

20 Gigawatt Photovoltaik pro Jahr sind nicht genug

Prof. Dr. Volker Quaschnig, Dr. Johannes Weniger, Joseph Bergner, Nico Orth, Bernhard Siegel, Michaela Zoll

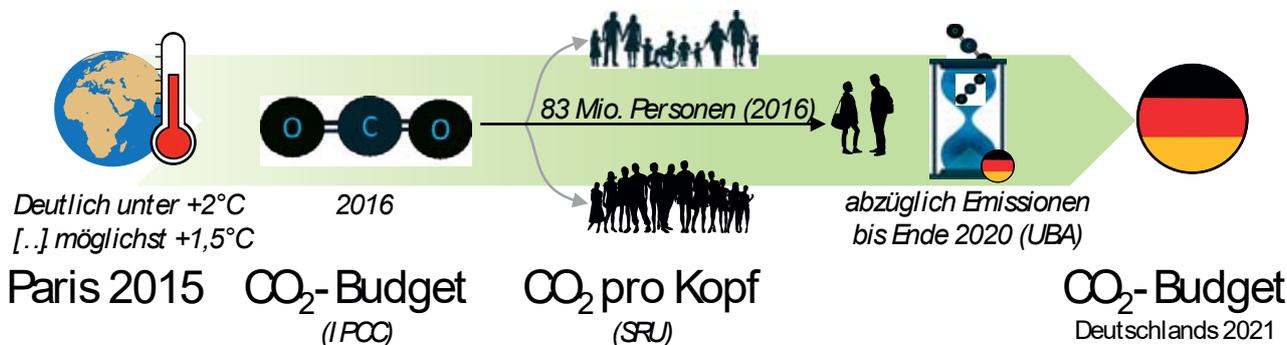


Bild 1 Schematische Darstellung der Methodik zur Ermittlung des restlichen deutschen CO₂-Budgets.

Abstract

Spätestens seit dem Urteil des Bundesverfassungsgerichts im Frühjahr 2021 ist klar: Deutschland befindet sich derzeit nicht auf dem notwendigen Klimaschutzpfad. Die letzte Bundesregierung hat nach dem Urteil das deutsche Klimaschutzgesetz hektisch nachgebessert. Neues Zieljahr der Regierung für die Klimaneutralität ist derzeit 2045. Nach dem Budgetansatz des Sachverständigenrats für Umweltfragen SRU [1] müsste die Klimaneutralität zum Einhalten des Pariser Klimaschutzabkommens in Deutschland jedoch deutlich früher erreicht werden. Im Rahmen dieses Beitrags wurden die Berechnungen des SRU mit den deutschen Kohlendioxidemissionen aus dem Jahr 2021 aktualisiert und anschließend für verschiedene Klimaschutzziele der jeweils nötige jährliche Photovoltaikzubau bestimmt.

Abschließend wird ein klimaverträglicher Zubaukorridor für die Photovoltaik in Deutschland ermittelt. Zum Einhalten des Pariser Klimaschutzabkommens wird sich dieser im Bereich von 20 bis 40 GW/a bewegen. Es ist Aufgabe der deutschen Solarindustrie, sich der Herausforderung zu stellen und nötige Maßnahmen von der Politik zu fordern, damit sich diese Installationszahlen auch umsetzen lassen.

Wann muss Deutschland CO₂-neutral werden?

Im Frühjahr 2021 verfasste das Bundesverfassungsgericht einen historischen Beschluss zum Klimaschutz, der die Bedeutung des Pariser Klimaschutzabkommens herausstellt: „Das verfassungsrechtliche Klimaschutzziel des Art. 20a Grundgesetz ist dahingehend konkretisiert, den Anstieg der globalen Durch-

schnittstemperatur dem sogenannten „Paris-Ziel“ entsprechend auf deutlich unter 2 °C und möglichst auf 1,5 °C gegenüber dem vorindustriellen Niveau zu begrenzen“ [2].

Welchen Beitrag Deutschland dazu leisten muss und wann Deutschland kohlendioxidneutral (CO₂-neutral) werden muss, kann anhand des sogenannten Budgetansatzes bestimmt werden. Bild 1 stellt die Methodik zur Ermittlung des restlichen deutschen CO₂-Budgets dar, die auf der vom Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU) vorgeschlagenen Vorgehensweise aufbaut [1].

In dieser Studie wurde der Budgetansatz an die realen CO₂-Emissionen des Jahres 2020 unter Berücksichtigung des neuesten Berichts des Weltklimarats IPCC aus dem Jahr 2021 [3] angepasst. Der IPCC hat globale CO₂-Budgets ermittelt, die zum Einhalten bestimmter Temperaturgrenzen für die globale Erwärmung nicht überschritten werden dürfen. Das Pariser Klimaschutzabkommen wurde im Jahr 2015 beschlossen. Daher wurde das Jahr 2016 als Referenzjahr für die Berechnungen gewählt.

Um die Erwärmung deutlich unter 2 °C halten zu können, sollte die Temperaturgrenze von 1,7 °C noch mit einer relativ hohen Wahrscheinlichkeit von wenigstens 67 % eingehalten werden. Soll die Erwärmung möglichst auf 1,5 °C begrenzt werden, ist dies mit einer mittleren Wahrscheinlichkeit von 50 % anzustreben. Demnach liegt das ab 2016 verbleibende globale CO₂-Budget zum Einhalten des Pariser Klimaschutzabkommens zwischen 664 und 864 Milliarden Tonnen CO₂, wie Tabelle 1 zeigt [3].

Temperaturgrenze	Wahrscheinlichkeit zum Einhalten der Temperaturgrenze				
	17 %	33 %	50 %	67 %	83 %
1,5 °C	1064	814	664	564	464
1,7 °C	1614	1214	1014	864	714

Tabelle 1 Verbleibendes Kohlendioxidbudget in Milliarden Tonnen CO₂ zum Begrenzen der globalen Erwärmung auf 1,5 °C bzw. 1,7 °C, bezogen auf den Zeitraum 1850 bis 1900 ab Anfang 2016, basierend auf [3].

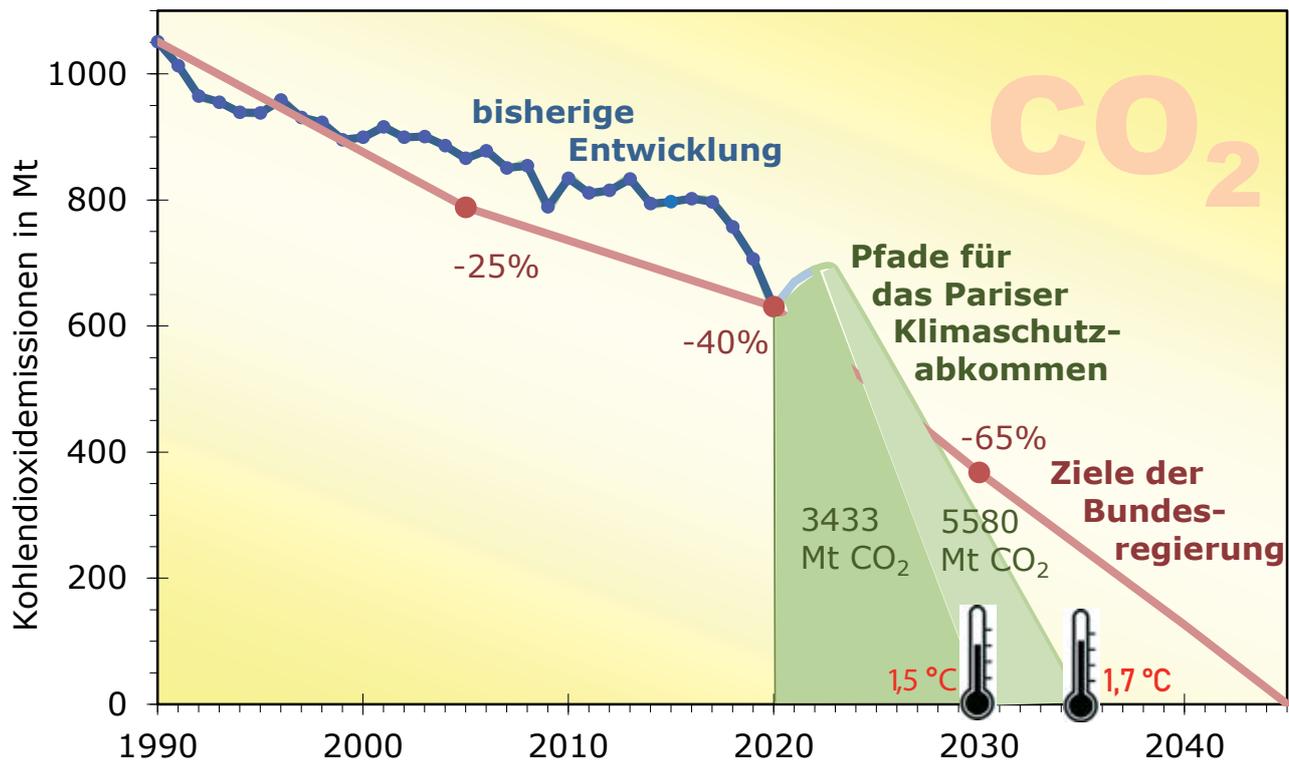


Bild 2 Entwicklung der Kohlendioxidemissionen in Deutschland zwischen 1990 und 2020, Ziele des Klimaschutzgesetzes und Pfade zum Einhalten des Pariser Klimaschutzabkommens gemäß des ermittelten CO₂-Budgets.

Die jährlichen globalen CO₂-Emissionen lagen in den vergangenen Jahren bei etwa 41 Milliarden Tonnen. Im Coronajahr 2020 waren es knapp 40 Milliarden Tonnen. Damit sind die für das Bezugsjahr 2016 vom IPCC ermittelten CO₂-Budgets in den vergangenen 4 Jahren um 164 Milliarden Tonnen CO₂ gesunken. Bis Ende 2020 sanken die verbleibenden CO₂-Budgets zum Einhalten der genannten Temperaturgrenzen somit auf 500 bis 700 Milliarden Tonnen CO₂.

Wird das CO₂-Budget aus dem Jahr 2016 gleichmäßig auf alle 7,753 Milliarden Menschen der Erde verteilt, liegt das restliche Pro-Kopf-CO₂-Budget zwischen 85,6 und 111,4 Tonnen CO₂. Für die 83,24 Millionen in Deutschland lebenden Menschen ergibt sich damit ein CO₂-Budget zwischen 7129 und 9276 Millionen Tonnen CO₂. Allerdings wurden nach Zahlen des Umweltbundesamts im Jahr 2020 in Deutschland bereits 644 Millionen Tonnen CO₂ und zwischen 2016 und 2021 insgesamt 3437 Millionen Tonnen CO₂ emittiert [4]. Damit hat sich Ende des Jahres 2020 das für Deutschland verbleibende Budget auf lediglich 3433 bis 5580 Millionen Tonnen CO₂ reduziert.

Unter der Annahme, dass sich der Ausstoß des Jahres 2020 weiter linear reduziert, ist das deutsche CO₂-Budget in einem Zeitraum von 11 bis 17 Jahren aufgebraucht. Demnach muss Deutschland im Zeitraum 2032 bis 2038 CO₂-neutral werden.

Nach dem Beschluss des Bundesverfassungsgerichts wurde das deutsche Klimaschutzgesetz durch die letzte Bundesregierung überarbeitet. Seitdem gilt 2045 als Zieljahr für die deutsche Klimaneutralität. In der Politik und in der Öffentlichkeit herrscht seitdem die weitverbreitete Auffassung, wir müssten erst 2045 unsere CO₂-Emissionen auf null reduzieren. Die Klimaneutralität

umfasst allerdings auch andere Treibhausgase wie Methan oder Lachgas, deren Minimierung eine deutlich größere Herausforderung darstellt als die Reduktion von Kohlendioxid. Eine Verringerung der CO₂-Emissionen bis 2045 ist für das Einhalten des Pariser Klimaschutzabkommens daher nicht ausreichend.

Außerdem ist bereits heute absehbar, dass die CO₂-Emissionen in den Jahren 2021 und 2022 durch den wegfallenden Coroneffekt, durch steigende Gaspreise und den deutschen Kernenergieausstieg tendenziell ansteigen werden. Dadurch wird das verbleibende CO₂-Budget noch schneller aufgebraucht sein. Unter Berücksichtigung dieser Effekte ergeben sich die Jahre 2030 und 2035 als Zieljahre zum Einhalten des Pariser Klimaschutzabkommens, was in Bild 2 visualisiert ist. In dieser Studie werden daher im Folgenden 2030 und 2035 als Referenzjahre für die CO₂-Neutralität betrachtet. Ergänzend dazu werden auch Ergebnisse für die Jahre 2040 und 2045 angegeben.

An dieser Stelle soll allerdings noch einmal ausdrücklich darauf hingewiesen werden, dass das Erreichen der CO₂-Neutralität nach dem Jahr 2035 nicht ausreichend ist, um das Pariser Klimaschutzabkommen einzuhalten. Vermutlich ist damit auch kein verfassungskonformer Klimaschutz möglich.

Entwicklung des Gesamtenergiebedarfs

Trotz der bisherigen Bemühungen im Rahmen der Energiewende ist der heutige Energiebedarf Deutschlands weiterhin stark von fossilen Energieträgern geprägt. Lediglich etwa 19,3 % des Endenergiebedarfs werden durch erneuerbare Energien gedeckt [5]. Zum Erreichen der Klimaschutzziele müssen die Sektoren Verkehr, Gebäude und Industrie vollständig durch erneuerbare

Bild 3 Rahmenbedingungen der untersuchten Szenarien, zentrale Kenngrößen des Gebäude- und Verkehrssektors im Jahr 2035 und relative Änderungen der Energiebedarfe einzelner Bereiche von 2035 gegenüber heute.

Energiebedarfspfade		<i>mutlos</i>	<i>ambitioniert</i>	<i>visionär</i>
Rahmenbedingungen	Zulassungsstopp für Verbrenner	2035	2025	2025
	Einbaustopp für fossile Kessel	2035	2025	2025
	Sanierungsquote	1 %/a	1,5 %/a	2 %/a
Anzahl	Wärmepumpen	8,1 Mio. 31 %	11,6 Mio. 44 %	11,6 Mio. 44 %
	Elektroautos	18,9 Mio. 43 %	31,0 Mio. 70 %	23,3 Mio. 66 %
Energiebedarf	Flug- und Güterverkehr	± 0 % -12 %	± 0 % -39 %	-25 % -50 %
	Bahn- und Busverkehr	- 3 % -24 %	- 3 % -46 %	+21 % -41 %
	Industrie	- 4 %	-13 %	-22 %

Energien versorgt werden. Diese Studie stellt den Energiebedarf und dessen klimaneutrale Deckung für 3 Szenarien zu 4 unterschiedlichen Zeitpunkten gegenüber. Sie sind durch unterschiedlich antizipierte gesellschaftliche und politische Zielsetzungen charakterisiert und werden folglich *mutlos*, *ambitioniert* und *visionär* genannt. Bild 3 vergleicht die Rahmenbedingungen der Szenarien sowie zentrale Kenngrößen des Gebäude- und Verkehrssektors für eine Klimaneutralität im Jahr 2035. Zudem sind die relativen Änderungen des Energiebedarfs ausgewählter Bereiche von 2035 gegenüber heute dargestellt.

Im Szenario *mutlos* stagniert die Sanierungsrate im baulichen Wärmeschutz auf dem derzeitigen Niveau von etwa 1 %/a. In der *ambitionierten* Betrachtung wird eine mittlere Sanierungsquote von 1,5 %/a erreicht, wohingegen im Szenario *visionär* jährlich etwa 2 % der Gebäude saniert werden. In Verbindung mit den Sanierungsmaßnahmen erfolgt eine fundamentale Änderung der Beheizungsstruktur der Gebäude. Diese wird durch einen Einbaustopp von neuen Gas- und Ölkesseln im Jahr 2035 (*mutlos*) bzw. 2025 (*ambitioniert* und *visionär*) eingeleitet. Während aktuell rund 1 Mio. Wärmepumpen installiert sind, werden es im Jahr 2035 8,1 Mio. bis 11,6 Mio. sein.

Wie im Gebäudesektor unterscheiden sich die Szenarien im Verkehrssektor hinsichtlich des Zeitpunkts eines Zulassungsstopps von neuen Verbrennern im Jahr 2035 bzw. 2025. Aufgrund der später eingeführten Ordnungsmaßnahme im Szenario *mutlos* ist der Anteil der Elektrofahrzeuge im PKW-Bereich am Gesamtbestand um 28 bzw. 23 Prozentpunkte niedriger als

in den ehrgeizigeren Szenarien. In der *visionären* Betrachtung geht darüber hinaus der Flugverkehr und damit der Bedarf auf 75 % des heutigen Niveaus zurück. Zudem wird bei diesem Szenario angenommen, dass die Neuzulassungen im LKW- und PKW-Bereich gegenüber den anderen Szenarien um 25 Prozentpunkte niedriger ausfallen. Dies hat direkte Auswirkungen auf den Energiebedarf dieser Verkehrsbereiche. Die zusätzliche Verlagerung des Individualverkehrs hin zum öffentlichen Nah- und Fernverkehr wird durch einen weiteren Anstieg im Bahn- und Busverkehr berücksichtigt.

Im Industriesektor unterscheiden sich die Szenarien in der Nutzung von Einsparungspotenzialen. So liegt der Gesamtenergiebedarf im Szenario *mutlos* etwa 10 Prozentpunkte über und im Szenario *visionär* ca. 10 Prozentpunkte unter dem Bedarf des Szenarios *ambitioniert*.

Bild 4 stellt die Aufteilung des Gesamtenergiebedarfs im Jahr 2019 dem Bedarf des Energieverbrauchspfad *ambitioniert* im Jahr 2035 gegenüber. Sanierungsmaßnahmen und die Umstellung der Beheizungsstruktur verringern den Energiebedarf im Gebäudesektor um ca. 36 %. Die Umstellung des PKW- und LKW-Bestands auf alternative, effizientere Antriebssysteme führt in Summe mit ca. 40 % gegenüber 2019 zu der größten Bedarfsreduktion. Im Industriesektor resultiert die Umstellung der Produktionstechniken und die prozessübergreifende Steigerung der Energieeffizienz in einem Rückgang des Bedarfs von ca. 13 %. Verschiedene Effizienzmaßnahmen in den einzelnen Sektoren tragen dazu bei, dass der Energiebedarf Deutschlands

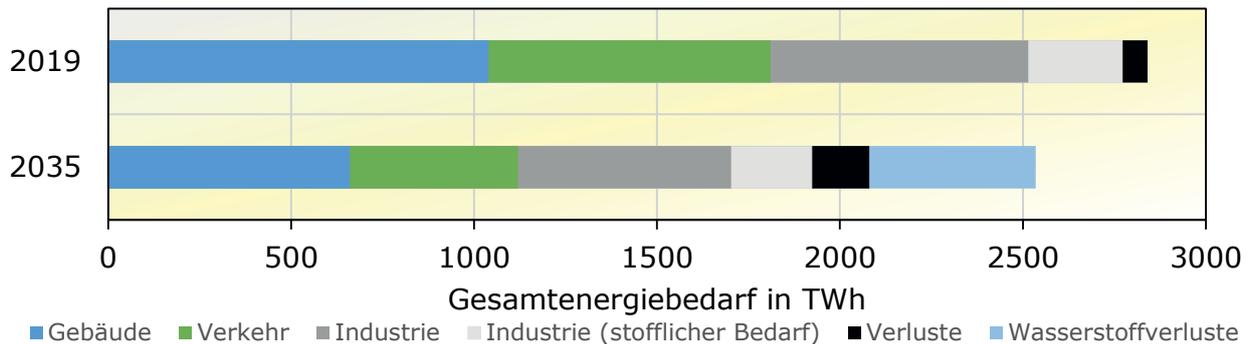


Bild 4 Sektorale Aufteilung des Energiebedarfs im Jahr 2019 und 2035 für das Szenario ambitioniert (Umwelt- und Abwärme sind nicht dargestellt, Wasserstoffverluste: Verluste bei der Herstellung von Wasserstoff und dessen Folgeprodukten; Daten für 2019 [6]).

fortlaufend sinkt. Im Jahr 2045 ist dieser im Vergleich zum Jahr 2035 um ca. 15 Prozentpunkte niedriger.

Weiterhin ist der stoffliche bzw. nicht-energetische Bedarf dargestellt. Er findet z. B. in der chemischen Industrie Anwendung. Durch die Nutzung von Einsparungspotenzialen und Recycling-Prozessen ist mit zunehmender Zeit auch hier ein leichter Rückgang zu erwarten.

Mit der Elektrifizierung des Energiebedarfs und der Umstellung der Energiebereitstellung steigen die Verluste im Energiesystem Deutschlands an. In dieser Studie sind darin u. a. Netz- und Übertragungsverluste, Speicherverluste sowie Abregelungsverluste enthalten.

Tabelle 2 stellt den Energiebedarf inklusive des stofflichen Bedarfs sowie der angenommenen Verluste für die unterschiedlichen Szenarien in Abhängigkeit vom Zeitpunkt der Klimaneutralität dar (vgl. auch Abbildung 2).

Aufgrund der verschiedenen Rahmenbedingungen variiert der Energiebedarf. Die Unterschiede zwischen den Szenarien *mutlos* und *visionär* liegen im Bereich von 550 TWh bis 710 TWh.

Um die gesamten Treibhausgasemissionen Deutschlands auf null zu senken, muss letztendlich der Energieverbrauch in allen Sektoren klimaneutral durch erneuerbare Energien gedeckt werden. Für ein rechtzeitiges Erreichen der Klimaneutralität in den Jahren 2030 und 2035 werden grüner Wasserstoff und dessen Folgeprodukte für den Weiterbetrieb der restlichen Verbrenner und Gaskessel benötigt oder finden Anwendung in der Industrie.

Beitrag der Photovoltaik zur Klimaneutralität

Um die Klimaneutralität des Energiesektors in Deutschland zu realisieren, sind zahlreiche parallele Strategien notwendig. Neben dem ambitionierten Ausbau der erneuerbaren Energien müssen alle Sektoren möglichst weitgehend elektrifiziert werden. Dies geht mit einem hohen Bedarf an Fachkräften einher. Darüber hinaus müssen Elektrolyseure im In- und Ausland errichtet und Wasserstoffimportrouten etabliert werden.

Der nachfolgende Abschnitt soll der zentralen Fragestellung der Studie nachgehen: Wie viel Photovoltaik (PV) ist in Deutschland zum Erreichen des Pariser Klimaschutzabkommens erforderlich? Gleichzeitig zeigt er auf, welche Faktoren den erforderlichen Solarstromausbau beeinflussen. Sofern nicht anders angegeben, beziehen sich die Berechnungsergebnisse auf die Rahmenbedingungen des Referenzszenarios (Tabelle 3).

Ausgehend von diesem Referenzszenario werden im Folgenden die Auswirkungen der davon abweichenden Rahmenbedingungen näher analysiert.

Was sind die Säulen einer klimaneutralen Energieversorgung?

Die deutsche Energieversorgung basiert derzeit noch zu ca. 82 % auf fossilen Energieträgern, wie Bild 5 verdeutlicht. Mit etwa 74 % wird ein Großteil dieser Energieträger importiert [6]. Die erneuerbaren Energien deckten im Jahr 2020 lediglich 454 TWh der benötigten 2579 TWh. Die Stromerzeugung aus Windrädern und Solaranlagen lag bei 182 TWh. Auf die Biomasse, die in allen Sektoren genutzt wird und derzeit den Großteil der erneuerbaren Energieversorgung Deutschlands ausmacht, entfielen 243 TWh. Ähnlich wie bei den anderen erneuer-

Szenario	2030	2035	2040	2045
<i>mutlos</i>	3258 TWh	2951 TWh	2649 TWh	2420 TWh
<i>ambitioniert</i>	2894 TWh	2536 TWh	2308 TWh	2159 TWh
<i>visionär</i>	2611 TWh	2244 TWh	2016 TWh	1869 TWh

Tabelle 2 stellt den Energiebedarf inklusive des stofflichen Bedarfs sowie der angenommenen Verluste für die unterschiedlichen Szenarien in Abhängigkeit vom Zeitpunkt der Klimaneutralität dar (vgl. auch Bild 2). Aufgrund der verschiedenen Rahmenbedingungen variiert der Energiebedarf. Die Unterschiede zwischen den Szenarien *mutlos* und *visionär* liegen im Bereich von 550 TWh bis 710 TWh.

Zieljahr zum Erreichen der CO₂-Neutralität	2035
Energieverbrauchspfad	<i>ambitioniert</i> (vgl. Bild 3)
Windenergieausbau im Zieljahr	Erschließung des Potenzials der Windkraft an Land von 200 GW [7] und 70 GW Windkraft auf See [8].
Anteil des importierten Wasserstoffs am gesamten Wasserstoffbedarf	60 %

Tabelle 3 Annahmen des Referenzszenarios.

baren Energien Wasserkraft, Geo- oder Solarthermie stagnierte der Zubau der Bioenergie in den vergangenen 10 Jahren. Dies ist unter anderem auf das beschränkte Kostensenkungspotenzial dieser Technologien zurückzuführen. Ein deutlicher Anstieg der Nutzung dieser erneuerbaren Energien ist daher nicht zu erwarten.

Die zukünftige klimaneutrale Energieversorgung Deutschlands baut auf den Säulen Windkraft, Photovoltaik und Biomasse sowie auf dem Import von grünem Wasserstoff und dessen Folgeprodukten auf. Bild 6 stellt für die unterschiedlichen Zieljahre der Klimaneutralität den Beitrag der einzelnen Technologien zur Energieversorgung dar. Aufgrund der Kostenvorteile von Wind- und Solarstrom (vgl. [9], [10]) werden diese erneuerbaren Energien den größten Anteil an der Energieversorgung ausmachen. Wird das gesamte angenommene Potenzial der Windkraft erschlossen, kann diese ca. 850 TWh (580 TWh onshore und 273 TWh offshore) bereitstellen. Auf die Biomasse entfallen etwa 243 TWh. Die verbleibende Lücke zur vollständigen Deckung des Bedarfs in Höhe von 660 TWh (2030) bzw.

447 TWh (2045) muss durch die Photovoltaik gedeckt werden. Fossile Energietechnik, die in den nächsten 10 Jahren nicht getauscht werden kann, muss mit grünem Wasserstoff betrieben werden. Die erforderlichen Wasserstoffimportmengen sind umso größer, je früher die CO₂-Neutralität angestrebt wird.

Wie viel Photovoltaikleistung wird zur CO₂-Neutralität benötigt?

Um den Energiebedarf zu decken, müssen alle regenerativen Energiequellen genutzt werden. Photovoltaikanlagen haben im Vergleich zu anderen Technologien verschiedene Vorteile. Sie sind kostengünstig [9], flexibel skalierbar und haben eine hohe Akzeptanz [11]. Aus diesen Gründen fällt der Photovoltaik die Aufgabe zu, die Bedarfslücke zur CO₂-Neutralität zu schließen. Das technische Potenzial der Photovoltaik in Deutschland wird mit 530 GW bis 3100 GW abgeschätzt [12]–[14].

Aus den erforderlichen Solarstrommengen lässt sich die in Deutschland zu installierende Photovoltaikleistung bestimmen. Hierbei wird der mittlere jährliche Ertrag mit 950 kWh/kW veranschlagt [15]. Die daraus resultierende Photovoltaikleistung ist

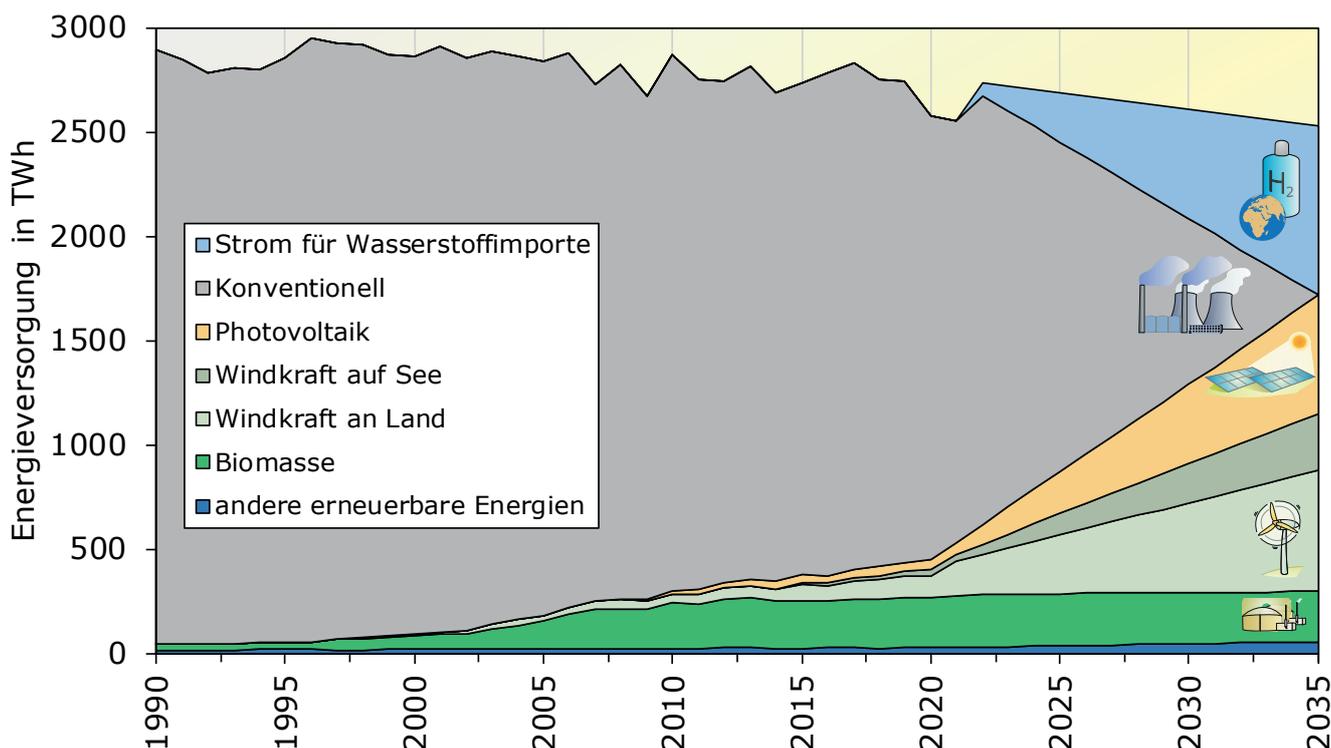


Bild 5 Entwicklung des Energieverbrauchs und der erneuerbaren Energieversorgung zum Erreichen der CO₂-Neutralität im Jahr 2035 (ohne Nutzung der thermischen Verluste in den Wärmekraftwerken, inkl. nicht-energetischem Bedarf, Referenzszenario).

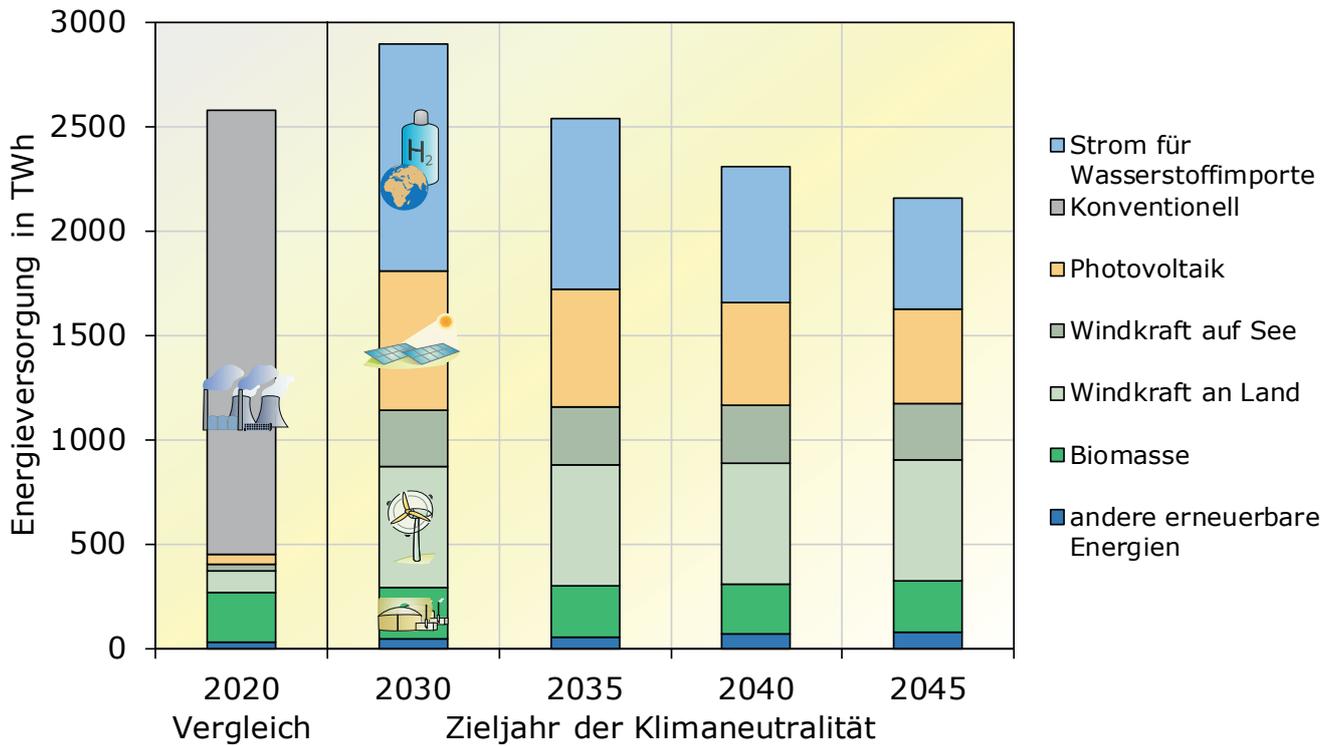


Bild 6 Deckung des Gesamtenergiebedarfs zu unterschiedlichen Zeitpunkten der CO₂-Neutralität im Referenzszenario.



Bild 7 Erforderliche Photovoltaikleistung in Deutschland zum Erreichen der CO₂-Neutralität zwischen 2030 und 2045 im Referenzszenario.



in Bild 7 für die verschiedenen Zieljahre im Szenario *ambitioniert* dargestellt. Als Vergleichswert dient die Ende 2020 installierte Photovoltaikleistung.

Während im Jahr 2030 knapp 700 GW Photovoltaikleistung erforderlich sind, um den Energiebedarf decken zu können, sinkt bei einem späteren Erreichen der CO₂-Neutralität die notwendige Leistung. Dies ist z. B. auf den abnehmenden Energiebedarf aufgrund vermehrter Sanierungen oder auf den Austausch der fossilen Heizungen und Verbrennerfahrzeuge zurückzuführen. Bei einer noch Paris-konformen Dekarbonisierung bis zum Jahr 2035 beträgt die erforderliche Leistung 594 GW. Wird die CO₂-Neutralität erst 10 Jahre später angestrebt, werden rund 470 GW benötigt. Die Unterschiede in den erforderlichen Photovoltaikleistungen werden bei den späteren Zieljahren tendenziell kleiner.

Weshalb ist die Elektrifizierung des Verkehrs- und Wärmesektors wichtig?

Wie bereits beschrieben, muss Solarstrom die Bedarfslücke zwischen der Energiebereitstellung der anderen erneuerbaren Energiequellen und dem Energiebedarf decken. Neben dem Jahr zur Erreichung der klimaneutralen Energieproduktion hat auch der angenommene Energiebedarfspfad einen erheblichen Einfluss auf die zu installierende Photovoltaikleistung.

Bisher wurden lediglich die Ergebnisse für das Szenario *ambitioniert* betrachtet. Tabelle 4 stellt den notwendigen Photovoltaikausbau zusätzlich für die Energieverbrauchspfade *mutlos* und *visionär* in den jeweiligen Zieljahren dar. Für das Jahr 2035 resultiert ein Photovoltaikausbaubedarf von rund 370 GW (*visionär*) bis 740 GW (*mutlos*).

Das Szenario *mutlos* ist von einem geringen Technologiewechsel bei Fahrzeugen und bei der Heizungstechnik geprägt. Für die CO₂-Neutralität müssen die fossilen Brennstoffe durch umweltfreundliche Produkte, wie z. B. grünen Wasserstoff oder dessen Folgeprodukte, ersetzt werden. Deren Bedarf liegt im Vergleich zum Szenario *ambitioniert* um ca. 33 % höher. Dies wirkt sich direkt auf den erforderlichen Photovoltaikausbau aus. Die Elektrifizierung der Sektoren Mobilität und Wärme steigert dabei die Wandlungseffizienz und reduziert damit den Energiebedarf. Folglich ist auch eine geringere Photovoltaikleistung erforderlich. Gegenüber dem Szenario *ambitioniert* sinkt der Photovoltaikausbau beim Szenario *visionär* durch weitere Energieeinsparungen um knapp 30 %. Der Elektrifizierung aller Sektoren kommt somit eine besondere Bedeutung zu. Es ist daher zwingend notwendig, Öl- und Gaskessel überwiegend durch Wärmepumpen sowie Verbrennerfahrzeuge durch Elektroautos zu ersetzen. Dies hat einen direkten Einfluss auf die benötigte Photovoltaikleistung in den jeweiligen Zieljahren.

Szenario	2030	2035	2040	2045
<i>mutlos</i>	823 GW	738 GW	655 GW	592 GW
<i>ambitioniert</i>	695 GW	594 GW	521 GW	471 GW
<i>visionär</i>	490 GW	372 GW	289 GW	232 GW

Tabelle 4 Einfluss der Energieverbrauchspfade auf die in Deutschland erforderliche Photovoltaikleistung bei unterschiedlichen Zieljahren zum Erreichen der CO₂-Neutralität (Rahmenbedingungen: max. Windenergieausbau, Wasserstoffimportanteil 60 %).

Kann der Wasserstoff ausschließlich in Deutschland produziert werden?

Durch den sehr kurzen Zeitraum, der zum Umbau des Energiesystems bleibt, bilden der grüne Wasserstoff und dessen Folgeprodukte eine wichtige Brücke zwischen der bestehenden fossilen Anlagentechnik und der klimaneutralen Zukunft. Stofflich gebundene Energieträger haben heute einen Importanteil von 74 % [6]. Mit dem Aufbau einer Wasserstoffproduktion in Deutschland besteht die Chance, diesen Importanteil deutlich zu reduzieren. Der Wasserstoffbedarf in den einzelnen Szenarien ist in Tabelle 5 dargestellt und dem dafür notwendigen Strombedarf zur CO₂-neutralen Produktion gegenübergestellt.

Dem Referenzszenario liegt die Annahme zugrunde, dass 60 % des benötigten Wasserstoffs und der darauf basierenden Folgeprodukte importiert werden. Dies entspricht einem Anteil von 24 % des Gesamtenergiebedarfs. Damit werden 40 % des Wasserstoffs in Deutschland produziert. Soll der Importanteil reduziert werden, steigt der zur Wasserstoffherzeugung erforderliche Strombedarf in Deutschland. Kann die Windkraft nicht über das

betrachtete Potenzial hinaus ausgebaut werden, kommt lediglich Photovoltaik zur weiteren Bedarfsdeckung in Frage.

Bild 8 verdeutlicht, wie sehr die im Jahr 2035 erforderliche Photovoltaikleistung vom Wasserstoffimportanteil abhängt. Transportverluste beim Wasserstoff wurden hierbei vernachlässigt. Erfolgt die grüne Wasserstoffproduktion ausschließlich in Deutschland, beträgt der Importanteil 0 %. In dem Fall müsste der Photovoltaikausbau stark ansteigen, sodass je nach Szenario Photovoltaikanlagen mit einer Gesamtleistung von 1146 GW bis 1890 GW zu installieren wären. Dies entspricht etwa dem 2,5- bis 3-fachen des Ausbaubedarfs im Referenzszenario. Soll weniger als die Hälfte des Wasserstoffbedarfs importiert werden, muss im Referenzszenario eine Photovoltaikleistung von mehr als 700 GW bis 2035 installiert werden. Dies entspricht mehr als einer Verelffachung der im Jahr 2020 installierten Photovoltaikleistung.

Die globalen Erzeugungskapazitäten für die Herstellung von grünem Wasserstoff sind bisher gering und die Transportmög-



Szenario (2035)	Wasserstoffbedarf (H ₂)	Strombedarf für H ₂
<i>mutlos</i>	1207 TWh	1825 TWh
<i>ambitioniert</i>	906 TWh	1362 TWh
<i>visionär</i>	816 TWh	1227 TWh

Tabelle 5 Einfluss der Energieverbrauchspfade auf die in Deutschland erforderliche Mengen an Wasserstoff sowie der dafür notwendige regenerative Strombedarf (Zieljahr der CO₂-Neutralität: 2035, maximaler Windenergieausbau).

lichkeiten begrenzt. Daher sind derzeit keine großen Importmengen an grünem Wasserstoff verfügbar.

Um dies jedoch in den Zieljahren zu gewährleisten, müssen die Importländer bereits heute die dazu erforderlichen Investitionen tätigen und helfen, geeignete Strukturen zu etablieren. Gleichzeitig gilt es im Inland die Wasserstoffinfrastruktur aufzubauen. Mit den fluktuierenden erneuerbaren Energien werden zeitweise sehr hohe Stromüberschüsse anfallen, die auch zur Produktion von grünem Wasserstoff oder dessen Folgeprodukte genutzt werden können.

Je nach Höhe des Wasserstoffimportanteils verlagert Deutschland einen Teil seiner Verantwortung in die Importländer. Eine deutliche Steigerung des leitungsgebundenen Stromimports wird in dieser Studie für die gewählten Zieljahre als nicht realistisch angesehen. Die Realisierungszeiten für transeuropäische Übertragungsleitungen sind viel zu hoch und aufgrund der feh-

lenden Akzeptanz für diese Trassen ist ein Aufbau großer Übertragungskapazitäten zu Ländern des Sonnengürtels fraglich.

Die notwendigen Erzeugungskapazitäten zur Herstellung des grünen Wasserstoffs und dessen Folgeprodukten im Ausland sind beachtlich. Dem Bild 9 sind beispielhaft die ausländischen Erzeugungskapazitäten für das Szenario *ambitioniert* zu entnehmen, die zur Produktion des nur nach Deutschland exportierten grünen Wasserstoffs notwendig werden. Je nach Standort variiert der erzielbare spezifische Ertrag. Während in Südspeanien Werte von bis zu 1750 kWh/kWp erreichbar sind, liegt dieser Wert mit bis zu 2000 kWh/kWp in Saudi-Arabien nochmal höher. Dies hat direkte Auswirkungen auf die zu installierende Photovoltaikleistung im Exportland. Im Referenzfall mit einem deutschen Importanteil von 60 % variiert die Leistung zwischen etwa 400 GW und 500 GW. Dies entspricht einer Fläche von 4000 km² bis 5000 km², wenn den Photovoltaikkraftwerken ein Flächenbedarf von 10 km²/GW unterstellt wird. Dies entspricht

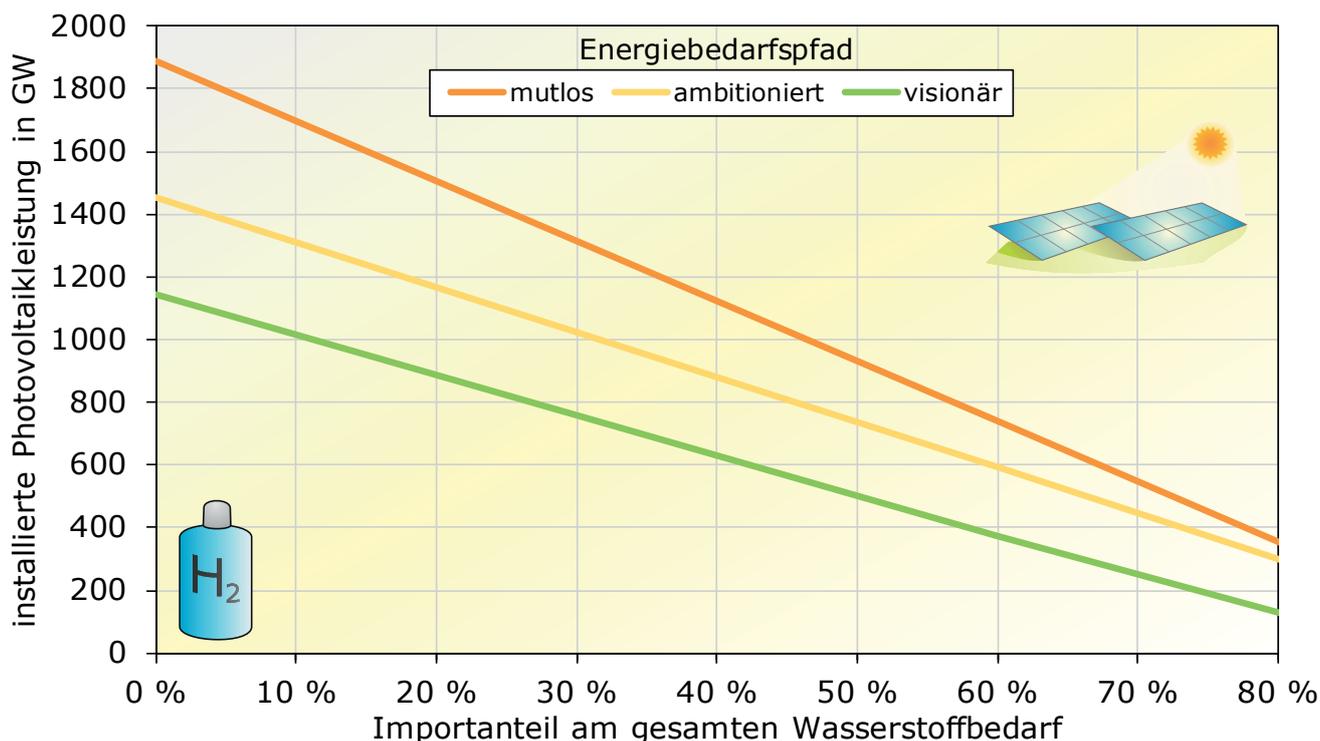


Bild 8 Einfluss des Wasserstoffimportanteils auf die erforderliche Photovoltaikleistung in Deutschland zum Erreichen der CO₂-Neutralität im Jahr 2035.

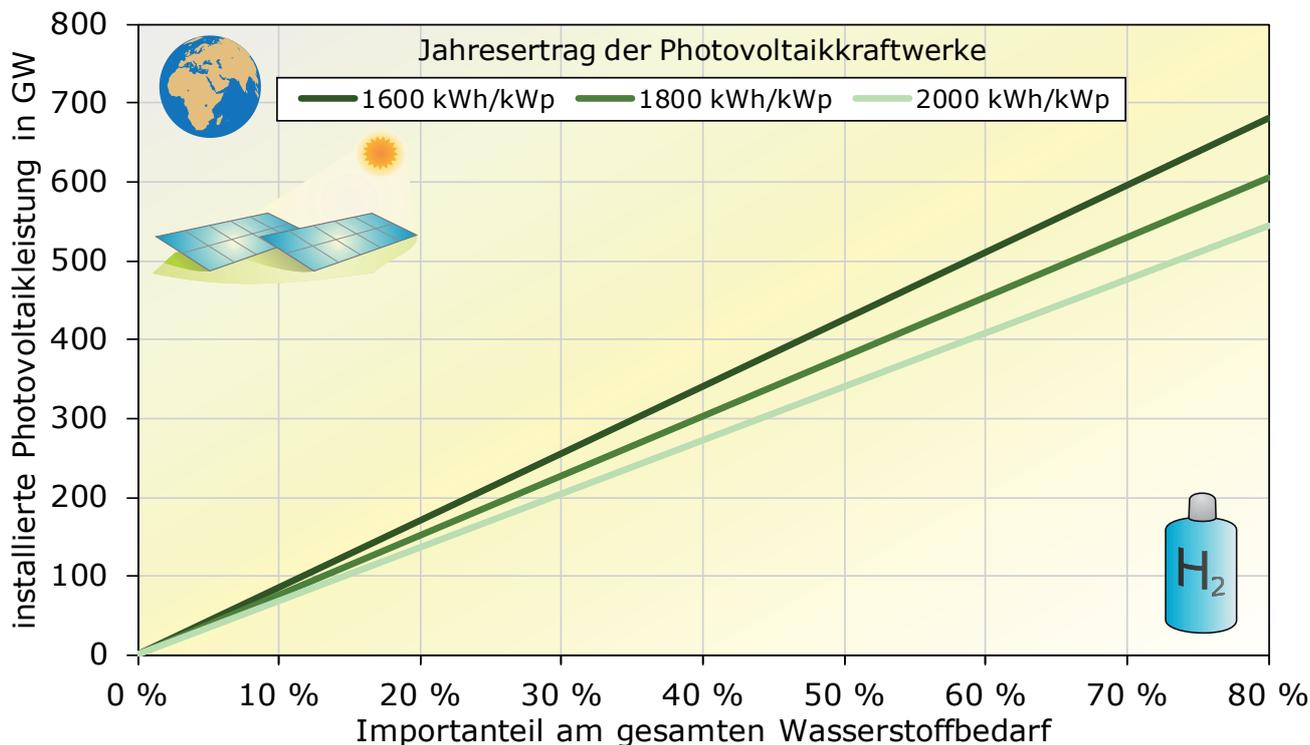


Bild 9 Einfluss des Wasserstoffimportanteils und des spezifischen Ertrags auf die in den Exportländern erforderliche Photovoltaikleistung zum Erreichen der CO₂-Neutralität im Jahr 2035 (Rahmenbedingungen: Szenario *ambitioniert*).

rund ein Prozent der Landesfläche Marokkos, allein für die von Deutschland benötigten Wasserstoffimporte. Es bleibt festzuhalten, dass die in Deutschland notwendige Photovoltaikleistung stark vom Ort der Wasserstoffproduktion und damit von dessen Importanteil abhängig ist.

Weshalb muss die Windkraft in Deutschland stark ausgebaut werden?

Windenergie ist eine zentrale Säule der Energiewende. Da die Akzeptanz der Windenergie in den vergangenen Jahren immer wieder thematisiert wurde, soll in diesem Abschnitt der Frage nachgegangen werden, wie ein stockender Windenergieausbau den erforderlichen Photovoltaikausbau beeinflusst.

2020 waren in Deutschland 29 608 Windkraftanlagen an Land mit einer Gesamtleistung von 55 GW installiert [16]. Dies entspricht 0,7 % der Landesfläche [17]. Es wird davon ausgegangen, dass etwa 5,3 % bis 13,8 % Deutschlands für die Nutzung durch Windkraft geeignet sind [7], [17], [18]. Dies ergibt bei 21 MW/km² ein Potenzial von etwa 400 GW bis 1000 GW an Land. Es besteht große Einigkeit darüber, dass davon 200 GW bzw. 2 % der Landesfläche gehoben werden können [18], [19]. Darüber hinaus besteht ein Potenzial für die Windkraft auf See von etwa 50 GW bis 70 GW [8]. In den Szenarien dieser Studie wird daher von einem Windpotenzial an Land von 200 GW und auf dem Meer von 70 GW ausgegangen.

Im Folgenden werden beispielhaft die Ergebnisse des Szenarios *ambitioniert* mit einem Wasserstoffimportanteil von 60 % für das Zieljahr 2035 betrachtet. Die Windkraft und Photovoltaik

decken bis dahin 82 % des Energiebedarfs und erzeugen in Summe 1417 TWh. Der Großteil davon entfällt auf Windkraftanlagen an Land und auf See. Dies kann mit den unterschiedlichen Volllaststunden begründet werden. Während Solaranlagen im Mittel auf 950 h/a kommen, sind die Volllaststunden von Windkraftanlagen um ein Vielfaches höher. In dieser Studie wurden die zukünftigen Volllaststunden von Windkraftanlagen an Land mit 2900 h/a und die von Windkraftanlagen auf See mit 3900 h/a in Anlehnung an [12] abgeschätzt. Jedes Gigawatt Windkraft, das nicht errichtet wird, erfordert einen um 3 GW bis 4 GW höheren Photovoltaikausbau.

Dieser Zusammenhang wird auch in Bild 10 deutlich. Dargestellt ist die erforderliche Photovoltaikleistung, wenn lediglich die Hälfte der oben genannten potenziellen Windleistung installiert wird. Bei minimalem Ausbau der Windkraft muss fast die doppelte Photovoltaikleistung installiert werden.

Auch in anderen Studien herrscht Einigkeit darüber, dass die nahezu vollständige Erschließung des Windkraftpotenzials essentiell für das Gelingen der Energiewende ist. Ein schwächeln-der Windenergieausbau ist nur schwer durch einen Solarenergieausbau im größeren Maßstab zu kompensieren.

Warum ist ein Photovoltaikzubau unter 40 GW pro Jahr unzureichend?

Je früher die CO₂-Neutralität erreicht werden soll, desto mehr Photovoltaikanlagen sind erforderlich. Wird die zusätzlich zum Bestand notwendige Photovoltaikleistung auf den bis zur CO₂-Neutralität verbleibenden Zeitraum gleichmäßig verteilt,

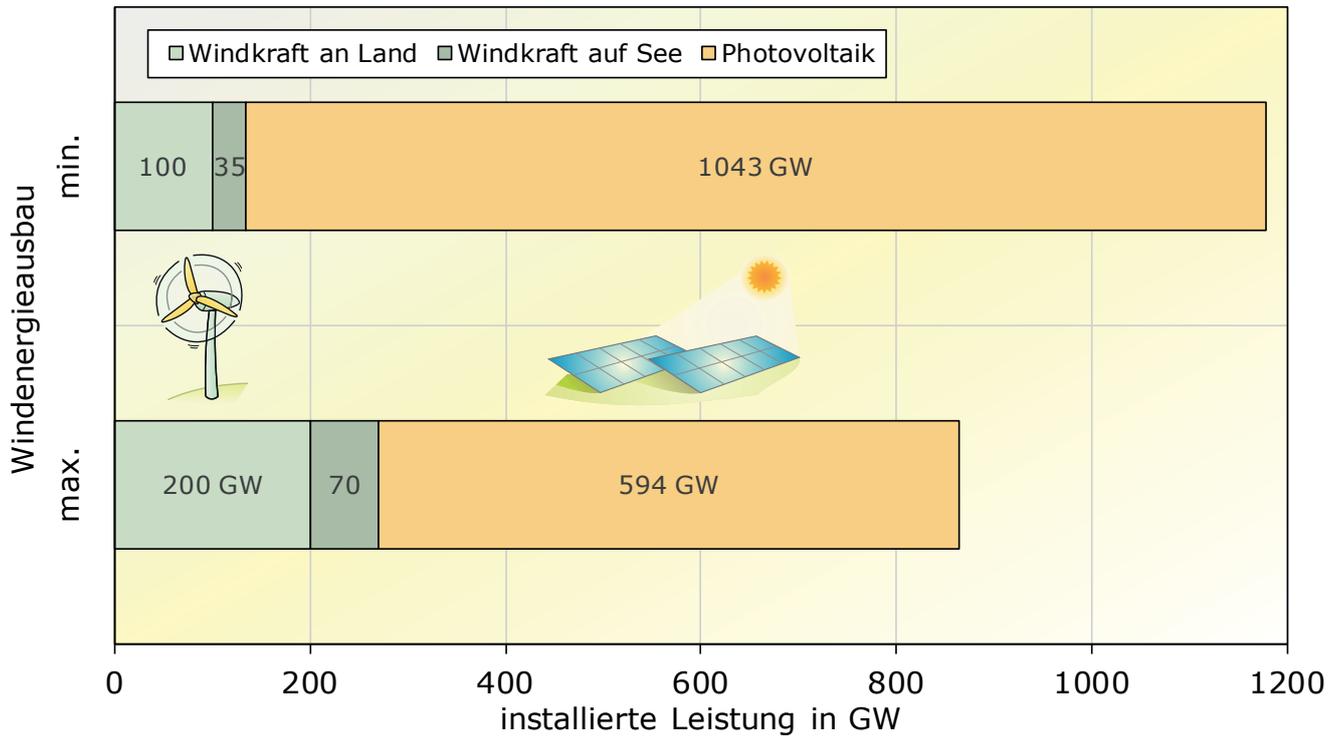


Bild 10 Einfluss des Windenergieausbaus auf die erforderliche Photovoltaikleistung in Deutschland zum Erreichen der CO₂-Neutralität im Jahr 2035 (Referenzszenario).

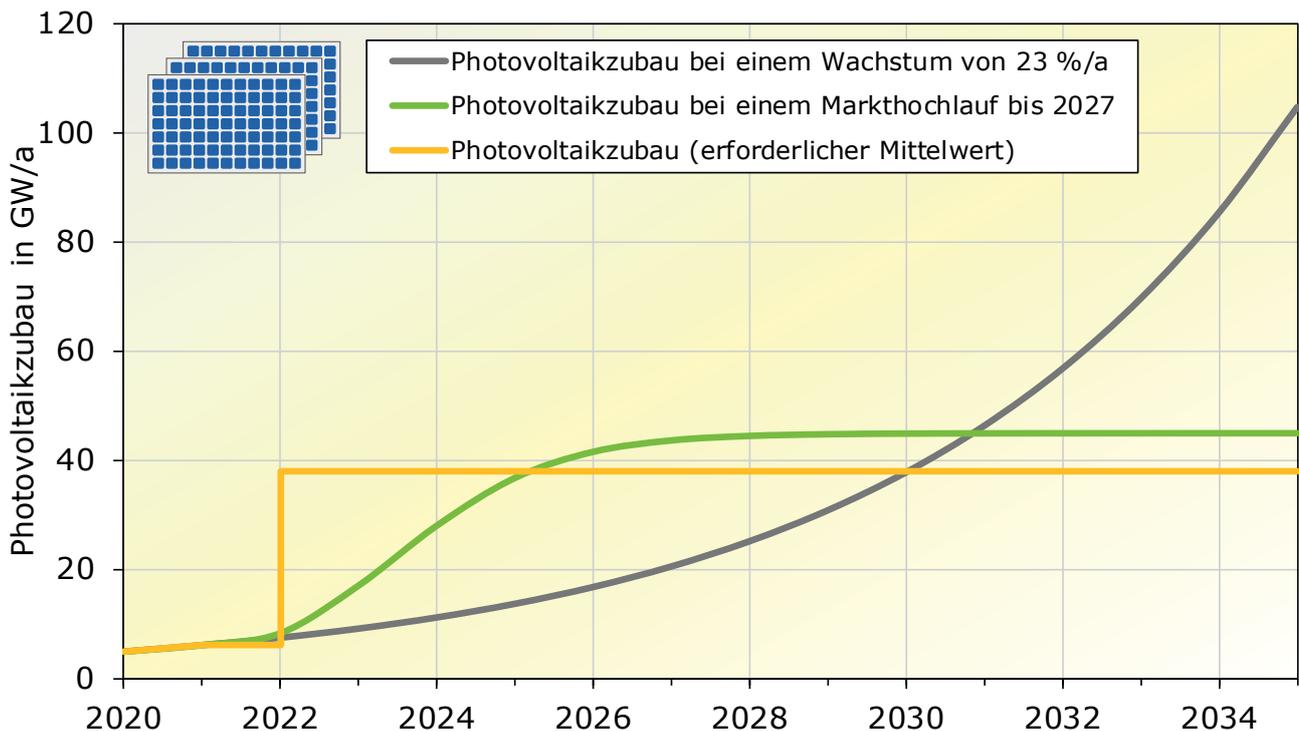


Bild 11 Pfade zur Steigerung des jährlichen Photovoltaikzubaus (netto) in Deutschland für das Referenzszenario (installierte Photovoltaikleistung im Zieljahr 2035 594 GW, Rahmenbedingungen: max. Windenergieausbau, Wasserstoffimportanteil 60 %).

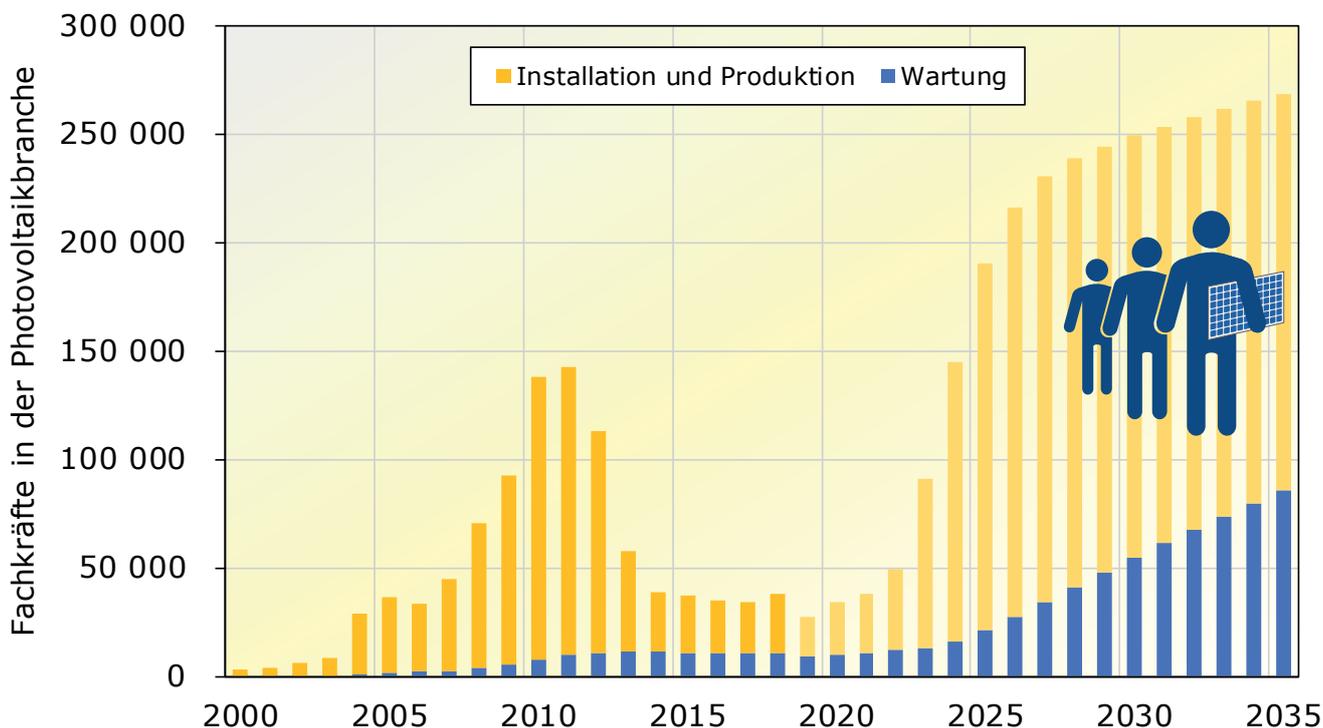


Bild 12 Fachkräfte für Installation, Produktion und Wartung der Photovoltaikanlagen. Historischer Verlauf der direkt und indirekt Beschäftigten nach [21] sowie künftiger Bedarf der direkt Beschäftigten für das Erreichen der CO₂-Neutralität im Jahr 2035 in Anlehnung an [20].

ergibt sich ein mittlerer Photovoltaikzubau pro Jahr. Bisher wurden in Deutschland Photovoltaikanlagen mit einer Leistung von insgesamt 59 GW errichtet. Im Referenzszenario mit dem Energieverbrauchspfad *ambitioniert* muss die installierte Photovoltaikleistung in den nächsten 14 Jahren um 535 GW steigen. Dies entspricht einem mittleren Zubau von rund 38 GW/a. Für das Zieljahr 2030 ergibt sich hingegen ein mittlerer Photovoltaikzubau von rund 71 GW/a (Nettozubau). Beides sind Vielfache des bisherigen Höchstwerts von 8,2 GW/a im Jahr 2012. Hinzu kommt der Ersatz von Photovoltaikanlagen, die das Ende ihrer Lebensdauer erreicht haben. Der Bruttozubau schließt neben dem Bau von Neuanlagen auch den Ersatz von Altanlagen ein.

In Bild 11 sind unterschiedliche Verläufe des Photovoltaikzubaus dargestellt. Die Fläche unter allen Kurven entspricht der installierten Leistung von 594 GW im Zieljahr 2035. Der ab 2022 rechnerisch notwendige Photovoltaikzubau von 38 GW/a ist durch die gelbe Linie dargestellt. Da eine sprunghafte Änderung im Jahr 2022 unwahrscheinlich ist, muss ein Markthochlauf eingeplant werden. Verzögerungen im Photovoltaikausbau müssen später durch einen höheren Zubau kompensiert werden, um insgesamt noch auf einen Ausbaustand zu kommen, der mit den Pariser Klimazielen konform ist.

Der graue Verlauf zeigt einen exponentiellen Verlauf mit einem jährlichen Zuwachs von 23 %. Dieser ist durch einen zunächst geringen Anstieg des Zubaus gekennzeichnet, welcher allerdings den Großteil des erforderlichen Photovoltaikzubaus auf

die letzten Jahre verschiebt. So steigt der jährliche Zubau ab dem Jahr 2032 auf über 50 GW/a an und erreicht im Zieljahr mit über 100 GW/a einen jährlichen Zubau, der weit über dem aktuellen Bestand liegt. Dieser Ausbaupfad ist aus mehreren Gründen nachteilig und nicht zu empfehlen. Zum einen steigt das Risiko der Verfehlung der Klimaschutzziele, wenn die immensen Zubauzahlen in den letzten Jahren nicht erreicht werden können. Zum anderen muss ein deutlicher Einbruch des Photovoltaikmarkts aufgrund eines Überangebots nach Erreichen der Klimaschutzziele vermieden werden.

Daher wird ein alternativer Photovoltaikausbaupfad mit einem Markthochlauf bis zum Jahr 2027 empfohlen (siehe grüne Linie in Bild 11). Dieser ambitionierte Markthochlauf erfordert bereits im Jahr 2023 einen Zubau von 17 GW/a. Bis zum Jahr 2027 muss der Photovoltaikzubau weiter auf 45 GW/a ansteigen. Der Vorteil von einem zunächst sehr ambitionierten Photovoltaikausbau ist, dass die Zubauzahlen später auf einem annähernd konstanten Niveau verweilen können. Damit nimmt der Photovoltaikmarkt eine Größenordnung an, die langfristig auch für den Ersatz von Altanlagen erforderlich ist. Für einen Paris-konformen Klimaschutz muss es der Bundesregierung daher gelingen, den Photovoltaikzubau noch in dieser Legislaturperiode auf ein Niveau von 40 GW/a zu steigern. Alle Zielsetzungen und Ambitionen der Parteien, die dahinter zurückbleiben, genügen vermutlich weder dem völkerrechtlich verbindlichen Pariser Klimaschutzabkommen noch dem Verfassungsrecht.



Wie viele Fachkräfte wird die Photovoltaikbranche beschäftigen?

Die oben skizzierten Mengen an Photovoltaikanlagen stellen bereits aus technischer Sicht eine Herausforderung dar. Hinzu kommt der Bedarf an Fachkräften, der sich aus dem Zubau ergibt. In Anlehnung an [20] wird im Folgenden der erforderliche Fachkräftebedarf aufgezeigt. Dabei wurden wesentliche Annahmen übernommen, allerdings Abweichungen bei den Annahmen zur inländischen Produktion von Photovoltaikkomponenten getroffen. Damit ergeben sich für die Wartung des Bestands im Mittel etwa 170 Vollzeitäquivalente (VZÄ) je GW, etwa 4100 VZÄ je GW/a beim Zubau und zusätzlich etwa 1700 VZÄ je GW/a in der Herstellung von Photovoltaikkomponenten.

Der ermittelte Fachkräftebedarf ist in Bild 12 für das Szenario *ambitioniert* entsprechend dem im vorangegangenen Abschnitt beschriebenen Markthochlauf bis 2027 dem historischen Verlauf nach [21] gegenübergestellt. In den nächsten Jahren muss mit einem starken Anstieg der benötigten Fachkräfte insbesondere im Bereich der Planung und Installation gerechnet werden. Der Zubau von knapp 37 GW/a im Jahr 2025 ist mit einem Bedarf an etwa 190 000 Personalstellen verbunden. Durch den zunehmenden Bestand an Photovoltaikanlagen ergibt sich ein wachsender Personalbedarf für die Wartung und Betriebsführung. Während es im Jahr 2021 noch etwa 11 500 Fachkräfte sind, erhöht sich deren Anzahl auf etwa 86 000 im Jahr 2035, welche einen Bestand von etwa 590 GW installierter Photovoltaikleistung instand halten.

Hier liegt auch der Schlüssel zu einem nachhaltigen Photovoltaikmarkt in Deutschland: Im Gegensatz zum starken Einbruch der Beschäftigtenzahlen ab dem Jahr 2012, stellt der zwischen 2021 und 2035 aufgebaute Photovoltaikbestand eine langfristige Perspektive für die Branche dar. Neben der Wartung der Bestandsanlagen wird sich der Zubau ab Mitte der Dreißigerjahre perspektivisch auf einem Niveau von etwa 20 GW/a bis 30 GW/a für den Ersatz von Altanlagen stabilisieren (Repowering).

Des Weiteren werden Fachkräfte in der Produktion der Photovoltaikkomponenten tätig sein. Wenn nur ein Fünftel der erforderlichen Komponenten in Deutschland hergestellt wird, dann ergibt sich ein Bedarf von etwa 14 000 Arbeitsplätzen in der Industrie. Die aktuellen Schwierigkeiten der globalen Lieferketten und der bessere ökologische Fußabdruck sind weitere Argumente, die für einen forcierten Aufbau einer heimischen Photovoltaikindustrie sprechen.

Verglichen mit den absoluten Beschäftigtenzahlen im Jahr 2018 von ca. 38 000 [22] ist der Anstieg auf über 250 000 enorm. Allerdings arbeiteten bereits in den Jahren 2010 bis 2012 im Mittel über 130 000 Menschen direkt oder indirekt in der deutschen Photovoltaikbranche. Wenn es gelingt, schnellstmöglich an dieses Niveau wieder anzuknüpfen, kann auch ein deutlich erhöhter Photovoltaikzubau realisiert werden. Hierbei ist es zwingend notwendig, durch eine groß angelegte Solarjoboffensive mit neuen Aus- und Weiterbildungsangeboten Fachkräfte in der Photovoltaikbranche zu qualifizieren, die den technischen Strukturwandel begleiten.

Schlussfolgerungen

1. Deutschland muss zwischen 2030 und 2035 kohlendioxid neutral werden, um das Pariser Klimaschutzabkommen einzuhalten. Dafür ist ein Photovoltaikausbau in Deutschland von 590 GW und eine Steigerung des jährlichen Zubaus auf 45 GW/a notwendig.
2. Die Energiebedarfssektoren Verkehr, Gebäude und Industrie müssen weitgehend elektrifiziert werden, um den Energiebedarf ausreichend senken zu können. Zusätzlich müssen Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz umgesetzt werden. Neuzulassungen von Verbrennerfahrzeugen sowie der Einbau von neuen Öl- und Gasheizungen müssen dafür möglichst schon im Jahr 2025 gestoppt werden.
3. Die Windkraft ist ein unersetzbarer Teil des Energiesystems. Das deutsche Windpotenzial mit 200 GW an Land und 70 GW offshore muss nahezu vollständig erschlossen werden. Maßnahmen zur Steigerung der Akzeptanz von Photovoltaik- und Windkraftanlagen in der Bevölkerung sind eine wesentliche Voraussetzung für das Gelingen der Energiewende.
4. Ohne importierten grünen Wasserstoff ist die Energiewende nicht realisierbar. Je schneller die CO₂-neutrale Energieversorgung erreicht werden soll, desto mehr wird sie von Wasserstoff und dessen Folgeprodukten geprägt sein. Mit dem Import von Wasserstoff verlagert Deutschland einen Teil seiner Verantwortung in die Exportländer. Der Importanteil sollte daher zukünftig so gering wie möglich gehalten werden. Diese Mengen haben einen großen Einfluss auf den notwendigen Photovoltaikausbau. Die Wasserstoffinfrastruktur ist zügig aufzubauen, um schnellstmöglich fossile Energieträger zu substituieren. Gleichzeitig müssen Importrouten etabliert werden.
5. Die Photovoltaik ist eine der tragenden Säulen der Energiewende und muss die Lücke zwischen dem zukünftigen Energiebedarf und den anderen Erneuerbaren schließen. Mit dem notwendigen Solarstromausbau wird die Photovoltaikbranche mit voraussichtlich mehr als 250 000 Arbeitsplätzen ein entscheidender Wirtschaftszweig Deutschlands. Umfangreichen Aus-, Um- und Weiterbildungsangebote müssen ausgebaut werden. Dies bietet auch vom Wandel betroffenen Wirtschaftszweigen eine neue Zukunftsperspektive.
6. Das Energiesystem braucht mehr Flexibilitätsoptionen. Zum Ausgleich der Erzeugung und der Nachfrage können beispielsweise Speicher oder intelligent gesteuerte Wärmepumpen und Elektrofahrzeuge notwendige Systemdienstleistungen erbringen. Es werden auch wasserstoffbasierte Langzeitspeicher für eine stabile Energieversorgung benötigt. Die dazu erforderlichen Speicherkapazitäten sind schnell aufzubauen.

Trotz der Widrigkeiten kann Deutschland noch zur Einhaltung des Pariser Klimaschutzabkommens beitragen. Dies erfordert allerdings eine sofortige Priorisierung des Klimaschutzes in der Politik und Gesellschaft. Es gilt keine weitere Zeit mehr zu verlieren.

► **Hinweis:** [...] sind Quellenangaben.

Quellenverzeichnis auf Anfrage: info@eh-bb.de