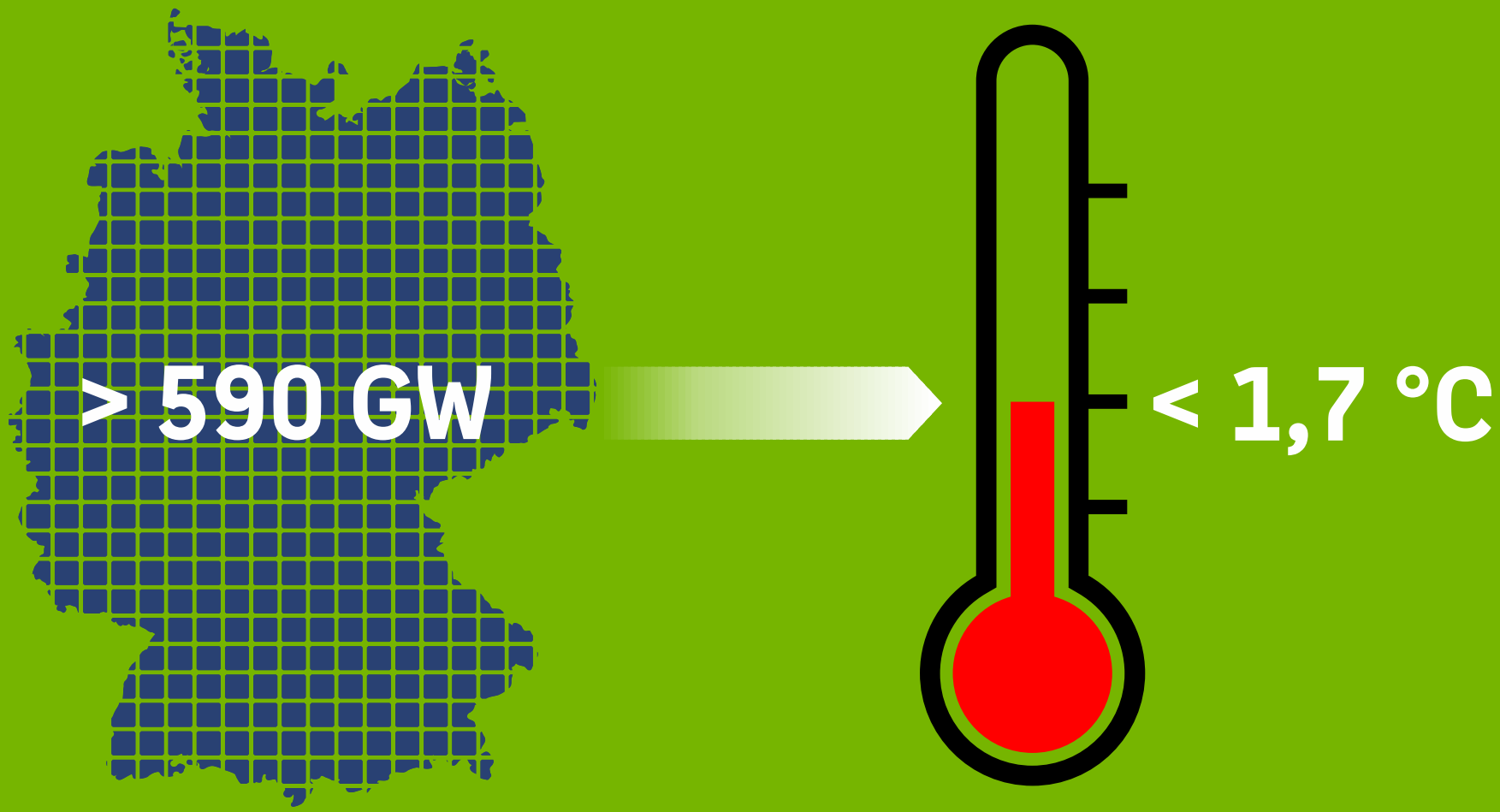
htw.
Hochschule für Technik
und Wirtschaft Berlin
University of Applied Sciences

Solarstromausbau für den Klimaschutz



Wie viel Photovoltaik ist in Deutschland zur Einhaltung des Pariser Klimaschutzabkommens erforderlich?

STUDIE

Solarstromausbau für den Klimaschutz

Wie viel Photovoltaik ist in Deutschland zur Einhaltung des Pariser Klimaschutzabkommens erforderlich?

AUTOR:INNEN

Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin
University of Applied Sciences

Prof. Dr. Volker Quaschning

Nico Orth

Dr. Johannes Weniger

Joseph Bergner

Bernhard Siegel

Michaela Zoll

Forschungsgruppe Solarspeichersysteme

Hochschule für Technik und Wirtschaft (HTW) Berlin

Wilhelminenhofstraße 75A

12459 Berlin

VERSION

Version 1.0 (November 2021)

WEBSEITE

https://pvspeicher.htw-berlin.de/solarstromausbau

INHALTSVERZEICHNIS

Vorwort 3

Kurzfassung 4

Wann muss Deutschland CO_2-neutral werden? 6

Entwicklung des Gesamtenergiebedarfs 8

Beitrag der Photovoltaik zur Klimaneutralität 10

Was sind die Säulen einer klimaneutralen Energieversorgung? 10

Wie viel Photovoltaikleistung wird zur CO_2-Neutralität benötigt? 11

Weshalb ist die Elektrifizierung des Verkehrs- und Wärmesektors wichtig? ... 12

Kann der Wasserstoff ausschließlich in Deutschland produziert werden? 12

Weshalb muss die Windkraft in Deutschland stark ausgebaut werden? 14

Warum ist ein Photovoltaikzubau unter 40 GW pro Jahr unzureichend? 15

Wie viele Fachkräfte wird die Photovoltaikbranche beschäftigen? 17

Diskussion der Methodik und Ergebnisse 18

Schlussfolgerungen 21

Literaturverzeichnis 23

Anhang 25

Vorwort

Die neue Bundesregierung beabsichtigt Deutschlands „Klima-, Energie- und Wirtschaftspolitik auf den 1,5-Grad-Pfad“ auszurichten [1]. Damit würde Deutschland das Pariser Klimaschutzabkommen erfüllen, das die Begrenzung der globalen Erwärmung auf deutlich unter 2 °C, möglichst 1,5 °C, fordert. Auch das Bundesverfassungsgericht hat das Einhalten dieser Ziele angemahnt. Das aktuelle deutsche Klimaschutzgesetz sowie der Koalitionsvertrag der Ampelparteien sehen allerdings nur die Klimaneutralität bis 2045 vor. Dies genügt nicht den Anforderungen des Pariser Klimaschutzabkommens. Deutschland müsste dafür seine Kohlendioxidemissionen bereits spätestens 2035 auf null zurückführen, um wenigstens einen Beitrag zur Begrenzung der globalen Erwärmung auf 1,7 °C zu leisten.

Mit dem Koalitionsvertrag versäumt die neue Bundesregierung den Ausbau der Windkraft und Solarenergie auf das Pariser Klimaschutzabkommen auszurichten, wie Bild 1 veranschaulicht. Die Pläne der neuen Bundesregierung sehen vor, die installierte Photovoltaikleistung bis 2030 auf 200 GW zu erhöhen. Hierzu sind in den nächsten Jahren Photovoltaikanlagen mit einer Leistung von durchschnittlich 16 GW/a zu installieren. Gleichzeitig wird ein Windkraftzubau von ca. 4 GW/a an Land und 2,5 GW/a auf See angestrebt [1].

Für eine Paris-konforme Ausrichtung der Energieversorgung sind etwa doppelt so hohe Zubauziele erforderlich, wie die Ergebnisse dieser Studie zeigen. Damit Deutschland spätestens 2035 kohlendioxidneutral werden kann, gilt es Windkraftanlagen mit einer Leistung von 15 GW/a zuzubauen. Die Photovoltaikleistung muss bis 2035 im Mittel um 38 GW/a steigen. Zwischen 2022 und 2030 sind es durchschnittlich 34 GW/a. Inwieweit unterschiedliche Rahmenbedingungen den erforderlichen Zubau beeinflussen, analysiert diese Studie. Dafür wurden verschiedene Szenarien für den Energieverbrauch, den Windkraftausbau und die Importmengen an grünem Wasserstoff betrachtet.

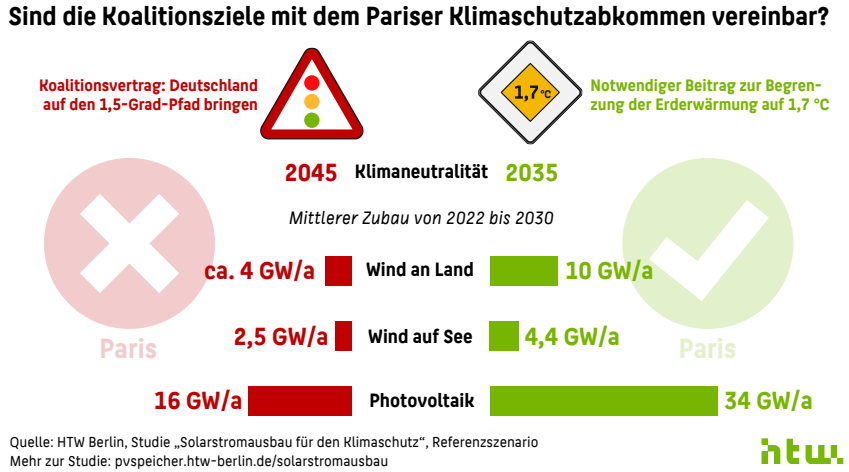


Bild 1 Die Koalitionsziele für den Wind- und Photovoltaikausbau sind für das Einhalten des Pariser Klimaschutzabkommens zu gering (Hochrechnung des Windausbaus an Land anhand des erwarteten Bruttostrombedarfs von 680 TWh bis 750 TWh im Jahr 2030 und der anderen erneuerbaren Erzeugungskapazitäten).

Die Ergebnisse verdeutlichen, dass die Wind- und Solarausbauziele der neuen Bundesregierung nicht mit dem angekündigten 1,5-Grad-Pfad kompatibel sind. Deutschland müsste dafür bereits 2030 klimaneutral werden. Die hierzu nötigen Zubauzahlen übersteigen die Ziele im Koalitionsvertrag um mehr als das Vierfache.

Die vorliegende Studie soll Journalist:innen und auch anderen interessierten Menschen die Möglichkeit geben, politische Vereinbarungen zum Klimaschutz und zur Energiewende auf ihre Kompatibilität zum Pariser Klimaschutzabkommen zu überprüfen. Damit möchten die Autor:innen dieser Studie einen Beitrag zur Transparenz beim Klimaschutz und bei der Energiewende leisten.

Kurzfassung

Aus den Zielsetzungen des Pariser Klimaschutzabkommens ergibt sich ein nationales Restbudget an Kohlendioxidemissionen. Daraus kann abgeleitet werden, bis zu welchem Zeitpunkt Deutschland klimaneutral werden muss. Für den 1,5-Grad-Pfad ergibt sich das Zieljahr 2030. Zur Begrenzung der Erderwärmung auf 1,7 °C muss Deutschland bis spätestens 2035 die Klimaneutralität erreichen.
Im Jahr 2020 deckten erneuerbare Energien gerade einmal 19,3 % des deutschen Endenergiebedarfs [2]. Dieser Anteil muss zur Einhaltung des Pariser Klimaschutzabkommens spätestens in 15 Jahren auf 100 % gesteigert werden. Wie viel Photovoltaik in Deutschland dazu erforderlich ist, untersucht die vorliegende Studie.

Kernergebnisse der Studie „Solarstromausbau für den Klimaschutz“

- Deutschland muss zwischen 2030 und 2035 kohlendioxidneutral werden, um das Pariser Klimaschutzabkommen einzuhalten.
- Alle Sektoren müssen weitgehend elektrifiziert werden, um den Energiebedarf ausreichend senken zu können.
- Ab 2025 sollten keine Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor neu zugelassen und keine Gas- oder Ölkessel neu eingebaut werden.
- Die installierte Windkraftleistung muss möglichst auf 200 GW an Land und 70 GW auf See ausgebaut werden.
- Ohne importierten grünen Wasserstoff ist die Energiewende in der Kürze der Zeit nicht realisierbar.
- Der Zubau der Photovoltaik muss erheblich gesteigert werden, von derzeit 6 GW/a auf 45 GW/a im Referenzszenario. Damit würde die installierte Photovoltaikleistung von derzeit 59 GW auf 590 GW verzehnfacht werden.

Anhand von 3 verschiedenen Szenarien wurde der zukünftige Energiebedarf Deutschlands und der Wechsel zu fossilfreien Technologien modelliert. Darauf aufbauend wurden ein kohlendioxidneutrales Energiesystem entwickelt und die dazu erforderlichen Ausbaumengen der erneuerbaren Energien bestimmt. Bild 2 stellt die Ergebnisse des in der Studie betrachteten Referenzszenarios dar und fasst die wichtigsten Bausteine und Rahmenbedingungen für die klimaneutrale Energieversorgung zusammen. Die Grundlage ist die weitgehende Elektrifizierung der Sektoren Verkehr, Gebäude und Industrie. Aus Effizienzgründen muss die Anzahl der Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor sowie der Öl- und Gasheizungen drastisch reduziert werden. Stattdessen müssen batterieelektrische Fahrzeuge den Verkehrssektor prägen und Gebäude überwiegend von effizienten Wärmepumpen beheizt werden. Ab 2025 sollten in Deutschland daher keine neuen Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor zugelassen oder neue Heizungssysteme mit Gas- oder Ölkesseln installiert werden. Unter diesen Rahmenbedingungen steigt im betrachteten Referenzszenario die Anzahl der Elektroautos auf 31 Mio. im Jahr 2035. Gleichzeitig ersetzen bis dahin etwa 12 Mio. Wärmepumpen konventionelle Heizungssysteme.
Die Ergebnisse der Studie zeigen darüber hinaus, dass die Energiewende in der Kürze der Zeit ohne grünen Wasserstoff nicht realisierbar ist. Dieser wird vor allem in nicht oder nur schwer elektrifizierbaren Bereichen eingesetzt und muss fossile Brennstoffe ersetzen. Im Referenzszenario wurde berücksichtigt, dass 60 % des Bedarfs an Wasserstoff und dessen Folgeprodukten importiert werden. Damit verlagert Deutschland bereits einen nicht zu vernachlässigen Teil seiner Verantwortung zur Einhaltung des Pariser Klimaschutzabkommens in die Exportländer.

Neben grünem Wasserstoff stellt die Windkraft eine weitere Säule der zukünftigen Energieversorgung dar. Wie die Ergebnisse dieser Studie zeigen, wird die Windenergie im Jahr 2035 etwa die Hälfte des Gesamtenergiebedarfs Deutschlands decken. Die installierte Windkraftleistung ist hierzu auf 200 GW an Land und 70 GW auf See zu erhöhen.

Die Rolle der Photovoltaik ist es, die Lücke zwischen dem Energiebedarf und der Energiebereitstellung der anderen erneuerbaren Energien zu schließen. Darauf aufbauend wurde in dieser Studie der erforderliche Photovoltaikausbau ermittelt. Im Referenzszenario müssen bis 2035 Photovoltaikanlagen mit einer Leistung von insgesamt 590 GW installiert werden, wie Bild 3 veranschaulicht. Die in Deutschland installierte Photovoltaikleistung muss somit verzehnfacht werden. Hierzu ist ein schneller Markthochlauf auf etwa 45 GW/a bis 2027 nötig. Der Vorteil von einem zunächst sehr ambitionierten Anstieg des Photovoltaikzubaus ist, dass der Photovoltaikmarkt später nicht in eine aus heutiger Sicht unrealistische Größenordnung wachsen muss.

Neben dem Abbau bürokratischer Hürden muss die neue Bundesregierung Maßnahmen in die Wege leiten, um einem massiven Fachkräftemangel vorzubeugen. Mitte des nächsten Jahrzehnts werden voraussichtlich mehr als 250 000 Fachkräfte in der Photovoltaikbranche tätig sein. Daher bedarf es einer breit angelegten Solarjoboffensive mit neuen Aus- und Weiterbildungsangeboten. Darüber hinaus sollte die Errichtung neuer Solarmodulproduktionsstätten in Europa unterstützt werden.

Klar ist auch: Die Umstrukturierung des Energiesystems hin zu hohen Anteilen erneuerbarer Energien erhöht den Bedarf an Flexibilitätsoptionen und Energiespeichersystemen. Der konsequente Ausbau der erneuerbaren Energien muss daher durch mehr Kurz- und Langzeitspeicher flankiert werden. Nur so kann Deutschland das Pariser Klimaschutzabkommen einhalten.

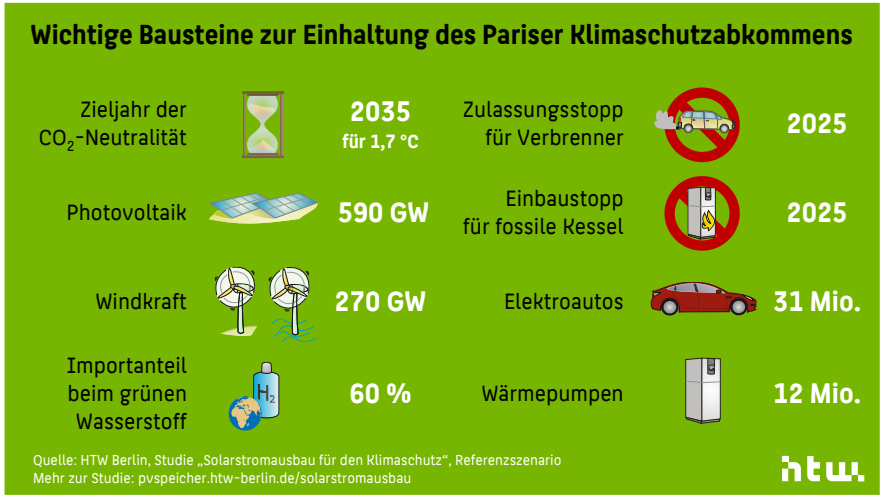


Bild 2 Neben dem forcierten Ausbau der Photovoltaik und Windkraft muss vor allem die Elektrifizierung des Verkehrs- und Wärmesektors beschleunigt werden.

Bild 3 Der Photovoltaikausbau muss in Deutschland bis 2035 auf 590 GW verzehnfacht werden. In der Solarbranche werden mehr 250 000 Fachkräfte arbeiten.

Wann muss Deutschland CO_2-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 Durchschnittstemperatur dem sogenannten „Paris-Ziel“ entsprechend auf deutlich unter 2 °C und möglichst auf 1,5 °C gegenüber dem vorindustriellen Niveau zu begrenzen“ [3].

Welchen Beitrag Deutschland dazu leisten muss und wann Deutschland kohlendioxidneutral (CO_2-neutral) werden muss, kann anhand des sogenannten Budgetansatzes bestimmt werden. Bild 4 stellt die Methodik zur Ermittlung des restlichen deutschen CO_2-Budgets dar, die auf der vom Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU) vorgeschlagenen Vorgehensweise aufbaut [4]. In dieser Studie wurde der Budgetansatz an die realen CO_2-Emissionen des Jahres 2020 unter Berücksichtigung des neuesten Berichts des Weltklimarats IPCC aus dem Jahr 2021 [5] angepasst. Der IPCC hat globale CO_2-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.

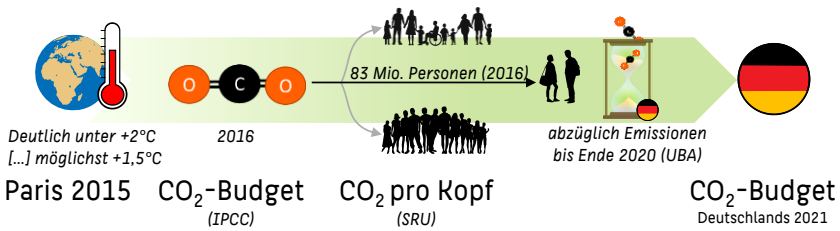


Bild 4 Schematische Darstellung der Methodik zur Ermittlung des restlichen deutschen CO_2-Budgets.

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 CO_2-Budget zum Einhalten des Pariser Klimaschutzabkommens zwischen 664 und 864 Milliarden Tonnen CO_2, wie Tabelle 1 zeigt [5].

Tabelle 1 Verbleibendes Kohlendioxidbudget in Milliarden Tonnen CO_2 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 [5].

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

Die jährlichen globalen CO_2-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 CO_2-Budgets in den vergangenen 4 Jahren um 164 Milliarden Tonnen CO_2 gesunken. Bis Ende 2020 sanken die verbleibenden CO_2-Budgets zum Einhalten der genannten Temperaturgrenzen somit auf 500 bis 700 Milliarden Tonnen CO_2.

Wird das CO_2-Budget aus dem Jahr 2016 gleichmäßig auf alle 7,753 Milliarden Menschen der Erde verteilt, liegt das restliche Pro-Kopf-CO_2-Budget zwischen 85,6 und 111,4 Tonnen CO_2. Für die 83,24 Millionen in Deutschland lebenden Menschen ergibt sich damit ein CO_2-Budget zwischen 7129 und 9276 Millionen Tonnen CO_2. Allerdings wurden nach Zahlen des Umweltbundesamts im

Jahr 2020 in Deutschland bereits 644 Millionen Tonnen CO_2 und zwischen 2016 und 2021 insgesamt 3437 Millionen Tonnen CO_2 emittiert [6]. Damit hat sich Ende des Jahres 2020 das für Deutschland verbleibende Budget auf lediglich 3433 bis 5580 Millionen Tonnen CO_2 reduziert.

Unter der Annahme, dass sich der Ausstoß des Jahres 2020 weiter linear reduziert, ist das deutsche CO_2-Budget in einem Zeitraum von 11 bis 17 Jahren aufgebraucht. Demnach muss Deutschland im Zeitraum 2032 bis 2038 CO_2-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 CO_2-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 CO_2-Emissionen bis 2045 ist für das Einhalten des Pariser Klimaschutzabkommens daher nicht ausreichend.

Außerdem ist bereits heute absehbar, dass die CO_2-Emissionen in den Jahren 2021 und 2022 durch den wegfallenden Coronaeffekt, durch steigende Gaspreise und den deutschen Kernenergieausstieg tendenziell ansteigen werden. Dadurch wird das verbleibende CO_2-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 5 visualisiert ist. In dieser Studie werden daher im Folgenden 2030 und 2035 als Referenzjahre für die CO_2-Neutralität betrachtet. Ergänzend dazu werden auch Ergebnisse für die Jahre 2040 und 2045 angegeben.

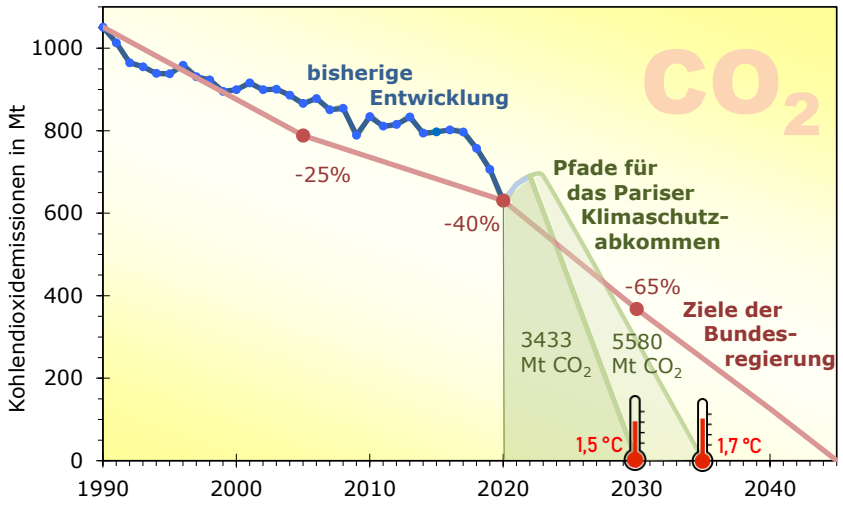


Bild 5 Entwicklung der Kohlendioxidemissionen in Deutschland zwischen 1990 und 2020, Ziele des Klimaschutzgesetzes und Pfade zum Einhalten des Pariser Klimaschutzabkommens gemäß des ermittelten CO_2-Budgets.

An dieser Stelle soll allerdings noch einmal ausdrücklich darauf hingewiesen werden, dass das Erreichen der CO_2-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 [2]. Zum Erreichen der Klimaschutzziele müssen die Sektoren Verkehr, Gebäude und Industrie vollständig durch erneuerbare 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 6 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

	Energiebedarfspfade	*mutlos*	*ambitioniert*	*visionär*
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 %

Bild 6 Rahmenbedingungen der untersuchten Szenarien, zentrale Kenngrößen des Gebäude- und Verkehrssektors im Jahr 2035 und relative Änderungen des Energiebedarfe einzelner Bereiche von 2035 gegenüber heute.

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 7 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 fortlaufend sinkt. Im Jahr 2045 ist dieser im Vergleich zum Jahr 2035 um ca. 15 Prozentpunkte niedriger (vgl. Bild 21 im Anhang).

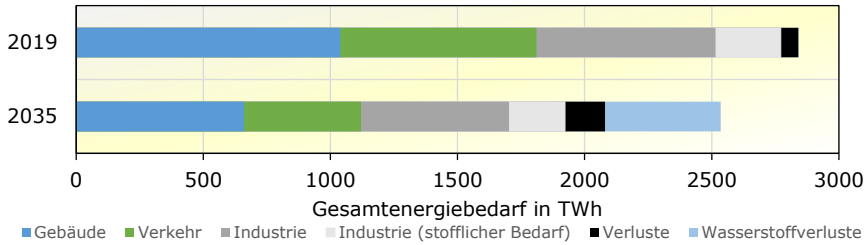


Bild 7 Sektorale Aufteilung des Energiebedarfs im Jahr 2019 und 2035 für das Szenario ambitioniert (Umwelt- und Abwärme sind nicht dargestellt, Wasserstoffverluste: Verluste bei der Herstellung von Wasserstoff und dessen Folgeprodukten; Daten für 2019 [7]).

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 inkl. des stofflichen Bedarfs sowie der angenommenen Verluste für die unterschiedlichen Szenarien in Abhängigkeit vom Zeitpunkt der Klimaneutralität dar (vgl. auch Bild 5). 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.

Details zu den Berechnungsgrundlagen dieser Studie und zur Ermittlung des Gesamtenergiebedarfs sind im Anhang A.1 aufgeführt.

Tabelle 2 Gesamtenergiebedarf der Szenarien in Abhängigkeit vom Zeitpunkt der Klimaneutralität (Umwelt- und Abwärme sind nicht enthalten, inkl. Verluste bei der Herstellung von Wasserstoff und dessen Folgeprodukten).

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

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.

Referenzszenario

- Zieljahr zum Erreichen der CO_2-Neutralität: 2035.
- Energieverbrauchspfad: *ambitioniert* (vgl. Bild 6).
- Windenergieausbau im Zieljahr: Erschließung des Potenzials der Windkraft an Land von 200 GW [6] und 70 GW Windkraft auf See [7].
- Anteil des importierten Wasserstoffs am gesamten Wasserstoffbedarf: 60 %.

Ausgehend von diesem Referenzszenario werden im Folgenden die Auswirkungen der davon abweichenden Rahmenbedingungen näher analysiert. Die diesem Kapitel zugrunde liegenden Annahmen und Berechnungsgrundlagen zur Abbildung der einzelnen erneuerbaren Energien sind in Anhang A.2 Modellgrundlagen des Energiesystems erläutert.

Was sind die Säulen einer klimaneutralen Energieversorgung?

Die deutsche Energieversorgung basiert derzeit noch zu ca. 82 % auf fossilen Energieträgern, wie Bild 8 verdeutlicht. Mit etwa 74 % wird ein Großteil dieser Energieträger importiert [7]. 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 erneuerbaren 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.

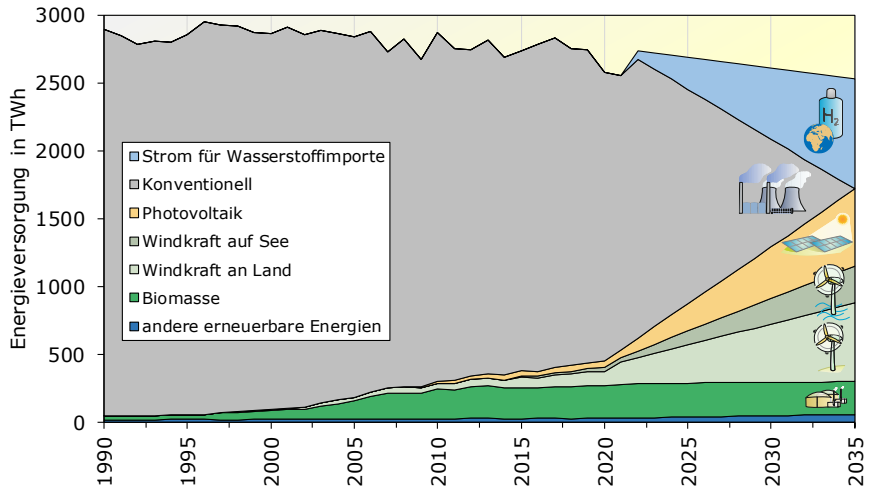


Bild 8 Entwicklung des Energieverbrauchs und der erneuerbaren Energieversorgung zum Erreichen der CO_2-Neutralität im Jahr 2035 (ohne Nutzung der thermischen Verluste in den Wärmekraftwerken, inkl. nicht-energetischem Bedarf, Rahmenbedingungen: max. Windenergieausbau, Wasserstoffimportanteil 60 %).

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 9 stellt für die unterschiedlichen Zieljahre der Klimaneutralität den Beitrag der einzelnen Technologien zur Energieversorgung dar. Aufgrund der Kostenvorteile von Wind- und Solarstrom (vgl. [8], [9]) 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 CO_2-Neutralität angestrebt wird.

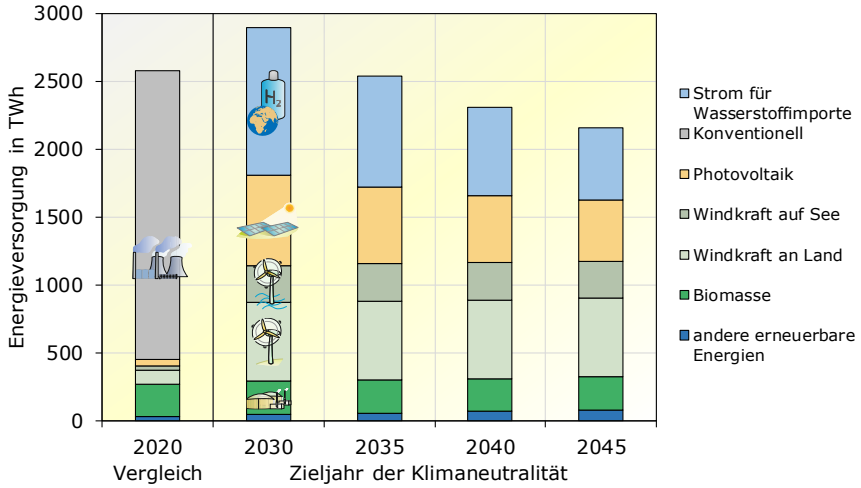


Bild 9 Deckung des Gesamtenergiebedarfs zu unterschiedlichen Zeitpunkten der CO_2-Neutralität im Referenzszenario (Rahmenbedingungen: max. Windenergieausbau, Wasserstoffimportanteil 60 %).

Wie viel Photovoltaikleistung wird zur CO_2-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 [8], flexibel skalierbar und haben eine hohe Akzeptanz [10]. Aus diesen Gründen fällt der Photovoltaik die Aufgabe zu, die Bedarfslücke zur CO_2-Neutralität zu schließen. Das technische Potenzial der Photovoltaik in Deutschland wird mit 530 GW bis 3100 GW abgeschätzt [11]–[13].

Aus den erforderlichen Solarstrommengen lässt sich die in Deutschland zu installierende Photovoltaikleistung bestimmen. Hierbei wird der mittlere jährliche Ertrag der Photovoltaikanlagen in Deutschland mit 950 kWh/kW veranschlagt [14]. Die daraus resultierende Photovoltaikleistung ist in Bild 10 für die verschiedenen Zieljahre im Szenario *ambitioniert* dargestellt. Als Vergleichswert dient die Ende 2020 installierte Photovoltaikleistung.

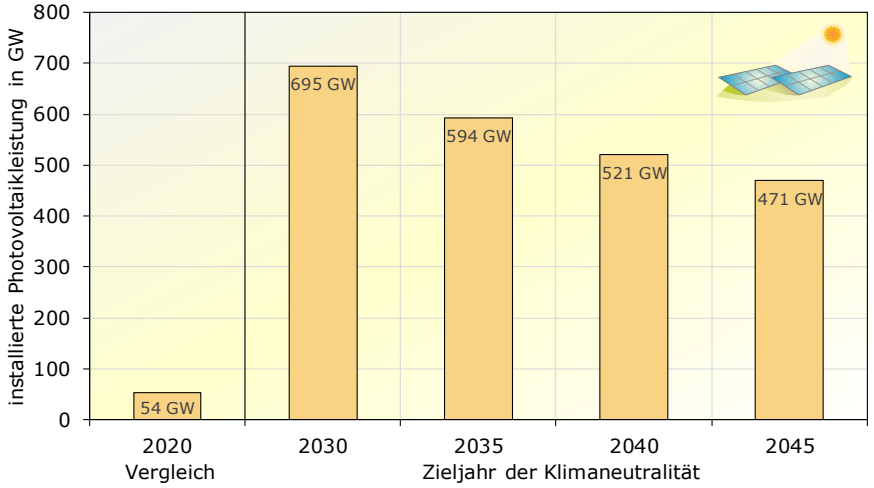


Bild 10 Erforderliche Photovoltaikleistung in Deutschland zum Erreichen der CO_2-Neutralität zwischen 2030 und 2045 im Referenzszenario (Rahmenbedingungen: max. Windenergieausbau, Wasserstoffimportanteil 60 %).

Während im Jahr 2030 knapp 700 GW Photovoltaikleistung erforderlich sind, um den Energiebedarf decken zu können, sinkt bei einem späteren Erreichen der CO_2-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 CO_2-Neutralität erst 10 Jahre später angestrebt, werden rund 470 GW benötigt. Die Unterschiede in den erforderlichen Photovoltaikleistungen werden bei den späteren Zieljahren tendenziell kleiner. Andere Studien ermitteln ähnliche Größenordnungen für die erforderliche Photovoltaikleistung (siehe Tabelle 7 im Anhang).

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 3 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 CO_2-Neutralität müssen die fossilen Brennstoffe durch umweltfreundliche Produkte, wie z. B. grünem 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.

Tabelle 3 Einfluss der Energieverbrauchspfade auf die in Deutschland erforderliche Photovoltaikleistung bei unterschiedlichen Zieljahren zum Erreichen der CO_2-Neutralität (Rahmenbedingungen: max. Windenergieausbau, Wasserstoffimportanteil 60 %).

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

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 % [7]. Mit dem Aufbau einer Wasserstoffproduktion in Deutschland besteht die Chance, diesen Importanteil deutlich zu reduzieren. Der Wasserstoffbedarf in den einzelnen Szenarien ist in Tabelle 4 dargestellt und dem dafür notwendigen Strombedarf zur CO_2-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 Wasserstofferzeugung erforderliche Strombedarf in Deutschland. Kann die Windkraft nicht über das betrachtete Potenzial hinaus ausgebaut werden, kommt lediglich Photovoltaik zur weiteren Bedarfsdeckung in Frage.

Tabelle 4 Einfluss der Energieverbrauchspfade auf die in Deutschland erforderliche Mengen an Wasserstoff sowie der dafür notwendige regenerative Strombedarf (Zieljahr der CO_2-Neutralität: 2035, maximaler Windenergieausbau).

Szenario (2035)	Wasserstoffbedarf (H_2)	Strombedarf für H_2
mutlos	1207 TWh	1825 TWh
ambitioniert	906 TWh	1362 TWh
visionär	816 TWh	1227 TWh

Bild 11 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 Transportmöglichkeiten begrenzt. Daher sind derzeit keine großen Importmengen an grünem Wasserstoff verfügbar.

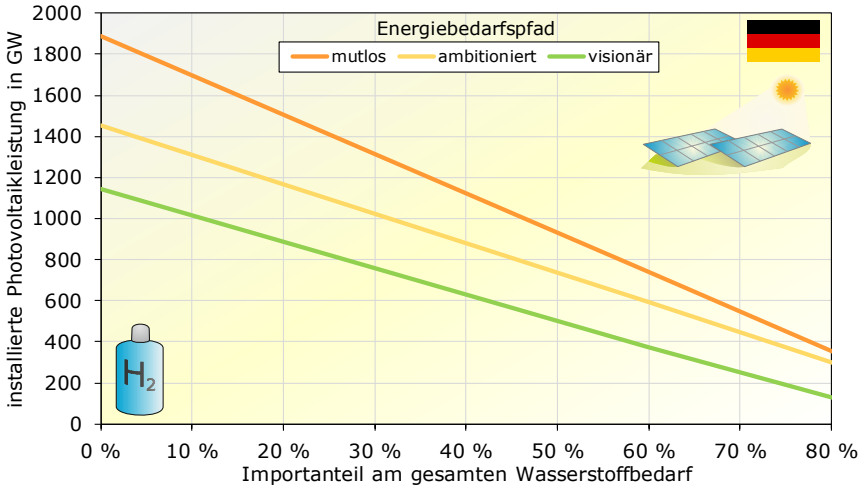


Bild 11 Einfluss des Wasserstoffimportanteils auf die erforderliche Photovoltaikleistung in Deutschland zum Erreichen der CO_2-Neutralität im Jahr 2035.

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 fehlenden 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 12 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 Südspanien Werte von bis zu 1750 kWh/kWp erreichbar sind, liegt dieser Wert mit etwa 1800 kWh/kWp in Marokko bzw. 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 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.

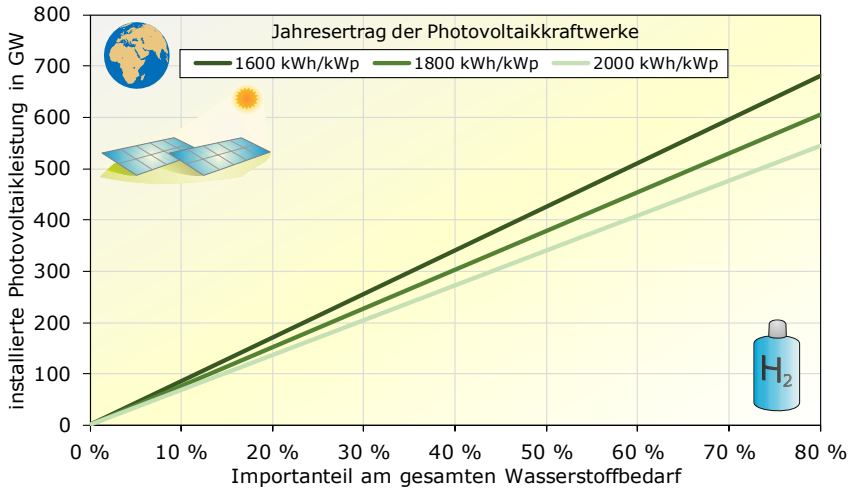


Bild 12 Einfluss des Wasserstoffimportanteils und des spezifischen Ertrags auf die in den Exportländern erforderliche Photovoltaikleistung zum Erreichen der CO_2-Neutralität im Jahr 2035 (Rahmenbedingungen: Szenario *ambitioniert*).

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 [15]. Dies entspricht 0,7 % der Landesfläche [16]. Es wird davon ausgegangen, dass etwa 5,3 % bis 13,8 % Deutschlands für die Nutzung durch Windkraft geeignet sind [16]–[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 [20]. 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 Vollaststunden 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 [11] abgeschätzt. Jedes Gigawatt Windkraft, das nicht errichtet wird, erfordert einen um 3 GW bis 4 GW höheren Photovoltaikausbau.

Dieser Zusammenhang wird auch in Bild 13 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.

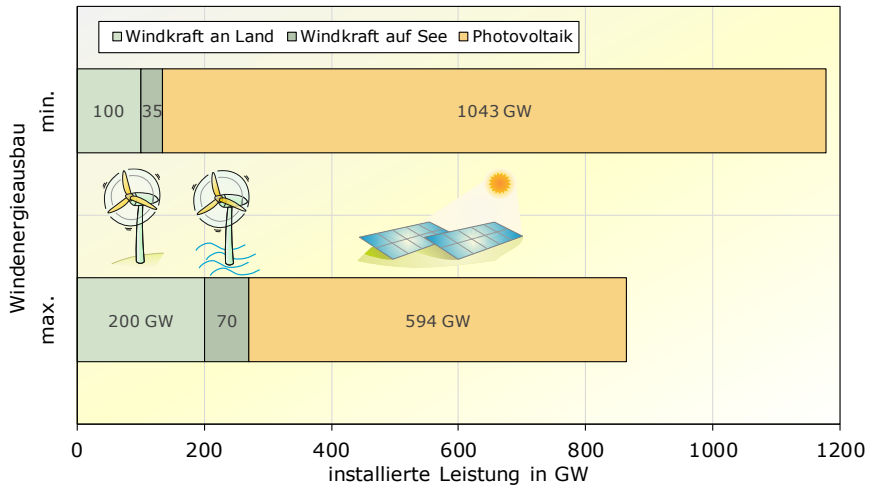


Bild 13 Einfluss des Windenergieausbaus auf die erforderliche Photovoltaikleistung in Deutschland zum Erreichen der CO_2-Neutralität im Jahr 2035 (Rahmenbedingungen: Referenzszenario mit einem Wasserstoffimportanteil von 60 %).

Auch in anderen Studien herrscht Einigkeit darüber, dass die nahezu vollständige Erschließung des Windkraftpotenzials essentiell für das Gelingen der Energiewende ist. Ein schwächelnder Windenergieausbau ist nur schwer durch einen Solarenergieausbau im größeren Maßstab zu kompensieren. Demnach sollte das gesamte Windpotenzial in Deutschland erschlossen werden.

Warum ist ein Photovoltaikzubau unter 40 GW pro Jahr unzureichend?

Je früher die CO_2-Neutralität erreicht werden soll, desto mehr Photovoltaikanlagen sind erforderlich. Wird die zusätzlich zum Bestand notwendige Photovoltaikleistung auf den bis zur CO_2-Neutralität verbleibenden Zeitraum gleichmäßig verteilt, 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 14 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 14). 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.

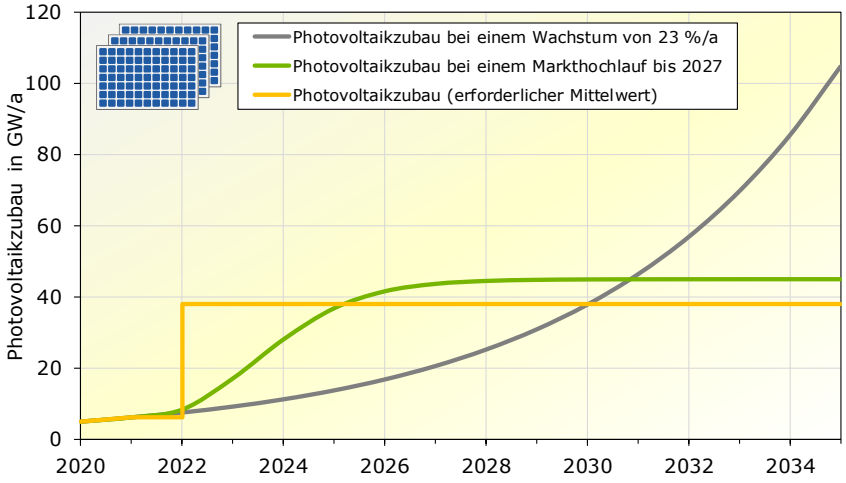


Bild 14 Pfade zur Steigerung des jährlichen Photovoltaikzubaus (netto) in Deutschland für das Referenzszenario (installierte Photovoltaikleistung im Zieljahr 2035 594 GW, Rahmenbedingungen: max. Windenergieausbau, Wasserstoffimportanteil 60 %).

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.

Klar ist, dass ein solch hoher Photovoltaikzubau nur durch eindeutige politische Impulse anzureizen ist. Die erforderlichen Zubaumengen in den Wahlprogrammen der im Bundestag vertretenden Parteien und der neuen Bundesregierung weichen von den hier skizzierten Zahlen teils deutlich ab, wie Tabelle 5 zu entnehmen ist. Außerdem ist eine Diskrepanz untereinander festzustellen, obwohl alle das Ziel formulieren, das Pariser Klimaschutzabkommen einhalten zu wollen. Die Unterschiede begründen sich unter anderem in den Annahmen von negativen Emissionen, die es erlauben, auch nach 2035 noch CO_2 zu emittieren.

Tabelle 5 Mittlerer Photovoltaikzubau und Ziele der Parteien für die CO_2-Neutralität der Energieversorgung in den Wahlprogrammen 2021.
[1] - Szenario *ambitioniert*, max. Windenergieausbau, 60 % Wasserstoffimportanteil,
[2] - „Mehr Tempo und 100 % EE bis 2040, konkrete Zubauzahlen im Ausbaupakt",
[3] - „höheres Tempo beim Ausbau" und CCS,
[4] - „mindestens 10 GW/a bis 2025", „CO_2-Neutralität bis 2035"

	Pariser Klimaziel	jährliches Zubauziel für die Photovoltaik	Zieljahr der CO_2-Neutralität
HTW: 1,5 °C[1]	**erreichbar**	**71 GW/a**	**2030**
HTW: 1,7 °C[1]	**noch erreichbar**	**38 GW/a**	**2035**
HTW: > 1,7 °C[1]	**nicht erreichbar**	**17 GW/a**	**2045**
SPD[2]	1,5 °C anvisiert	10 bis 20 GW/a	2040
CDU / CSU[3]	1,5 °C anvisiert	8 bis 10 GW/a	2045
B90 / Die Grünen (ab 2025)	1,5 °C anvisiert	10 bis 12 GW/a (18 bis 20 GW/a)	2035
FDP	1,5 °C anvisiert	keine Vorgaben	2050
Die LINKE[4] (ab 2025)	1,5 °C anvisiert	> 10 GW/a (> 50 GW/a)	2035
neue Bundesregierung 2021	1,5 °C anvisiert	16 GW/a (Mittelwert bis 2030)	2045

Um einen langfristig akzeptablen Photovoltaikzubau zu ermöglichen, muss der Photovoltaikmarkt in Deutschland auf mindestens 45 GW/a bis 2027 wachsen. Andernfalls schnellen die Zubauzahlen im Laufe des nächsten Jahrzehnts in unerreichbare Höhen. 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 [21] 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 15 für das Szenario *ambitioniert* entsprechend dem im vorangegangenen Abschnitt beschriebenen Markthochlauf bis 2027 dem historischen Verlauf nach [22] 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.

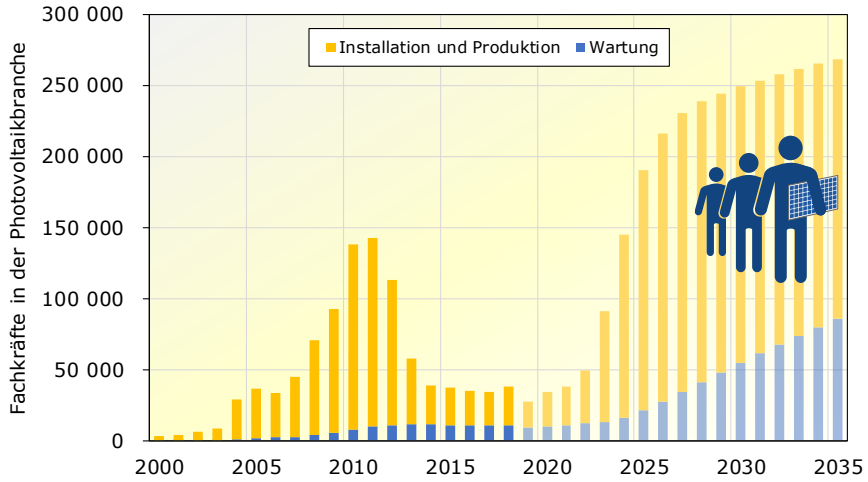


Bild 15 Fachkräfte für Installation, Produktion und Wartung der Photovoltaikanlagen. Historischer Verlauf der direkt und indirekt Beschäftigten nach [22] sowie künftiger Bedarf der direkt Beschäftigten für das Erreichen der CO_2-Neutralität im Jahr 2035 in Anlehnung an [21].

Verglichen mit den absoluten Beschäftigtenzahlen im Jahr 2018 von ca. 38 000 [23] 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.

Diskussion der Methodik und Ergebnisse

Diese Studie wirft vor dem Hintergrund des Pariser Klimaschutzabkommens ein Schlaglicht auf die Photovoltaik und verdeutlicht deren Bedeutung für den Klimaschutz. Nachfolgend werden die Chancen und Grenzen eines forcierten Photovoltaikausbaus sowie die Berechnungsansätze der Studie diskutiert.

Technologiemix

Abweichungen zu anderen Studien [24]–[26] zeigen sich insbesondere bei der Verwendung umstrittener Technologien wie Carbon Capture & Storage (CCS). Hierzu zählt auch die internationale Verschiebung der Verantwortung in Form von Kompensationen oder Ausgleichzahlungen. Diese verschiedenen Optionen werden angesichts der kurzen verbleibenden Zeitspanne, geringen Wirkungsgraden, hohen Kosten und mangelnden Akzeptanz in Deutschland einerseits sowie der zum Teil ineffizienten Kompensationsmechanismen andererseits in dieser Studie nicht betrachtet.
Der heuristische Ansatz des Technologiewechsels dieser Studie in den Sektoren Verkehr und Wärme wurde anhand der in der Vergangenheit beobachteten Lebensdauern parametriert. Eine erhöhte Wechselbereitschaft bei steigenden Betriebskosten der fossilen Mobilität und Wärmebereitstellung wird nicht berücksichtigt. Der Fachkräftemangel und begrenzte Produktionskapazitäten limitieren allerdings die mögliche Transformationsgeschwindigkeit. Weiterhin bleiben die Emissionen im landwirtschaftlichen Sektor unberücksichtigt.

CO_2-Budget

Darüber hinaus ist die Prognose des verbleibenden CO_2-Budgets mit Unsicherheiten behaftet. Der im Jahr 2021 erschienene Entwurf des IPCC-Berichts lässt vermuten, dass die Klimaschutzziele nur dann sicher erreicht werden, wenn die untere Grenze des Budgets angestrebt wird. In dieser Studie wird ein linearer Rückgang der CO_2-Emissionen angenommen. Wird dies aufgrund eines verzögertem Austauschs fossiler Technologien nicht erreicht, kann das CO_2-Budget bereits früher aufgebraucht sein. Daher ist ein stetiger Anstieg des grünen Wasserstoffanteils in der fossilen Energiewirtschaft Deutschlands notwendig. Andererseits ist es auch möglich, den Emissionsüberschuss durch einen forcierten Austausch z. B. fossiler Fahrzeuge und Heizungssysteme vor dem Ende der Lebensdauer zu kompensieren.

Zeitlicher Verlauf der Bedarfe und räumlicher Austausch

Es wurde aufgezeigt, dass große Mengen Wind- und Photovoltaikanlagen installiert werden müssen. Das Energiesystem wurde für diese Studie zweckmäßig als Einknotenmodell abgebildet. Somit lassen sich Sensitivitäten analysieren und Abhängigkeiten komplexer Zusammenhänge vereinfacht darstellen.
In dieser Studie wurde das zeitliche Dargebot regenerativer Erzeugung oder gespeicherter Energie als jederzeit verfügbar vorausgesetzt. Die zugrunde gelegten Energiebedarfe der einzelnen Sektoren werden vollständig gedeckt. Saisonale und tägliche Unterschiede in der Wind- und Solarstromerzeugung und der Einsatz von Speichern können mit diesem Ansatz nicht abgebildet werden. Insbesondere Energiespeicher, aber auch Netzrestriktionen erhöhen den Bedarf an Investitionen in den Umbau des Energiesystems. Die dabei auftretenden Verluste aufgrund des Transports, der Speicherung sowie der Abregelung wurden im Referenzszenario mit 158 TWh angenommen. Dies entspricht etwa 6 % des gesamten Energiebedarfs Deutschlands. Andere Studien [24], [25] geben geringere Verluste an, da Abregelungsverluste häufig unberücksichtigt bleiben.
Räumliche Ausgleichseffekte mit dem europäischen Verbundnetz sind aufgrund der gewählten Methodik nicht abbildbar. Der andere Bedarf an Wind-

und Solarkapazitäten (vgl. Tabelle 7) ist teilweise auch in der negativen Stromhandelsbilanz zu finden. Da die Dekarbonisierung des Energiesystems jedoch ein Kraftakt für alle Staaten Europas darstellt, ist hier nicht mit nennenswerten Energieimporten der kleineren Volkswirtschaften zu rechnen. Energieimporte verlagern die Herausforderungen Deutschlands lediglich räumlich, wie es bei den Wasserstoffimporten der Fall ist.

Die Rolle von Wasserstoff

Der Wasserstoffbedarf wurde in dieser Studie stellvertretend für verschiedene Folgeprodukte des Wasserstoffs herangezogen. Dieser liegt - trotz des Umbaus des Energiesystems – für das Referenzszenario in der Größenordnung des heutigen Mineralölbedarfs.
Für das Einhalten des CO_2-Budgets muss Wasserstoff bereits heute eingeplant werden. Wie in Bild 11 dargestellt ist, prägt der Importanteil des Wasserstoffs maßgeblich den notwendigen Ausbau der Photovoltaik. In dieser Studie wurde er mit 60 % angenommen. Ein höherer Anteil der Wasserstoffproduktion in Deutschland ist mit einem höheren Ausbau der Photovoltaik verbunden. Allerdings kann in der Kürze der Zeit ein deutlich größerer Anteil der Wasserstoffversorgung in Deutschland, bis das verbleibende CO_2-Budget aufgebraucht sein wird, als unrealistisch betrachtet werden. Dies setzt jedoch voraus, dass Länder im Sonnengürtel der Erde in der Lage sind, die erforderlichen Mengen an Wasserstoff zu liefern.
Kritisch ist dabei: Je kürzer der Zeitraum zur angestrebten CO_2-Neutralität ist, desto höher ist der Bedarf an importiertem Wasserstoff. Die Ursache liegt in den fossilen Fahrzeugen und Heizungsanlagen, die zunehmend durch Wasserstoff oder deren Folgeprodukte betrieben werden müssen. Der Wasserstoffbedarf wird mit zunehmender Transformation des Energiesystems jedoch geringer, während gleichzeitig die erneuerbaren Erzeugungskapazitäten ansteigen. Es etabliert sich ein gegenläufiger Trend. Ob hier allein marktwirtschaftliche Lösungen zum Tragen kommen, kann bezweifelt werden. Aktuell fehlen geeignete Rahmenbedingungen, um bereits heute eine nennenswerte Wasserstoffinfrastruktur aufzubauen. Diese muss aber zeitnah fossile Energieträger sukzessiv substituieren.
Verglichen mit den Ergebnissen anderer Studien (z. B. [11], [24]) sind die Werte für den ermittelten Wasserstoff- und Strombedarf hoch. Dies liegt daran, dass den Studien unterschiedliche Annahmen zur Verwendung der regenerativen Energiequellen und andere Technologiepfade zugrunde liegen. Zum Teil werden große Mengen an Biomasse für den Bedarf der Industrie verwendet [24], [25], die Anzahl der Autos stärker reduziert [24], [27] und fossile Fahrzeuge schneller aus dem Markt genommen. Wie schnell fossile Heizungen ersetzt werden, hängt auch von der angenommenen Sanierungsquote ab. Je nach Studie variiert zudem der nicht-energetische Bedarf.

Energiebedarf und Effizienz

Effizienzgewinne in der Informations- und Kommunikationstechnik (IKT) oder der Beleuchtung, wurden hier, im Vergleich zu anderen Untersuchungen [24], [28] nicht berücksichtigt. Aufgrund der zunehmenden Digitalisierung weiterer Lebensbereiche können sogenannte Rebound-Effekte erwartet werden.
Bei der Entwicklung der Energiebedarfe in der Industrie und beim Flugverkehr bestehen große Unsicherheiten. Zum einen müssen hier neue technische Lösungen etabliert werden. Zum anderen sind die Investitionszyklen der Branchen sehr lang. Im vergangenen Jahrzehnt war kein Rückgang des Energiebedarfs erkennbar. Die Trendwende steht also noch bevor und muss zeitnah erfolgen. Im Gegensatz zu anderen Studie (vgl. [24]) wurden keine Effizienzgewinne im Flugverkehr angenommen.
Ein großer Hebel zur Reduktion des Energiebedarfs ist die energetische Sanierung der Gebäude. Der Anteil der jährlich sanierten Gebäude wurde im Referenzszenario mit 1,5 %/a angenommen. Diese wird in anderen Studien mit 1,4 %/a [28] bis 1,73 %/a [27] angegeben.

Angesichts der hohen Auslastung des Handwerks und der stagnierenden Sanierungsquote in den vergangenen Jahren stellt sich die Frage, ob eine solch hohe Quote erreichbar ist und für die Zielerreichung eingeplant werden kann.

Unsicherheiten und Bandbreite

Am Ende muss im Vergleich mit anderen Energiewendestudien stets berücksichtigt werden, dass unterschiedliche Eingangsparameter und Referenzwerte das Ergebnis maßgeblich beeinflussen. So verringert zum Beispiel der schnellere Wechsel von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor hin zur Elektromobilität die Nachfrage nach grünen Treibstoffen. Ähnliches gilt für die Lebensdauer fossiler Heizungssysteme. Damit wird auch weniger Wind- und Solarenergie zur Wasserstoffproduktion benötigt.

Politische Rahmenbedingungen und Herausforderungen

Zahlreiche Annahmen antizipieren ambitionierte politische Ziele und attraktive Rahmenbedingungen. Es ist denkbar, dass das Verbot von Verbrennungsmotoren abgelehnt, der Kohleausstieg verzögert oder der Energiebedarf im Verkehr eher ansteigen wird. Diese Studie verdeutlicht, dass dies an anderer Stelle durch einen höheren Ausbau erneuerbarer Energien kompensiert werden muss, um die völkerrechtlich verbindlichen Vorgaben des Pariser Klimaschutzabkommens einzuhalten. Verzögerungen beim Technologiewechsel sind bei dem geringen verbleibenden CO_2-Budget jedoch kaum auszugleichen. Neben dem gesteigerten Ausbau erneuerbarer Energien wäre auch eine „Austausch-Politik“, mit Maßnahmen wie der „Abwrack-Prämie“, möglich. Dadurch könnten die Effizienzgewinne eines längerfristigen Umbaus bereits kurzfristig erzielt werden. Dies würde sich positiv auf den Energiebedarf und damit auf den Ausbaubedarf der erneuerbaren Energien auswirken.
Die Konflikte um Flächen, Landschafts- und Naturschutz bei Biomasse, Wind und zunehmend auch bei Photovoltaikfreiflächenanlagen zeigen, dass die Akzeptanz der Energiewende in der Bevölkerung nicht außer Acht gelassen werden darf. Wie sich die Einstellung gegenüber den erneuerbaren Energien bei einem deutlich höheren Ausbau verändern wird, kann nicht anhand von Simulationsstudien ermittelt werden. Generell bedarf es akzeptanzfördernder Rahmenbedingungen, die der Energiewende den nötigen Rückenwind geben. Hinzu kommen auch Diskussionen um begrenzte Ressourcen und um die Verfügbarkeit von Fachkräften. Ob sich zukünftig in Deutschland jährlich Photovoltaikanlagen mit einer Leistung von 45 GW/a und mehr realisieren lassen, ist derzeit schwer zu beantworten.

Schlussfolgerungen

1. Deutschland muss zwischen 2030 und 2035 kohlendioxidneutral werden, um das Pariser Klimaschutzabkommen einzuhalten.

- Das aktuelle deutsche Klimaschutzgesetz zielt darauf ab, erst im Jahr 2045 eine klimaneutrale Energieversorgung zu erreichen. Das CO_2-Budget Deutschlands zum Einhalten des Pariser Klimaschutzabkommens wird damit mit hoher Wahrscheinlichkeit überschritten. Ein verfassungskonformer Klimaschutz ist damit kaum oder nur mit sehr teuren, noch nicht marktreifen, CO_2-Entnahmetechnologien möglich.
- Aus eigener Kraft kann Deutschland seinen Beitrag zum Einhalten des 1,5-Grad-Pfads durch eine vollständig klimaneutrale Energieversorgung bis 2030 wahrscheinlich nicht leisten. Zum einen wären hierzu sehr hohe Importmengen an regenerativen Energieträgern erforderlich. Zum anderen müssten Photovoltaikanlagen mit einer Leistung von 70 GW/a installiert werden, sodass eine Gesamtleistung von knapp 700 GW erreicht wird. Des Weiteren wäre eine restriktive „Abwrack-Politik“ gegenüber allen fossilen Energietechnologien erforderlich, um die Effizienzgewinne eines längerfristigen Umbaus bereits kurzfristig zu erzielen.
- Die dazu benötigten Maßnahmen wurden bislang von keiner der im Bundestag vertretenden Parteien vorgeschlagen. Das Erreichen des deutschen Beitrags zum 1,5-Grad-Pfad, wie zwar von allen relevanten Parteien angestrebt, wird aufgrund des mangelnden politischen und gesellschaftlichen Willens als unrealistisch angesehen.
- Für eine CO_2-Neutralität der Energieversorgung Deutschlands im Jahr 2035 ist unter Berücksichtigung bereits ambitionierter Maßnahmen ein Photovoltaikausbau in Deutschland von 590 GW und eine Steigerung des jährlichen Zubaus auf 45 GW/a notwendig.
- Wird die Klimaneutralität erst im Jahr 2045 angestrebt, sind Photovoltaikanlagen mit einer Leistung von 470 GW zu installieren. Durch den längeren Zeitraum liegt der mittlere Zubau nur bei ca. 17 GW/a.

2. Alle Sektoren müssen weitgehend elektrifiziert werden, um den Energiebedarf ausreichend senken zu können.

- Neben der Umstellung der Energiebereitstellung müssen ambitionierte Elektrifizierungsstrategien in den Energiebedarfssektoren Verkehr, Gebäude und Industrie verfolgt und 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.

- Um die notwendige Photovoltaikleistung nicht noch weiter in die Höhe zu treiben, muss das deutsche Windpotenzial mit 200 GW an Land und 70 GW offshore 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 in der Kürze der Zeit nicht realisierbar.

- Je schneller die CO_2-neutrale Energieversorgung erreicht werden soll, desto mehr wird sie von Wasserstoff und dessen Folgeprodukten geprägt sein. Sie werden vor allem im Industriesektor und zum Weiterbetrieb der verbleibenden Verbrennungsfahrzeuge und Heizungskessel eingesetzt.
- 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.
- Zusätzlich zu dem Zulassungsstopp von neuen Verbrennungsfahrzeugen und dem Einbaustopp für fossile Heizkessel kann die Stilllegung und der Austausch der fossilen Technik im Bestand den Energiebedarf reduzieren.
- Der Wasserstoffbedarf und die importierten Wasserstoffmengen haben einen großen Einfluss auf den notwendigen Photovoltaikausbau. Dies sollte bei der Festlegung der Ausbauziele berücksichtigt werden.
- 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.

- Das Zieljahr der Klimaneutralität der Energieversorgung hat einen großen Einfluss auf den Energiebedarf und damit auf den erforderlichen Photovoltaikausbau in Deutschland.
- Je nach Energiebedarfspfad ist für das Einhalten des Pariser Klimaschutzabkommens eine Photovoltaikleistung von 370 GW bis 820 GW erforderlich.
- Hierzu ist ein stringenter Markthochlauf erforderlich, der innerhalb der nächsten 2 Jahre einen jährlichen Photovoltaikzubau von mehr als 17 GW/a und ab 2027 mehr als 45 GW/a vorsieht.
- Mit dem notwendigen Solarstromausbau wird die Photovoltaikbranche mit voraussichtlich mehr als 250 000 Arbeitsplätzen ein entscheidender Wirtschaftszweig Deutschlands. Der rasante Markthochlauf erfordert daher eine schnelle Etablierung von umfangreichen Aus-, Um- und Weiterbildungsangeboten. Dies bietet auch Fachkräften aus vom Wandel betroffenen Wirtschaftszweigen eine Zukunftsperspektive.

6. Das Energiesystem braucht mehr Flexibilitätsoptionen.

- Mit den aufgezeigten Ausbaupfaden übersteigt die Windkraft- und Photovoltaikleistung die Stromnachfrage um ein Vielfaches. Dies stellt die Energiesystemstabilität vor neue Herausforderungen. Zum Ausgleich der Erzeugung und der Nachfrage sowie zur Erbringung von Systemdienstleistungen sind weitere Flexibilitätsoptionen erforderlich. Beispielsweise können Speicher oder intelligent gesteuerte Wärmepumpen und Elektrofahrzeuge dazu beitragen.
- Der intelligenten Verknüpfung der Sektoren muss daher ein verlässlicher, diskriminierungsfreier Rahmen gegeben werden, der den Anforderungen gerecht wird.
- Neben vielen effizienten Kurzzeitspeichern wie Batteriesystemen 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.

Literaturverzeichnis

[1] Sozialdemokratische Partei Deutschlands (SPD), BÜNDNIS 90 / DIE GRÜNEN, and Freie Demokraten (FDP), 'Koalitionsvertrag 2021 – 2025 (Mehr Fortschritt wagen - Bündnis für Freiheit, Gerechtigkeit und Nachhaltigkeit)', Berlin, Nov. 2021.

[2] Umweltbundesamt, 'Erneuerbare Energien in Zahlen', *Umweltbundesamt*, Mar. 04, 2021. https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/erneuerbare-energien/erneuerbare-energien-in-zahlen (accessed Nov. 24, 2021).

[3] Bundesverfassungsgericht, *Bundesverfassungsgericht (2021): Pressemitteilung vom 29.4.2021: Verfassungsbeschwerden gegen das Klimaschutzgesetz teilweise erfolgreich, Karlsruhe*. p. 5. Accessed: Oct. 15, 2021. [Online]. Available: https://www.bundesverfassungsgericht.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/DE/2021/bvg21-031.html

[4] Sachverständigenrat für Umweltfragen, 'Für eine entschlossene Umweltpolitik in Deutschland und Europa - Umweltgutachten 2020', Geschäftsstelle des Sachverständigenrates für Umweltfragen (SRU), Berlin, Gutachten, Jan. 2020.

[5] 'IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change (2021): Climate Change 2021, Draft of 7 August 2021'.

[6] S. Wilke, 'Treibhausgas-Emissionen in Deutschland', *Umweltbundesamt*, Aug. 29, 2013. https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/treibhausgas-emissionen-in-deutschland (accessed Oct. 15, 2021).

[7] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), 'Zahlen und Fakten: Energiedaten', BMWi, Mar. 2021. Accessed: Oct. 16, 2021. [Online]. Available: http://www.bmwi.de/Navigation/DE/Themen/energiedaten.html

[8] C. Kost, S. Shammungam, V. Fluri, D. Peper, A. D. Memar, and T. Schlegl, 'Stromgestehungskosten Erneuerbare Energien', Fraunhofer - Institut für solare Energiesysteme ISE, Jun. 2021.

[9] 'Renewable Power Generation Costs in 2020', IRENA Internatiol Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, 2021.

[10] I. Wolf, A.-K. Fischer, and J.-H. Huttarsch, 'Soziales Nachhaltigkeitsbarometer der Energie- und Verkehrswende 2021', Kopernikus-Projekt Ariadne Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK), Potsdam, Jul. 2021.

[11] G. Luderer *et al.*, 'Ariadne-Report. Deutschland auf dem Weg zur Klimaneutralität 2045 Szenarien und Pfade im Modellvergleich', Kopernikus-Projekt Ariadne Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK), Potsdam, Oct. 2021.

[12] H. Wirth *et al.*, 'Solaroffensive für Deutschland - Wie wir mit Sonnenenergie einen Wirtschaftsboom entfesseln und das Klima schützen', Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE und Greenpeace, Kurzstudie, Jul. 2021.

[13] J. Brandes, M. Haun, C. Senkpiel, C. Kost, A. Bett, and H.-M. Henning, 'Wege zu einem klimaneutralen Energiesystem - Die deutsche Energiewende im Kontext gesellschaftlicher Verhaltensweisen – Update für ein CO2-Reduktionziel von 65% in 2030 und 100% in 2050', Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, Freiburg, Dec. 2020.

[14] T. Kelm *et al.*, 'Vorbereitung und Begleitung bei der Erstellung eines Erfahrungsberichts gemäß § 97 Erneuerbare-Energien-Gesetz: Teilvorhaben II c: Solare Strahlungsenergie. März 2019', Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg und Bosch & Partner GmbH, Stuttgart und Hannover, Mar. 2019.

[15] Bundesverband WindEnergie BWE e.V., 'Zahlen und Fakten', *BWE e.V.* https://www.wind-energie.de/themen/zahlen-und-fakten/ (accessed Nov. 11, 2021).

[16] Agora Energiewende, 'PV- und Windflächenrechner'. https://www.agora-energiewende.de/service/pv-und-windflaechenrechner/ (accessed Nov. 11, 2021).

[17] S. Bofinger, D. Callies, M. Scheibe, Y.-M. Saint-Drenan, and K. Rohrig, 'Potenzial der Windenergienutzung an Land', Bundesverband WindEnergie BWE und Fraunhofer Institut für Windenergie Energiesystemtechnik (IWES) Abteilung Energiewirtschaft und Netzbetrieb, Studie Kurzfassung, May 2011.

[18] I. Lütkehus, H. Salecker, and K. Adlunger, 'Potenzial der Windenergie an Land', Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau, 2013.

[19] Stiftung Klimaneutralität, 'Mehr Flächen für Windenergie', *Stiftung Klima*. https://www.stiftung-klima.de/de/themen/energie/flaechen-wind/ (accessed Nov. 11, 2021).

[20] Agora Energiewende, Agora Verkehrswende, Technical University of Denmark, and Max-Planck-Institute for Biogeochemistry, 'Making the Most of Offshore Wind: Re-Evaluating the Potential of Offshore Wind in the German North Sea', Agora Energiewende, Agora Verkehrswende, Technical University of Denmark and Max-Planck-Institute for Biogeochemistry, 2020.

[21] M. Dr. Ammon, T. Bruns, and N. Semerow, 'ENERGIEWENDE im Kontext von Atom- und Kohleausstieg. Perspektiven im Strommarkt bis 2040. UPDATE 2020', EuPD Research Sustainable Management GmbH, Bonn, May 2020.

[22] M. O'Sullivan, D. Edler, and U. Lehr, 'Ökonomische Indikatoren der Energiebereitstellung: Methode, Abgrenzung und Ergebnisse für den Zeitraum 2000-2017', 2019.

[23] M. O'Sullivan and D. Edler, 'Gross Employment Effects in the Renewable Energy Industry in Germany An Input-Output Analysis from 2000 to 2018', Jul. 2020.

[24] Prognos, Öko-Institut, and Wuppertal-Institut, 'Klimaneutrales Deutschland 2045. Wie Deutschland seine Klimaziele schon vor 2050 erreichen kann', Langfassung im Auftrag von Stiftung Klimaneutralität, Agora Energiewende und Agora Verkehrswende, Jun. 2021.

[25] D. Stolten, P. Markewitz, T. Schöb, F. Kullmann, L. Kotzur, and S. Risch, 'Neue Ziele auf Alten Wegen? - Strategien für eine treibhausgasneutrale Energieversorgung bis zum Jahr 2045', Forschungszentrum Jülich GmbH, Kurzfassung, 2021.

[26] T. Bründlinger *et al.*, 'Integrierte Energiewende: Impulse für die Gestaltung des Energiesystems bis 2050', Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), Berlin, Leitstudie, Jun. 2018.

[27] Energiewirtschaftliches Institut an der Universität zu Köln (EWI), 'Leitstudie Aufbruch Klimaneutralität - Klimaneutralität 2045 - Transformation der Verbrauchssektoren und des Energiesystems', Gutachterbericht im Auftrag der Deutschen Energie-Agentur (dena), Oct. 2021.

[28] F. Sensfuß *et al.*, 'Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland 3. Kurzbericht: 3 Hauptszenarien. 05/2021', Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI und Consentec GmbH, Karlsruhe, Jun. 2021.

[29] V. Quaschning, 'Sektorkopplung durch die Energiewende - Anforderungen an den Ausbau erneuerbarer Energien zum Erreichen der Pariser Klimaschutzziele unter Berücksichtigung der Sektorkopplung', Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin (HTW Berlin), Berlin, Studie, Jun. 2016.

[30] Kraftfahrt-Bundesamt, 'Fahrzeugzulassungen (FZ) Neuzulassungen von Kraftfahrzeugen nach Umwelmerkmalen', Flensburg, FZ 14, May 2021.

[31] Kraftfahrt-Bundesamt, 'Fahrzeugzulassungen (FZ) Bestand an Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern nach Fahrzeugalter (2021)', Flensburg, Broschüre FZ 15, Jan. 2021.

[32] 'Klimaneutralität 2045 - Transformation des Gebäudesektors', Institut für Technische Gebäudeausrüstung Dresden Forschung und Anwendung GmbH (ITG); Forschungsinstitut für Wärmeschutz e.V. München (FIW), Dresden, Gräfelfing, Gutachten im Rahmen der dena-Leitstudie Aufbruch Klimaneutralität, Oct. 2021. Accessed: Nov. 24, 2021. [Online]. Available: https://www.dena.de/fileadmin/dena/Dokumente/Landingpages/Leitstudie_II/Gutachten/211005_DLS_Gutachten_ITG_FIW_final.pdf

[33] Bundesverband der Energie und Wasserwirtschaft, 'Entwicklung der Beheizungsstruktur des Wohnungsbestandes in Deutschland', Jan. 2021. Accessed: Nov. 19, 2021. [Online]. Available: https://www.bdew.de/media/documents/Beheizungsstruktur_Wohnungsbestand_Entw_ab_1995_online_o_jaehrlich_CMi_2801202_udEP16f.pdf

[34] Bundesverband des Schornsteinfegerhandwerks. Zentralinnungverband (ZIV), 'Erhebungen des Schornsteinfegerhandwerks.', 2019.

[35] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie und Arbeitsgruppe Erneuerbaren-Energien-Statistik (AGEE-Stat), 'Zeitreihen zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland', Bundesministerium für Wirtschaft und Energie und Arbeitsgruppe Erneuerbaren-Energien-Statistik (AGEE-Stat), Excel-Tabelle, Feb. 2021.

[36] P. Sterchele *et al.*, 'Wege zu einem klimaneutralen Energiesystem - Die deutsche Energiewende im Kontextgesellschaftlicher Verhaltensweisen - Anhang zur Studie', Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, Freiburg.

Anhang

A.1 Berechnungsgrundlagen

Im Folgenden werden die entwickelten Berechnungsansätze zur Ermittlung des Energiebedarfs der Sektoren Verkehr, Wärme und Industrie vorgestellt. Hierzu wurden sogenannte Effizienzfaktoren verwendet. In [29] sind die verwendeten Effizienzfaktoren und deren Herleitung detailliert beschrieben. Eine zentrale Annahme dieser Studie ist, dass sämtliche fossile Energieträger durch Wasserstoff und seine Folgeprodukte ersetzt werden können.

Im **Verkehrssektor** liegt der Bedarf aktuell bei 761 TWh. Mehr als 93 % des Energiebedarfs des Sektors ist mit der Verbrennung von fossilen Energien verbunden [7]. Eine reine Dekarbonisierung durch biogene Treibstoffe ist aufgrund der begrenzten landwirtschaftlichen Flächen in Deutschland ausgeschlossen [29]. Die Verlagerung vom motorisierten Individualverkehr zum öffentlichen Nah- und Fernverkehr bzw. zu „Sharing"-Konzepten und die damit einhergehende Reduktion der Anzahl an PKWs ist dringend notwendig. Gleichzeitig muss eine Umwälzung des PKW- und LKW-Bestands hin zu alternativen Antriebssystemen erfolgen. Unter Berücksichtigung des Jahres der Fahrzeugzulassung und des Fahrzeugbestands im Jahr 2020, nach den Daten des Kraftfahrt-Bundesamtes [30], [31] ,wurde die Altersstruktur der PKWs, LKWs und Busse ermittelt, vgl. Bild 16. Entsprechend der heuristisch hergeleiteten Lebensdauer werden Fahrzeuge aus dem aktiven Fuhrpark genommen und können durch andere Fahrzeuge ersetzt werden. Dieser Ansatz wird im weiteren Verlauf auch für die Elektrofahrzeuge berücksichtigt. Basierend auf den Zulassungszahlen der Vergangenheit [31] wurde mittels linearer Regression die Entwicklung der Neuzulassungen abgeschätzt und zudem ein linearer Markthochlauf der alternativen Fahrzeugkonzepte bis zum Beginn des Zulassungsstopps von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor angenommen. Bild 17 und Bild 18 vergleichen die Entwicklung der PKW-Flotte für die unterschiedlichen Szenarien unter Berücksichtigung eines Zulassungsstopps von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor im Jahr 2025 bzw. 2035.

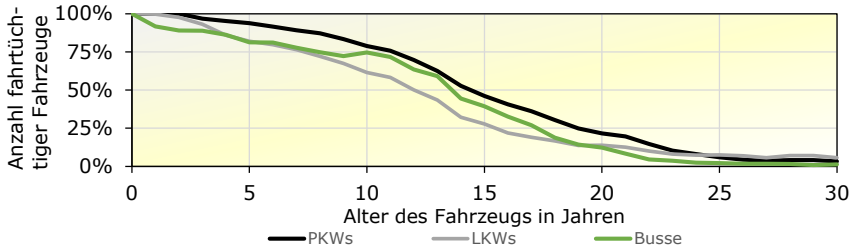


Bild 16 Altersstruktur unterschiedlicher in Deutschland zugelassener Fahrzeugtypen, nach [30],[31].

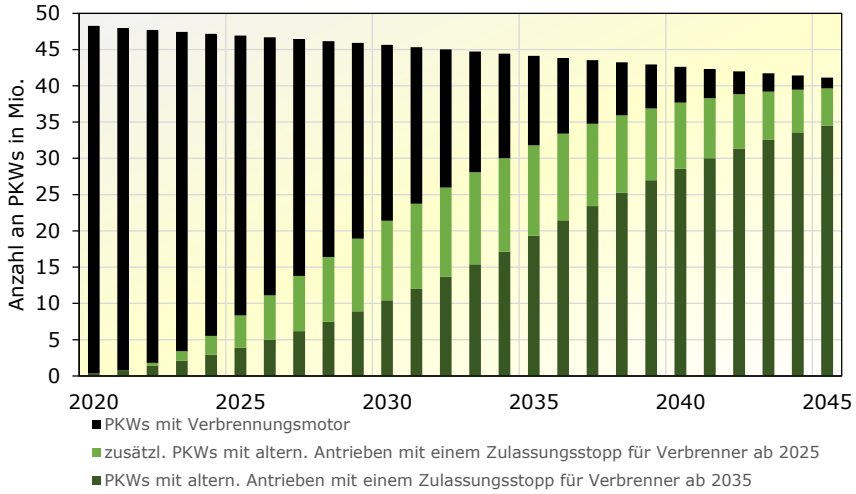


Bild 17 Einfluss des Zulassungsstopps von Verbrennern auf die Zusammensetzung des deutschen PKW-Bestands (ambitioniert: 2025; mutlos: 2035).

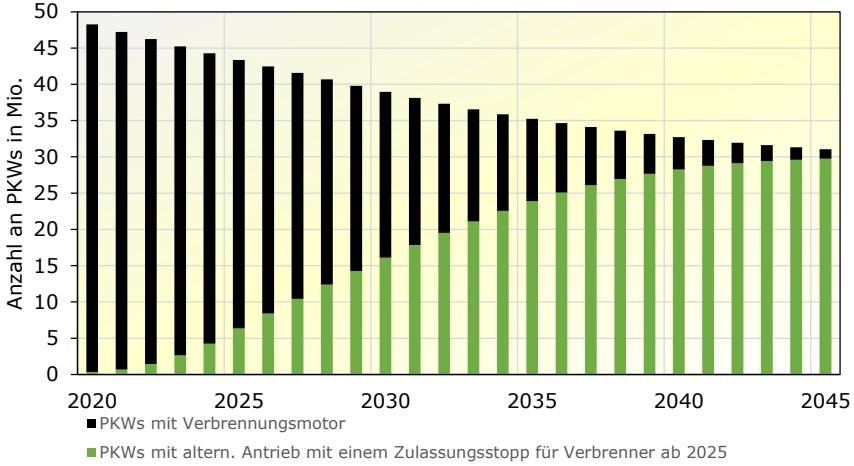


Bild 18 Zusammensetzung des deutschen PKW-Bestands im Szenario *visionär*.

Aus Effizienzgründen werden künftig batterieelektrische Fahrzeuge den Individualverkehr prägen. Der Anteil wasserstoffelektrisch betriebener PKWs ist mit 2,5 % (2035) bzw. 5 % (2045) vergleichsweise gering. Für Lastkraftwagen ist der prognostizierte Anteil doppelt so hoch. Während im Szenario *ambitioniert* im Jahr 2035 etwa 31 Mio. Elektrofahrzeuge (70 %) betrieben werden, sind es im Szenario *mutlos* aufgrund der verspäteten Zulassungsbeschränkung lediglich 19 Mio. (43 %). Für die CO_2-Neutralität im Jahr 2035 (Referenzszenario) bedeutet dies, dass allein im Individualverkehr ein zusätzlicher Bedarf an Wasserstofffolgeprodukten von ca. 108 TWh besteht.

Mit aktuell mehr als 1000 TWh ist der Energiebedarf im **Gebäudesektor** am höchsten. Dies ist insbesondere auf den hohen Raumwärmebedarf der nur teilweise sanierten Wohn- und Nichtwohngebäude und auf die geringe Effizienz der Heizungssysteme zurückzuführen [32]. Aktuell werden noch etwa 75 % der Heizungssysteme fossil betrieben [33]. Auf Grundlage der vom BDEW herausgegebenen Beheizungsstruktur im Gebäudebestand [33] und der vom Bundesverband des Schornsteinfegerhandwerks [34] erfassten Gas- und Ölfeuerungsanlagen, wurde die Anzahl und Zusammensetzung der Heizungssysteme zur Deckung des Raumwärme- und Trinkwarmwasserbedarfs ermittelt. Unter Berücksichtigung der Neuinstallationen fossil betriebener Systeme in den vergangenen Jahren, einer Anlagenlebensdauer von 25 Jahren sowie dem Installationsstopp neuer fossiler Kessel ab 2025 bzw. 2035 wurde die zukünftige Entwicklung der fossilen Heizungssysteme abgeschätzt. Der Rückgang dieser fossilen Systeme wird neben einem Anstieg von Fernwärmeanschlüssen sowie anderen Systemkonzepten wie z. B. die Wärmeversorgung durch Holzpelletheizungen primär von der Installation von Wärmepumpen kompensiert, vgl. Bild 19.

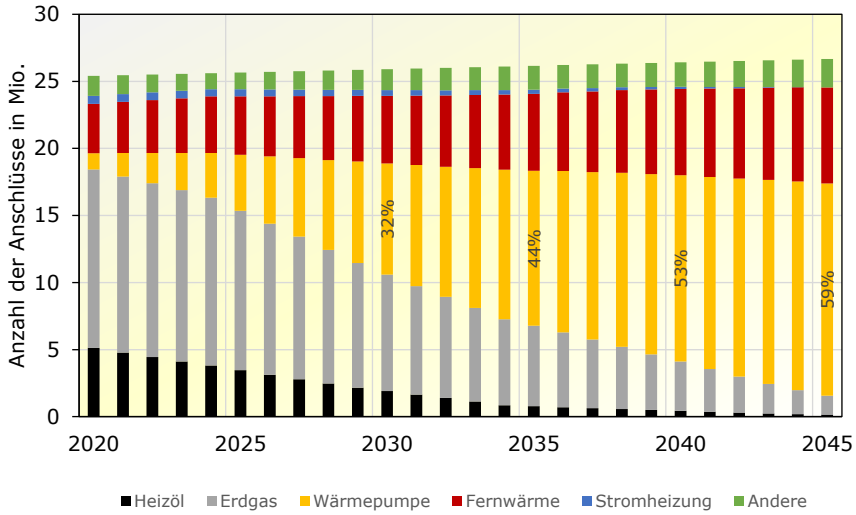


Bild 19 Zusammensetzung der Heizungssysteme für Warmwasser und Raumwärme in Gebäuden im Szenario *ambitioniert* und *visionär*.

Insbesondere für den effizienten Einsatz von Wärmepumpen ist es vorteilhaft, wenn zuvor die Gebäudesubstanz energetisch modernisiert wurde. Der Anteil der ab 2000 sanierten bzw. neu gebauten Gebäude liegt bei ca. 38 % [24]. Die anderen Gebäude werden vereinfacht als unsaniert betrachtet. In dieser Studie wurde angenommen, dass der sanierte Gebäudebestand im Mittel einen

Wärmebedarf von 55 kWh/m² aufweist. Der mittlere Wärmebedarf unsanierter Gebäude beträgt hingegen 178 kWh/m². Je nach Szenario werden zwischen 1 % und 2 % des Gebäudebestands jährlich saniert (siehe Bild 6). Dies reduziert den Energiebedarf des gesamten Gebäudebestands mit einer Fläche von 5620 Mio. m². Der Gesamtwärmebedarf liegt im Szenario *ambitioniert* bei ca. 597 TWh (2035) bzw. 492 TWh (2045). Bedingt durch die höhere Sanierungsquote im Szenario *visionär* reduziert er sich auf 548 TWh (2035) bzw. 409 TWh (2045).

In nicht energetisch modernisierten Gebäuden werden voraussichtlich auch zukünftig Verbrennungskessel eingesetzt werden. Deren Emissionen müssen durch den Einsatz von grünem Wasserstoff reduziert werden. Der Raumwärme- und Trinkwarmwasserbedarf des Gebäudesektors wird ergänzt durch einen Bedarf an Prozesswärme und -kälte, mechanischer Energie, Beleuchtung sowie Strom für Informations- und Kommunikationstechnik (IKT). Im Gegensatz zu anderen Studien wird in dieser Arbeit dieser Bedarf als konstant betrachtet. Einsparpotenziale, z. B. durch die Installation von LEDs, werden durch einen Anstieg von IKT, dem Bedarf an Klimakälte oder ähnlichem kompensiert.

Der jährliche Energiebedarf des **Industriesektors** beträgt derzeit ca. 704 TWh. Der Anteil fossiler Energien liegt bei über 55 % [7]. Aufgrund der zur Verarbeitung der Rohstoffe erforderlichen energieintensiven Hochtemperaturprozesse, steht der Industriesektor vor besonderen Herausforderungen [24]. Um die CO_2-Neutralität auch in diesem Sektor erzielen zu können, müssen innovative Technologien eingesetzt, die Energieeffizienz gesteigert sowie Rohstoffe vermehrt recycelt werden [27]. In dieser Studie wurde der Bedarf sowie dessen Zusammensetzung für die unterschiedlichen Zieljahre aus der Leitstudie der Dena [27] entnommen. Vorhandene fossile Brennstoffe in den Zieljahren wurden vereinfacht durch Wasserstoff bzw. dessen Folgeprodukten substituiert. Der Energiebedarf der Industrie wird langfristig von Strom (ca. 54 % im Jahr 2045) und Wasserstoff geprägt sein, wie Bild 20 zeigt. Insbesondere die chemische Industrie nutzt den Wasserstoff nicht nur energetisch, sondern auch stofflich. Auch hier wurden die Werte der Dena-Leitstudie übernommen [27].

Generell unterscheiden sich die Szenarien in der Höhe der Einsparpotenziale. Im Szenario *mutlos* liegt der Energiebedarf 10 % über, im Szenario *visionär* 10 % unter dem Bedarf des Referenzszenarios *ambitioniert*. Die relative Verteilung der Energieträger ist jedoch identisch.

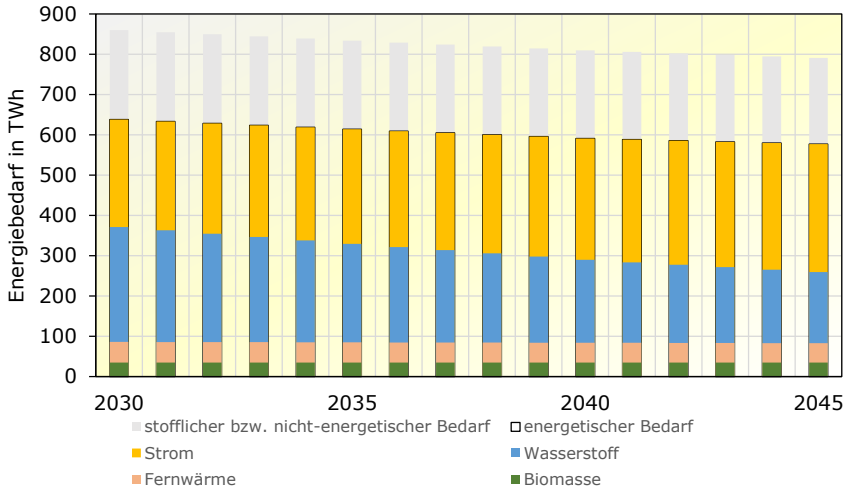


Bild 20 Zusammensetzung des Energiebedarfs für eine CO_2-neutrale Industrie im Szenario ambitioniert (Gesamtenergiebedarf in Anlehnung an [27]).

Die Entwicklung der erwarteten Zusammensetzung des Energiebedarfs ist für verschiedene Zieljahre in Bild 21 dargestellt. Zum einen ist zu erkennen, dass der Energiebedarf zukünftig deutlich sinkt. Dies ist maßgeblich auf die Effizienzsteigerungen beim Wechsel zur direkten Stromnutzung und auf die energetischen Gebäudesanierungen zurückzuführen. Zum anderen wird eine Effizienzlücke zwischen 2030 und 2045 sichtbar, die mit dem späteren Ausscheiden der fossilen Anlagen erklärt werden kann.

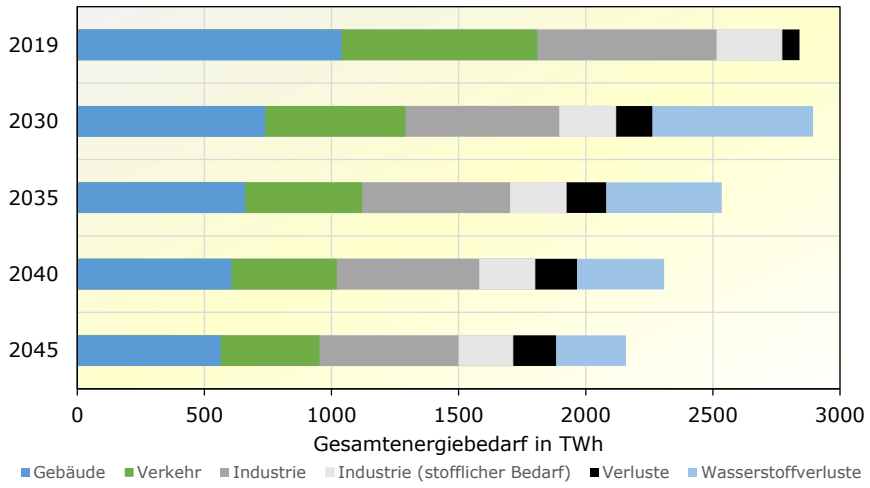


Bild 21 Sektorale Aufteilung des Energiebedarfs im Szenario *ambitioniert* für unterschiedliche Jahre der CO_2-Neutralität (Umwelt- und Abwärme sind nicht dargestellt, Wasserstoffverluste: Verluste bei der Herstellung von Wasserstoff und dessen Folgeprodukten; Daten für 2019 [7]).

A.2 Modellgrundlagen des Energiesystems

Im Folgenden werden die Annahmen und Rahmenbedingungen zur Modellierung des Energiesystems erläutert. Für die CO_2-neutrale Deckung des zukünftigen Energiebedarfs dürfen lediglich erneuerbare Energien zum Einsatz kommen. Wie im Abschnitt zur Diskussion der Methodik und Ergebnisse beschrieben, wird in dieser Studie die CO_2-Abscheidung nicht näher betrachtet.

Zur Deckung des Strombedarfs tragen Wasser- und Windkraft sowie die Photovoltaik, Biomasse und Geothermie bei. Die beiden Letzteren sowie die Solarthermie kommen zudem in der Wärmeversorgung zum Einsatz. In den Modellrechnungen wurde berücksichtigt, dass die Biomasse im Jahr 2035 mit 50 TWh zur Stromerzeugung beiträgt. Weitere 193 TWh entfallen auf die Wärmebereitstellung im Gebäude- und Industriesektor und auf die Nutzung der Biomasse im Verkehrssektor. Dem Modell liegen darüber hinaus die installierte Leistung sowie die bereitgestellte Energie der einzelnen erneuerbaren Energien für den Zeitraum von 1990 bis 2020 zugrunde [35]. Die Zahlen für das Jahr 2021 wurden größtenteils auf Basis der Vorjahreswerte abgeschätzt.

Für die zukünftige Entwicklung der installierten Leistung und bereitgestellten Energie der einzelnen erneuerbaren Energien mussten mehrere Annahmen getroffen werden. Tabelle 6 stellt die in dieser Studie berücksichtigen Volllaststunden und mittleren Lebensdauern der einzelnen Technologien gegenüber. Zudem sind die jährlichen Zubauzahlen (netto) aufgeführt, die aus den Berechnungsergebnissen dieser Studie resultieren. Das Potenzial für die Windkraft an Land wurde mit 200 GW [17] und auf See mit 70 GW [20] angenommen. Bei dem in dieser Studie bezeichneten max. Windenergieausbau wird das Potenzial vollständig erschlossen. Der jährliche Windzubau variiert je nach Zieljahr der CO_2-Neutralität.

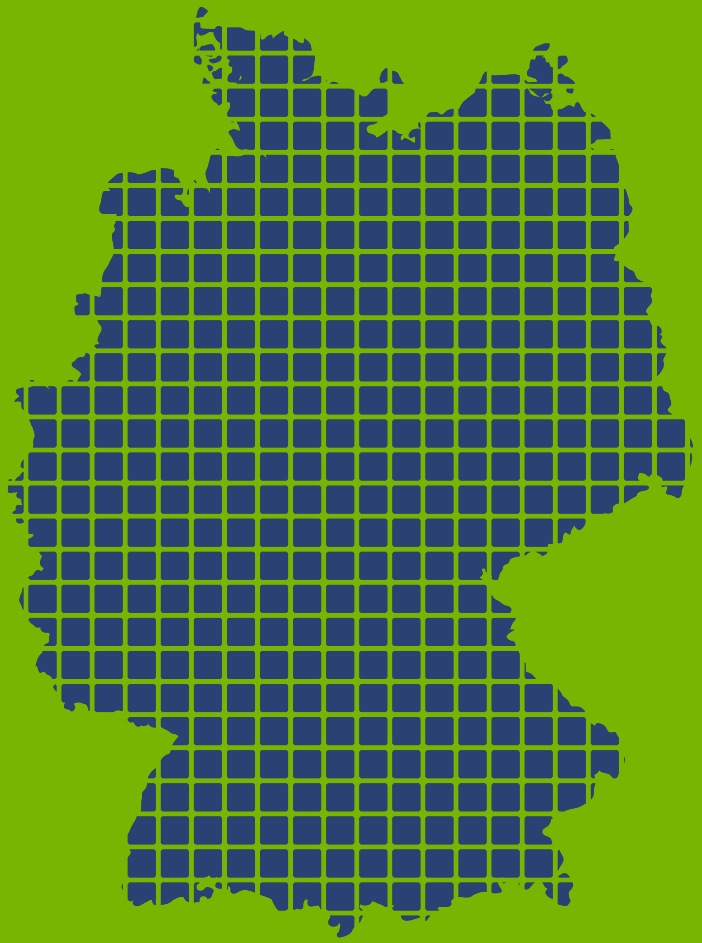
Tabelle 6 Technische Parameter zur Modellierung der wichtigsten erneuerbaren Energien für die Strombereitstellung. Der Windkraftzubau variiert je nach Zieljahr der Klimaneutralität und bezieht sich auf das Szenario mit max. Windausbau.

	Volllaststunden	mittlere Lebensdauer	Zubau
Wasserkraft	3500 h/a		0,05 GW/a
Windkraft an Land	2900 h/a [11]	25 a [36]	6 GW/a bis 16 GW/a
Windkraft auf See	3900 h/a [11]	20 a [36]	2,6 GW/a bis 7 GW/a
Biomasse	5500 h/a	20 a [36]	0,4 GW/a (brutto)
Photovoltaik	950 h/a [14]	27 a [36]	

Tabelle 7 Ermittelter Photovoltaik- und Windausbau verschiedener Studien für die klima- bzw. CO_2-neutrale Energieversorgung Deutschlands.

Studie	Zieljahr	Windausbau	Solarausbau
PIK [11]	2045	170 GW bis 236 GW	200 GW bis 550 GW
AGORA [24]	2045	215 GW	385 GW
ISE [13]	2050	297 GW	449 GW
IEK [25]	2045	285 GW	449 GW
EWI [27]	2045	180 GW	264 GW

https://pvspeicher.htw-berlin.de/solarstromausbau



htw. Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin

University of Applied Sciences