html#:~:text=Im%20ersten%20Halbjahr%202022%20wurden,(BWE)%20und%20der%20VDMA). Abgerufen am 26. September 2022.

ARUG II. (2019). Gesetz zur Umsetzung der zweiten Aktionärsrechterichtlinie. https://www.bmj.de/SharedDocs/Gesetzgebungsverfahren/Dokumente/BGBL_ARUG_II.html. Abgerufen am 26. September 2022.

Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland (BUND). (n.d.) BUND-Abschaltplan: Der Kohleausstieg vor 2030 ist möglich!. <https://www.bund.net/kohle/kohle-ausstieg/>. Abgerufen am 26. September 2022.

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK). (2022a). Treibhausgasemissionen stiegen 2021 um 4,5 Prozent. <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Pressemitteilungen/2022/03/20220315-treibhausgas-emissionen-stiegen-2021-um-45-prozent.html>. Abgerufen am 26. September 2022.

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK). (2022b). Aktuelle Informationen: Erneuerbare Energien im Jahr 2021. [https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Navigation/DE/Service/Erneuerbare_Energien_in_Zahlen/Aktuelle-Informationen/aktuelle-informationen.html#:~:text=Insgesamt%20liegt%20der%20Anteil%20der,\(45%2C2%20Prozent\)](https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Navigation/DE/Service/Erneuerbare_Energien_in_Zahlen/Aktuelle-Informationen/aktuelle-informationen.html#:~:text=Insgesamt%20liegt%20der%20Anteil%20der,(45%2C2%20Prozent)). Abgerufen am 26. September 2022.

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK). (2022c). CCU/CCS: Baustein für eine klimaneutrale und wettbewerbsfähige Industrie. <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Artikel/Industrie/weitere-entwicklung-ccs-technologien.html#:~:text=Das%20Gesetz%20zur%20Demonstration%20und,31%2FEG%20zur%20geologischen%20Kohlendioxidspeicherung>. Abgerufen am 21. September 2022.

Bundesnetzagentur. (n.d.). Ausbaubedarf ermitteln. <https://www.netzausbau.de/Wissen/Ausbaubedarf/de.html>. Abgerufen am 26. September 2022.

Bundesregierung. (2022). Entwurf eines Gesetzes zu Sofortmaßnahmen für einen beschleunigten Ausbau der erneuerbaren Energien und weiteren Maßnahmen im Stromsektor. https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/Energie/04_EEG_2023.pdf?__blob=publicationFile&v=8. Abgerufen am 26. September 2022.

Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft (BDEW). (2020). 320 Milliarden Euro bis 2030: Investitionen zur Erreichung der Energie- und Klimaziele können wirtschaftliche Erholung befähigen. <https://www.bdew.de/presse/presseinformationen/investitionen-zur-erreichung-der-energie-und-klimaziele/>. Abgerufen am 26. September 2022.

Burke, J. (2022). Gas turbine power plant getting hydrogen retrofit. *Diesel & Gas Turbine Worldwide*. <https://www.dieselturbine.com/news/gas-turbine-power-plant-getting-hydrogen-retrofit/8020456.article>. Abgerufen am 26. September 2022.

Deutsche WindGuard. (2022). Status des Offshore-Windenergieausbaus in Deutschland Erstes Halbjahr 2022. https://www.wind-energie.de/fileadmin/redaktion/dokumente/publikationen-oeffentlich/themen/06-zahlen-und-fakten/Status_des_Offshore-Windenergieausbaus_Halbjahr_2022_final.pdf. Abgerufen am 26. September 2022.

Energie Baden-Württemberg (EnBW). (2021). EnBW will Kraftwerk Altbach/Deizisau bis 2026 kohlefrei und langfristig klimaneutral machen. <https://www.enbw.com/unternehmen/presse/fuel-switch-als-zwischenschritt-auf-dem-weg-zur-klimaneutralitaet.html>. Abgerufen am 26. September 2022.

Energie Baden-Württemberg (EnBW). (2022). Solarpflicht: Kommt die Solarpflicht für alle?. <https://www.enbw.com/blog/energiewende/solarenergie/solarpflicht-kommt-die-solarpflicht-fuer-alle/>. Abgerufen am 26. September 2022.

Europäische Kommission. (2008). Energy Sources, Production Costs and Performance of Technologies for Power Generation, Heating and Transport. Commission Staff Working Document. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52008SC2872&from=EN>. Abgerufen am 26. September 2022.

Europäische Kommission. (2015). Das weltweit erste Hybridkraftwerk mit Wasserstoffspeicher. https://ec.europa.eu/regional_policy/de/projects/germany/the-first-hybrid-electricity-fuel-heat-power-plant-with-hydrogen-storage-in-the-world. Abgerufen am 26. September 2022.

Europäische Kommission. (2021). Vorschlag für eine Änderung der Richtlinie hinsichtlich der Nachhaltigkeitsberichterstattung von Unternehmen. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52021PC0189>. Abgerufen am 26. September 2022.

Figgner, J. (2021). Marktstammdatenregister beinhaltet Batteriespeicher mit einer Kapazität von insgesamt knapp 2.000 Megawattstunden. PV Magazine. <https://www.pv-magazine.de/2021/01/15/marktstammdatenregister-beinhaltet-batteriespeicher-mit-einer-kapazitaet-von-insgesamt-knapp-2-000-megawattstunden/>. Abgerufen am 21. September 2022.

Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (ISE). (2022). Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland. <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/aktuelle-fakten-zur-photovoltaik-in-deutschland.pdf>. Abgerufen am 26. September 2022.

Fraunhofer-Institut für Windenergiesysteme (IWES). (2011). Speicherungsmöglichkeiten von Überschuss-Energie mit Wasserstoff oder Methan – ein Vergleich. https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Allgemeines/Presse/Pressemitteilungen/2011/111122_PowerToGas_AnlageIWES_pdf.pdf?__blob=publicationFile&v=3. Abgerufen am 26. September 2022.

Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (ISE). (2022). Agrophotovoltaik: hohe Ernteerträge im Hitzesommer. <https://www.ise.fraunhofer.de/de/presse-und-medien/presseinformationen/2019/agrophotovoltaik-hohe-ernteertraege-im-hitzesommer.html>. Abgerufen am 26. September 2022.

Glasgow Financial Alliance for Net Zero (GFANZ). (2022). Financial Institution Net-zero Transition Plans. https://assets.bbhub.io/company/sites/63/2022/06/GFANZ_Recommendations-and-Guidance-on-Net-zero-Transition-Plans-for-the-Financial-Sector_June2022.pdf. Abgerufen am 26. September 2022.

Fachagentur Windenergie an Land. (2016). Wer den Wind erntet. https://www.fachagentur-windenergie.de/fileadmin/files/Veroeffentlichungen/FA-Wind_Zeitung_Wer_den_Wind_erntet_01-2016. Abgerufen am 26. September 2022.

Fuss, S., Candell, J. G., Peters, G. P., Tavoni, M., Andrew, R. M., Ciais, P., ... Yamag. (2014). Betting on negative emissions. Nature Climate Change, 4(10), 850–853. <https://doi.org/10.1038/nclimate2392>. Abgerufen am 26. September 2022.

Groom, N. (2020). Problems plagued U.S. CO2 capture project before shutdown: document. Reuters. <https://www.reuters.com/article/us-usa-energy-carbon-capture-idUSKCN2523K8>. Abgerufen am 26. September 2022.

Höland, C. (2022). Wirtschaftsweise Grimm: Wenn die Regierung nicht handelt, scheitert der Kohleausstieg 2030. Redaktions Netzwerk Deutschland. <https://www.rnd.de/wirtschaft/wirtschaftsweise-dank-putin-ist-der-kohleausstieg-kein-selbstlaeufer-mehr-UHW3WM3ZSRHXHH2IUHBGFQJ2YA.html>. Abgerufen am 26. September 2022.

Imperial College London. (2022). Biogas and biomethane supply chains leak twice as much methane as first thought. ScienceDaily. <http://www.sciencedaily.com/releases/2022/06/220617111456.htm>. Abgerufen am 26. September 2022.

Koberstein, H. (2022). So funktionieren Deutschlands Gasspeicher. ZDFheute. <https://www.zdf.de/nachrichten/wirtschaft/gasspeicher-deutschland-faq-ukraine-krieg-russland-100.html>. Abgerufen am 26. September 2022.

Öko-Institut. (2022). CO₂-Speichersaldo – CO₂-Emissionen der Holznutzung sichtbar machen. <https://co2-speichersaldo.de/de/index.html>. Abgerufen am 26. September 2022.

Prognos, Öko-Institut und Wuppertal-Institut. (2021). Klimaneutrales Deutschland 2045. Wie Deutschland seine Klimaziele schon vor 2050 erreichen kann. Langfassung im Auftrag von Stiftung Klimaneutralität, Agora Energiewende und Agora Verkehrswende. <https://www.agora-energiewende.de/veroeffentlichungen/klimaneutrales-deutschland-2045-vollversion/>. Abgerufen am 26. September 2022.

Richtlinie 2014/65/EU des Europäischen Parlaments und des Rates über Märkte für Finanzinstrumente sowie zur Änderung der Richtlinien 2002/92/EG und 2011/61/EU. (2014). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX:32014L0065>. Abgerufen am 26. September 2022.

Siemens Gas and Power, Engie Solutions und Centrax. (2020). HYFLEXPOWER: Weltweit erste integrierte Power-to-X-to-Power-Demonstrationsanlage mit Wasserstoffgasturbine. <https://press.siemens.com/global/de/pressemitteilung/hyflexpower-weltweit-erste-integrierte-demonstrationsanlage-einer-power-x-power>. Abgerufen am 26. September 2022.

Statista. (2022). Wasserkraft - Anteil an der Stromerzeugung in Deutschland bis 2021. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/233230/umfrage/anteil-der-wasserkraft-an-der-stromerzeugung-in-deutschland/>. Abgerufen am 26. September 2022.

Stede, J. und May, N. (2019). Strikte Mindestabstände bremsen den Ausbau der Windenergie. DIW Wochenbericht 48/2019. Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung. https://www.diw.de/de/diw_01.c.698984.de/publikationen/wochenberichte/2019_48_4/strikte-mindestabstaende-bremsen-den-ausbau-der-windenergie.html. Abgerufen am 26. September 2022.

Umweltbundesamt. (2019). Gesellschaftliche Kosten von Umweltbelastungen. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/umwelt-wirtschaft/gesellschaftliche-kosten-von-umweltbelastungen#gesamtwirtschaftliche-bedeutung-der-umweltkosten>. Abgerufen am 26. September 2022.

Umweltbundesamt. (2021). Biogasanlagen. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/wirtschaft-konsum/industriebranchen/biogasanlagen#einfuehrung>. Abgerufen am 26. September 2022.

Umweltbundesamt. (2022a). Treibhausgasminderungsziele Deutschlands. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/treibhausgasminderungsziele-deutschlands#internationale-vereinbarungen-weisen-den-weg>. Abgerufen am 26. September 2022.

Umweltbundesamt. (2022b). Stromverbrauch. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/stromverbrauch#:~:text=Im%20Jahr%202021%20stieg%20der,der%20sogenannten%20Sektorkoppelung%20ein-zuplanen%20sind>. Abgerufen am 26. September 2022.

Verordnung (EU) 2019/2088 des Europäischen Parlaments und des Rates über nachhaltigkeitsbezogene Offenlegungspflichten im Finanzdienstleistungssektor. (2019). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX:32019R2088>. Abgerufen am 26. September 2022.

Verordnung (EU) 2020/852 des Europäischen Parlaments und des Rates über die Einrichtung eines Rahmens zur Erleichterung nachhaltiger Investitionen und zur Änderung der Verordnung (EU) 2019/2088. (2020). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX:32020R0852>. Abgerufen am 26. September 2022.



WWF Deutschland. (2022a). Megatrends der globalen Energiewende II. <https://www.wwf.de/themen-projekte/klima-energie/megatrends-der-globalen-energie-wende>. Abgerufen am 26. September 2022.

WWF Deutschland. (2022b). Erneuerbare auf und unters Dach. WWF Policy Brief. <https://www.wwf.de/fileadmin/fm-wwf/Publikationen-PDF/Klima/policy-brief-erneuerbare-aufs-und-unters-Dach.pdf>. Abgerufen am 26. September 2022.

WWF Deutschland. (2022c). Keine Kraft für Wasserkraft. <https://www.wwf.de/2022/maerz/keine-kraft-fuer-wasserkraft>. Abgerufen am 26. September 2022.

Impressum

Herausgeber: WWF Deutschland
Stand: Oktober 2022
Gesamtverantwortung: Matthias Kopp, Director Sustainable Finance, WWF Deutschland;
Dr. Nicole Röttmer, Global Lead Climate Clients & Industries, PwC Deutschland
Autorin:nen/Mitarbeit: Vanessa Bolmer, Felix Schmidt, Dr. Laura Niederdrenk (alle WWF Deutschland);
ao. Prof. Dr. Jürgen Peterseim, Moritz Zahn, Fritz Fromageot (alle PwC Deutschland)
Kontakt: Vanessa Bolmer (Senior Policy Advisor Sustainable Finance, WWF Deutschland);
ao. Prof. Dr. Jürgen Peterseim (Senior Manager Sustainability Services,
PwC Deutschland);
info@pathwaystoparis.com
Gestaltung: Anita Drbohlav (www.paneemadesign.com)
Bildnachweise: Cover, S. 6: iStock/Getty Images; S. 10: Nicholas Doherty/Unsplash;
S. 16: ENERTRAG

Disclaimer

Pathways to Paris ist ein vom Bundeswirtschaftsministerium (BMWK) gefördertes Projekt mit einer Laufzeit von zwei Jahren. Die aktive Projektphase endete im Oktober 2022.

WWF Deutschland und PwC Deutschland begleiteten und unterstützten die teilnehmenden Unternehmen bei der Entwicklung von Transformationspfaden, die für die Erreichung der Ziele des Pariser Klimaschutzabkommens notwendig sind. Neben der Schaffung eines gemeinsamen Verständnisses und breiter Akzeptanz für die Anforderungen einer erfolgreichen Klimawende wurden sektorspezifische, reproduzierbare Transformationspfade beleuchtet, die öffentlich zugänglich sind.

Eine exklusive Beratung mit unmittelbarer Wirkung auf z.B. Produktionstechnologien, Strategieplanung oder Wertschöpfungsketten einzelner Unternehmen fand nicht statt. Des Weiteren bestehen im Rahmen des Projektes keine finanziellen Verbindlichkeiten zwischen den teilnehmenden Unternehmen und den Projektinitiatoren, so dass etwaige Interessenkonflikte ausgeschlossen sind.

Die Inhalte des vorliegenden Orientierungsrahmens wurden mit größtmöglicher Sorgfalt erstellt. Der Anbieter übernimmt jedoch keine Gewähr für die Richtigkeit, Vollständigkeit und Aktualität der bereitgestellten Inhalte. Die Nutzung des Orientierungsrahmens erfolgt auf eigene Gefahr des Nutzers.

Eine Kooperation von:



Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages