



Megatrends der globalen Energie- wende II

Stationen einer Erfolgsgeschichte und
die veränderte Rolle Deutschlands

Herausgeber	WWF Deutschland
Stand	Januar 2022
Koordination	Sebastian Breer (WWF Deutschland)
Kontakt	sebastian.breer@wwf.de
Mitwirkende	Henrik Maatsch, Viviane Raddatz, Fentje Jacobsen, Ulrike Hinz, Felix Schmidt (alle WWF Deutschland)
Autoren	Dr. Gerd Rosenkranz, Jürgen Quentin
Redaktion	Susanne Reinhold (www.reinhold-lektorat.de)
Design	Anita Drbohlav (www.paneemadesign.com)
Titelbild	IMAGO/UIG

INHALT

Vorwort	5
Zusammenfassung	7
Paris und die Suche nach einem neuen Gleichgewicht	13
Ein Blick zurück	17
Ein zivilisatorischer Fortschritt	18
Die Wende danach	23
Treiber 1: Die Realität der Klimakrise	24
Treiber 2: Greta Thunberg, eine globale Jugendbewegung und was sie auslöst	25
Treiber 3: Die Zukunftsangst der Industrie im Globalen Norden	26
Treiber 4: Eine Wende in der Rechtsprechung	27
Die Megatrends der globalen Energiewende	29
Megatrend 1: Das Ende der fossilen Ära ist unausweichlich	31
Der Kampf um das Ende der fossilen Verbrennung	35
Fossilwirtschaft: Investoren, Fonds und Aktionäre wenden sich ab	36
Energiewende in den USA auch ganz ohne Politik	39
Europa: Die Bilder gleichen sich	40
Asien: Die Klimakrise gemeinsam bewältigen oder gemeinsam scheitern	41
Paris wirkt, aber noch nicht genug	45
Donald Trumps „Verdienst“: Die Klärung der Prioritäten der Wirtschaft	50
Megatrend 2: Die Energiezukunft ist Gegenwart – fast überall	53
Durchmarsch für Wind und Sonne – Aber wo reiht sich Deutschland ein?	54
Beängstigende Ermüdungserscheinungen in Deutschland	56
Verdienste der Vergangenheit bleiben	59
Die globale Entwicklung stimmt: Alle Signale für Wind und Sonne stehen auf grün	60
Investitionen in die Stromerzeugung	63
Globale Stromerzeugung aus Erneuerbaren Energien 2020 erstmals vor Atomkraft	66
Eine Führungsrolle für China?	66
Indien, energetisch das nächste China?	68
Megatrend 3: Die Energiezukunft ist erneuerbar – und unumkehrbar	71
Warum der Kampf gegen Windmühlenflügel scheitert	74
Kosten für Erneuerbare Energien weiter im Sinkflug	75
Windenergie: Immer leistungsstärker, immer effizienter	77
Photovoltaik: Mehr Strom aus weniger Fläche	80
Erneuerbare versus Fossile: Die Kostenschere öffnet sich	81
Atomenergie: Renaissance fürs Klima?	84
Kleine modulare Reaktoren – eine überflüssige Debatte	86

Megatrend 4: Die Energiezukunft ist dezentral und öffnet Chancen für eine gerechtere Welt	89
Die dezentrale Natur der Energiewende	90
Die Folgen des Übergangs	92
Das Energiesystem kommt den Menschen näher	93
Dezentralität im Rahmen der Sektorenkopplung	93
Alles dezentral?	95
Eine Chance für den Globalen Süden	96
Megatrend 5: Die Energiewende ist elektrisch	101
Die Dimension der Elektrifizierung	102
Energieeinsparung als Nebenwirkung der Elektrifizierung	106
Freundliche Übernahme: Regenerativ erzeugter Strom wächst über sich hinaus	107
Mobilität: Fahren mit Strom	108
Gebäude: Strom macht Wärme	110
Industrie: Dekarbonisierung mit Strom	111
Megatrend 6: Energiewende braucht Wasserstoff – für „besondere Aufgaben“	113
Wasserstoff ist nicht das Öl des 21. Jahrhunderts	115
Wasserstoffstrategien: Die Steuerungsaufgabe der Politik	118
Wohin mit dem grünen Wasserstoff?	118
Wasserstoff für die Industrie	120
Wasserstoff im Transportsektor	120
Wasserstoff im Stromsektor	122
Wasserstoff im Gebäudesektor	123
Wasserstoff: Langfristig alles auf grün	124
Wohin und woher kommt der Bedarf an klimaneutralem Wasserstoff?	125
Megatrend 7: Ohne Digitalisierung keine Energiewende und keine Dekarbonisierung	127
Energiewende sofort – die Illusion der frühen Jahre	129
Das neue Stromsystem: Komplexer und sicherer?	129
Digitalisierung und Kleinteiligkeit als Prinzip des neuen Energiesystems	132
Die nächste Stufe: Künstliche Intelligenz und selbstlernende Systeme	133
Systemsicherheit durch schlaue Netze und günstige Großbatterien	135
Jenseits des Stroms: Digitalisierung der Industrie im Zeichen ihrer Dekarbonisierung	136
Fazit	139
Von Paris nach Glasgow: Die Energiewende auf dem Weg zur Unumkehrbarkeit	140
Die offene Frage: Klimakrise oder Klimakatastrophe	143
Welche Rolle für Deutschland?	146
Taugt Deutschland bei der Energiewende international (noch) als Vorbild?	147
Das Dilemma der neuen Bundesregierung: Selbst schnellstmöglich ist noch zu langsam	148
Abbildungen	151
Quellen & Anmerkungen	153

Vorwort



Der französische Außenminister Laurent Fabius, Vorsitzender der 21. UN-Klimakonferenz, schrieb am 12. Dezember 2015 Klimageschichte. Vor den Augen der Delegierten aus 196 Staaten und der Europäischen Union (EU) wurde die bisher umfassendste internationale Übereinkunft zum Klimaschutz besiegelt und angenommen: das Pariser Klimaschutzabkommen. Die Weltgemeinschaft hat sich damit völkerrechtlich bindend das Ziel gesetzt, die globale Erderwärmung auf deutlich unter 2 und möglichst 1,5 Grad Celsius (°C) bis 2050 zu begrenzen.

Der WWF hatte kurz vor diesem historischen Datum zusammen mit LichtBlick in einem Report die „Megatrends der globalen Energiewende“ aufgezeigt und damit zahlreiche Belege geboten, dass die Transformation des globalen Energiesystems bereits angelaufen war.

Das Ende der fossil-nuklearen Ära hatte faktisch begonnen, Erneuerbare Energien boomten weltweit und die Umgestaltung der Energiesysteme war längst keine Frage mehr, die sich ausschließlich auf die Industriestaaten begrenzte. Damals wurden fünf Megatrends der Energiewende identifiziert, die sich in der einen oder anderen Form überall auf der Welt abzeichneten. Seitdem sind sechs Jahre vergangen. Das Ziel von damals, die Klimakrise einzudämmen, ist geblieben – die Dringlichkeit, dieses Ziel zu erreichen, ist heute jedoch höher als je zuvor. Die Klimakrise schreitet mit großen Schritten voran und die bisherigen Klimaschutzmaßnahmen reichen bei Weitem nicht aus, um die Erwärmung des Planeten bei 1,5 °C zu stoppen, warnt der Sachstandsbericht des Weltklimarates IPCC vom August 2021. Die 26. UN-Klimakonferenz in Glasgow hat diese Einschätzung im November 2021 eindrucksvoll bestätigt und das Klimaabkommen von Paris angesichts der inzwischen eingetretenen realen Entwicklung der weltweiten Klimakrise noch einmal in Richtung Einhaltung der 1,5-Grad-Marke verschärft.

Doch noch immer gehen neue Kohlekraftwerke ans Netz, die Konzentration von Kohlendioxid (CO₂) in der Luft wächst weiter und der Ausbau der Erneuerbaren Energien reicht trotz aller Erfolge nicht zur Einhaltung der Klimaschutzziele. Negative Klimarekorde werden Jahr für Jahr aufs Neue gebrochen – mit dramatischen Konsequenzen für Mensch und Umwelt. Die Folgen der Klimakrise sind auf der ganzen Welt immer öfter und immer verheerender zu spüren.

Sechs Jahre nach Paris ist klar: Wir tun nicht genug!

Das gilt auch und besonders für Deutschland, das als ehemaliger Vorreiter der Energiewende von zahlreichen Staaten überholt wurde. Die EU und auch Deutschland haben ihre Klimaziele zwar in jüngster Zeit verschärft und sich der Klimaneutralität bis spätestens Mitte des Jahrhunderts verschrieben, hängen jedoch bei der Umsetzung weit hinterher. Dennoch gilt es, den Kopf nicht in den Sand zu stecken.

Dieser Report zeigt auf, dass weltweit die richtigen und notwendigen Prozesse zur Eindämmung der Klimakrise angelaufen sind. Auf die Megatrends der globalen Energiewende von damals schauen wir nun aus neuen Blickwinkeln. Zugleich sind zwei weitere Trends hinzugekommen, die aktuelle Dynamiken der nationalen und globalen Energiewende abbilden und Hoffnung machen. Auch wenn derzeit viel stockt: Noch können wir die globale Energiewende bis 2050 schaffen und die Klimakrise eindämmen. Dabei ist eines klar: Jedes Zehntel Grad zählt. Wir müssen dringend handeln!

A handwritten signature in black ink, reading 'Viviane Raddatz'. The signature is fluid and cursive, with a large, stylized flourish at the end.

Viviane Raddatz

Fachbereichsleiterin Klimaschutz und Energiepolitik

Zusammen- fassung

Im Herbst 2015 – unmittelbar vor der Weltklimakonferenz von Paris (COP 21) – veröffentlichte der WWF gemeinsam mit LichtBlick den Report „Megatrends der globalen Energiewende“. Die Ausarbeitung warf, ausgehend von der deutschen Energiewende, einen umfassenden Blick auf Entwicklungen der Energiewirtschaft rund um den Globus. Klar wurde schon damals, dass die Energiewende längst kein europäisches oder gar deutsches Phänomen mehr war, sondern in vielen Regionen der Erde Fahrt aufgenommen hatte. Seitdem haben sich die Veränderungen in der Klima- und Energiepolitik auf internationaler und europäischer Ebene enorm beschleunigt.

Das bahnbrechendste Ereignis war die Verabschiedung des Pariser Klimaabkommens im Dezember 2015 auf der 21. Weltklimakonferenz, die die Staatengemeinschaft dazu verpflichtet, die Erderhitzung auf höchstens 2 °C, möglichst aber auf 1,5 °C zu begrenzen. Die 26. Weltklimakonferenz in Glasgow hat diese Verpflichtung erneut bekräftigt. Die im Herbst 2015 von WWF und LichtBlick identifizierten fünf Megatrends der globalen Energiewende sind nach wie vor aktuell. Sie haben sich verstärkt, konkretisiert und weiterentwickelt. Neue Prozesse, initiiert aus der Mitte der Gesellschaft, trieben den Wandel voran. An erster Stelle die von der schwedischen Schülerin Greta Thunberg ausgelöste weltweite Jugendbewegung. Auch eine fundamental veränderte Sicht gewichtiger Segmente der globalen Wirtschaft auf die Klimakrise sowie eine zukunftsorientierte Wende in der Rechtsprechung und Regulatorik der Energiesysteme mit einem stärkeren Fokus auf Klimaschutz prägten und prägen diese Prozesse.

Der nachfolgende Bericht nimmt die Megatrends der globalen Energiewende erneut unter die Lupe. Dabei bleiben ihre Überschriften weitgehend gleich, wenn auch nicht immer identisch. Zwei zusätzliche Megatrends haben wir identifiziert, deren Wucht vor sechs Jahren noch nicht hinreichend wahrgenommen wurde.

Die sieben Megatrends der globalen Energiewende:

Megatrend 1: Das Ende der fossilen Ära ist unausweichlich

Die völkerrechtliche Verbindlichkeit des Klimaabkommens von Paris hat den Druck zum Ausstieg aus den fossilen Brennstoffen entscheidend erhöht. Um die Erderhitzung deutlich unter 2 °C, möglichst aber auf 1,5 °C zu limitieren, müssen weitaus größere Anteile der bekannten Kohle-, Öl- und Erdgasreserven im Boden bleiben als 2015 vor dem Hintergrund des damals angestrebten 2-Grad-Limits angenommen. Die Erschließung weiterer Vorräte wird – voraussichtlich gegen den Widerstand der Exportländer – kurzfristig beendet werden müssen.

Die zuerst aus der Klimaschutzbewegung erhobene Forderung, Kapital aus großen Kohle-, Gas- und Ölunternehmen abzuziehen, ist heute offizielle Strategie internationaler Energie- und Finanzorganisationen und vieler Regierungen auf dem Weg zur Klimaneutralität. Dennoch hinkt der reale Abschied von der fossilen Ära, die die Weltenergieversorgung seit der Industrialisierung geprägt hat, den klimapolitischen Beschlüssen nach wie vor dramatisch hinterher.

Der Ausstieg („Phase-out“) aus Kohle, Öl und Erdgas bleibt unausweichlich für das Erreichen der globalen Klimaschutzziele – entgegen der Schlusserklärung der 26. Weltklimakonferenz von Glasgow, die lediglich eine Verminderung („Phase-down“) des Kohleinsatzes fordert und Öl und Erdgas nicht einmal erwähnt.

Megatrend 2: Die Energiezukunft ist Gegenwart – fast überall

Erneuerbare Energien auf Basis von Wind und Sonne sind heute in vielen Regionen der Welt kostengünstiger und wettbewerbsfähig gegenüber der traditionellen Stromerzeugung aus Kohle, Erdgas oder Atomkraft. Der Kostenvorteil von Wind- und Solarenergie gegenüber fossil erzeugter Elektrizität wird weiter zunehmen, weil die CO₂-Emissionen der Stromerzeugung in immer mehr Regionen der Erde bepreist werden, wenn auch noch in unzureichender Höhe angesichts der realen und zu erwartenden Klimaschäden.

Aufgrund dieser Entwicklungen dominieren schon heute die Erneuerbaren rund um den Erdball den Zubau neuer Stromerzeugungskapazitäten. Zwischen 2014 und 2020 hat sich die weltweit installierte Windenergieleistung verdoppelt, die der Photovoltaik nahezu vervierfacht. Mehr als vier Fünftel der im Jahr 2020 neu installierten Erzeugungskapazität war erneuerbar. Fossile und nukleare Kraftwerke kamen in Summe noch auf 18 Prozent und sind damit weit abgeschlagen. 2020 flossen 70 Prozent der Neuinvestitionen in Anlagen zur Stromerzeugung aus Erneuerbaren Energien, 22 Prozent in fossile und acht Prozent in Atomkraftwerke. Windenergie und Photovoltaik sind die kostengünstigsten Erzeugungstechnologien der Zukunft. Sie überwinden die Großrisiken der fossilen und nuklearen Energiesysteme des 20. Jahrhunderts.

Alle Staaten der Erde sind aufgerufen, klimaneutrale Energiesysteme auf Grundlage ihrer jeweils spezifischen Realitäten zu installieren.

Megatrend 3: Die Energiezukunft ist erneuerbar – und unumkehrbar

Angetrieben von weiter sinkenden Kosten sind Erneuerbare Energien auf Basis von Wind und Sonne zu weltweiten Schlüsseltechnologien für das 21. Jahrhundert geworden. Weil gleichzeitig Strom aus der Verbrennung fossiler Energieträger systematisch teurer wird, ist eine Trendumkehr nicht mehr vorstellbar. Die Atomenergie spielt in Zukunft in Deutschland keine, in Europa und der Welt, wenn überhaupt, eine Nebenrolle. Sie ist zu teuer, ihre Risiken sind nicht beherrschbar und ihre Langzeitfolgen unkalkulierbar.

Eine Renaissance der Atomkraft auf Basis neuer, kleinerer Reaktoren käme als Beitrag zur Lösung der Klimakrise selbst dann zu spät, wenn sich die finanz- und sicherheitstechnischen Probleme allesamt in Luft auflösen würden. Die Energiezukunft wird getragen von Erneuerbaren Energien – die Entwicklung ist seit Inkrafttreten des Klimaabkommens von Paris unumkehrbar und wurde in Glasgow erneut bestätigt.

Der Ausbau der Erneuerbaren Energien, vor allem von Windenergie und Photovoltaik, muss rund um den Globus solange beschleunigt fortgesetzt werden, bis weltweit Klimaneutralität erreicht ist.

Megatrend 4: Die Energiezukunft ist dezentral und öffnet Chancen für eine gerechtere Welt

Die Stromversorgung aus fossil und nuklear betriebenen Großkraftwerken geht nach über hundert Jahren zu Ende und macht Platz für ein dezentral geprägtes Energiesystem auf Basis Erneuerbarer Energien. Aus der Physik der regenerativen Energiequellen ergibt sich ein Mischsystem aus dezentraler Stromerzeugung in Millionen kleinen aber auch einer erheblichen Anzahl großer Erzeugungsanlagen und einer zentral koordinierten, mindestens teilautomatisierten Systemsteuerung. Wie bei der *Stromerzeugung* aus regenerativen Energien führen auch neue *Stromanwendungen* etwa im Verkehrs- und Gebäudesektor zu dezentraleren Strukturen und einem insgesamt gleichmäßiger über die Fläche verteilten Stromverbrauch.

Im Weltmaßstab führt das regenerative Energiesystem tendenziell zu mehr Verteilungsgerechtigkeit, weil bisher im fossil-nuklearen Energiesystem benachteiligte Weltregionen über große erneuerbare Erzeugungspotenziale verfügen. Die Energie- und Klimawende kann so Chancen für eine insgesamt gerechtere Welt eröffnen.

Deutschland und der Globale Norden sind, nicht zuletzt aufgrund ihrer historischen Verantwortung für die Klimakrise, aufgefordert, diesen System- und Technologietransfer sowie den Aufbau der Energiesysteme der Zukunft im Globalen Süden technologisch voranzutreiben und finanziell abzusichern.

Megatrend 5: Die Energiewende ist elektrisch

Strom aus Erneuerbaren Energien wird mit der Energiewende zum universell einsetzbaren Energieträger auch jenseits seiner traditionellen Anwendungen. Die Dekarbonisierung des Verkehrssektors, des Wärmesektors und der Industrie erfolgt zu großen Teilen über den direkten oder indirekten Einsatz von regenerativ erzeugtem Strom. Aus der Umstellung der energetischen Basis von fossilen und nuklearen Brenn- und Spaltstoffen auf Erneuerbare Energien und grünen Strom ergibt sich auch für die betroffenen Branchen der Anwenderseite ein tiefgreifender technologischer Wandel.

Das künftige strombasierte Energiesystem arbeitet wesentlich effizienter als das alte, weil durch die Umstellung auf Strom thermische Umwandlungsverluste in den Kraftwerken minimiert werden und auch viele Anwendungstechnologien die eingesetzte Energie effektiver nutzen. Die Elektrifizierung unserer Wirtschaft und Gesellschaft ist in vollem Gange. Strom ist der maßgebliche Endenergieträger der Zukunft.

Die Systemumstellung von fossiler und nuklearer Stromerzeugung auf Erneuerbare Energien und Effizienz muss die direkte und indirekte Elektrifizierung in Gestalt der Kopplung der Sektoren über den gesamten Transformationsprozess immer bewusst mitdenken und mitumsetzen.

Megatrend 6: Energiewende braucht Wasserstoff – für „besondere Aufgaben“

Wasserstoff ist nicht der Energieträger zur Fortsetzung des fossilen Zeitalters mit anderen Mitteln. Weil Wasserstoff für seine Herstellung den Einsatz enormer Mengen an grünem Strom voraussetzt, bleibt er vielmehr ein rares und teures Gut und sollte gezielt dort eingesetzt werden, wo energieeffizientere elektrische Lösungen oder andere Alternativen dauerhaft nicht zur Verfügung stehen. Andererseits garantiert nur grüner Wasserstoff, bei dessen Herstellung so gut wie keine Treibhausgase in die Atmosphäre gelangen, langfristige vollständige Klimaneutralität.

Der Einsatz von Wasserstoff ist unverzichtbar bei der Dekarbonisierung wichtiger Industriebranchen, in nicht zu elektrifizierenden Segmenten der Mobilität sowie als Back-up (z. B. als Speicher und in Gaskraftwerken auf H₂-Basis) für künftige Energiesysteme, die – wie insbesondere das deutsche – abhängig von volatilen Energieträgern sind. Wegen der über die Welt ungleich verfügbaren neuen Leitenergien aus Wind und Sonne wird Deutschland auch nach der Energiewende auf Energieimporte – dann in Form von oder auf Basis von Wasserstoff – angewiesen bleiben, jedoch in geringerem Umfang.

Wie beim Ausbau der Erneuerbaren Energien ist auch bei der Schaffung der Infrastrukturen für eine ausreichende Versorgung mit grünem Wasserstoff die Geschwindigkeit das entscheidende Kriterium. Kluge staatliche Unterstützung, Steuerung und Priorisierung des Prozesses sind zentrale Voraussetzungen für den Erfolg.

Megatrend 7: Ohne Digitalisierung keine Energiewende und keine Dekarbonisierung

Die Digitalisierung der Energiebranche ist beides: Voraussetzung und Schlüssel für ein zuverlässiges und zukunftsfähiges Energiesystem. Bei der Umsetzung der Energiewende wachsen IT- und Energiesektor zusammen mit dem vorrangigen Ziel, Energieangebot und -bedarf auch in Zukunft zu jeder Zeit zur Deckung zu bringen. Künstliche Intelligenz wird schon in wenigen Jahren helfen, das neue, smarte Energiesystem effizienter, kostengünstiger und sicherer zu machen.

Digitaler Wandel und Dekarbonisierung befeuern sich gegenseitig und transformieren alle Kernindustrien – überall auf der Welt.

In Deutschland geht es kurzfristig darum, die noch weitgehend getrennten Sphären des digitalen Wandels und der Dekarbonisierung der Sektoren Energiewirtschaft, Industrie, Verkehr, Gebäudewärme und Landwirtschaft systemisch zu verknüpfen.

Paris

und die Suche
nach einem neuen
Gleichgewicht

Mit dem Klimaabkommen von Paris hat die internationale Staatengemeinschaft im Dezember 2015 Geschichte geschrieben. Der Beschluss verfolgt das zentrale Ziel, die Erderwärmung im Vergleich zum vorindustriellen Zeitalter auf deutlich unter 2 °C, möglichst aber auf 1,5 °C zu begrenzen. Er stand am Ende der 21. UN-Weltklimakonferenz und war der bis dahin mit Abstand ernsthafteste Versuch, auf die globale Klimakrise eine angemessene, ebenfalls globale Antwort zu geben. Das Abkommen wurde als bahnbrechender internationaler Erfolg gefeiert, weil sich 196 Staaten und die EU zum ersten Mal völkerrechtlich bindend auf ambitionierte Klimaschutzziele verpflichteten.

Der Klimapakt von Glasgow, der anlässlich der 26. Weltklimakonferenz im November 2021 verabschiedet wurde, hat die Einhaltung der Temperaturschwelle des Pariser Abkommens erneut bestätigt und angesichts der realen Klimaentwicklung sogar noch einmal in Richtung Einhaltung des 1,5-Grad-Pfades verschoben.¹ Erklärter Anspruch der Völkergemeinschaft ist es, bis zur Mitte des 21. Jahrhunderts einen weltweiten Gleichgewichtszustand wieder herzustellen, den die sich rasant entwickelnde und ebenso rasant wachsende Menschheit binnen eines Jahrhunderts erstmals seit ihrem Erscheinen auf der Erde zerstört hat. Es ist das Zeitalter des Menschen, das Anthropozän.

▼ Anzahl der Schadensereignisse

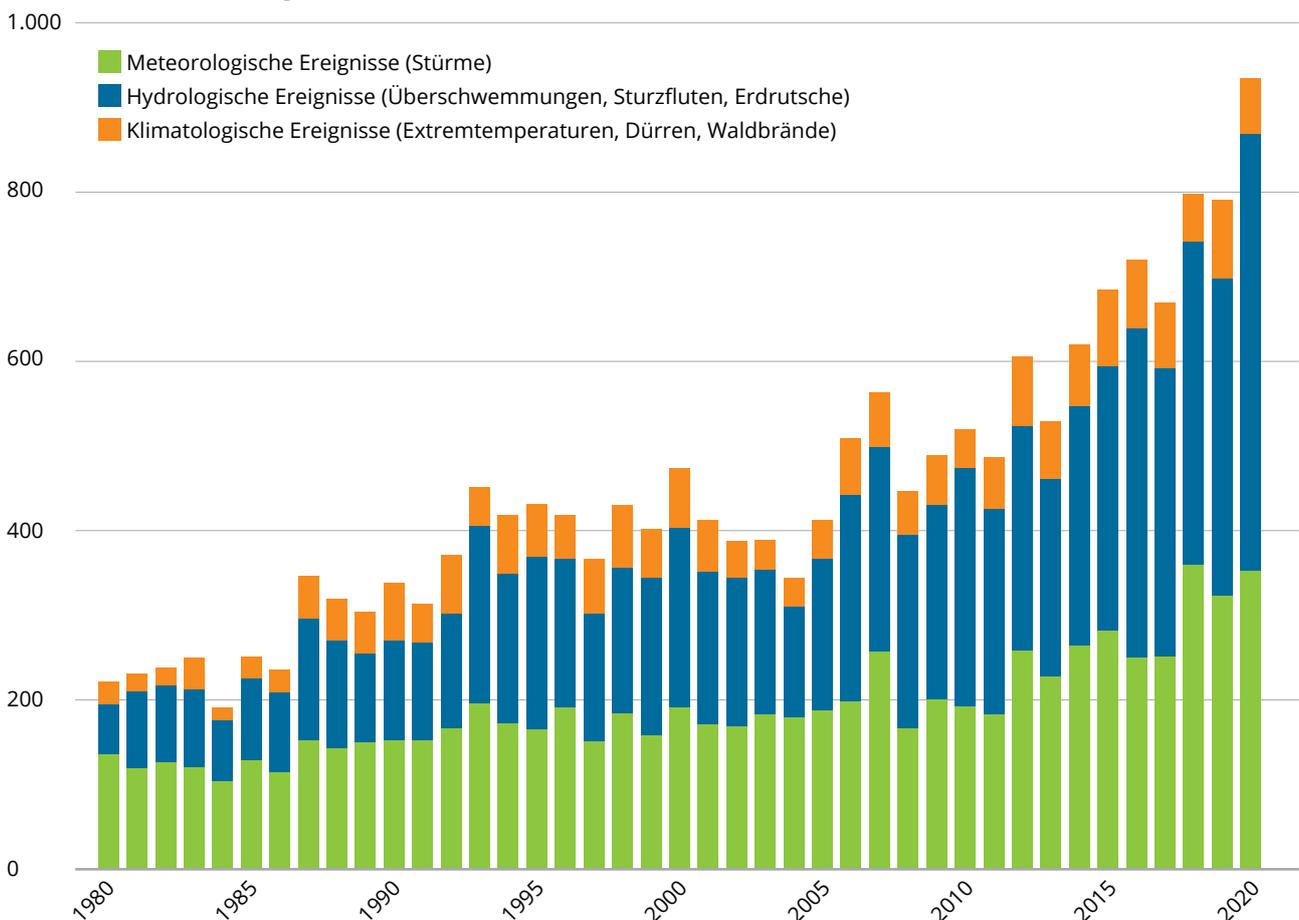


Abbildung 1:

Globale wetterbedingte Schadensereignisse in den vergangenen 40 Jahren; Quelle: Munich Re²

Der Mensch hat das physikalische System Erde aus dem Gleichgewicht gebracht. Jetzt erlebt er fast jeden Tag irgendwo auf der Welt die fatalen Folgen: in Lytton (Kanada), in Zhengzhou (Zentralchina), am Lake Tahoe (Kalifornien/Nevada) und auch in Ahrweiler (Rheinland-Pfalz) sowie in Erftstadt (Nordrhein-Westfalen). Dabei sterben immer mehr Menschen. Noch ist nicht ausgemacht, ob das, was wir erleben, aus der menschheitsgeschichtlichen Perspektive eine Episode bleiben wird – oder ob Kipppunkte erreicht werden, die die Erde für Homo sapiens dauerhaft zu einem unwirtlichen Ort machen.

So weit, so dramatisch. In jedem Fall muss der Versuch unternommen werden, es nicht zum Äußersten kommen zu lassen. Es ist eine, vielleicht *die* Überlebensfrage der Menschheit. Das in Paris formulierte (und sechs Jahre später in Glasgow bekräftigte) Klimaziel war das erste ernsthafte Signal, dass fast alle Regierungen der Welt die Dramatik der Situation im Prinzip verstanden haben. Praktisch bedeutet das: Für die Rückkehr ins Gleichgewicht darf der Mensch nicht auf Dauer mehr klimawirksame Gase in die Atmosphäre abgeben, als durch Wälder, Ozeane und andere biologische Senken oder auch technische Maßnahmen im gleichen Zeitraum aus ihr herausgefiltert werden. Der neue Gleichgewichtszustand, der das Schlimmste verhindern soll, firmiert unter dem Namen „Treibhausgasneutralität“ oder „Netto-Null“. Doch seine Realisierung liegt immer noch in weiter Ferne. Im Mittelpunkt des Klimavertrags von Paris steht deshalb das Versprechen der Völkergemeinschaft an sich selbst, die anthropogenen, also menschengemachten Emissionen, die die Atmosphäre unabhängig vom Ort ihres Entstehens immer weiter aufheizen, zu stoppen, bevor aus der Klimakrise eine weltumspannende und unumkehrbare Klimakatastrophe wird.

Dazu muss zunächst die Energie überall auf der Welt effizienter genutzt werden und sich insgesamt eine Lebensweise entwickeln, die weniger ressourcenintensiv ist als die aktuellen Lebensstile, vor allem die einer globalen Mittel- und Oberschicht. Doch dies allein wird nicht ausreichen. Wenn im Jahr 2050 mehr als 9,5 Milliarden Menschen³ zeitgemäß und in Würde auf der einen Erde leben wollen, ist die fundamentale Umgestaltung der Energieversorgung binnen nicht einmal einer Generation eine notwendige Bedingung.

Die großtechnische Verbrennung der fossilen Energieträger Kohle, Öl und Erdgas war der wohl wichtigste Treibsatz für den Zivilisationssprung der Menschheit seit Aufklärung und industrieller Revolution. Sie muss jetzt aufhören und neuen, klimaschonenden Energietechnologien Platz machen, deren zwischenzeitlich erreichte Einsatzreife wiederum nur aufgrund der ungeheuren Akkumulation von Wissen in den vergangenen 150 fossil-nuklearen Jahren möglich wurde.

Wind- und Sonnenenergie haben sich – jedenfalls für die heute überschaubare Zukunft und in immer mehr Weltregionen – als ökonomische wie ökologische Etappensieger des globalen Technologiewettbewerbs um die besten Lösungen durchgesetzt. Die Digitalisierung, die Übertragung von Elektrizität über Fernleitungen und diverse Methoden der Stromspeicherung machen die erfolgreichen Schlüsseltechnologien auch systemisch praxistauglich und letztendlich auch

jenseits der Klimafrage gegenüber dem hergebrachten Energiesystem überlegen. Ohne digitale Datenverarbeitung und Systemsteuerung, Stromtrassen mit hoher Übertragungsleistung sowie bedarfsgerechte Speichersysteme wäre ein Energiesystem für Milliarden Menschen auf Basis von Wind und Sonne nicht denkbar.

Das Abkommen von Paris markierte anlässlich der 21. Weltklimakonferenz im Jahr 2015 eine Zeitenwende, einen damals überraschenden Erfolg der internationalen Klimadiplomatie. Es sah in den Folgejahren zunächst nicht so aus, als hätten die Regierungen der Welt überhaupt realisiert, welches epochales Kunststück ihnen in Paris gelungen war. Zwar hatten die Staats- und Regierungschefs die Richtungsänderung in der Entwicklung der Menschheit nach zähem Ringen durchaus gezielt ausgelöst. Doch nach dem Konferenzmarathon versäumten sie es, den eben erst eingeschlagenen neuen Kurs durch wirksame Schritte zur Umsetzung auch zu halten.

Manche unter ihnen mochten sich an ihre Zustimmung schon wenig später kaum erinnern und machten nach der Rückkehr aus der französischen Hauptstadt zunächst zu Hause weiter wie zuvor. Die USA unter Donald Trump leiteten sogar umgehend den Ausstieg aus dem Abkommen ein. Viele andere Unterzeichnende, darunter auch die Deutschen, beschworen unablässig weiter die Dringlichkeit der Klimawende, hielten sich aber bei der Umsetzung zurück, so wie schon in den Jahren vor der Klimakonferenz von Paris. Viel zu lange blieb das Menschheitsproblem Klimakrise ein Projekt von Fachpolitiker:innen, selbst noch nach Paris. Mehrheitlich verstanden weder Politik noch Wirtschaft, dass die Klimakrise sich von anderen Krisen dadurch unterscheidet, dass sie nicht mehr weggeht – und ohne wirksames Umsteuern mit naturgesetzlicher Unerbittlichkeit geradewegs von der Krise in die Katastrophe mündet. Auch in Deutschland war diese Haltung verbreitet, trotz der Hitze- und Dürresommer der vergangenen Jahre.⁴ Die Zukunft wird zeigen, ob die Katastrophen im Jahr 2021, die weltweit aber auch hierzulande im Zusammenhang mit der Klimakrise stehen, daran dauerhaft etwas geändert haben.

Ein Blick zurück

Unmittelbar bevor sich die Staaten der Welt im Dezember 2015 in Paris auf das historische Abkommen verständigten, veröffentlichte die Umweltstiftung WWF gemeinsam mit LichtBlick ihren ersten Bericht „Megatrends der globalen Energiewende“.⁵ Der Report wurde vielfach gelobt, jedoch wegen seiner positiv grundierten Thesen auch als „*verwegen*“ kritisiert. Tatsächlich war die Grundmelodie des Reports optimistisch, obwohl der Erfolg von Paris, nach vielen Enttäuschungen und Rückschlägen in 20 Weltklimakonferenzen zuvor, zum Zeitpunkt der Drucklegung im Herbst 2015 noch gar nicht absehbar war.

Ein Thema schon damals: Trotz erkennbarer Fortschritte, unter anderem bei der Umsetzung der Energiewende in Deutschland, war bereits von „Ermüdungserscheinungen“ bei der Verfolgung der energie- und klimapolitischen Ziele die Rede. Diese haben sich in den Jahren nach Paris zunächst weiter verstärkt. Kleinmut, Mutlosigkeit, zum Teil auch offenes Ressentiment gegen diejenigen, die nicht müde wurden, vor den Folgen eines „Weiter so“ zu warnen, blieben an der Tagesordnung. Viel zu viele Entscheidungsträger:innen in Politik und Wirtschaft hatten den Ernst der Lage noch nicht verstanden.

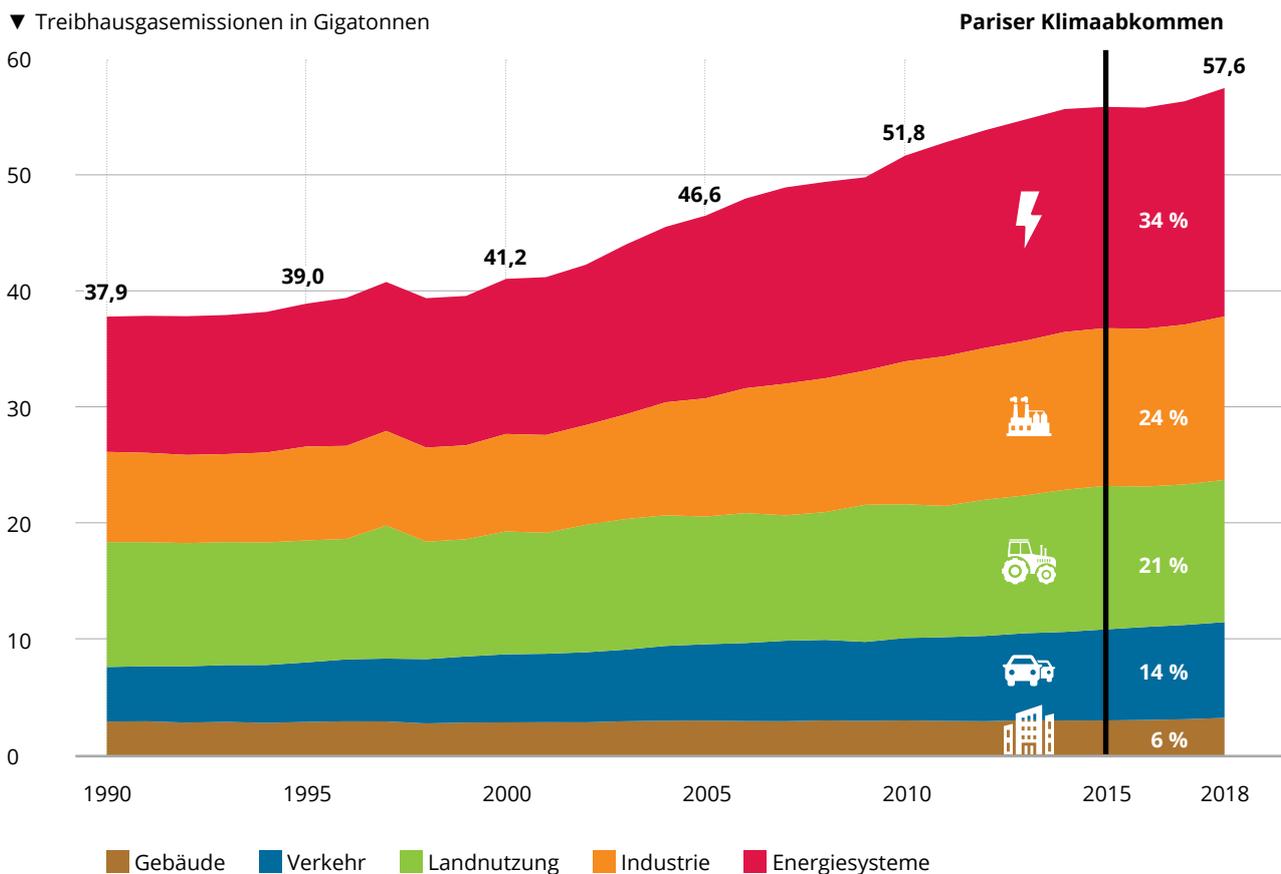


Abbildung 2:

Alarmierende Bilanz: Die Entwicklung der weltweiten Treibhausgasemissionen von 1990 bis 2018 nach Sektoren; Quelle: Lamb et al.⁶

Das Ergebnis ist kaum mehr als Stillstand, im Weltmaßstab nicht einmal das. Global stiegen die Treibhausgasemissionen auch nach dem vermeintlichen Durchbruch von Paris weiter an und erreichten 2019 den höchsten Wert aller Zeiten.⁷ Weltweit trägt die Energiewirtschaft mit mehr als einem Drittel der Gesamtemissionen die größte Verantwortung. Gleichzeitig gibt es in keinem Sektor wirklich einschneidende Klimaschutzfolge (Abbildung 2).

In Deutschland und Europa sanken zwar insgesamt die Emissionen, blieben aber hinter den – ohnehin zu wenig ambitionierten – Reduktionszielen zurück. Seit der Verabschiedung der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen in Rio de Janeiro im Jahr 1992 sind die vom Menschen verursachten Treibhausgasemissionen nur in wenigen Ausnahmeh Jahren real zurückgegangen: etwa nach der Weltfinanz- und -wirtschaftskrise der Jahre 2008/2009 sowie 2020, im ersten Jahr der COVID-19-Pandemie.⁸ In den Jahren seit 2010 reichte der Ausbau der Erneuerbaren Energien lediglich aus, um den Anstieg etwas zu bremsen, aber nicht um die Emissionsentwicklung zu stoppen oder gar umzukehren.

Selbst die Corona-Pandemie sorgte 2020 nur sehr kurzzeitig für einen spürbaren Rückgang der Emissionen. Im Oktober 2021 berichtete die Internationale Energieagentur (IEA) von einem enormen Wiederanstieg des globalen Kohle- und Ölverbrauchs, der 2021 zum Jahr mit dem zweitgrößten Anstieg der CO₂-Emissionen aller Zeiten machen werde.⁹

Ein zivilisatorischer Fortschritt

Andererseits: Die klimapolitische Stimmungslage in Deutschland ist heute eine andere als unmittelbar nach der Verabschiedung des Klimaabkommens von Paris. In der Gesellschaft insgesamt ist die Erkenntnis fest verankert, dass das lang gepflegte und bequeme „Weiter so“ an Grenzen stößt – an planetare Grenzen.

Deutschland hat nach der Katastrophe von Fukushima und einer ganzen Reihe weiterer nuklearer Beinahe-Katastrophen^{10,11} entschieden, aus der Nuklearenergie auszusteigen. Nach dem Ausstieg aus der Atomkraft soll bis spätestens 2038 auch mit der Kohleverstromung Schluss sein. Aus ökologischer und ökonomischer Sicht ist ein früherer Ausstieg bis zum Jahr 2030 notwendig und mit dem Antritt der Ampelkoalition auch wahrscheinlicher geworden. Das neue Ziel lautet Treibhausgasneutralität bis 2045, was bedeutet, dass auch die Tage des besonders treibhauswirksamen Energieträgers Erdgas in Deutschland gezählt sind.

Die viertgrößte Volkswirtschaft der Welt hat damit faktisch entschieden, ihren Energiebedarf in weniger als einer Generation nahezu ausschließlich aus Erneuerbaren Energien zu decken. Das hat weitreichende Konsequenzen. Denn es bedeutet, dass jede weitere Verzögerung beim Ausbau Erneuerbarer Energien als Angriff auf den Wirtschaftsstandort Deutschland gewertet werden muss. Es geht ab sofort um die Zukunftsfähigkeit Deutschlands als Industrienation und Hochtechnologiestandort. Die Frage nach dem „Ob“ der Energiewende hat sich erledigt. Auf der Tagesordnung steht das „Wie“ und mehr noch das

„Wie schnell“. Darin manifestiert sich ein zivilisatorischer Fortschritt, der die Chance eröffnet, dass sich Deutschland und ähnlich auch Europa gegen die reale Klimakrise im internationalen Verbund besser wappnen kann.

Ganz am Ende der 19. Legislaturperiode sorgte die Entscheidung des Bundesverfassungsgerichts vom März 2021 über das Klimaschutzgesetz für zusätzliche Dynamik. Binnen weniger Tage wurde in der Folge der Zeitpunkt, zu dem das Ziel „Klimaneutralität“ erreicht sein soll, von 2050 auf 2045 vorverlegt und das Klimaschutzgesetz aus dem Jahr 2019 entsprechend geändert. Seitdem verfügt Deutschland über ein ambitioniertes Ziel, aber leider noch über keinen politisch fixierten Umsetzungspfad. Immerhin, die 2015 in der Klimadebatte noch allgegenwärtige Behauptung eines Sonderwegs, auf den sich Deutschland begeben habe, ist aus der öffentlichen Diskussion praktisch verschwunden,¹² auch weil sich inzwischen alle gewichtigen Regionen der Welt auf diesen Weg begeben haben.

Die Internationale Energieagentur (IEA) wurde 1974 von der Industriestaatengemeinschaft OECD gegründet, um die Versorgung ihrer Mitglieder mit Erdöl abzusichern.¹³ Über Jahrzehnte unterschätzte die IEA in den Prognosen ihres

▼ Ausbau Erneuerbare Energien in Gigawatt

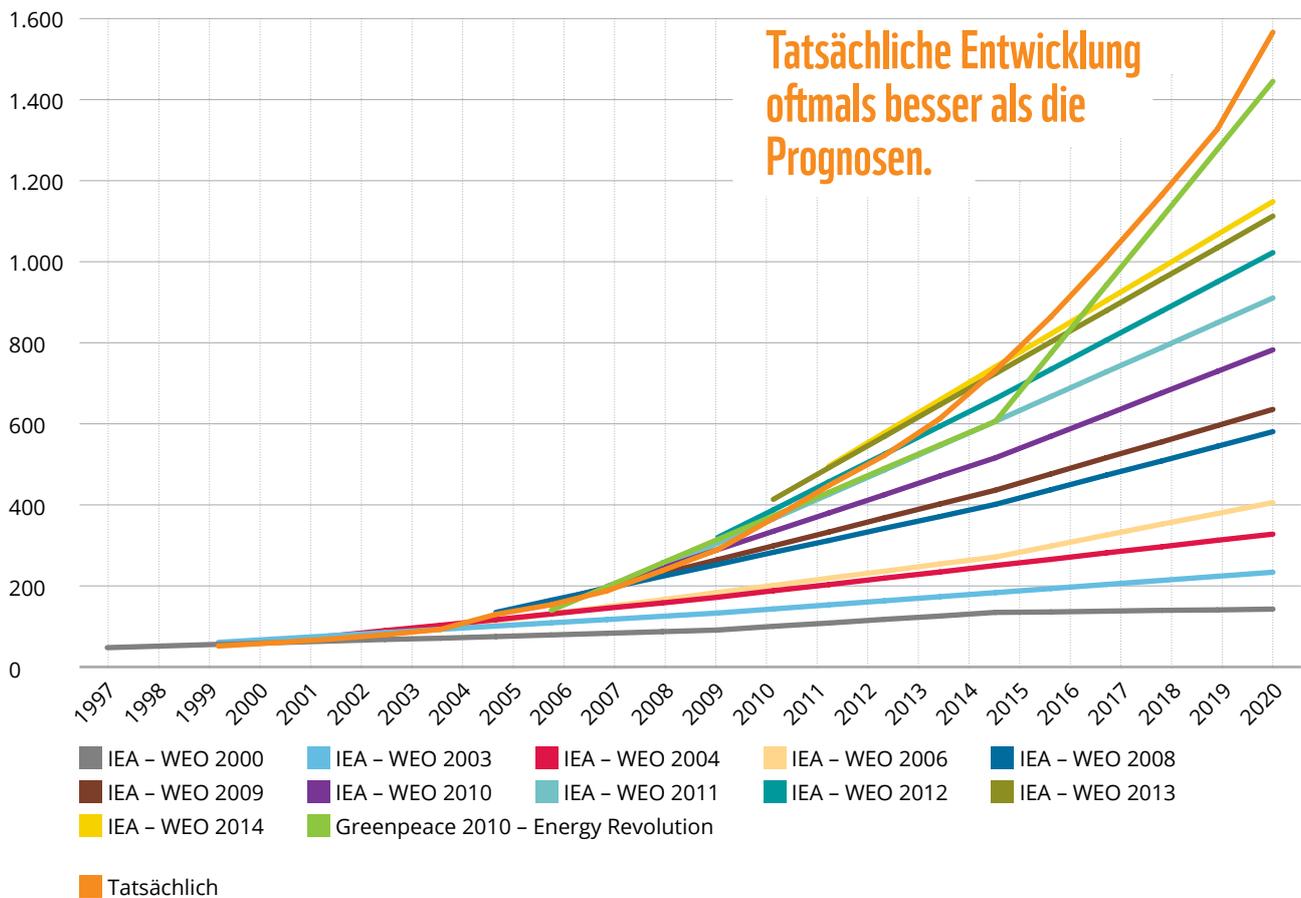


Abbildung 3:

Prognosen zum Zubau Erneuerbarer Energien (ohne Wasserkraft) weltweit und ihre tatsächliche Entwicklung; Quellen: IEA, Greenpeace, IRENA¹⁴

jährlichen Flaggschiff-Reports „World Energy Outlook“ (WEO) mit beeindruckender Sturheit die Dynamik des globalen Ausbaus der Erneuerbaren Energien, nur um sich Jahr für Jahr von der Realität widerlegen zu lassen (Abbildung 3). Zyniker:innen sagen, diese Linie entsprach exakt dem Auftrag der IEA, Schaden von der fossilen Wirtschaft abzuwenden.

Die Klimaschutzversprechen der Unterzeichner des Paris-Abkommens reichen bei weitem noch nicht aus, um die Erderhitzung wirksam einzudämmen.

Nach der Weltklimakonferenz am Ort ihres Sitzes Paris und der Amtsübernahme durch den neuen Exekutivdirektor Fatih Birol (2015) näherte sich die IEA endlich, dann aber mit Riesenschritten, den Realitäten. Im Mai 2021 erfolgte schließlich die vollständige Kehrtwende, als Birol erklärte: „Das weltweite Rennen um die besten Lösungen der Klimakrise hat begonnen, aber es ist nicht ein Rennen der Nationen gegeneinander, sondern ein gemeinsames Rennen gegen die Zeit.“¹⁵ Beeindruckend war nicht nur die Aussage selbst, sondern auch ihr Anlass: Der Chef der zutiefst vom fossilen Zeitalter geprägten Organisation verkündete die neuen Einsichten bei der Vorstellung des neuen IEA-Leitszenarios für die Welt unter dem Titel „Net Zero by 2050“.¹⁶

Seither sieht sich die Agentur an der Spitze der Bewegung zur Eindämmung der weltweiten Klimakrise. Im Vorfeld der Weltklimakonferenz COP 26 im schottischen Glasgow¹⁷ veröffentlichte die IEA wie jedes Jahr ihren „World Energy Outlook“¹⁸, in dem die Organisation die Regierenden der Welt eindringlich aufrief, die Anstrengungen gegen die Klimakrise zu intensivieren und den Einsatz fossiler Energieträger so schnell wie möglich komplett zu beenden. Birol beklagte, dass die Zusagen der Vertragsstaaten bis zu diesem Zeitpunkt weniger als 20 Prozent der Lücke zum Netto-Null-Szenario der IEA schließen würden (Abbildung 4).

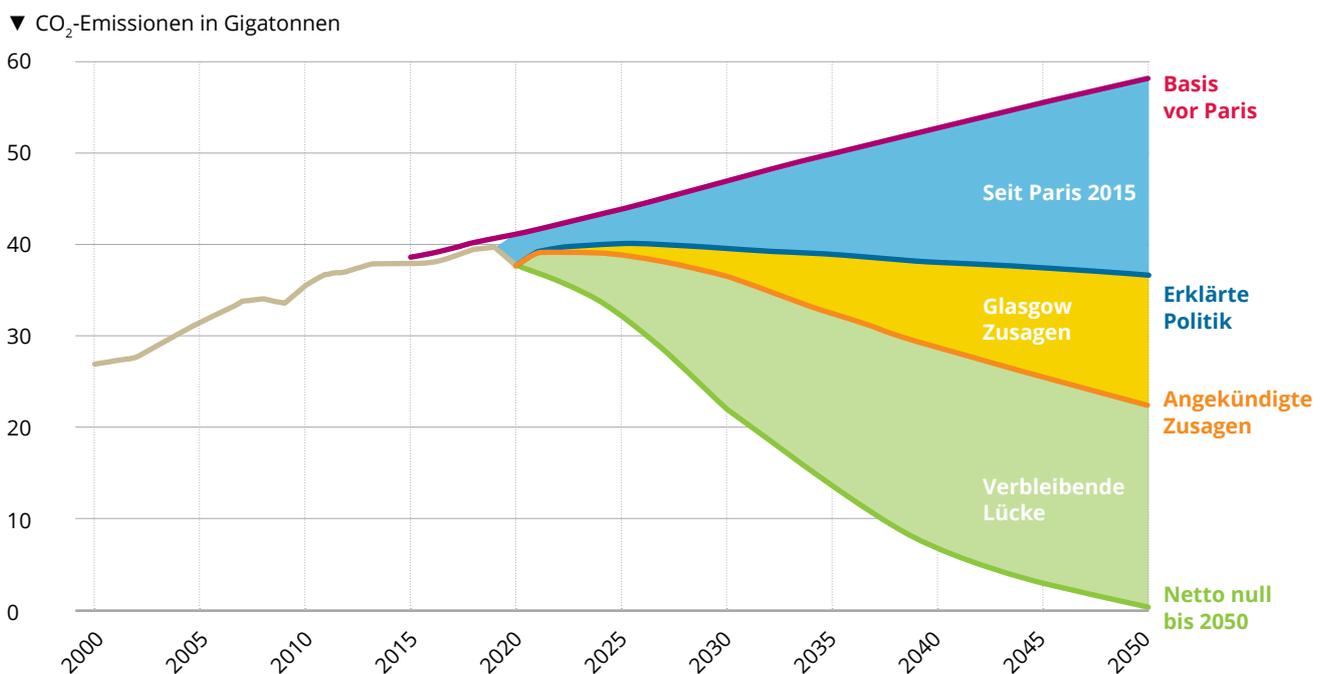


Abbildung 4:

Die Zusagen der Vertragsstaaten des Klimaabkommens von Paris zur Weltklimakonferenz in Glasgow bis Oktober 2021 reichen bei Weitem nicht, um 2050 Klimaneutralität zu erreichen; Quelle: IEA¹⁹

Seit Paris ist also viel geschehen. So viel, dass bei der Weltklimakonferenz in Glasgow manche Beobachter:innen von tektonischen Verschiebungen sprachen, von einer neuen Machtbalance, in der die Nichtregierungsorganisationen die Politik zu einem entschlosseneren Handeln anhielten – und dies auch Ergebnisse zeitigte, die ein erneutes jahrelanges „Weiter so“ nach der Konferenz unwahrscheinlich machen.

Nichtregierungsorganisationen (NROs), die das mediale Bild der Weltklimakonferenzen mindestens außerhalb der geschlossenen Verhandlungsräume von jeher prägten, waren in Glasgow nicht länger nur global agierende Umweltorganisationen wie der WWF oder Greenpeace, sondern auch zahllose Akteur:innen aus der Wirtschaft. Diese waren zwar vor und nach Paris auch schon vertreten, jedoch fast ausschließlich, um für eigene Interessen und gegen den Klimaschutz zu lobbyieren. Neben den Umwelt-NROs und anderen Akteuren der Zivilgesellschaft traten nun in Glasgow auffällig viele Vertreter:innen der Wirtschaft als Treiber der Transformation auf. Zwar gab es auch in der schottischen Hauptstadt noch fossil-basierte Unternehmen in ihrer gewohnten Rolle als Bremser. Doch eine große Zahl von Firmenvertreter:innen wechselte die Seiten, weil sie erkannt haben, dass das Zeitalter der fossilen Verbrennung zu Ende geht und alle verlieren, die nicht beizeiten ihr Geschäftsmodell auf die heraufziehende Ära klimaverträglicher Energiesysteme ein- und umstellen.

Auch deshalb scheint die Zeit reif, nach den Megatrends von 2015 erneut ein Zwischenfazit zu ziehen, nachzuzeichnen was auf dem Weg von Paris nach Glasgow im globalen Maßstab geschehen ist und was dies für die Energie- und Klimapolitik in Deutschland und der EU bedeutet. Welche Fortschritte der weltweiten Entwicklung auf dem Weg Richtung Klimaneutralität hat es gegeben und welche Defizite müssen überwunden werden, damit die Klimawende noch rechtzeitig gelingt?

Die Wende danach

Vier Entwicklungen, die seit der Konferenz von Paris die Sicht auf die Klimakrise verändert haben

Auf der Suche nach den Faktoren, die sich in Deutschland seit der Ausarbeitung des ersten WWF-Reports „Megatrends der globalen Energiewende“ im Sommer 2015 verändert und den Blick immer größerer Segmente der Gesellschaft auf die Klimakrise geprägt haben, stehen vier Phänomene im Vordergrund.²⁰ Die vier Treiber der mentalen Klimawende nach Paris haben sich, obwohl grundverschieden, verstärkt, bis sich schließlich auf breiter Front die Überzeugung durchsetzte, dass auch auf der deutschen Wohlstandsinsel ein „Weiter so“ keine Option mehr sein kann.

Treiber 1: Die Realität der Klimakrise

Viel zu lange kamen Abwiegler:innen und Klimawandelleugner:innen nach jeder Flut oder Dürreperiode mit der Parole durch, schlechtes Wetter habe es immer schon gegeben. Viele Klimawissenschaftler:innen waren angesichts der immer greifbareren Realität der Krise tief besorgt – und doch mehrheitlich defensiv in ihren öffentlichen Einlassungen. Sie fürchteten, nicht zu Unrecht,²¹ als Alarmisten angefeindet zu werden, die die Veränderungen dramatisieren.

Natürlich wussten die Expert:innen besser als Laien, dass Wetter und Klima nicht in eins zu setzen sind. Gleichzeitig passte die Häufung bestimmter Extremwetterereignisse beängstigend genau zu ihren Berechnungen über die Folgen einer vom Menschen zusätzlich energetisch aufgeladenen Atmosphäre.

Dann übertraf der Sommer 2021 die schlimmsten Befürchtungen: der „Hitzedom“ im Nordwesten der USA und im Westen Kanadas mit nie zuvor gemessenen Temperaturen, der Auslöschung der Ortschaft Lytton (British Columbia) und hunderten vorzeitiger Todesfälle, die Hochwasserkatastrophe in mehreren chinesischen Provinzen mit zehntausenden zerstörter Häuser, fast 38 Millionen Betroffenen und mindestens 300 Opfern; schließlich der in Deutschland beispiellose Einschlag in Rheinland-Pfalz und Nordrhein-Westfalen mit mehr als 180 Toten.

Es war nicht nur die Nähe der Ereignisse, die die Schockwirkung auslöste, sondern auch ihre Gleichzeitigkeit rund um den Globus und nicht zuletzt der von Meteorologen fachlich unterlegte Verdacht, dass der Klimawandel vergleichbare Wetterlagen mit Tiefs und Hochs, die sich kaum von der Stelle bewegen, systematisch hervorrufen könnte.

Schon seit Jahrzehnten bemühen sich wissenschaftliche Institutionen und Initiativen um ein besseres Verständnis der Abläufe in der sich wandelnden Atmosphäre, auch um potenziell Betroffene besser und früher warnen zu können. Ein eigener Wissenschaftszweig, die sogenannte Attributionsforschung, ist entstanden, der sich allein mit der Frage beschäftigt, welche Extremwetterereignisse mit wie hoher Wahrscheinlichkeit dem Klimawandel zugeordnet werden können.²² Das Inferno im kanadischen Lytton, dem Rekordtemperaturen vorausgegangen waren, die um 4 bis 5 °C höher lagen als die höchsten jemals in dem Ort gemessenen Werte, war nach einer Datenanalyse der Forschergruppe World Weather Attribution Initiative extrem unwahrscheinlich. Ohne den Klimawandel als zusätzlichen Antrieb wären Temperaturen von fast 50 °C „so gut wie unmöglich“ gewesen, so die Forschenden.²³

Mit jedem Extremwetterereignis wächst auch das Wissen über die veränderten Bedingungen in der Atmosphäre. Nach wie vor ist wahr, dass nicht jeder heftige Hagelschauer seinen Ursprung in der globalen Erhitzung hat. Aber die Häufung der Ereignisse rund um den Globus und ihre beängstigend wachsende Intensität machen diese Diskussion zunehmend obsolet. Nicht nur Fachleute haben begriffen: Die dramatischen Wetterphänomene der Gegenwart sind erst der Anfang.

Treiber 2: Greta Thunberg, eine globale Jugendbewegung und was sie auslöst

Am 20. August 2018, in Schweden war es der erste Schultag nach den Sommerferien, setzte sich Greta Thunberg mit ihrem selbst gemalten Schild mit der Aufschrift „Skolstrejk för klimatet“ („Schulstreik für das Klima“) vor den schwedischen Reichstag in Stockholm. Niemand – und schon gar nicht die Schülerin selbst – ahnte, dass dies der Startschuss für eine globale Jugendbewegung sein würde, die binnen Monaten das erreichte, worum sich hunderttausende Wissenschaftler:innen und Aktivist:innen über Jahrzehnte weitgehend vergeblich bemüht hatten: die Klimakrise ganz oben auf der Agenda zahlreicher Staaten und auch der Weltpolitik zu etablieren.

Es musste vieles zusammentreffen, damit es so kam. Aber im Kern führte ein ebenso schlichter wie überzeugender Dreiklang zu dem historischen Erfolg, der die Bewegung zum Antreiber der Weltpolitik avancieren ließ: Die Jugendlichen haben erstens die wissenschaftlichen Fakten bei der dramatischen Zeichnung der Krise und ihrer vorhersehbaren Folgen auf ihrer Seite, sie sind zweitens schon qua Alter nicht für die Klimaerhitzung verantwortlich und sie werden drittens aus demselben Grund diejenigen sein, die umfassender als die Eltern- und Großelterngeneration von ihr betroffen sein werden. Die bittere Wahrheit lautet: Kinder haften für ihre Eltern.

**Die bittere Botschaft
der weltweiten
Fridays-for-Future-
Bewegung lautet:
Kinder haften für
ihre Eltern.**

Aus dem Kleinen und Kleinteiligen, das die Bewegung „Fridays for Future“ etwa im Alltag der Deutschen bewirkte, entstand der mentale Wandel einer Gesellschaft als wichtiger Motor für eine in Zukunft vielleicht angemessene Klimaschutzpolitik. Denn weil die Jugendlichen freitags nicht zur Schule gingen (und *nur* deshalb)²⁴, wurde der Schulstreik Thema in buchstäblich jeder Familie mit schulpflichtigen Kindern – auch in solchen, in denen die Entscheider über die Zukunft Deutschlands sitzen. In Summe blieb dies nicht ohne Wirkung auf die Politik.

Treiber 3: Die Zukunftsangst der Industrie im Globalen Norden

Vor wenigen Jahren noch beschworen Teile der traditionellen Wirtschaft regelmäßig die *„Deindustrialisierung des Standorts Deutschland“*, wenn Umweltschützer:innen eine konsequente Klimapolitik oder den *„Kohleausstieg“* einforderten – ein Begriff übrigens, der erst nach dem Pariser Abkommen Karriere machte und bis dahin in der deutschen Politik nahezu tabu war.

Inzwischen kommen prägende Industriebranchen und Unternehmen bei ihren öffentlichen Veranstaltungen nur selten ohne Diskussionsbeitrag eines Vertreters oder einer Vertreterin von *„Fridays for Future“* aus. Arm in Arm mit Umweltbewegten und Wissenschaftler:innen fordern Wirtschaftsführer:innen etwa aus der Auto- oder Stahlindustrie mittlerweile den beschleunigten Ausbau der Erneuerbaren Energien, weil der Umstieg auf Wasserstoff-Stahl, Elektroautos oder Wärmepumpen sonst keinen Sinn ergibt. Einem Unternehmen wie VW, das sich seit einigen Jahren auf Elektromobilität mit batterieelektrischem Antrieb konzentriert, bleibt auch gar nichts anderes übrig, als nach mehr grünem Strom zu rufen.

Manche scheinen allerdings die Hoffnung auf den Staat schon aufgegeben zu haben und bilden Konsortien mit Energieunternehmen oder Windradherstellern, um sich sauberen Strom im eigenen Portfolio zu sichern. Der Chemiekonzern BASF etwa plant gemeinsam mit dem Energieversorger RWE in der Nordsee einen gigantischen Offshore-Windpark, der bis 2030 auf eine Leistung von zwei Gigawatt (2.000 Megawatt) kommen soll. Mit dem Windstrom vom Meer will BASF seine Produktion in Ludwigshafen ergrünen, außerdem soll der Markthochlauf von grünem Wasserstoff gefördert werden.²⁵ *„Energiewende selber machen!“* – der alte Slogan der Umweltbewegung wird von Teilen des Industriemanagements übernommen.

Geradezu symbolhaft erscheint da die demonstrative Rolle des früheren Siemens-Chefs Joe Kaeser, der 2021 auf den Posten des Aufsichtsratsvorsitzenden des von Siemens abgespaltenen Kraftwerkskonzerns Siemens Energy wechselte. Erst outete sich Kaeser als Anhänger der Jugendbewegung *„Fridays for Future“*, anschließend warb er im Bundestagswahlkampf 2021 offensiv für die Grüne Annalena Baerbock als Kanzlerin.

Selbstverständlich ist auch dieses Bild nicht einheitlich. Es gibt Nachzügler und nach wie vor ist es Strategie von Unternehmen, mit dem alten klimaschädlichen Geschäftsmodell noch so lange wie möglich Kasse zu machen, um dann den Übergang aus einer vermeintlich gesicherten Position anzugehen. Doch eine stetig wachsende Zahl namhafter Unternehmen hat diese Phase hinter sich gelassen. Sie haben verstanden und organisieren sich zum Beispiel in der klimapolitisch aktiven Stiftung 2^o.²⁶ Im Oktober 2021 versammelten sich 69 deutsche Unternehmen unter der Devise „Eine Umsetzungsoffensive für Klimaschutz. Jetzt.“²⁷

Treiber 4: Eine Wende in der Rechtsprechung

Der real existierende Klimawandel, die globale Jugendbewegung und der Aufsprung wichtiger Teile der Industrie auf den „Klimazug“ verdichteten sich in den vergangenen Jahren zu einer grundlegenden Wende in der Klimaschutzdebatte. Diese erfasste schließlich auch das höchste deutsche Gericht. Mit seinem historischen Beschluss im Frühjahr 2021 wies das Bundesverfassungsgericht einer immer noch zögerlichen Politik geradezu demonstrativ die Richtung und verfügte im Ergebnis eine starke Beschleunigung aller Anstrengungen zum Schutz des Klimas. Die Karlsruher Richter:innen haben mit großer Klarheit entschieden, dass die ältere Generation wirksamen Klimaschutz nicht auf Kosten der Jungen in die Zukunft verschieben darf. Wenn die Regierenden nicht weitere höchstrichterliche Kurskorrekturen provozieren wollen, müssen sie die seit mehr als eineinhalb Jahrzehnten verfolgte Politik der langen Bank beenden.

Im O-Ton des Gerichts klingt die Zurechtweisung so: Es dürfe *„nicht einer Generation zugestanden werden, unter vergleichsweise milder Reduktionslast große Teile des CO₂-Budgets zu verbrauchen, wenn damit zugleich den nachfolgenden Generationen eine radikale Reduktionslast überlassen und deren Leben umfassenden Freiheitseinbußen ausgesetzt würde“*.²⁸ Mit anderen Worten: Es gibt in Deutschland nunmehr ein Grundrecht auf Klimaschutz, und je weiter der Klimawandel fortschreitet, umso mehr Gewicht erhält das Klimaschutzgebot in der Abwägung mit anderen Grundrechten.

Seit dem historischen Klimabeschluss des Bundesverfassungsgerichts von 2021 gibt es in Deutschland faktisch ein Grundrecht auf Klimaschutz.

Die Große Koalition novellierte in der Folge des am 29. April 2021 veröffentlichten Beschlusses des Bundesverfassungsgerichts – den Bundestagswahlkampf vor Augen – das verfassungswidrige Klimaschutzgesetz von 2019 in Rekordzeit und zog das Ziel der Treibhausgasneutralität von 2050 auf 2045 vor. Das war richtig. Doch ohne Maßnahmen, die das neue Ziel erreichbar machen, würde die neue Zielmarke die Emissionen in der realen Welt nicht mindern. Diese Maßnahmen zu entwerfen und zügig umzusetzen, delegierte die damalige Bundesregierung als Auftrag an ihre Nachfolgerin. Die Ampelregierung muss nun unter höchstem Zeitdruck das leisten, was vorherige Bundesregierungen versäumt haben.

Nur vier Wochen, nachdem das Bundesverfassungsgericht das deutsche Klimaschutzgesetz aus dem Jahr 2019 für verfassungswidrig erklärt hatte, folgte in den Niederlanden der nächste Paukenschlag vor Gericht. Diesmal erzielte es nicht einen Staat oder dessen Regierung, sondern den Ölriesen Shell mit Sitz in den Niederlanden.²⁹ Das Bezirksgericht in Den Haag verurteilte den Konzern nicht nur, seine eigenen CO₂-Emissionen deutlich stärker zu reduzieren als bisher angekündigt, sondern auch die seiner Lieferanten und Kunden.³⁰ Jedes Unternehmen sei jetzt gewarnt, erklärte ein Sprecher von sieben Umweltorganisationen und 17.000 Bürger:innen, die die Klage angestrengt hatten, „*dass Geschäftsmodelle auf Kosten von Natur und Klima nicht länger zulässig*“ seien.³¹

Die Mega- trends der globalen Energie- wende

Megatrends hätten ihren Namen nicht verdient, wenn sie sich nach sechs Jahren in nichts auflösen könnten. Insofern kann nicht überraschen, dass die Megatrends der globalen Energiewende, die in der Publikation von WWF und LichtBlick im Herbst 2015 unmittelbar vor der Weltklimakonferenz von Paris (COP 21) identifiziert wurden, heute fortwirken. Sie haben sich verstärkt, konkretisiert und weiterentwickelt. Deshalb nehmen wir sie erneut unter die Lupe.

Wie unterscheidet sich die durch Megatrends geprägte Lage der Welt unter den Bedingungen der Klimaerhitzung im Jahr 2021 von der des Jahres 2015? Was hat sich verändert? Wie tief war der Einschnitt, den Paris hinterlassen hat? Was hat die Entscheidung der Staatengemeinschaft bei der 21. Weltklimakonferenz, die Erderhitzung gegenüber dem vorindustriellen Niveau nicht nur auf 2 °C begrenzen zu wollen, sondern möglichst auf 1,5 °C, letztlich bewirkt? Inwieweit gab es tatsächliche Konsequenzen für den Klimawandel oder beschränkte sich die Wirkung des Beschlusses lediglich auf Absichtserklärungen mit höherem Ambitionsniveau?

Eines sei vorausgeschickt: Mit zwei Ausnahmen identifizieren wir in diesem Report dieselben Megatrends wie 2015. Die Headlines bleiben weitgehend gleich, wenn auch nicht immer identisch.

Megatrend 1:

Das Ende
der fossilen Ära
ist unausweichlich

- Die völkerrechtliche Verbindlichkeit des Klimaabkommens von Paris hat den Druck zum Ausstieg aus den fossilen Brennstoffen entscheidend erhöht.
- Noch größere Anteile der bekannten Kohle-, Öl- und Erdgasreserven müssen im Boden bleiben, als bis 2015 angenommen. Die Erkundung weiterer Vorräte wird voraussichtlich gegen den Widerstand der Exportländer beendet.
- Die zuerst von der Klimaschutzbewegung erhobene Forderung, Kapital aus großen Kohle-, Gas- und Ölunternehmen abzuziehen, ist heute offizielle Strategie internationaler Energie- und Finanzorganisationen und vieler Regierungen auf dem Weg zur Klimaneutralität.
- Aber: Noch hinkt der reale Abschied von der fossilen Ära den klimapolitischen Beschlüssen und Ankündigungen dramatisch hinterher.

Der globale Klimawandel ist allgegenwärtige Realität. In deutlichem Kontrast zur Situation des Jahres 2015 gehört diese Feststellung heute zum Alltagswissen der Menschen in großen Teilen der Welt. Beschlüsse wie die Abschlusserklärung des G7-Gipfels 2015 im bayerischen Schloss Elmau, in der die Staats- und Regierungschefs der G7-Staaten erstmals die Dekarbonisierung ihrer Volkswirtschaften thematisierten, galten seinerzeit als sensationell. Nach der Verabschiedung des Klimaabkommens von Paris, die nur wenige Monate später folgte, gehören Bekenntnisse zum globalen Klimaschutz in fast allen Regionen der Welt zum Standard jeder Politik. Von den meisten Menschen wurden sie jedoch über Jahre eher achselzuckend zur Kenntnis genommen. Dieser Gleichmut gegenüber der Ankündigung einer epochalen Wende der energetischen Lebensgrundlagen hatte eine banale Ursache: Im realen Leben änderte sich zunächst so gut wie nichts.

Die dem als Durchbruch gefeierten Abkommen von Paris folgenden Weltklimakonferenzen reflektieren diesen Übergangszustand. Sie standen nicht mehr für Aufbruch, sondern eher für Stillstand. Die in der Organisation erdölexportierender Länder (OPEC) zusammengeschlossenen Staaten,³² Russland, Japan, die großen Kohleförderer wie Australien, letztlich alle wesentlichen Exporteure fossiler Brennstoffe verharren weiter in ihrer angestammten Rolle als notorische Bremser einer weniger klimaschädlichen Wirtschafts- und Lebensweise.

Dann im Mai 2021 veröffentlichte die IEA mit ihrer Roadmap zur globalen Klimaneutralität bis 2050 die größte Kehrtwende ihrer Geschichte.³³ Ein Fanal. Denn um das globale Ziel der Klimaneutralität bis 2050 tatsächlich erreichen zu können, forderten die IEA-Energieexpert:innen Unerhörtes: Ab sofort keine neuen Ölfelder mehr, keine neuen Kohleminen, nicht einmal mehr Erweiterungen bestehender Förderstätten. Zudem einen Stopp des Verkaufs fossilbefeuerter Heizungen ab 2025, Null-Emissionen für alle Neubauten ab 2030, Kohleausstieg der Industriestaaten bis 2030, ein Verkaufsverbot für Pkw mit Verbrennungsmotor ab 2035 und schließlich die Stilllegung der letzten Kohlekraftwerke im Rest der Welt bis 2040.

Wenig überraschend meldeten sich umgehend die üblichen Verdächtigen mit harschen Reaktionen. Die IEA-Mitglieder Japan und Australien teilten mit, man halte nichts von einem Verzicht auf den Aufschluss neuer Ölfelder oder Kohleminen. Der australische Minister für Rohstoffe erklärte, sein Land werde noch Jahrzehnte mit der Prospektion, der Förderung, der Verbrennung und dem Export fossiler Brennstoffe fortfahren.³⁴ Die OPEC war mit der Mahnung zur Stelle, die Vorstellungen der IEA seien geeignet, die Ölmärkte zu destabilisieren, sollten Investoren sich an die Vorschläge halten und nicht mehr in neue Öl-Assets investieren.³⁵

Selbstverständlich sind die Besorgnisse, die sich in den Reaktionen der Exportländer fossiler Brennstoffe artikulieren, nicht ohne Grundlage. Ihre Volkswirtschaften gründen seit Jahrzehnten oder sogar Generationen auf dem Geschäft mit Öl, Gas und Kohle, das nun mit zunehmender Dynamik wegzubrechen droht. Die Veränderungen, die diesen Staaten abverlangt werden, sind teilweise von noch grundlegenderer Natur als die Transformationen, die die großen Verbraucherstaaten der industrialisierten Welt erwarten. Doch gleichzeitig hat sich die Entwicklung, die nun nicht mehr aufzuhalten ist, über viele Jahre angebahnt. Nach fast 30 Jahren Weltklimapolitik und 26 Weltklimakonferenzen kann keine Regierung ernsthaft behaupten, sie sei überrascht von der Entwicklung.

Vor inzwischen mehr als 20 Jahren prophezeite der frühere saudi-arabische Ölminister Sheikh Yamani, dass es in 30 Jahren eine gewaltige Menge an Ölreserven geben werde, jedoch niemanden mehr, der sie dann noch kaufen und verbrennen wolle: *„Das Öl wird in der Erde bleiben. Die Steinzeit endete nicht, weil wir einen Mangel an Steinen hatten, und das Ölzeitalter wird nicht enden, weil es einen Mangel an Öl gibt.“*³⁶ Bis es so weit ist, das Öl also wirklich in der Erde bleibt, werden voraussichtlich noch etwas mehr als die verbleibenden zehn Jahre vergehen, die Yamani dem Ölzeitalter von heute aus gesehen damals prophezeite.

Klimawissenschaftler:innen wiesen schon vor 2015 darauf hin, dass die Förderung von immer mehr fossilen Brennstoffen in einem unauflösbaren Widerspruch stehe zu den politisch vereinbarten Zielen, die Klimaerwärmung im weltweiten Mittel auf damals 2 °C und seit Paris auf möglichst 1,5 °C im Vergleich zum vorindustriellen Zeitalter zu begrenzen. Britische Forscher:innen hatten im Januar 2015 in der Zeitschrift „Nature“, der ersten Adresse unter den Wissenschaftsmagazinen der Welt, vorgerechnet, dass weltweit ein Drittel der Ölreserven, die Hälfte des Erdgases und mehr als 80 Prozent der heute bekannten Kohlereserven in der Erde bleiben müssen, wenn es eine reale Chance geben soll, die damals vereinbarte Zwei-Grad-Schwelle noch einzuhalten.³⁷

Im September 2021 erschien in „Nature“ ein Update dieser Studie, nun mit Blick auf das im Klimaabkommen von Paris verschärfte Temperaturlimit. Wenig überraschend dürfen nun noch weniger der bekannten fossilen Reserven gefördert werden, wenn das ambitioniertere Ziel die neue Wegmarke sein soll. Fast 60 Prozent der angenommenen Ölreserven (statt zuvor ein Drittel), ebenfalls 60 Prozent der Erdgasreserven (statt zuvor die Hälfte) und 90 Prozent der

Bei unveränderten Emissionen bis zum Erreichen der vom Weltklimarat IPCC definierten Budgetgrenze wäre Ende dieses Jahrzehnts Schluss mit dem Fossilzeitalter.

Kohlereserven (statt zuvor 80 Prozent) müssen demnach unter der Erde bleiben für eine 50-Prozent-Chance, die globale Erhitzung bis zum Jahr 2100 auf 1,5 °C zu begrenzen.³⁸

Mit dem Abkommen von Paris haben sich die bis zum Erreichen der Klimaschwelle gerade noch zulässigen CO₂-Budgets und mit ihnen die noch nutzbaren fossilen Brennstoffmengen also weiter verringert. Der Sonderbericht „1,5 °C globale Erwärmung“ des Weltklimarats IPCC³⁹ schätzt für den Zeitraum ab Anfang 2018 die bis zum Erreichen der 1,5-Grad-Schwelle noch erlaubten globalen Emissionsbudgets ab. Um die 1,5-Grad-Grenze mit einer Wahrscheinlichkeit von 66 Prozent einzuhalten, dürften nach dem neuesten IPCC-Bericht⁴⁰ noch 400 Milliarden Tonnen CO₂ emittiert werden, was aktuell nicht einmal zehn Weltjahresbudgets entspricht. Mit anderen Worten: Unter der Annahme unveränderter Emissionen bis zum Erreichen der Budgetgrenze wäre spätestens Ende des Jahrzehnts Schluss.⁴¹

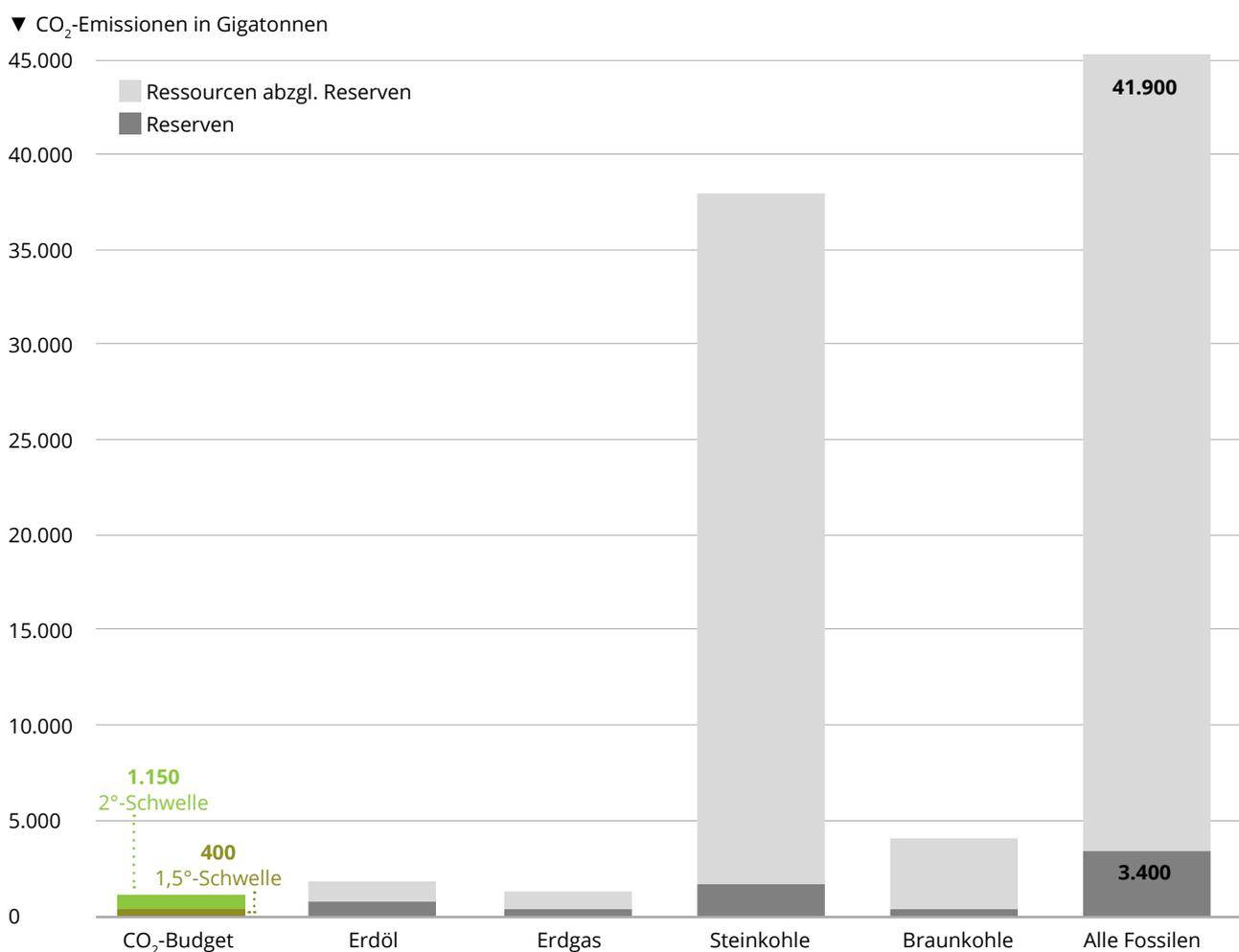


Abbildung 5:

CO₂-Emissionen bei der Nutzung der Reserven⁴² und Ressourcen von Kohle, Öl und Erdgas im Vergleich zu den nach dem Budgetansatz zur Einhaltung des 1,5-Grad-Limits des Pariser Klimaabkommens bzw. der früheren 2-Grad-Grenze noch „verbrennbaren“ fossilen Rohstoffe (Wahrscheinlichkeit der Einhaltung des Limits: 66 Prozent); Quellen: BGR, IPCC⁴³

Der Kampf um das Ende der fossilen Verbrennung

Alle Unterzeichnerstaaten des Pariser Abkommens haben sich verpflichtet, ihren Teil zur Zielerreichung beizusteuern. Das bedeutet, jede Erkundung, jeder Aufschluss weiterer fossiler Brennstoffvorräte gleicht heute einem ökonomischen Harakiri. Die Förderung unkonventioneller und meist besonders klimaschädlicher Erdölvorräte – wie z. B. Teersande im Westen Kanadas, Öl am Grund der Tiefsee oder in der Arktisregion – ist vollkommen unvereinbar mit den global festgelegten Klimazielen. Gefördert und verbrannt werden dürfen, unter weltweiten Effizienzkriterien betrachtet, nur noch geringe Mengen bereits erschlossener Vorräte mit den günstigsten Förderkosten. Die bekannten, heute noch wirtschaftlich förderbaren Reserven übertreffen die Mengen fossiler Brennstoffe, die noch energetisch genutzt werden dürfen, um ein Vielfaches.

Das mit dem Paris-Ziel noch vereinbare, globale Treibhausgasbudget hat zur Folge, dass sich jede weitere Prospektion fossiler Brennstoffe absolut verbietet. Das fordern nicht mehr nur Umweltbewegte oder grüne Parteien, sondern eben auch die IEA, die Investoren in aller Welt eindringlich auffordert, nicht mehr in neue Ölquellen, Gas- oder Kohleprojekte zu investieren.^{44,45} Die Roadmap der IEA zur Klimaneutralität, die die Organisation zuvor veröffentlicht hatte, erfordert demnach mehr als eine Verdreifachung der weltweiten Investitionen in saubere Energietechnik bis 2030, wenn die Klimaneutralitätsziele bis 2050 erreichbar bleiben sollen. Es geht jetzt nicht mehr um weitere Zielversprechen, sondern um Maßnahmen zur Beschleunigung von Investitionen in marktfähige Lösungen, drängt der IEA-Exekutivdirektor Fatih Birol.⁴⁶

Dennoch waren Meldungen bisher selten, die die harte Grenze bei künftigen Investitionen zur Verbrennung fossiler Brennstoffe widerspiegeln. Australien beispielsweise, der nach Indonesien zweitgrößte Kohleexporteur der Welt, besitzt ungeheure Kohlemengen, die noch dazu größtenteils kostengünstig im Tagebau gefördert werden können.⁴⁷ Dutzende neue Tagebaue sollen aufgeschlossen werden, vornehmlich für den Export und zur Verbrennung in Japan, Indien, China, Südkorea und Taiwan. Geht es nach der Regierung, sollen die neuen Minen noch Jahrzehnte über das globale Zieljahr zum Erreichen der Klimaneutralität hinaus weiter betrieben werden.⁴⁸ Umso skeptischer reagierten Fachleute in Australien auf die Ankündigung von Premierminister Scott Morrison im unmittelbaren Vorfeld der Weltklimakonferenz (COP 26) in Glasgow, sein Land strebe ebenfalls Klimaneutralität bis 2050 an. Gleichzeitig ließ der australische Regierungschef keinen Zweifel daran, dass der von ihm ausgerufene „*einzigartige australische Weg*“ die heimische Fossilwirtschaft vorerst in ihrer angestammten dominanten Stellung belassen solle. Bis 2030 soll es keine Veränderungen geben, danach will Australien in großen Mengen Wasserstoff aus fossilen Brennstoffen erzeugen, die CO₂-Emissionen abscheiden und in geologischen Formationen verpressen (CCS).

Immerhin gibt es sie, die anderen Nachrichten: Im Juni 2021 entschied die grönländische Regionalregierung, keine Lizenzen mehr für neue Öl- und Erdgasprojekte zu vergeben. Begründung: „*Die Zukunft liegt nicht im Öl. Die*

*Zukunft gehört der erneuerbaren Energie und in dieser Hinsicht haben wir viel mehr zu gewinnen.*⁴⁹ Meldungen wie diese sind Ausdruck des Kampfs zwischen ernsthafter Klimapolitik und jenen Beharrungskräften, die an ihren Geschäftsmodellen festhalten wollen – koste es, was es wolle.

Fossilwirtschaft: Investoren, Fonds und Aktionäre wenden sich ab

Die ursprünglich US-amerikanische Fossil-Free-Kampagne⁵⁰ machte schon bald nach ihrer Gründung nicht nur in den Vereinigten Staaten Furore, sondern warb in vielen Ländern des Globalen Nordens dafür, Kapital aus großen Kohle-, Gas- und Ölunternehmen abzuziehen, die weiter in die Ausbeutung fossiler Brennstoffe investieren – und erhielt dabei schon vor dem Paris-Abkommen enorm viel Resonanz und großen Zulauf. Hunderte von Stiftungen, Universitäten, Kirchen, Pensionskassen, Versicherungsgesellschaften, Städte wie San Francisco, Seattle oder Oxford und, besonders spektakulär, Erben der Rockefeller-Öldynastie, verpflichteten sich bereits vor Jahren, ihre Anteile an Öl-, Kohle- oder Gasunternehmen zu verkaufen und stattdessen in klimaschonende Unternehmen zu investieren.⁵¹

Im Juni 2015 entschied das norwegische Parlament, dass der staatliche norwegische Pensionsfonds nicht mehr in Unternehmen investieren darf, die mehr als 30 Prozent ihres Umsatzes oder ihrer Stromerzeugung auf Kohle stützen.⁵² Der seinerzeit mit fast 800 Milliarden Euro größte Staatsfonds der Welt hatte erheblich in kohlelastige Unternehmen investiert, Beteiligungen in Milliardenhöhe sollten nun infolge des Beschlusses aufgegeben werden. Die Entscheidung galt seinerzeit als Durchbruch. Die Umsetzung allerdings erwies sich, wie in ähnlich gelagerten Fällen, als mühsam, weil die Regeln und Kriterien, die den Ausstieg aus den Kohleunternehmen festlegten, unscharf formuliert waren und zahlreiche Schlupflöcher ließen.

Diese Phase neigt sich jetzt dem Ende zu. Der größte französische Versicherungskonzern Axa, der früh seinen Abschied von kohlebasierten Unternehmen verkündet hatte, scheint nun ernst zu machen. Mit als erstes Unternehmen ist der Essener RWE-Konzern betroffen, der sich viel darauf zugutehält, inzwischen auch in großem Stil in Erneuerbare Energien zu investieren, aber wegen seines Festhaltens an den rheinischen Braunkohlerevieren immer noch die Liste der größten CO₂-Emittenten Europas anführt.⁵³ Im März 2021 berichtete die Finanznachrichtenagentur Bloomberg, dass die Axa Gruppe wegen der fortbestehenden Kohleabhängigkeit des Essener Konzerns die Geschäftsbeziehungen zu RWE beende.⁵⁴ Zwar wollten beide Unternehmen den Vorgang nicht kommentieren, doch eine Axa-Sprecherin teilte kühl mit: *„Wir wenden einfach nur die bei uns beschlossene Politik an.“*

Ungleich bedrohlicher als spektakuläre Einzelentscheidungen ist für Kohleunternehmen die Tatsache, dass die Politik der Axa Gruppe Teil eines sich beschleunigenden Trends ist. Die Allianz SE, größtes Unternehmen der deutschen Versicherungsbranche, will sich als Teilhaber und Versicherer bis

Ende 2022 von allen Unternehmen trennen, die mehr als 25 Prozent ihrer Energieerzeugung auf Basis von Kohle produzieren oder mehr als fünf Gigawatt elektrische Leistung aus Kohle generieren.⁵⁵ Und die Schweizer Zurich Versicherung gibt kohlelastigen Unternehmen, deren Einnahmen zu mehr als 30 Prozent aus der Kohle kommen oder die mehr als 30 Prozent ihrer Stromerzeugung in Kohlekraftwerken erzeugen, eine Art Gnadenfrist, um diese Marken zu unterschreiten.⁵⁶

Insgesamt haben sich bis Ende 2020 laut einer Aufstellung mindestens 65 Versicherer, die in Summe ein Anlagevolumen von 12 Billionen US-Dollar repräsentieren (mehr als 40 Prozent der gesamten Vermögenswerte der Versicherungswirtschaft), entweder zu Divestment-Maßnahmen gegen die Kohle verpflichtet oder erklärt, künftig nicht mehr im Kohlesektor zu investieren.⁵⁷ Die Konsequenzen für kohlebasierte Unternehmen entwickeln sich dramatisch. Einerseits bröckelt die Investitionsbereitschaft in fossile Unternehmen mit jedem nationalen oder internationalen Klimabeschluss der Politik, andererseits wird es für die Unternehmen immer teurer, ihre klimaschädlichen Assets zu versichern. Berichtet wird über Kostensteigerungen von 40 Prozent in jüngster Zeit.⁵⁸

Anlässlich der 26. Weltklimakonferenz in Glasgow beschleunigte sich der Prozess weiter. Mehr als 40 Teilnehmerstaaten bekannten sich dort konkret zum Ausstieg aus der Kohleverbrennung im Rahmen der Powering Past Coal Alliance (PPCA), die sich 2017 bei der Weltklimakonferenz in Bonn konstituiert hatte. Deutschland trat der Allianz 2019 bei, wenige Monate nachdem die von der Bundesregierung eingesetzte Kohlekommission den nationalen Kohleausstieg bis 2038 vorgeschlagen hatte. Im November 2021 zählte die PPCA im Nachgang zum Glasgow-Gipfel bereits 48 Regierungen zu ihren Mitgliedern, ebenfalls 48 Regionen und regionale Regierungen wie Kalifornien, Schottland oder Sydney sowie 69 Finanzinstitutionen und Unternehmen mit einem Vermögenswert von insgesamt mehr als 17 Billionen US-Dollar, die sich unter der Parole „*Die Kohle in die Geschichte verbannen*“ zu einem schrittweisen Ausstieg aus der Finanzierung von Kohleprojekten bekennen.^{59,60}

Doch das ist es nicht allein. Nicht nur globale politische Bekenntnisse und Abkommen, die Beschlüsse hoher Gerichte oder die Reaktionen der Versicherungswirtschaft setzen die Fossilwirtschaft unter Druck. Auch in der Welt der Unternehmen selbst stößt die ungebremste Verbrennung klimaschädlicher Brennstoffe an Grenzen. Um die absehbar limitierte Betriebsperspektive ihrer einst lukrativen fossilen Vermögenswerte ökonomisch zu überleben, drängen zunehmend auch Teilhaber:innen und Investor:innen das Management der Großkonzerne, entschlossener auf die Klimakrise zu reagieren und die Suche nach zukunftsfähigen Geschäftsalternativen zu verstärken.

Auf nationaler Ebene und bezogen auf die Ablösung des Brennstoffs Kohle ist diese Entwicklung bereits weit fortgeschritten. Hierzulande dominierten nach einer Konsolidierungsphase infolge der europaweiten Liberalisierung der Strommärkte kurz vor der Jahrtausendwende vier Elektrizitätsversorgungsunternehmen den Strommarkt: RWE, E.ON, Vattenfall und EnBW. Die vier Energieriesen setzten seinerzeit praktisch ausschließlich auf Kohle und Atom. Ende 2022 wird das Kapitel kommerzielle Atomkraft in Deutschland nach fast 60 Jahren weitgehend Geschichte sein.⁶¹

E.ON zog sich auch aus der fossilen Stromerzeugung, später zudem aus der erneuerbaren Erzeugung zurück und setzt inzwischen ganz auf den Stromvertrieb und sogenannte Kundenlösungen. Der schwedische Staatskonzern Vattenfall befindet sich seit dem Verkauf seiner ostdeutschen Braunkohle-Assets an einen tschechischen Investor (heute: Lausitz Energie AG, kurz LEAG)⁶² auf dem Rückzug aus Deutschland bzw. setzt ganz auf den Energievertrieb und eine klimaschonendere Erzeugung. Für Schlagzeilen sorgte im Sommer 2021 das frühe Aus des Vattenfall Steinkohlekraftwerks Hamburg-Moorburg nach nur sechsjähriger Betriebsdauer. Im Herbst dann klang das schwedische Staatsunternehmen vollends so wie die Umweltorganisationen nach dem Gipfel von Paris: Man wolle nun auf den 1,5-Grad-Kurs einschwenken und bis 2040 komplett klimaneutral agieren, teilte das Unternehmen mit. Die EnBW, mit Sitz in Karlsruhe, investiert seit dem absehbaren Verlust seiner vier Atomkraftwerke infolge des Fukushima-Desasters konsequent in Erneuerbare Energien, betreibt aber auch weiter eine Reihe von Steinkohlekraftwerken und ist Miteigentümer eines großen Braunkohlekraftwerks.⁶³ Erdgas soll als Übergangsbrennstoff zum Einsatz kommen. Schon 2035 will das Unternehmen komplett klimaneutral sein. Selbst der Essener RWE-Konzern, der als Gesamtunternehmen nach eigenen Angaben schon etwa ein Viertel seines Stroms erneuerbar erzeugt, will den Umstieg auf sauberen Strom weiter beschleunigen und seine Erzeugungskapazität aus Erneuerbaren Energien bis 2030 auf 50 Gigawatt erhöhen.⁶⁴

Neuerdings trifft die Aussicht auf eine klimaneutrale Zukunft zunehmend auch die Ölindustrie, die ein ganzes Energiezeitalter geprägt hat. ExxonMobil, ein Konzern, der sich noch vor wenigen Jahren als wertvollstes börsennotiertes Unternehmen der Welt feiern ließ, musste 2020 erstmals seit 40 Jahren einen Gesamtjahresverlust in Höhe von 22 Milliarden US-Dollar verbuchen. Auf Initiative eines kleinen Hedgefonds, der mit gerade einmal 0,02 Prozent am Aktienkapital des Ölriesen beteiligt war,⁶⁵ schafften es bei der Jahreshauptversammlung Ende Mai 2021 zwei Kandidaten in den Aufsichtsrat des texanischen Ölriesen – gegen den erbitterten Widerstand des Managements. Ihr Programm: die Entwicklung eines glaubwürdigen Unternehmensplans für die Energiewende. Ähnlich erging es dem kalifornischen Konkurrenten Chevron, bei dem Großinvestoren Ende Mai 2021 ebenfalls einen Kurswechsel gegen den Widerstand des Managements erzwangen. 61 Prozent der Anteilseigner:innen forderten bei der Hauptversammlung eine Reduzierung der CO₂-Emissionen aus den Produkten des Konzerns.⁶⁶

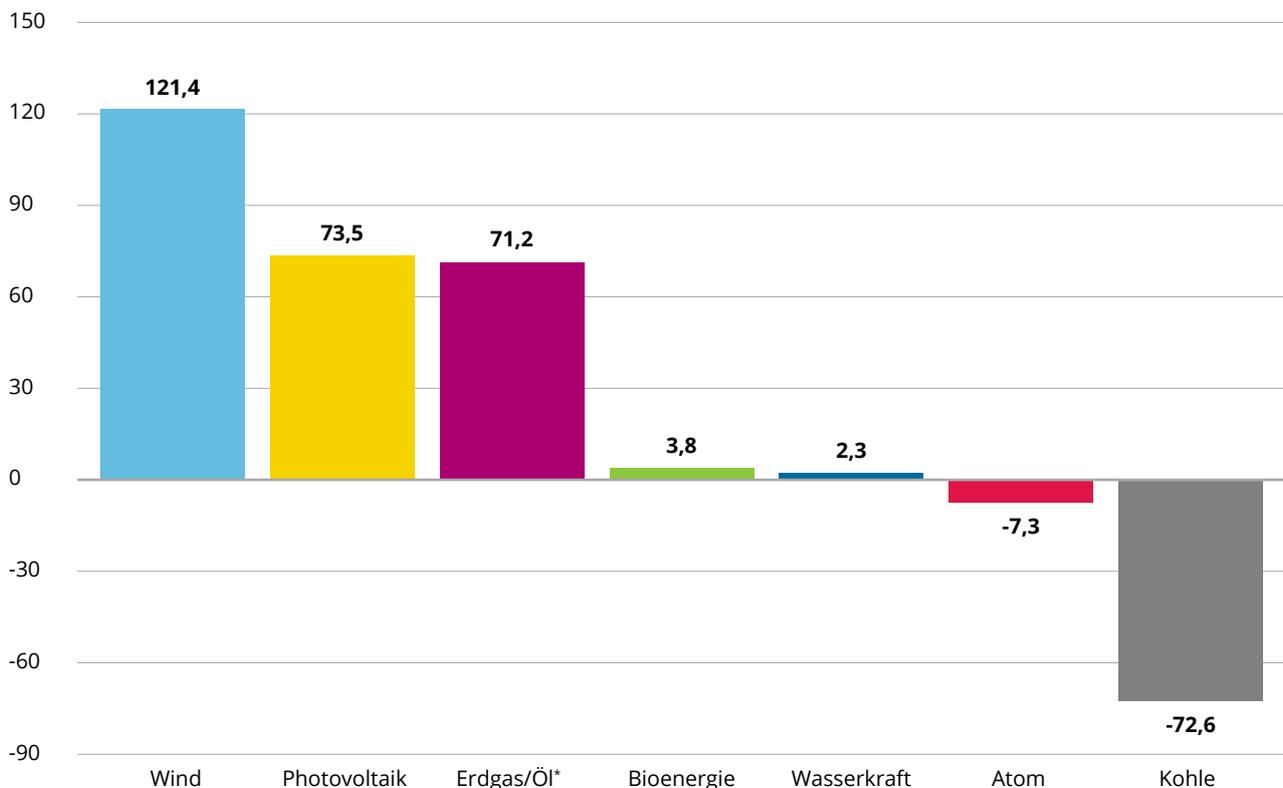
Energiewende in den USA auch ganz ohne Politik

Die Wirtschaftsweltmacht USA durchlebt eine Veränderung ihres Strommixes wie seit Jahrzehnten nicht. Noch zur Jahrtausendwende stammte dort mehr als jede zweite Kilowattstunde aus meist schlecht oder gar nicht schadstoffgefilterten Kohlekraftwerken. 2015 waren es noch knapp 40 Prozent. Die Ratingagentur Moody's ging vor sechs Jahren davon aus, dass der Anteil des Kohlestroms in den USA bis zum Ende des Jahrzehnts auf 30 Prozent sinken würde⁶⁷ – und lag damit weit daneben. Denn im Jahr 2020 erreichten die Kohleverstromung wie auch der Strom aus Atomkraftwerken jeweils nur noch 19 Prozent an der Gesamtstromerzeugung der USA, erstmals abgehängt von den Erneuerbaren Energien, die auf 21 Prozent kamen.⁶⁸ Die Flucht aus der Kohle ging in den Vereinigten Staaten also auch in den vergangenen Jahren weiter, und zwar beschleunigt.

In den USA beschleunigt sich die Flucht aus der Kohle – auch ohne politische Ausstiegsbeschlüsse.

Neue Investitionsentscheidungen für Kohleprojekte wird es jenseits des Atlantiks in Zukunft aller Voraussicht nach nicht mehr geben. Auch bei der Atomenergie sind allen anhaltenden Diskussionen über eine angeblich bevorstehende Renaissance zum Trotz keine Neubauprojekte in Sichtweite. Zwei Blöcke am Standort Vogtle (Georgia) sind seit 2013 im Bau, begleitet von zahllosen Pannen und immer neuen Verzögerungen. Zuletzt sollte das Atomkraftwerk 2022 in Betrieb gehen, sechs Jahre nach Plan.^{69,70}

▼ Kraftwerksleistung in Gigawatt



* Der Wert für die Europäische Union basiert auf Erdgas, während er sich in den USA aus Erdgas und Öl bezieht.

Abbildung 6:

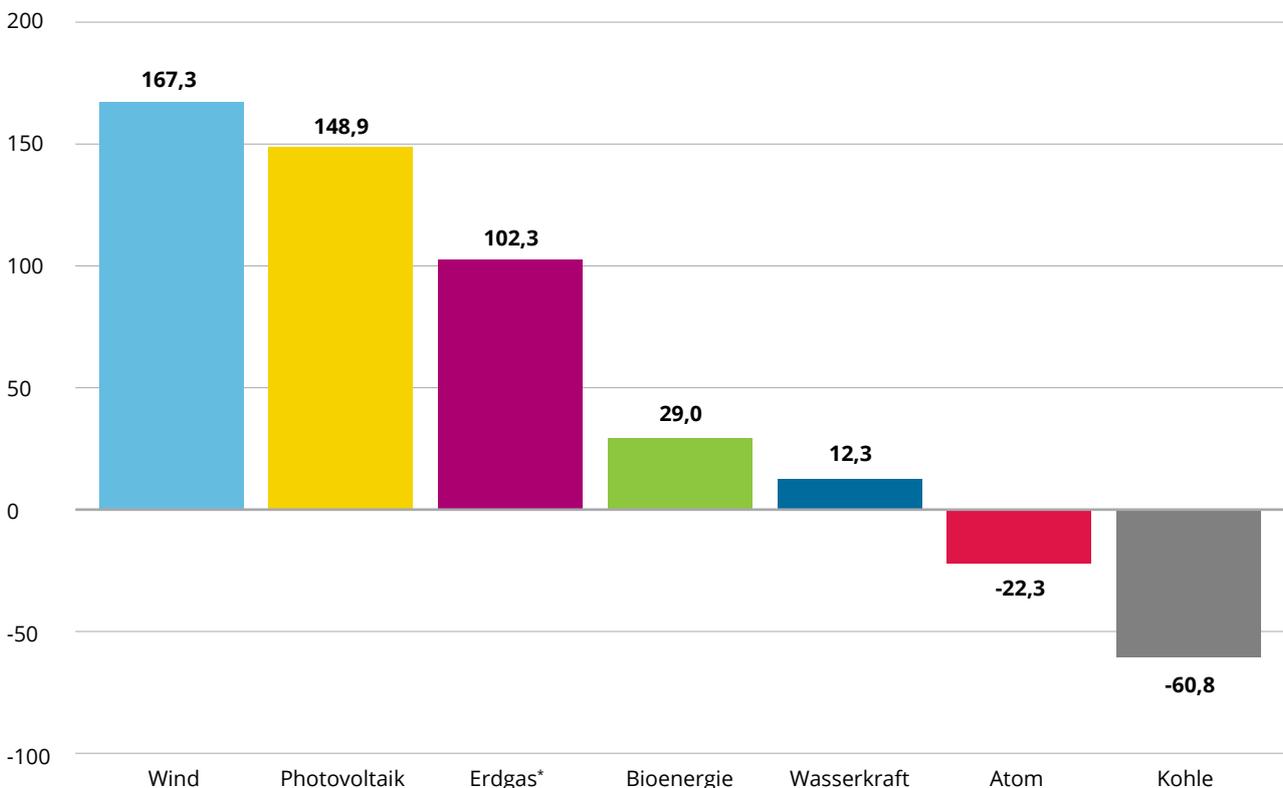
Dekarbonisierung made in USA: Erneuerbare Energien und Erdgas ersetzen Kohle und Atom. Kumulierte Veränderung der Kraftwerksleistung verschiedener Stromerzeugungstechnologien im Zeitraum 2005–2020; Quelle: eia⁷¹

Anders ausgedrückt: Der Niedergang der prägenden Stromerzeugungstechnologien des vergangenen Jahrhunderts setzt sich fort. Neu in Betrieb gehen in den USA praktisch ausschließlich Erdgaskraftwerke, die bisher vom dortigen Schiefergas-Boom profitieren, sowie Windenergie- und Photovoltaikanlagen (Abbildung 6).

Europa: Die Bilder gleichen sich

In Abbildung 7 ist die reale Kraftwerksentwicklung seit 2005 in Europa dargestellt. Sie zeigt: Die EU als Ganzes befindet sich bisher, allen energiepolitischen Fliehkräften zwischen den Mitgliedstaaten zum Trotz, auf einem guten Weg ins Zeitalter der regenerativen Energien. 167 Gigawatt Windenergieleistung und knapp 150 Gigawatt PV-Kapazität wurden seit der Jahrtausendwende installiert.⁷² Auf der anderen Seite wurde seit 2005 gut dreimal so viel Kohlekraftwerksleistung stillgelegt wie neu in Betrieb genommen. Die installierte Leistung der Atomkraftwerke ging im selben Zeitraum um 22 Gigawatt zurück, die Stromerzeugung aus der Kernspaltung sank entsprechend. Laut BP wurden 2005 in Europa 1.110 Terawattstunden (TWh) Atomstrom erzeugt, 2020 waren es nur noch 837 TWh – das bedeutet einen Rückgang um 273 TWh bzw. 25 Prozent.⁷³

▼ Kraftwerksleistung in Gigawatt



*Der Wert für die Europäische Union basiert auf Erdgas, während er sich in den USA aus Erdgas und Öl bezieht.

Abbildung 7:

Dekarbonisierung made in Europe: Erneuerbare Energien und Erdgas ersetzen Kohle und Atom. Kumulierte Veränderung der Kraftwerksleistung verschiedener Stromerzeugungstechnologien im Zeitraum 2005–2020; Quellen: IRENA; Global Energy Monitor⁷⁴

Dasselbe Muster in allen Industriestaaten: Mit hoher Geschwindigkeit wird die Kohle als zentraler Pfeiler der Stromversorgung des 20. Jahrhunderts abgelöst durch Strom aus Wind und Sonne, die Technologien des 21. Jahrhunderts. Triebfedern sind der Klima- und Umweltschutz und zunehmend auch die Ökonomie. Die Atomenergie als Verheißung der Nachkriegsära der 1950er und 1960er Jahre wird zur Episode, die in den einstigen Vorreiterländern nur deshalb noch nicht zu einem schnellen Ende kommt, weil die in die Jahre gekommenen Kraftwerke über Nachrüstungen Jahrzehnte länger betrieben werden können als ursprünglich vorgesehen. Eine bittere Ironie der Geschichte: Nicht die großen Havarien von Three Mile Island, Tschernobyl und Fukushima werden am Ende den Traum von der unendlichen und billigen Energie aus der Kernspaltung beenden, sondern auch hier die Ökonomie. Atomkraftwerke produzieren Strom um ein Mehrfaches teurer als Wind und Sonne, sofern sie neu errichtet werden müssen. Dies gilt selbst dann, wenn man den Aufwand für die bedarfsgerechte Systemsteuerung der volatilen Erneuerbaren Energien in die Gesamtrechnung einbezieht.

Asien: Die Klimakrise gemeinsam bewältigen oder gemeinsam scheitern

Der Abschied aus dem fossilen Energiezeitalter ist in der westlichen industrialisierten Welt nach all dem unumkehrbar – auch wenn er angesichts der sich verschärfenden Realität der Klimakrise weiter zu langsam verläuft. Die CO₂-Emissionen in diesen Ländern sinken, weil klimaschädliche Kraftwerke sukzessive vom Netz gehen und weil in Zukunft dort auch im Mobilitäts- und Wärmesektor fossile Brennstoffe von klimaneutralen Erneuerbaren Energien ersetzt werden.

Der Befund ändert zunächst nichts an der historischen Verantwortung dieser Weltregionen für den Klimawandel. Sie legten – freilich weitgehend ohne das heute wissenschaftlich untermauerte Wissen über die menschengemachten Klimawirkungen – die Basis für die aktuelle Klimakrise, indem sie als Erste ihre enorme Entwicklung und darauf gründende globale Dominanz auf der Verbrennung fossiler Brennstoffe aufbauten.⁷⁵ Auch liegt der Pro-Kopf-Ausstoß klimawirksamer Treibhausgase weiterhin in den meisten traditionellen Industriestaaten mehr oder weniger deutlich über dem der sich entwickelnden Staaten.^{76,77,78}

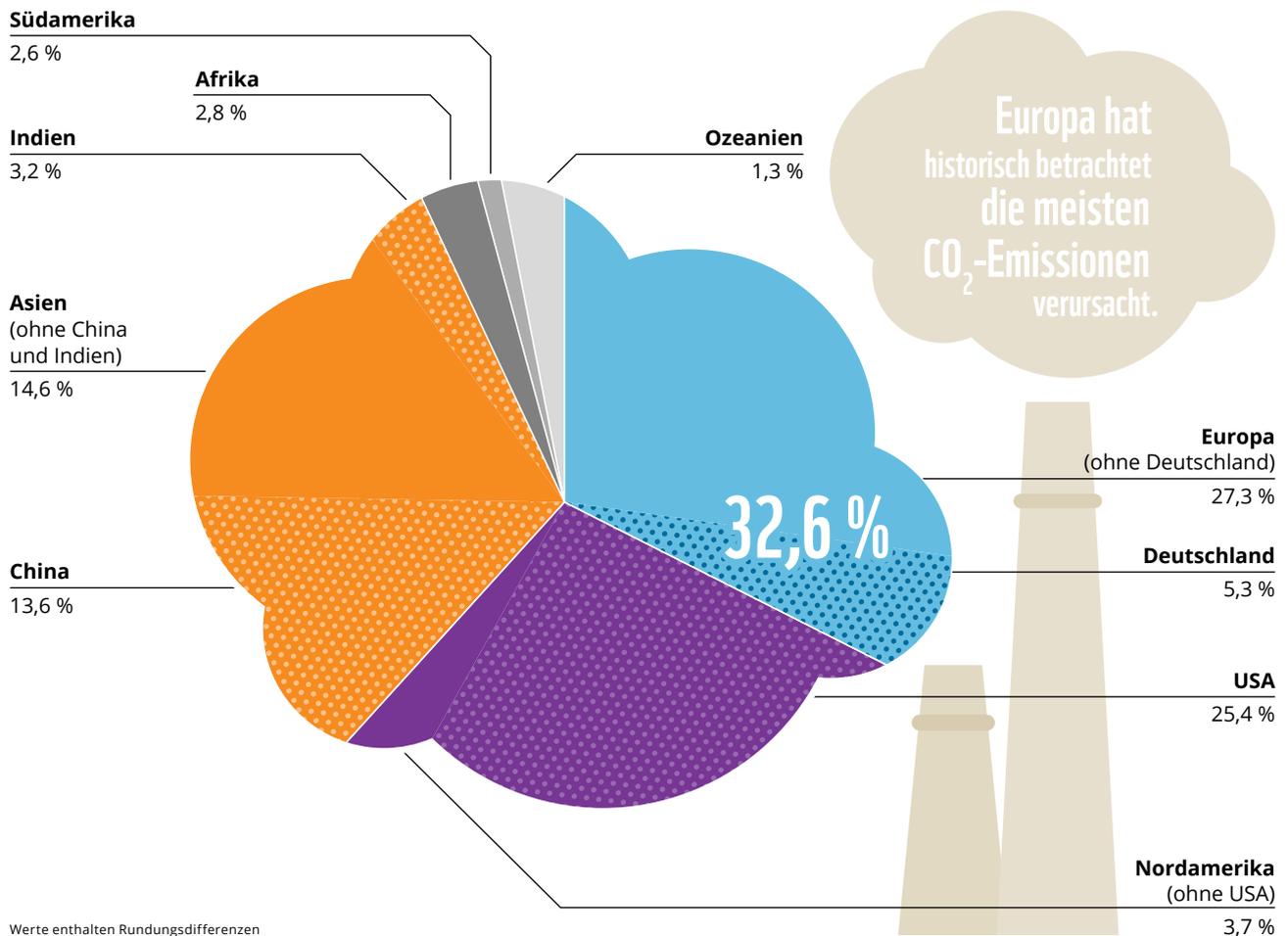


Abbildung 8:

Historische Emissionen, historische Verantwortung: Anteil an weltweiten CO₂-Emissionen von 1750 bis 2019; Quelle: Our World in Data⁷⁹

Gleichzeitig steht China seit 2006 mit seinem jährlichen CO₂-Ausstoß weltweit auf Platz eins vor den USA, die diese Rangliste bis dahin angeführt hatten. Im Jahr 2020 emittierte China 10,5 Milliarden Tonnen CO₂ und damit mehr als doppelt so viel wie die USA (4,7 Mrd. t CO₂). Das entsprach 30 Prozent der weltweiten Emissionen. Seit fast zwei Jahrzehnten hat Ostasien, mit China als Schwergewicht, die Rolle als dominierender Treiber der globalen Treibhausgasemissionen übernommen, für die zuvor die Industriestaaten des Nordens fast allein verantwortlich waren. Der immense Nachholbedarf bei der Wohlstandsentwicklung und eine beispiellose wirtschaftliche Dynamik haben diese tiefgreifende Neuverteilung der absoluten Emissionsmengen ausgelöst. Längst haben China und andere Länder erkannt und im Prinzip auch akzeptiert, dass ihr Entwicklungsweg nur fortgesetzt werden kann, wenn es gelingt, Wirtschaftswachstum und Treibhausgasausstoß viel stärker zu entkoppeln, als dies bisher der Fall ist.

Die große unbeantwortete Frage lautet also: Ist der Rückgang der Emissionen in Europa und den USA für den Fortgang der globalen Klimakrise überhaupt noch maßgeblich? Die nachfolgende Abbildung 9 scheint zunächst dagegen zu sprechen. Zu dramatisch ist die Zunahme der Kohlekraftwerkskapazitäten der Jahre 2010 bis 2020 in China im Vergleich zu Europa und den USA, selbst wenn man die Bevölkerungszahlen in Betracht zieht.

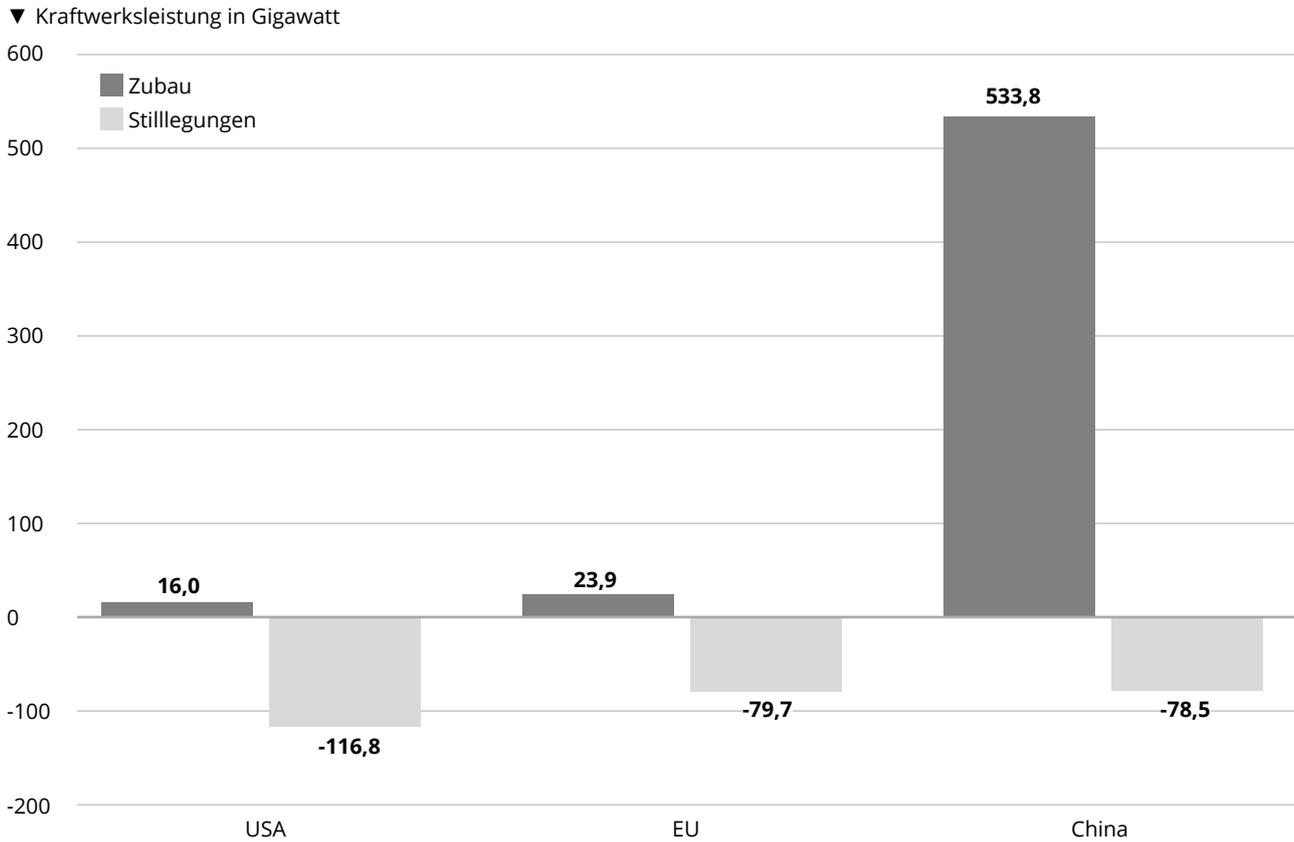


Abbildung 9:

Neu installierte bzw. stillgelegte Kohlekraftwerksleistung von 2010 bis 2020; Quellen: Ember⁸⁰, Global Coal Tracker⁸¹

Die nächste Abbildung relativiert jedoch den Befund. Sie zeigt, dass auch in China die Entwicklungsrichtung grundsätzlich stimmt: Trotz des beispiellosen Anstiegs des absoluten Strombedarfs in China im Zuge seiner Industrialisierung sank der Anteil der Kohle am Strommix zwischen 2010 und 2020 um 16 Prozentpunkte, in den USA um 26 und in der EU um 12 Prozentpunkte. Das bedeutet, dass China die klimaschonende Stromerzeugung aus Erneuerbaren Energien und Atomkraft in der letzten Dekade noch deutlich schneller ausgebaut hat als die Kohlekraft. Dennoch bleibt China innerhalb der großen Emittenten der Welt bis auf Weiteres klar das Kohleland Nummer eins.

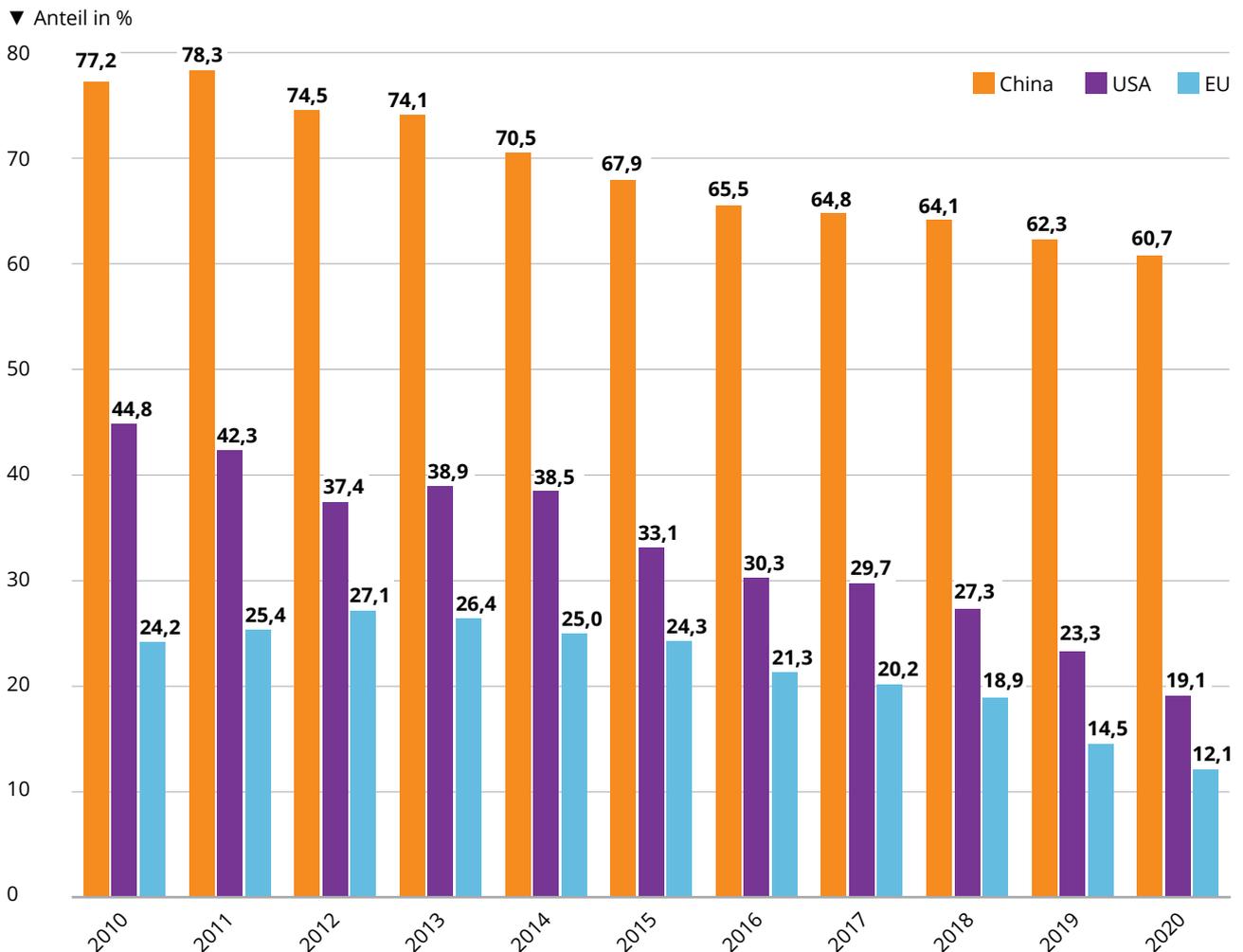


Abbildung 10:

Prozentualer Anteil des Kohlestroms am jährlichen Strommix; Quelle: Ember⁸²

Besorgniserregend erscheint die Perspektive, dass Indien und andere bevölkerungsreiche Regionen des Globalen Südens sich derzeit aufmachen, eine ähnliche wirtschaftliche Dynamik auf einer ähnlich emissionsintensiven Basis zu entfachen wie früher Japan und Südkorea oder zuletzt vor allem China. Vor diesem Hintergrund erklärt sich der aufregende Schlussakkord der 26. Weltklimakonferenz im November 2021 in Glasgow, als auf Initiative Indiens (und mit Unterstützung Chinas) die Formulierung zur weltweiten Abkehr von der Kohleverstromung im letzten Moment der Konferenz abgeschwächt wurde.⁸³

Heute ist im Grunde entschieden: Die Menschheit bewältigt die Klimakrise gemeinsam oder sie scheitert gemeinsam an ihr.

Trotz dieses Versuchs strategisch entscheidender Länder, den Prozess der Dekarbonisierung an dieser Stelle zu verlangsamen, herrscht weltweit weitgehender Konsens, dass die Länder des Globalen Südens nicht mehr die Freiheit haben, ihre Zukunft nach dem gleichen treibhausgasintensiven Muster voranzutreiben, wie es zuerst die Industriestaaten des Nordens und dann die Staaten Ostasiens getan haben. Damit ist im Grunde entschieden, dass die Menschheit die Klimakrise entweder gemeinsam bewältigt oder gemeinsam an ihr scheitert. Diese Erkenntnis entspricht dem schon 1992 auf dem Erdgipfel von Rio de Janeiro in der damals beschlossenen Klimarahmenkonvention verabschiedeten Prinzip, wonach die Vertragsstaaten sich verpflichten, das Klima „in Übereinstimmung mit ihren gemeinsamen, aber differenzierten Verantwortlichkeiten und jeweiligen Fähigkeiten“ zu schützen.⁸⁴

Paris wirkt, aber noch nicht genug

Um die künftige Entwicklung im Stromsektor abschätzen zu können, lohnt zunächst ein Blick auf die Veränderungen der globalen Stromerzeugungskapazitäten seit der Jahrtausendwende. Sie sind in Abbildung 11 dargestellt, die eine entsprechende Grafik im Report des Jahres 2015 lediglich fortschreibt.

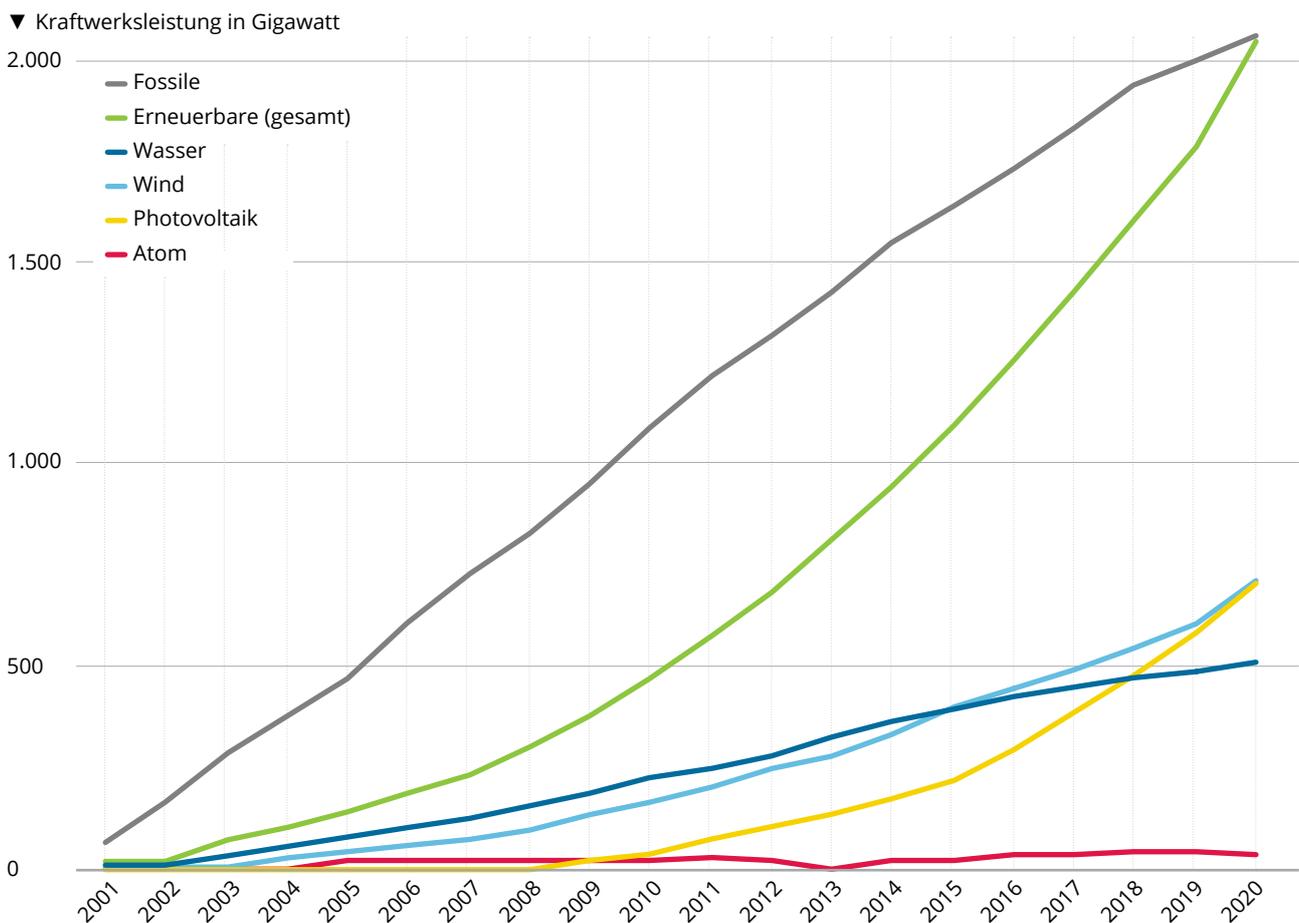


Abbildung 11:

Entwicklung der weltweit installierten Kraftwerksleistung seit 2001; Quelle: IRENA⁸⁵

Zu sehen ist zunächst, dass Atomenergie – wie schon zuvor – nur eine sehr nachgeordnete Rolle spielt, wenn es um die reale Entwicklung der Kraftwerkskapazitäten der Welt geht. Dominierend waren im Zeitraum bis 2014 die Kapazitätswüchse bei den fossilen Kraftwerken und gleichzeitig der sich rasant beschleunigende Ausbau der Erneuerbaren Energien aus Sonne, Wind und Wasser. Bis 2014 verliefen beide Zuwachsentwicklungen steil nach oben und am Ende nahezu parallel.

Danach beschleunigte sich der Zubau klimaschonender erneuerbarer Kapazitäten weiter, während sich die Neuinstallation fossiler Kraftwerkskapazitäten nach 2015 langsam, zuletzt jedoch deutlich abschwächte. Ergebnis: Die Kurven, die die weltweite Zuwachsdynamik beider Technologiebereiche abbilden, berühren sich im Jahr 2020 erstmals. Jeweils etwas mehr als 2.000 Gigawatt elektrische Leistung gingen seit der Jahrtausendwende neu ans Netz. Ende 2021 werden die Erneuerbaren Energien beim aufsummierten Leistungszuwachs seit dem Jahr 2000 erstmals vorn liegen und in den Folgejahren den konventionellen Kraftwerken weiter enteilen.

Damit die so eingeleitete Wendedynamik den Kollaps des Weltklimas tatsächlich bremst, müssen jedoch zwei Bedingungen erfüllt sein: Erstens muss der Globale Norden seine Klimaschutzanstrengungen mit höherem Ambitionsniveau als bisher fortsetzen und zweitens müssen die Länder des Globalen Südens den Umweg über die fossilen Energien bei ihrer weiteren Entwicklung frühzeitig abbrechen oder gar nicht erst in ihn einbiegen.

Je näher die von vielen Expert:innen als entscheidend oder letzte Chance qualifizierte 26. Weltklimakonferenz (COP 26) im schottischen Glasgow im Herbst 2021 rückte, umso deutlicher wurde, dass das Abkommen von Paris zwar einerseits tatsächlich wirkte, andererseits jedoch bei weitem nicht genug, um auf einen robusten 1,5-Grad-Pfad zu kommen. Das Pariser Übereinkommen verpflichtet die Vertragsstaaten, regelmäßig eigene nationale Klimaschutzbeiträge, die sogenannten Nationally Determined Contributions (NDCs), auszuarbeiten, sie umzusetzen und solange zu verschärfen, bis die Ziele des Abkommens eingehalten werden können.

Dieser Anspruch würde jedoch, insbesondere bezogen auf das Zwischenziel 2030, mit den bis zum Klimagipfel in Glasgow eingereichten nationalen Klimaschutzbeiträgen selbst im Fall ihrer vollständigen Umsetzung weit verfehlt und die Welt auf einen Pfad mit einer Klimaerhitzung von etwa 2,4 °C bringen – eine dramatische Kluft zur angestrebten 1,5-Grad-Grenze (vgl. Abbildung 44). Deshalb verweist das Abschlussdokument des Glasgow-Gipfels eindringlich auf eine Forderung des Weltklimarats,⁸⁶ wonach die globalen Emissionen bis 2030 um 45 Prozent gegenüber 2010 sinken müssen, um noch auf den 1,5-Grad-Pfad kommen zu können.⁸⁷

Die Staaten werden aufgefordert, ihre Klimaziele für die laufende Dekade schon bis Ende 2022 zu verschärfen und nicht, wie im Pariser Abkommen vorgesehen, erst für 2025 die Vorlage neuer, besserer Klimaziele für die 2030er Jahre vorzulegen. Künftig soll zudem nicht nur alle fünf Jahre, sondern jährlich weltweit überprüft werden, wie groß die Lücke zur Erreichung des 1,5-Grad-Ziels noch ist.⁸⁸

Die westlichen Regierungen standen vor dem Klimagipfel in Glasgow unter hohem Erwartungsdruck von zwei Seiten – aus den Entwicklungsländern, die darauf drängen, dass die Phase des entschlossenen Handelns endlich beginnt,⁸⁹ und aus den eigenen Gesellschaften, in denen der Klimaschutz nie zuvor einen vergleichbar hohen Stellenwert aufwies.

Doch nicht nur der Globale Norden stand im Vorfeld der Konferenz von Glasgow unter verschärfter Beobachtung. Auch China muss als wichtigster Akteur der kommenden Jahre liefern und hohe Erwartungen der internationalen Völkergemeinschaft befriedigen. Denn einerseits hat das Land mit den mit Abstand höchsten Zuwächsen bei den Treibhausgasen angekündigt, den Scheitelpunkt seiner Emissionen spätestens 2030 erreichen zu wollen und andererseits vor 2060 CO₂-neutral zu werden und dies in seinem unmittelbar vor dem Klimagipfel in Glasgow bei der UN eingereichten aktualisierten nationalen Klimabeitrag (NDC) noch einmal bekräftigt.⁹⁰ Gleichzeitig war China noch 2020 allein für mehr als die Hälfte der weltweiten Kohlestromerzeugung verantwortlich.⁹¹ Der aktuell gültige Fünfjahresplan soll zwar den Weg in eine weniger klimaschädliche Entwicklung bereiten, noch jedoch sind die konkreten Schritte widersprüchlich.⁹²

Immerhin startete das Reich der Mitte im Sommer 2021 sein lange angekündigtes, nationales Emissionshandelssystem zur Reduzierung der CO₂-Emissionen, sodass nun in allen drei großen Wirtschaftsblöcken der Welt der Ausstoß klimaschädlicher Gase einen Preis hat.⁹³ Der Start des chinesischen Emissionshandels wurde weithin als wichtiges Signal wahrgenommen. Denn nach der Bewältigung der Corona-Krise im Innern kehrte China als eines der ersten Länder der Welt wieder auf seinen kräftigen Wachstumspfad zurück, was jedoch die chronische Stromknappheit und Probleme bei der Versorgungssicherheit erneut verschärfte und in der Folge, im Herbst des Jahres 2021, zu zahlreichen Netzausfällen führte. Die Umstellung auf volatile Erneuerbare Energien fällt in einer solchen Situation naturgemäß noch schwerer. Als kurzfristigen Ausweg aus der chronischen Stromknappheit baut China wie gehabt weiter Kohlekraftwerke. Im Jahr 2020 gingen fast 40 Gigawatt neu ans Netz, etwa dreimal mehr als im Rest der Welt.⁹⁴

Noch dazu trieb China in den vergangenen Jahren die Finanzierung von Kohlekraftwerken im Ausland aggressiv voran. Die zehn Spitzenplätze bei der internationalen Finanzierung von Kohleprojekten besetzen seit 2016 allesamt chinesische Banken. Allerdings lief das internationale Geschäft mit der Kohle auch für China zuletzt nicht mehr rund. Im Juni 2021 ergab eine Untersuchung, dass seit 2017 etwa viereinhalbmal mehr geplante Kohlekapazitäten zeitlich verschoben oder ganz aufgegeben als neu gestartet wurden.⁹⁵ Wie sehr China sich unter Druck gesetzt fühlt, nicht länger als Verkäufer schmutziger Kohlekraftwerke

in alle Welt zu gelten, zeigte sich wenige Wochen vor der Weltklimakonferenz von Glasgow, als das Land verkündete, die Finanzierung und den Bau von Kohlemeilern im Ausland vollständig zu beenden.⁹⁶ China folgt damit – zumindest jenseits seiner eigenen Grenzen – einer weltweiten Ausstiegsdynamik aus der Kohle, die sich seit 2015 immer weiter verstärkt hat.

Zuletzt hob die IEA diese Entwicklung in ihrem „World Energy Outlook 2021“ hervor.⁹⁷ Demnach waren Zahl und Leistung der weltweit neu ans Netz gebrachten Kohlekraftwerke in den vergangenen Jahrzehnten immer weiter angestiegen. In den 2020er Jahren steht diese Entwicklung jedoch vor einer historischen Kehrtwende (Abbildung 12). Sollte China zudem sein Engagement für Kohlekraftprojekte im Ausland wie angekündigt komplett beenden, würde dies bedeuten, dass im laufenden Jahrzehnt über die im Bau befindlichen Kohlekraftwerke hinaus nur noch wenige Kohlemeiler neu gestartet würden und nach 2030 gar keine mehr.

▼ Kraftwerksleistung in Gigawatt

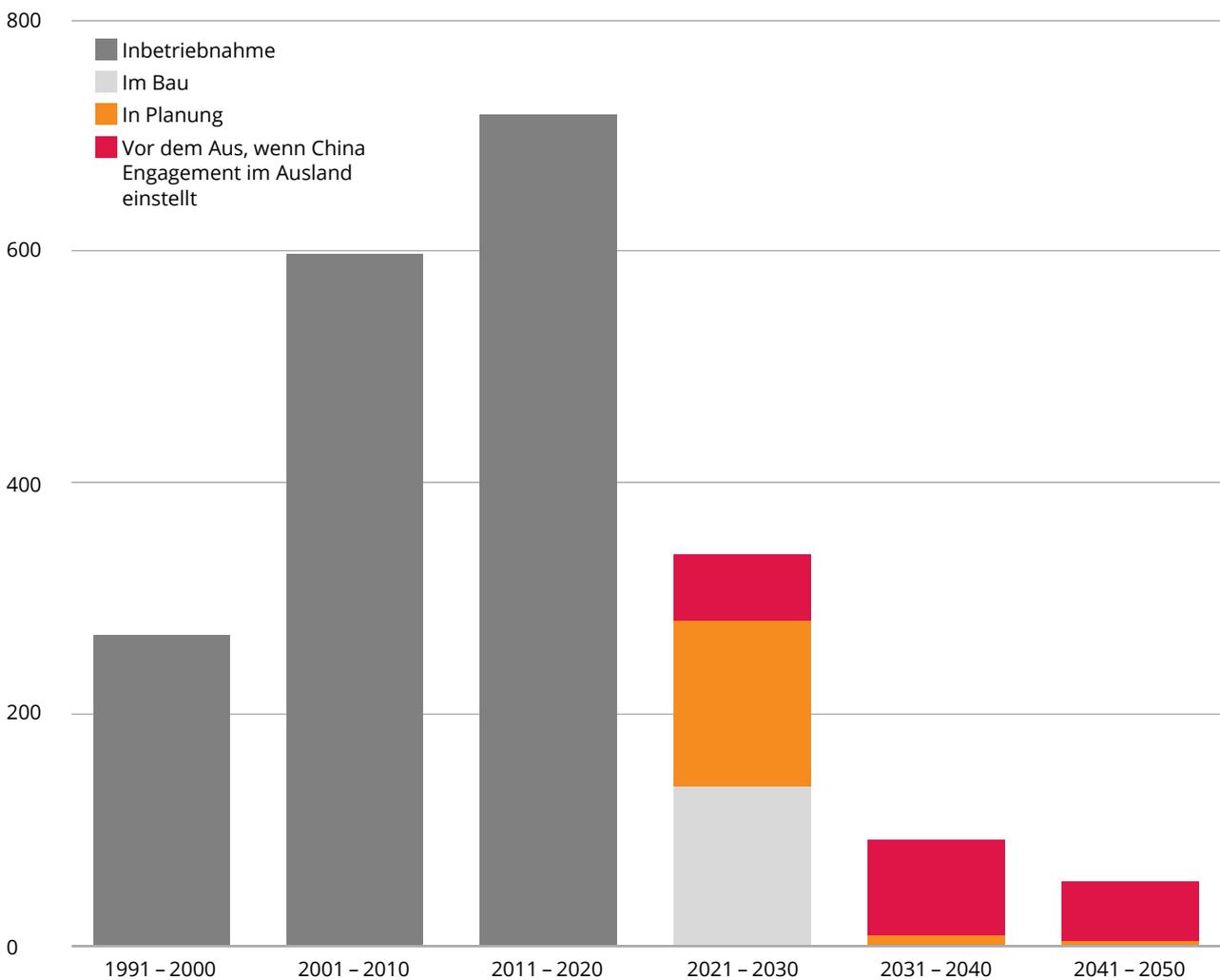


Abbildung 12:

Historischer und prognostizierter Zubau weltweiter Kohlekraftwerksleistung (mit und ohne Engagement Chinas im Ausland); Quelle: IEA 2021⁹⁸

Bereits zuvor war die Flucht aus der Kohle im Herbst 2021 durch eine Bilanz der weltweiten Kohleprojekte umfassend belegt worden.⁹⁹ Demnach wurden drei Viertel aller Kohleprojekte seit 2015 aufgegeben. 44 Staaten kündigten im selben Zeitraum an, keine neuen Kohleprojekte mehr starten zu wollen. UN-Generalsekretär António Guterres hat die Staaten der Welt zudem aufgerufen, den Bau neuer Kohlekraftwerke mit dem Jahr 2021 endgültig und vollständig zu beenden.

Vor dem Klimagipfel von Paris hatte das französische Brokerhaus Kepler Cheuvreux im Herbst 2015 damals noch geradezu utopische Klimabeschlüsse zum Ausgangspunkt einer bestechenden Analyse gemacht. Diese Beschlüsse waren dann – als Reaktion auf die Pflichten aus dem Klimaabkommen von Paris – schon vor dem Gipfeltreffen in Glasgow auf breiter Front Realität geworden: auf internationaler Ebene etwa in Gestalt des Green Deal der EU, der neuen Klimaambitionen der USA nach ihrer Rückkehr in die internationale Klimadiplomatie unter Präsident Joe Biden oder mit dem Start des chinesischen Emissionshandelssystems.

Die fossilen Weltkonzerne, so die Analyse von Kepler Cheuvreux aus dem Jahr 2015, könnten wegen der Klimaschutzdebatte und der immer kostengünstigeren Erneuerbaren Energien vor Verlusten in zweistelliger Billionenhöhe stehen. Ambitionierte Klimaschutzbeschlüsse würden die an Kohle, Öl und Erdgas gebundenen Unternehmen vor ein nicht auflösbares Dilemma stellen: Sofern die Handelspreise für fossile Brennstoffe auf niedrigem Stand verharrten, würde die aufwändige Erkundung und Förderung aus schwierigen Öllagerstätten unbezahlbar. Wenn die Preise jedoch wieder stiegen, würde dies die Substitution von Öl durch immer kostengünstigere erneuerbare Stromerzeugungstechnologien, insbesondere im Mobilitätssektor, zusätzlich beschleunigen.¹⁰⁰

Im Jahr 2021 erlebt die Welt die zweite der beiden für die Ölindustrie gleichermaßen bedrohlichen Alternativen: Die Ölpreise sind hoch, und mehr und mehr Autohersteller verabschieden sich vom Verbrennungsmotor. Unter dem Eindruck der internationalen politischen Vorgaben setzen sie verstärkt oder vollständig auf Elektromobilität. Auch die Erdgaspreise erreichen zwischenzeitlich Rekordstände. Die Ursachen sind vielfältig und die Dauer der Hochpreisphase bleibt ungewiss. Sicher aber verbessern hohe Erdgaspreise die Wettbewerbsposition gasunabhängiger Heizsysteme, etwa solcher mit modernen Wärmepumpen gegenüber Gasheizungen aller Art.

So wie die Autohersteller sich Schritt für Schritt vom Verbrennungsmotor verabschieden, werden auch die Hersteller von Heizsystemen sich schon bald Alternativen zuwenden, die nicht auf fossile Energieträger angewiesen sind. Nicht nur die Hersteller selbst erwarten eine Zukunft ohne Pkw-Verbrenner oder mit sehr viel weniger Gasheizungen. Sie werden darin von vielen Analysten und Energieinstitutionen wie auch der Internationalen Energieagentur bestärkt.

Donald Trumps „Verdienst“: Die Klärung der Prioritäten der Wirtschaft

Nicht zuletzt half ein irrlichternder US-Präsident ungewollt, die neuen Prioritäten mächtiger Industriebranchen nicht nur in den USA zu erhellen. Donald Trump trieb die USA während seiner Amtszeit (2016 – 2020) auch in der Energie- und Weltklimapolitik in die Isolation. Zwar dachte keine der global führenden Wirtschaftsmächte daran, Trumps Harakiri-Kurs ausdrücklich zu folgen. Niemand sonst kam auf die Idee, das Klimaabkommen von Paris aufzukündigen. Doch die Wirtschaftsmacht USA entfaltete unter Trump immerhin noch so viel ökonomische Macht, dass konkurrierende Wirtschaftsschwergewichte Trumps Alleingang nicht durch zu große, eigene Ambitionen im Klimaschutz zu einem kurzfristigen Wettbewerbsvorteil für die USA adeln wollten. So zögerten viele Staaten, ihren Klimaschutz ambitioniert zu beschleunigen.

Die Sorge, die USA könnten aus der Rolle des klimapolitischen Trittbrettfahrers Vorteile generieren, stellte sich jedoch als von Anfang an unbegründet heraus. Denn Trump war weder im Inland noch im Ausland mit seinem Konfrontationskurs gegen den Klimaschutz erfolgreich. Im Ausland ging die Klimadiplomatie, wenn auch mit angezogener Handbremse, weiter, im Inland setzten sich die Trends für mehr Erneuerbare Energie und gegen die Kohlekraft fort. Dass die USA im Weltmaßstab nicht den Anschluss an die Entwicklung hin zu einem neuen modernen und klimaverträglichen Energiesystem verpassten, war vor allem dem Umstand geschuldet, dass US-Staaten wie Kalifornien, viele Hochtechnologiestandorte und große Unternehmen Trumps Rolle rückwärts ignorierten und mit ihrer eigenen Energiewende einfach weitermachten.

Unter Trump wurden die mit Abstand größten Kohlekraftwerkskapazitäten in den USA stillgelegt.

Wie vergeblich Donald Trump mit seinen Kohleparolen gegen Windmühlenflügel kämpfte, verdeutlicht die nachfolgende Grafik. Sie bildet die Entwicklung der Kraftwerkskapazitäten in den USA unter den Präsidenten George W. Bush, Barack Obama und Donald Trump ab. Das Ergebnis ist eindeutig: Unter Trump wurden die mit Abstand größten Kohlekraftwerkskapazitäten stillgelegt, trotz seines scheinbar unermüdlichen Einsatzes für die Kohlekumpel. Die Aufstellung hält noch eine zweite Ironie der Geschichte bereit: Unter Trump wurden mehr erneuerbare Erzeugungskapazitäten errichtet als unter jedem anderen US-Präsidenten zuvor, obwohl er die klimaschonenden Technologien stets bekämpfte. Der Befund ist der vielleicht eindrucklichste Beweis, dass sich die neuen, klimaschonenden Energietechnologien von der Politik emanzipiert haben. Die Phase, in der sie nur boomten, wo der politische Rahmen günstig gesetzt war, ist erkennbar vorbei (vgl. Abbildung 13).¹⁰¹

▼ Kraftwerksleistung in Gigawatt

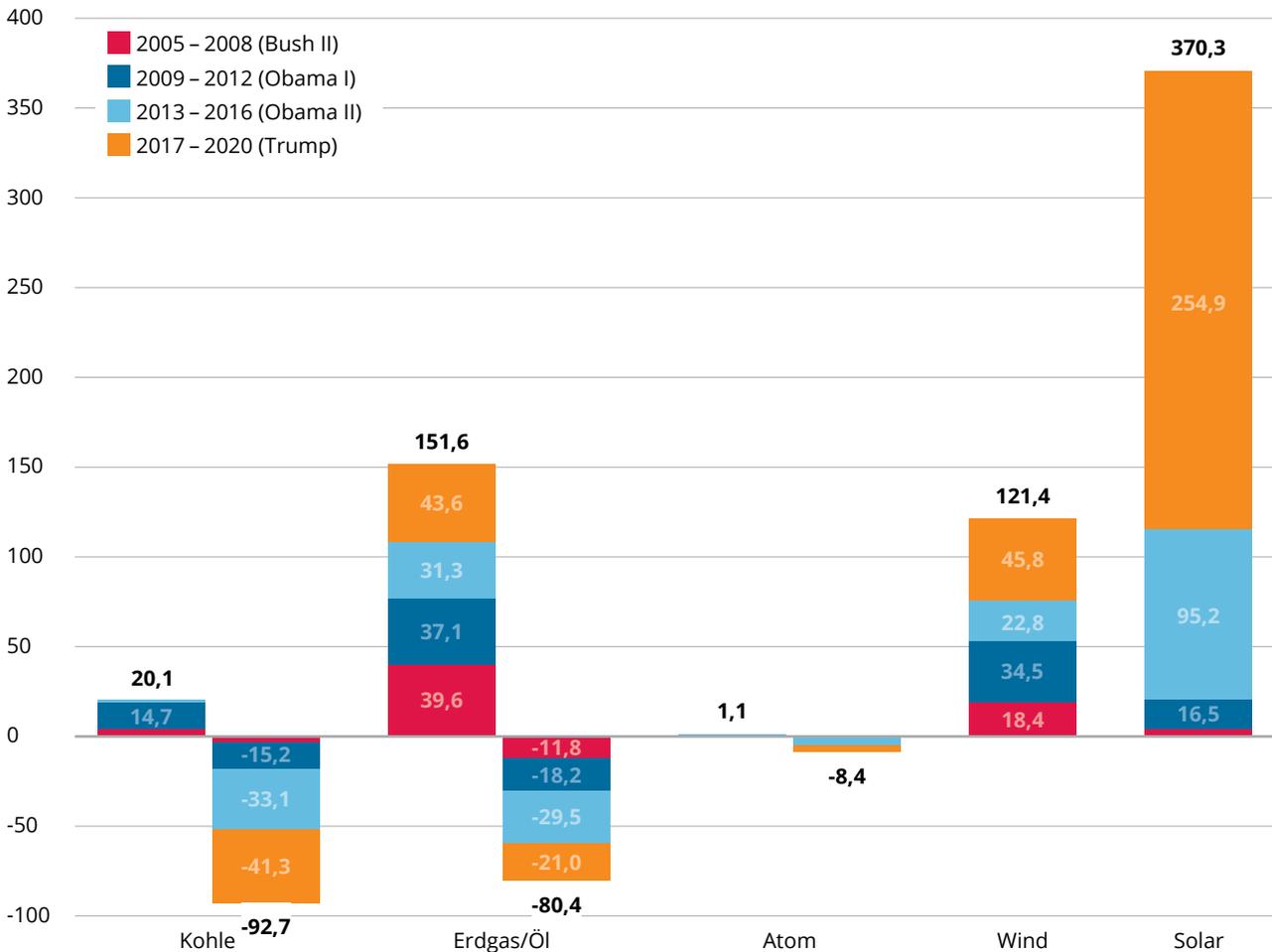


Abbildung 13:

Zubau und Stilllegung von Kraftwerksleistung in den USA während der Amtszeiten der US-Präsidenten George W. Bush, Barack Obama und Donald Trump; Quelle: eia¹⁰²

Diese Erkenntnis, die wir nicht zuletzt dem krachenden energiepolitischen Scheitern Trumps verdanken, lässt auch mit Blick auf Asien, insbesondere auf China, Indien, Indonesien oder Australien hoffen. Auch diese Länder und ihre Unternehmen gehorchen den Gesetzen der Ökonomie und werden eher über kurz als über lang auf den auch wirtschaftlich vorteilhaften Pfad einschwenken.

Den Investoren war es während der Trump-Zeit augenscheinlich gleichgültig, welche Kraftwerkstechnologie der mächtigste Mann der Welt favorisierte. Die fossile Ära geht zu Ende, so viel ist sicher. Entscheidend ist, ob dies schnell genug passiert. Die Ressourcen fossiler Energieträger lagern nach wie vor in gigantischen Mengen unter der Erde. Ob es gelingt, sie dauerhaft dort zu lassen, ist eine Überlebensfrage der Menschheit – und des demokratischen Systems. Glückt der gesteuerte und politisch kontrollierte Übergang in die post-fossile Welt oder löst der ungeheure Wertverfall der Ressourcen sowie der einstmaligen fossilen Weltkonzerne eine Phase gesellschaftlicher und ökonomischer Turbulenzen aus?

Megatrend 2:

Die Energiezukunft
ist Gegenwart –
fast überall

- Erneuerbare Energien auf Basis von Wind und Sonne sind heute in vielen Regionen der Welt gegenüber der traditionellen Stromerzeugung aus Kohle, Erdgas oder Atomkraft konkurrenzfähig.
- Der Kostenvorteil von Wind- und Sonnenenergie gegenüber fossil erzeugter Elektrizität verstärkt sich weiter, weil die CO₂-Emissionen der Stromerzeugung in immer mehr Regionen der Erde einen Preis erhalten.¹⁰³
- Zwischen 2014 und 2020 hat sich die weltweit installierte Windenergieleistung verdoppelt, die der Photovoltaik nahezu vervierfacht.
- Mehr als vier Fünftel der im Jahr 2020 neu installierten Erzeugungleistung war erneuerbar. Fossile und nukleare Kraftwerke kamen in Summe noch auf 18 Prozent und sind damit weit abgeschlagen.
- 2020 flossen 70 Prozent der Neuinvestitionen in Anlagen zur Stromerzeugung in den Erneuerbare-Energien-Sektor, 22 Prozent in fossile und acht Prozent in Atomkraftwerke.

Durchmarsch für Wind und Sonne – Aber wo reiht sich Deutschland ein?

Die Energiewende, ein deutsches Phänomen? Diese Frage stand 2015 ganz am Anfang des Megatrends unter dem Titel „Die Energiezukunft hat schon begonnen“. Sie wurde verneint, denn schon damals hatten wichtige Länder rund um den Globus die Energierevolution eingeleitet – in Deutschland hatte sich dies damals nur noch nicht herumgesprochen.

Heute stellt sich die Frage anders. Beim Zubau von Windenergie an Land lag Deutschland 2020 im weltweiten Ranking an siebter Stelle,¹⁰⁴ bei der Photovoltaik auf Platz fünf.¹⁰⁵ Beunruhigender noch als die Rangfolge wirken jedoch die absoluten Zahlen. China errichtete allein im Jahr 2020 Windenergieanlagen mit einer Gesamtleistung von 69,3 Gigawatt und damit in einem Jahr deutlich mehr, als in Deutschland insgesamt an Land und vor den Küsten installiert ist (zum Jahresende 2020: 62,2 Gigawatt¹⁰⁶). Der Onshore-Zubau lag hierzulande im Jahr 2020 bei 1,2 Gigawatt netto,¹⁰⁷ der Offshore-Zubau bei lediglich 0,2 Gigawatt.¹⁰⁸ Das entspricht in Summe einem Anteil am weltweiten Zubau des Jahres 2020 von 1,1 Prozent. Bei der Photovoltaik erreichte China 2020 allein einen Zubau von 49,3 Gigawatt und lag damit in einem einzigen Jahr nur geringfügig unter der bis dahin in Deutschland insgesamt installierten Leistung (zum Jahresende 2020: 53,7 Gigawatt¹⁰⁹).

**Deutschland droht
als ehemaliger
Energiewende-
vorreiter den
Anschluss an
die Energiezukunft
zu verlieren.**

Natürlich spielen China und Deutschland in unterschiedlichen Ligen. Doch auch im Vergleich mit anderen Ländern oder der EU gehört Deutschland als frühere Führungsnation beim Ausbau der erneuerbaren Technologien nicht mehr zu den Schwergewichten. Schließlich gibt zu denken, dass auch ein Land wie Vietnam seit zwei Jahren in der solaren Ausbaustatistik erfolgreicher ist als Deutschland, obwohl sich das Zubautempo bei der Photovoltaik hierzulande zuletzt erholt und erfreulich entwickelt hat. Die führende Wirtschaftsnation der EU steuerte 2020 mit 4,8 Gigawatt 3,8 Prozent zum globalen PV-Zubau bei.¹¹⁰

Deutschland ist früh mit Elan in die neuen Energietechnologien gestartet. Doch ein Sonderweg blieb das allenfalls für wenige Jahre. Heute stellt sich die Frage, ob die viertgrößte Volkswirtschaft der Welt als traditioneller Hochtechnologiestandort in der post-fossilen Energiewelt noch mithalten und seinen Strombedarf innerhalb der notwendigen Fristen klimaneutral bereitstellen kann. Deutschland hat seine einst prägende Rolle in der Energiewende in den vergangenen 15 Jahren nicht nur eingebüßt, es hat sie teilweise freiwillig und sogar gezielt hergegeben. Das traditionelle Kohleland Deutschland hat energiepolitisch eine Rolle rückwärts gemacht und droht darüber den Anschluss an die Energiezukunft zu verlieren.

Als die Windenergie Mitte des letzten Jahrzehnts boomte, deckelte die Bundesregierung den Zubau, kürzte rabiart die EEG-Vergütung und schaute zu, wie zusätzliche bürokratische Hürden, pauschale Abstandsregelungen und überbordende genehmigungsrechtliche Anforderungen die dringend benötigte Ausbaudynamik allmählich erstickten. Wenige Jahre zuvor war der Solarwirtschaft Ähnliches widerfahren. Als diese zwischen 2010 und 2012 boomte, wurde sie ebenfalls durch eine zu schnelle Absenkung der EEG-Vergütungen abgewürgt und verschwand größtenteils aus Deutschland. Heute fürchten vor allem Kernbranchen der deutschen Industrie, in deren angeblichem Interesse die Politik das Energiewendetempo in der Vergangenheit drosselte, eine Ökostromlücke mit Versorgungsengpässen und überteuerten Elektrizitätskosten¹¹¹ und fordern vehement eine entschlossenerere Politik im Kampf gegen die Klimakrise.¹¹²

Beängstigende Ermüdungserscheinungen in Deutschland

Mit wachsender Sorge beobachten die Manager:innen, dass die globalen Schlüsseltechnologien Windenergie und Photovoltaik in vielen konkurrierenden Ländern Rekordzuwächse vorweisen können, während sich ausgerechnet in Deutschland, einem der über viele Jahre weltweit geschätzten Vorreiter der Energiewende, in der entscheidenden Phase der Energietransformation nur noch wenig bewegt.

Ausgerechnet im traditionellen Vorzeigebereich der deutschen Energiewendepolitik, dem Ausbau der Erneuerbaren Energien, bleibt das Land weit hinter den Notwendigkeiten und eigenen Ansprüchen zurück. Geradezu dramatisch ist dieser Befund, weil Ende 2022 der vor zehn Jahren beschlossene Atomausstieg endgültig vollzogen wird und der Ausstieg aus der Kohle unter veränderten ökonomischen und politischen Rahmenbedingungen voraussichtlich schon 2030, jedenfalls deutlich früher als 2038 kommt, wie ursprünglich in der Kohlekommission vereinbart. Gleichzeitig erwartet die Ampelregierung bis 2030 einen auf bis zu 750 Terawattstunden steigenden Strombedarf,¹¹³ weil der Elektrizitätssektor über seine traditionellen Anwendungen hinauswächst (siehe Megatrend 5).

In Abbildung 14 und Abbildung 15 ist jeweils der jährliche Nettozubau von Photovoltaik- und landseitiger Windenergieleistung in den vergangenen beiden Dekaden dargestellt, außerdem der prozentuale Anteil Deutschlands am jeweiligen Zubau in Europa. Die Kurven zeigen, auf der Zeitachse etwas verschoben, einen vergleichbaren Verlauf.

Deutschland startete nach der Jahrtausendwende früher als andere Länder in Europa mit zahlreichen kleinen privaten PV-Dachanlagen geringer Leistung und Windenergieanlagen mit auch anfangs schon erheblich größerer Leistung. Die erste Welle, getragen von den Pionieren der jeweiligen Technologien, flaute ab, bevor die Solarenergie durch die Errichtung erster industrieller PV-Freiflächenanlagen hoher Leistung und sehr gute Vergütungsbedingungen zwischen 2010 und 2012 ihren ersten großen Boom erlebte. Ein vergleichbarer Höhenflug folgte bei der Windenergie an Land etwas später (2014 – 2017). Beide Hochphasen führten zu rasanten Technologiesprüngen und einer massiven Kostendegression. Die jeweiligen Bundesregierungen reagierten mit politischen Bremsmanövern, indem sie die Vergütungen nach dem EEG erheblich reduzierten und den jährlichen Zubau deckelten (Union/FDP bei PV; Union/SPD bei Wind). Beide Bremsmanöver kosteten in Summe mehr als hunderttausend Arbeitsplätze in Deutschland.¹¹⁴ Die noch junge PV-Herstellerindustrie stürzte regelrecht ab und verschwand weitgehend aus Deutschland. Die Windindustrie rettete sich in Teilen durch den Export von Anlagen und Konsolidierung.

▼ Jährlicher Netto-Zubau Solarenergieleistung in Gigawatt

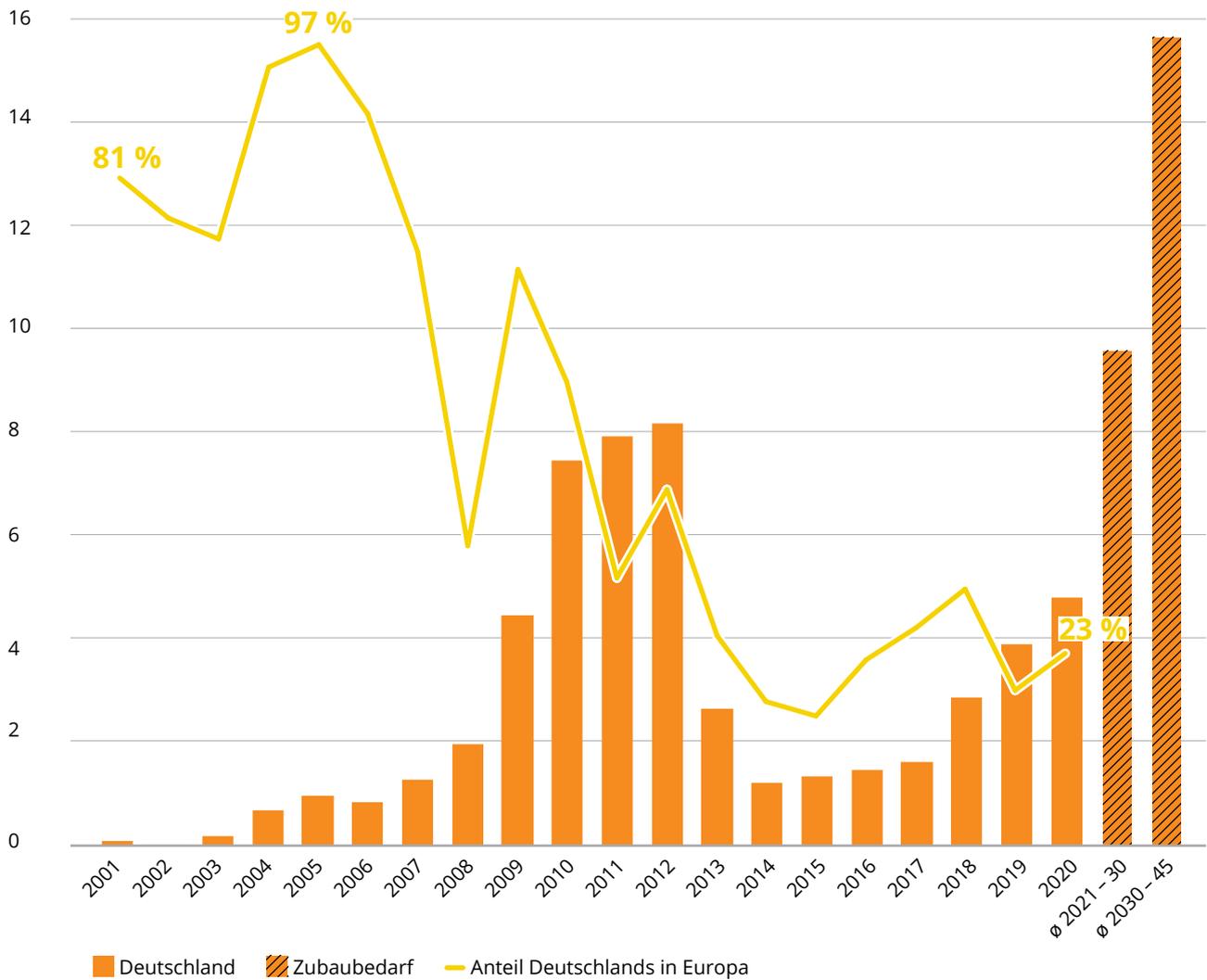


Abbildung 14:

Jährlicher Netto-Zubau Solarenergieleistung in Deutschland und Anteil am Ausbau in Europa. Schraffierte Balken: Zubaubedarf gemäß Studie „Klimaneutrales Deutschland 2045“; Quellen: IRENA,¹¹⁵ Prognos, Öko-Institut, Wuppertal Institut¹¹⁶

Auch der Anteil Deutschlands am europäischen Ausbau der Wind- und Solar-energie fiel nach den jeweiligen Boomphasen auf Tiefstwerte (Abbildung 14 und Abbildung 15). Während der Ausbau der wichtigsten Erneuerbaren Energien einbrach, verschärften die verantwortlichen Bundesregierungen jedoch die Klimaschutzziele und ergriffen über viele Jahre keine wirksamen Maßnahmen gegen den Fortbestand und Neubau von Kohlekraftwerken.

Nach 16 Jahren einer ambivalenten und folgensweren Stop-and-go-Politik gegenüber den Erneuerbaren Energien auf der einen und ambitionierten Klimazielen auf der anderen Seite muss der Ausbau der Photovoltaik und der landseitigen Windenergie nun in den 2020er Jahren – ausweislich unterschiedlicher Szenarien – kurzfristig jeweils etwa verdreifacht werden, um das im Frühjahr 2021 beschlossene Ziel der Klimaneutralität bis zum Jahr 2045 noch zu erreichen.^{117,118} Die Ampelkoalition aus SPD, Grünen und FDP hat sich zudem in ihrem Koalitionsvertrag vorgenommen, den Anteil der Erneuerbaren Energien am Strombedarf bis 2030 von zuvor vorgesehenen 65 Prozent weiter auf 80 Prozent zu erhöhen. Dies bedeutet, dass der Zubau von Windenergie und Photovoltaik in den 2020er Jahren noch steiler verlaufen muss. Alleine für die Photovoltaik bedeutet dies im Schnitt jährlich einen Zubau von etwa 15 GW, um das Ziel, bis Ende des Jahrzehnts 200 Gigawatt Photovoltaik installiert zu haben, erreichen zu können.

▼ Jährlicher Netto-Zubau Windenergieleistung in Gigawatt

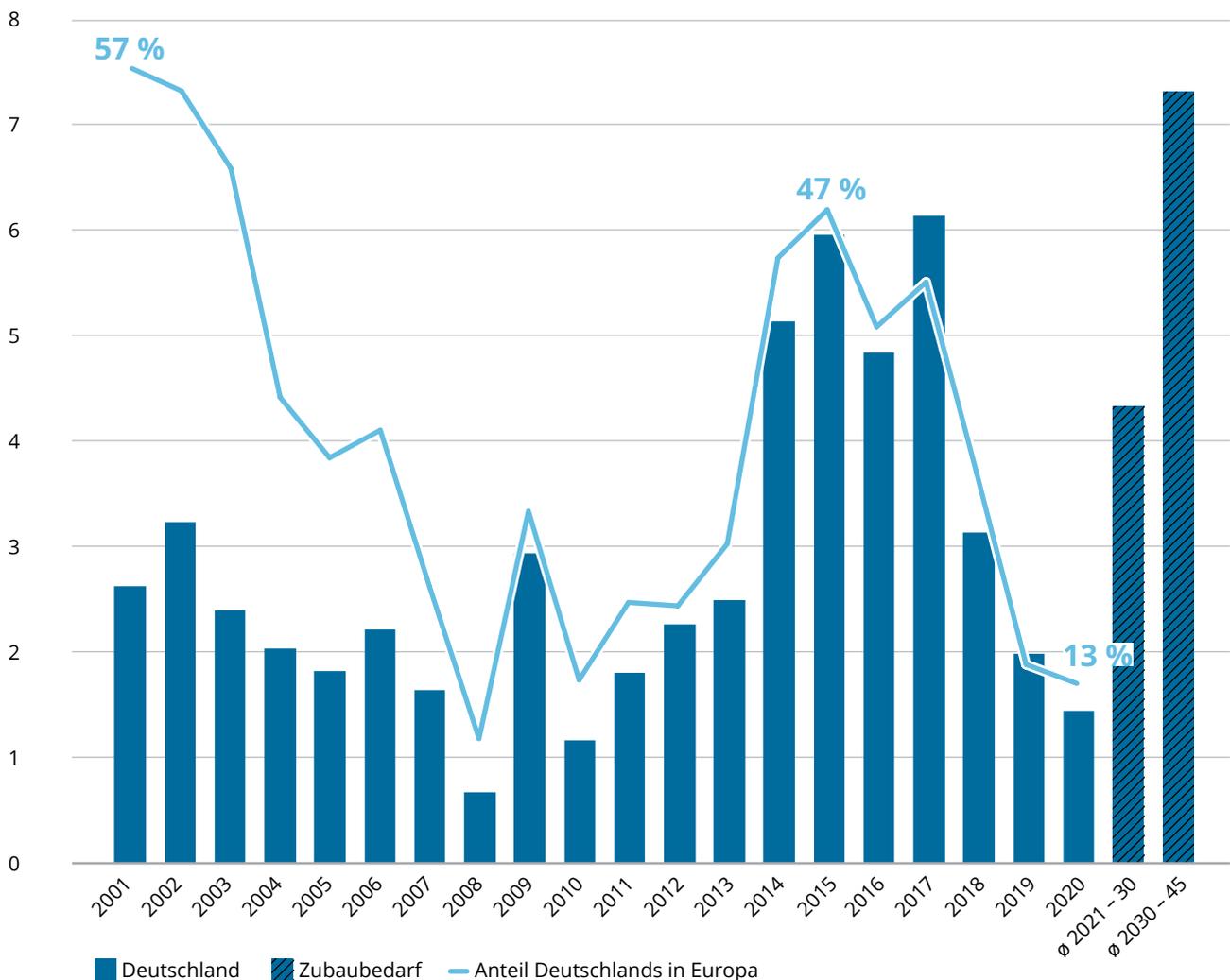


Abbildung 15 :

Jährlicher Netto-Zubau Onshore-Windenergieleistung in Deutschland und Anteil am Ausbau in Europa. Schraffierte Balken: Zubaubedarf gemäß Studie „Klimaneutrales Deutschland 2045“; Quellen: IRENA,¹¹⁹ Prognos, Öko-Institut, Wuppertal Institut¹²⁰

Verdienste der Vergangenheit bleiben

Trotz der unerfreulichen Entwicklungen in der jüngeren Vergangenheit bleibt wahr, dass Deutschland den weltweiten Siegeszug der Erneuerbaren Energien nach der Jahrtausendwende wesentlich mit ausgelöst hat. Zum einen wurde hierzulande zur Jahrtausendwende unter der rot-grünen Bundesregierung das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) erfunden,¹²¹ das sich mit seiner über 20 Jahre garantierten und auskömmlichen Vergütung der erzeugten Strommengen als erfolgreiches Instrument zur Markteinführung der damals noch teuren Stromerzeugung aus Sonne, Wind und Biomasse in weitgehend gesättigten Elektrizitätsmärkten erwies. Dieses Prinzip wurde bis heute weltweit in über 80 Staaten erfolgreich übernommen.¹²² Das ist und bleibt Deutschlands erstes, sein konzeptionelles Verdienst.

Auch das zweite Verdienst bleibt. Es ist finanzieller Natur: Die deutschen Stromverbraucher:innen haben seit Einführung des Gesetzes über die EEG-Umlage mit ihren Stromrechnungen einen Großteil der Entwicklungs- und Markteinführungskosten dieser globalen Schlüsseltechnologien für das 21. Jahrhundert mit dreistelligen Milliardensummen bezahlt.¹²³ So wurde vor allem Strom aus Sonnen- und Windenergie auch für weniger wohlhabende Länder erschwinglich. Der deutsche Beitrag zu dieser Entwicklung war und ist bis heute erheblich – insbesondere für private Haushalte, die die EEG-Umlage von durchschnittlich mehreren hundert Euro pro Jahr bis heute schultern, ebenso wie für kleine Gewerbetreibende und solche Unternehmen, die im Gegensatz zu vielen energieintensiven Großbetrieben nicht von der Umlage befreit sind.¹²⁴

Das Erneuerbare-Energien-Gesetz und seine Übernahme in über 80 Ländern der Erde ist vermutlich das erfolgreichste deutsche Entwicklungshilfeprogramm aller Zeiten.

Die EEG-Mittel waren und sind gut angelegtes Geld. Denn die globale Kostenreduzierung von Strom aus Erneuerbaren Energien erwies sich – ohne dass dieser Aspekt bei der Verabschiedung der entsprechenden Regelungen eine Rolle gespielt hätte – als vermutlich erfolgreichstes Entwicklungshilfeprogramm, das Deutschland je für die Welt aufgelegt hat. Als Treibsatz für den globalen Klimaschutz und die deutsche Exportwirtschaft, aber auch für das heimische Handwerk und die regionale Wertschöpfung kommen sie nicht zuletzt uns selbst zugute. Die Kostendegression der erneuerbaren Leittechnologien Photovoltaik und Windenergie führte zu einem anhaltenden und in dieser Dynamik selbst von Expert:innen kaum vorausgesagten weltweiten Boom, der immer noch anhält.

Die globale Entwicklung stimmt: Alle Signale für Wind und Sonne stehen auf grün

Zwischen 2004 und 2014 war die installierte PV-Leistung auf der Welt von bescheidenen 3,7 auf gut 170 Gigawatt nach oben geschnellt (vgl. Abbildung 16). Doch das war erst der Anfang. Bis 2020, also binnen sechs Jahren, hat sich die installierte Gesamtleistung auf über 700 Gigawatt noch einmal fast vervierfacht. Die Windenergieleistung legte zwischen 2004 und 2014 von 47 Gigawatt auf etwa 350 Gigawatt zu, also um mehr als das Siebenfache, und lag Ende 2020 noch einmal mehr als doppelt so hoch, nämlich bei über 730 Gigawatt (vgl. Abbildung 17). Die IEA rechnet in ihrem jüngsten Marktreport trotz der anhaltenden COVID-19-Pandemie erneut mit Rekordwerten beim weltweiten Zubau von Erneuerbarer Energien. Demnach ist die aufsummierte Erzeugungsleistung aus Sonne, Wind, Wasser und Biomasse allein im Jahr 2021 um 290 Gigawatt angestiegen.¹²⁵

Die Realität der Transformation des globalen Energiesystems gründet also vor allem auf dem Erfolg der Schlüsseltechnologien Windenergie und Photovoltaik. Sie sind die notwendige Voraussetzung für erfolgreichen globalen Klimaschutz. Hinreichend wird dieser Erfolg dann, wenn die Elektrizität aus Wind und Sonne über ihre traditionellen Anwendungen hinauswächst und ihren Siegeszug auch in den Bereichen Mobilität und Wärme fortsetzt. Auch die Speicherung des volatilen Stroms aus Wind und Sonne muss für alle Anwendungen günstiger werden.

▼ Installierte Solarenergieleistung in Gigawatt

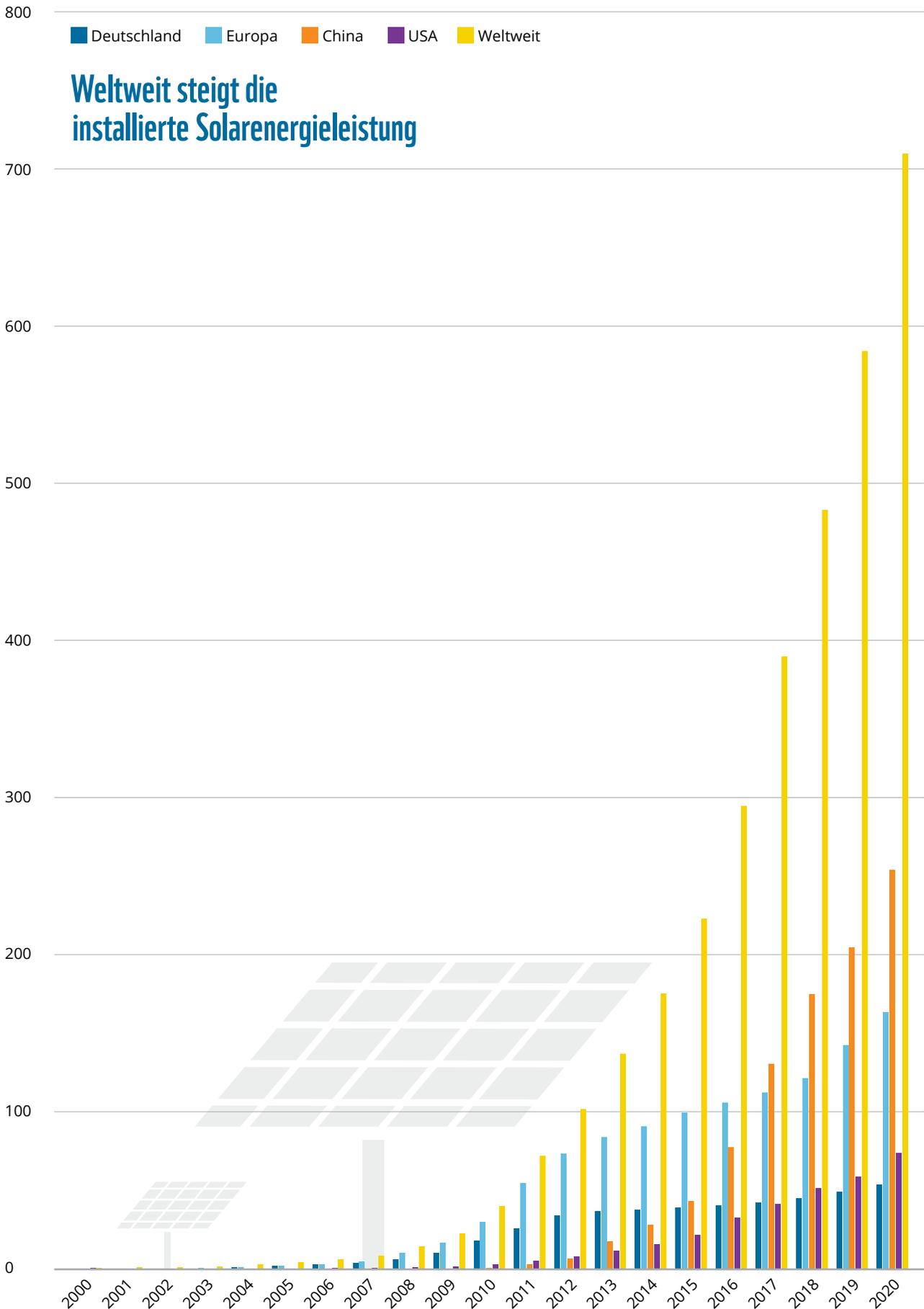


Abbildung 16:

Entwicklung der weltweit installierten Solarenergieleistung seit 2000; Quelle: IRENA¹²⁶

▼ Installierte Windenergieleistung in Gigawatt

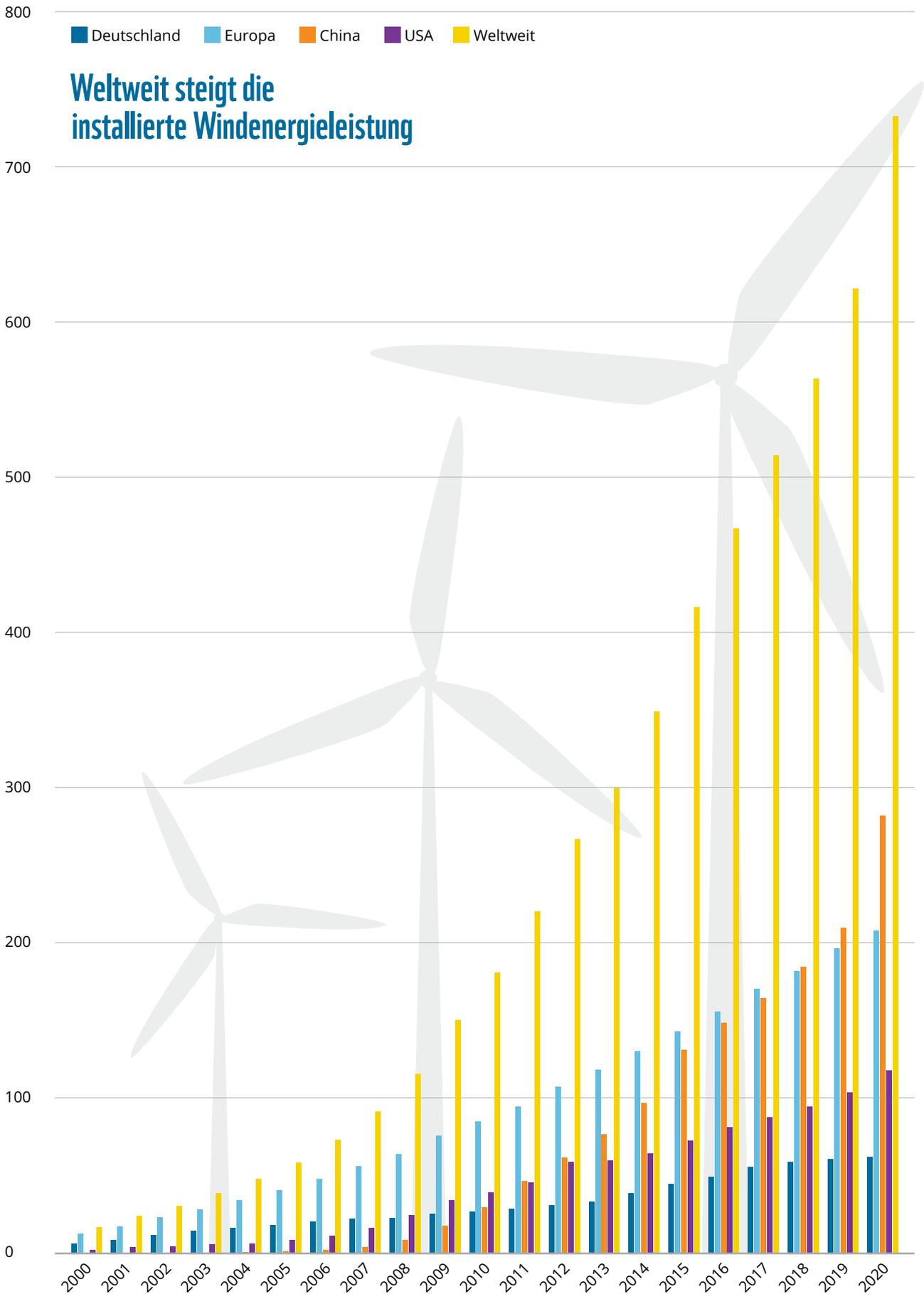


Abbildung 17:

Entwicklung der weltweit installierten Windenergieleistung seit 2000; Quelle: IRENA¹²⁷

Investitionen in die Stromerzeugung

Als der erste Megatrend-Report 2015 erschien, galt als sensationelle Nachricht, dass in den Jahren zuvor weltweit stärker in erneuerbare Stromerzeugungskapazitäten investiert worden war als in fossile und nukleare Kraftwerke zusammen. Dies hatte die Internationale Energieagentur (IEA) für die Jahre 2000 bis 2012 ermittelt. Durchschnittlich 57 Prozent aller Investitionen in die Stromerzeugung erfolgten damals im Bereich Erneuerbarer Energien; knapp 40 Prozent blieben bei den fossilen Kraftwerken.

Inzwischen haben sich die Gewichte weiter verschoben. In ihrem Report zu den weltweiten Investitionen in den Energiesektor zum Berichtsjahr 2020 ermittelte die IEA einen Anteil der Erneuerbaren an den Gesamtinvestitionen in die Stromerzeugung von 70 Prozent (entsprechend 359 Mrd. USD). Bei den fossilen Energietechnologien blieben 22 Prozent der Investitionen (113 Mrd. USD), davon gingen 49 Milliarden US-Dollar in die Kohle, 64 Milliarden US-Dollar wurden in Erdgaskraftwerken verbaut.¹²⁸ Etwas stärker als in den Jahren vor 2015 wurde in Atomenergie investiert, sie lag bei immerhin noch acht Prozent der Kraftwerksinvestitionen (42 Mrd. USD).

▼ Kapazitätswachstum in Gigawatt

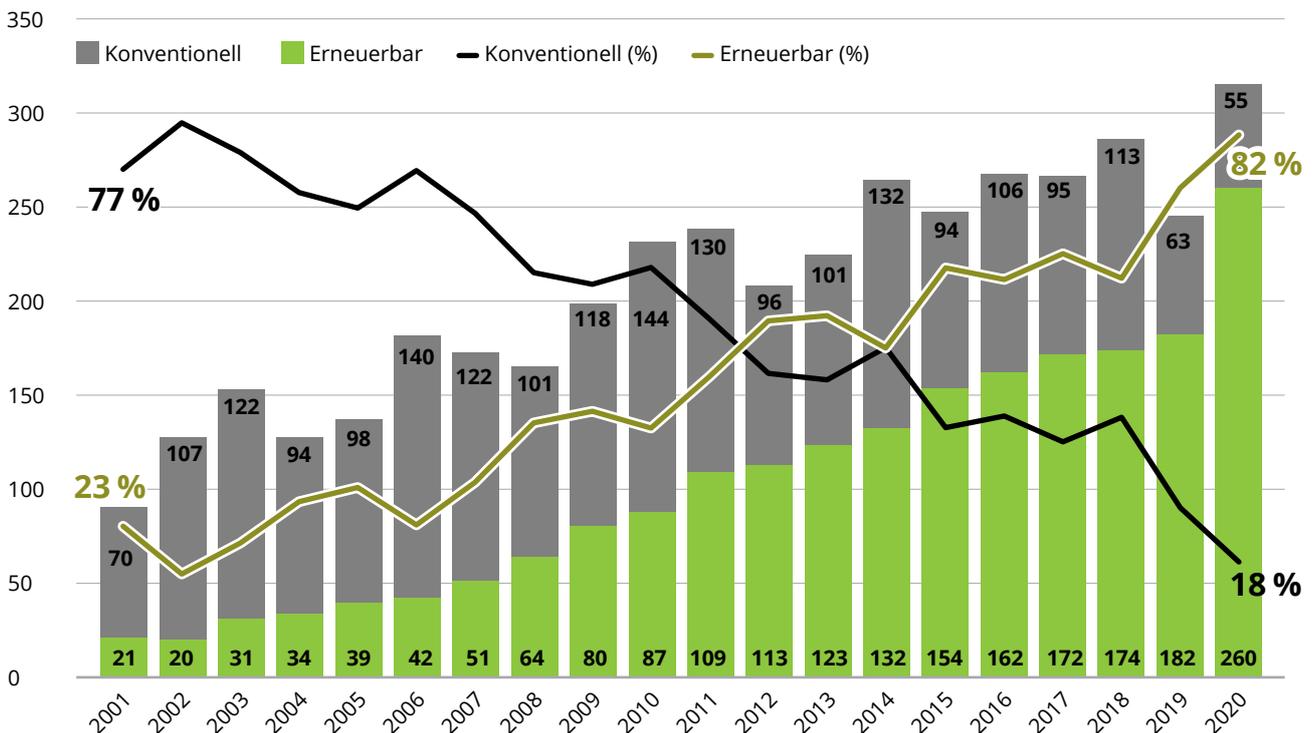


Abbildung 18:

Jährlich weltweit installierte Kraftwerksleistung; Quelle: IRENA¹²⁹

Eine weitere Meldung sorgte im Vorfeld der Weltklimakonferenz von Paris 2015 für Aufsehen: Erstmals lagen in den Jahren 2012 bis 2014 der weltweite Zubau von Erzeugungleistung im Segment konventioneller Kraftwerke und derjenige in Erneuerbare Energien in etwa gleich auf. Abbildung 18 zeigt eindrücklich, wie sich das damalige Patt seither weiter zugunsten der Erneuerbaren verschoben hat. Im Jahr 2020 lag ihr Anteil an der insgesamt neu installierten Erzeugungleistung bei mehr als vier Fünftel. Fossile und nukleare Kraftwerke kamen zusammen nur noch auf 18 Prozent.

Beben im globalen Strommix

Große Verschiebungen sind in der Folge auch bei der Zusammensetzung des klimaschonenden Strommixes zu beobachten. Schon seit der Jahrtausendwende zeigt der Vergleich der weltweiten Kapazitätsentwicklung bei Wind- und Solaranlagen einerseits und bei der Atomkraft andererseits eindrücklich, wo auch unter den Bedingungen der sich verschärfenden Klimakrise die Zukunft liegt und wo die Vergangenheit (Abbildung 19). Eine erneute Trendwende zeichnet sich allen interessierten Diskussionen über eine Renaissance der Atomkraft zum Trotz auch in jüngster Zeit nicht ab.¹³⁰ Reaktor Neubauten außerhalb der Volksrepublik China bleiben absolute Ausnahmereisenercheinungen, während der Boom der Windenergie im Weltmaßstab anhält und der der Photovoltaik nach 2015 geradezu explodierte. Nichts deutet darauf hin, dass sich dies in der nahen Zukunft ändern könnte. Im Gegenteil: Nie wurde in einem Jahr mehr Photovoltaikleistung (126,8 GW) zugebaut als im Corona-Jahr 2020 und nie wurde in einem Jahr mehr Windenergieleistung (110,8 GW) errichtet.¹³¹ Die IEA geht davon aus, dass dieser Allzeitrekord im Jahr 2021 erneut getoppt wird.¹³²

Auch die große Wasserkraft, in Gestalt von Fluss- und Stauseekraftwerken, wird trotz ihrer problematischen Auswirkungen durch Massenumsiedlungen und schwerwiegende Eingriffe in die lokale und regionale Ökologie weiter ausgebaut. Die 2013 für den Zeitraum bis 2020 angekündigten Inbetriebnahmen mit einer Gesamtleistung von 180 Gigawatt und Schwerpunkten in China, Brasilien, der Türkei und Indien sind ausweislich der aktuellen Statistiken praktisch vollständig umgesetzt worden. Andererseits hat sich hier die Ausbaudynamik in der jüngeren Vergangenheit deutlich abgeschwächt, sodass bezogen auf die seit dem Jahr 2000 neu installierte Erzeugungleistung nun sowohl Windenergie als auch Photovoltaik die traditionelle Wasserkraft überholt haben (vgl. Abbildung 19).

▼ Installierte Stromerzeugungsleistung in Gigawatt

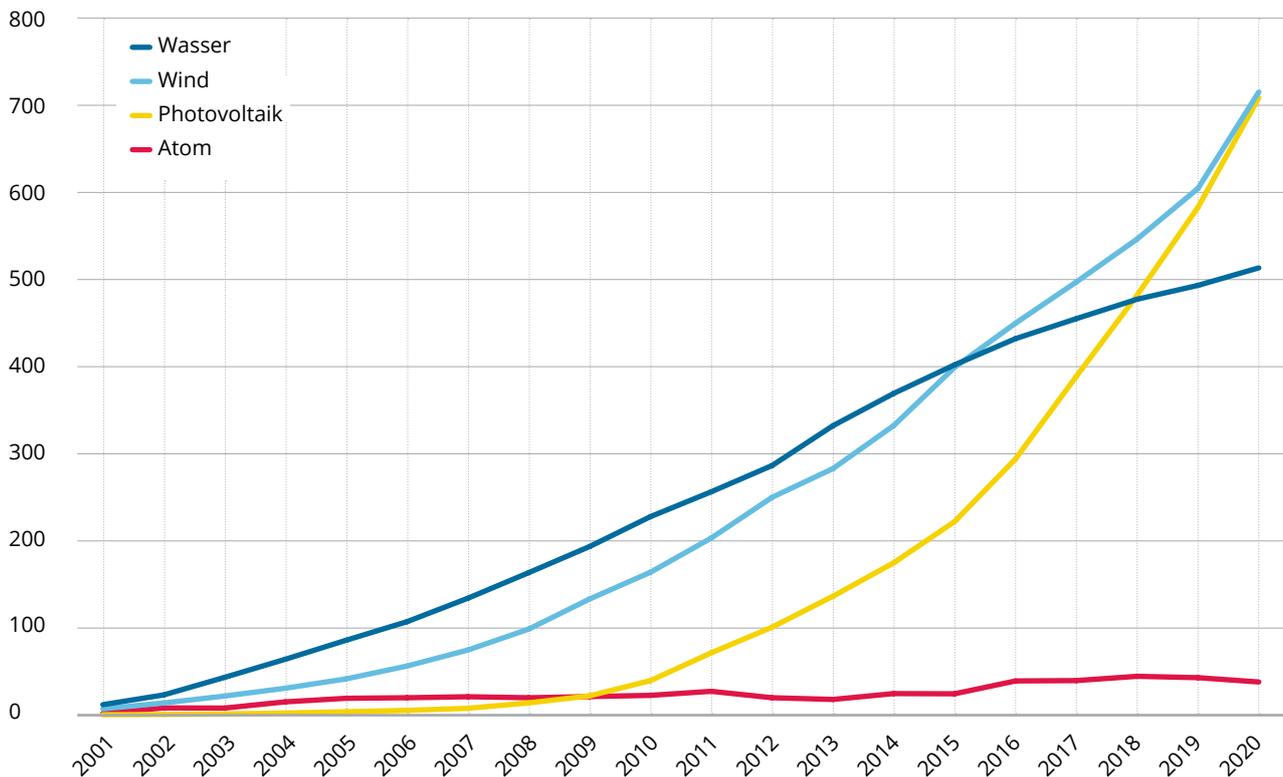


Abbildung 19:

Entwicklung der weltweit installierten Kraftwerksleistung mit Erneuerbaren Energien und Atom seit 2001; Quelle: IRENA¹³³

Allerdings vermittelt diese Feststellung allein ein unvollständiges Bild. Denn der Löwenanteil der heute im Betrieb befindlichen Wasserkraftwerke wurde bereits im 20. Jahrhundert errichtet. Insgesamt waren Ende 2020 weltweit Wasserkraftanlagen mit einer installierten Gesamtleistung von 1.322 Gigawatt am Netz.¹³⁴ Die Projekte der großen Wasserkraft, die regelmäßig zu den leistungsstärksten Kraftwerken auf der Welt führen,¹³⁵ sind wie Windenergie und Photovoltaik CO₂-arm und erzeugen im Vergleich zu diesen, bezogen auf die installierte Leistung, viel mehr Strom. Im Ergebnis stammte auch 2020 noch deutlich mehr Strom aus Wasserkraftwerken (4.296 Terawattstunden) als aus allen anderen erneuerbaren Energiequellen zusammen (3.147 Terawattstunden). Doch während der Anteil der Wasserkraft an der globalen Stromversorgung seit Jahrzehnten zurückgeht oder stagniert, steigt die Erzeugung aus Wind- und Sonnenenergie Jahr für Jahr kräftig an. Ihr Anteil wird den der Wasserkraft deshalb in wenigen Jahren übertreffen.¹³⁶

Globale Stromerzeugung aus Erneuerbaren Energien 2020 erstmals vor Atomkraft

Im Verhältnis der neuen regenerativen Energien und der alten Atomkraft wurde die historische Marke schon 2020 erreicht. Erstmals produzierten Erneuerbare Energien¹³⁷ in Summe mehr Strom (3.147 Terawattstunden) als die Atomenergie (2.700 Terawattstunden). Noch 2019 lagen beide Erzeugungstechnologien praktisch gleich auf.

Die Investitionen in moderne Energieerzeugung aus Wind und Sonne nahmen also nach der Unterzeichnung des Abkommens von Paris weiter eine rasante Entwicklung. Es handelt sich ganz offensichtlich um einen robusten Megatrend, der zwar in einzelnen, auch wechselnden Ländern Schwankungen unterliegt, sich aber grundsätzlich selbst von globalen Krisen weitgehend unberührt fortsetzt. Das war schon nach der Finanz- und Weltwirtschaftskrise 2008/2009 so und wiederholte sich während der Corona-Pandemie. Erkennbar ist – neben dem anhaltenden, aber schrumpfenden Zubau von großen Wasserkraftwerken – der enorme Bedeutungszuwachs von Photovoltaik und Windenergie als zentrale Träger des laufenden Transformationsprozesses. Die Entwicklung erweist sich als unumkehrbar, weil ihre wichtigsten Triebfedern dauerhaft wirksam sind: einerseits die weiter sinkenden Produktionskosten für Solar- und Windstrom und andererseits die Verteuerung der fossilen Verbrennung, wenn zunehmend CO₂-Emissionshandelssysteme auf der Welt installiert werden, ihre Wirkung entfalten und darüber hinaus die Explorationskosten steigen.

Eine Führungsrolle für China?

Ein im Weltmaßstab herausragender Träger der Entwicklung ist zweifellos China. Das Land, das seit zwei Jahrzehnten alle verfügbaren Technologien zur Stromerzeugung mit maximaler Ausbaugeschwindigkeit forciert, um den Energiehunger einer sich rasant entwickelnden Gesellschaft mit mehr als 1,4 Milliarden Menschen zu stillen. Seit der Jahrtausendwende trieben die Regierungen in Peking neben Kohlekraftwerken auch die Atomenergie voran. Heute ist China immer noch das Land, das mit Abstand die meisten neuen Reaktoren ans Netz bringt. Doch obwohl der Ausbau der Windenergie erst 2009 – Jahre nach der Atomenergie – startete, überflügelt die Öko- die Nuklearenergie inzwischen nicht nur bei der installierten Erzeugungsleistung, sondern seit 2013 auch bei den erzeugten Kilowattstunden (vgl. Abbildung 20). Seit 2013 kommt die Photovoltaik als weitere Erneuerbare Energie mit rasch zunehmender Bedeutung hinzu. Zwischen 2016 und 2019 verlief ihr Kapazitätswachstum sogar noch weit schneller als der der Windenergie (vgl. Abbildung 21).

▼ Stromerzeugungsleistung in Gigawatt

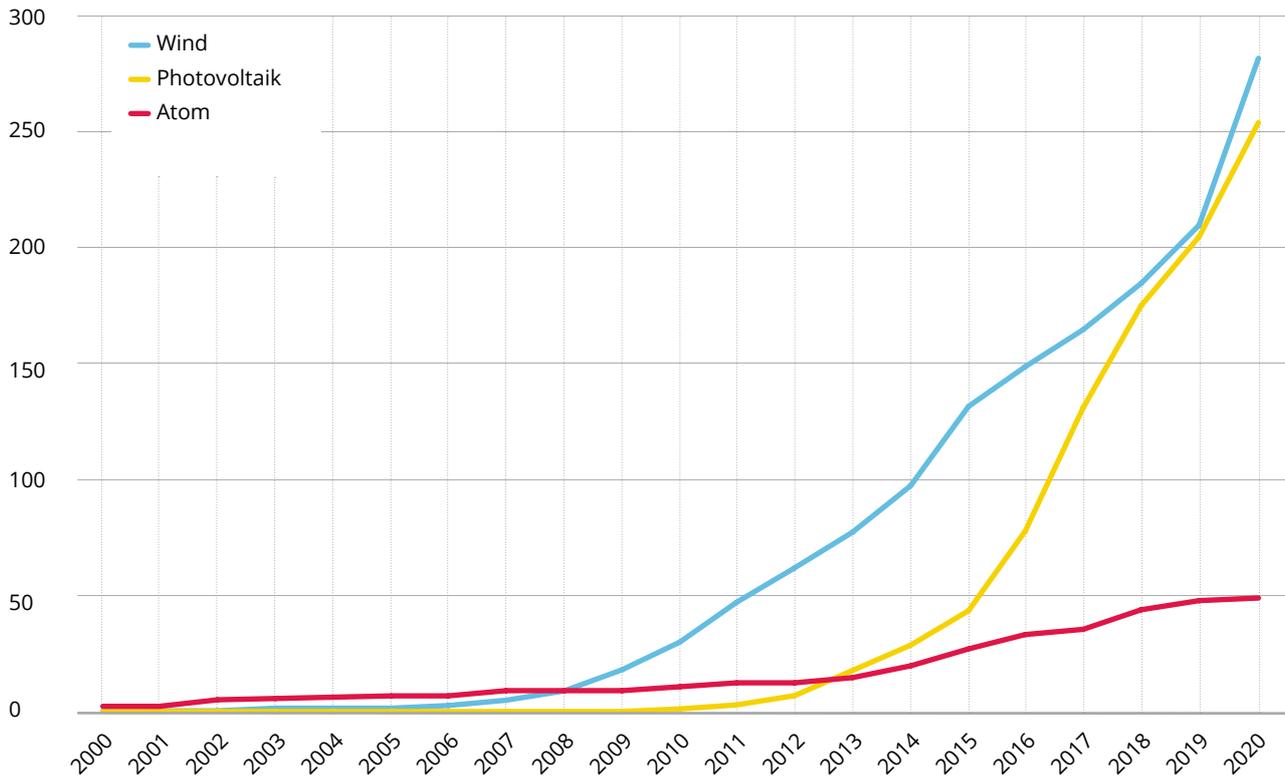


Abbildung 20:

Entwicklung der in China installierten Kraftwerksleistung mit Erneuerbaren Energien und Atom seit 2000; Quelle: IRENA¹³⁸

▼ Erzeugte Strommengen in Terawattstunden

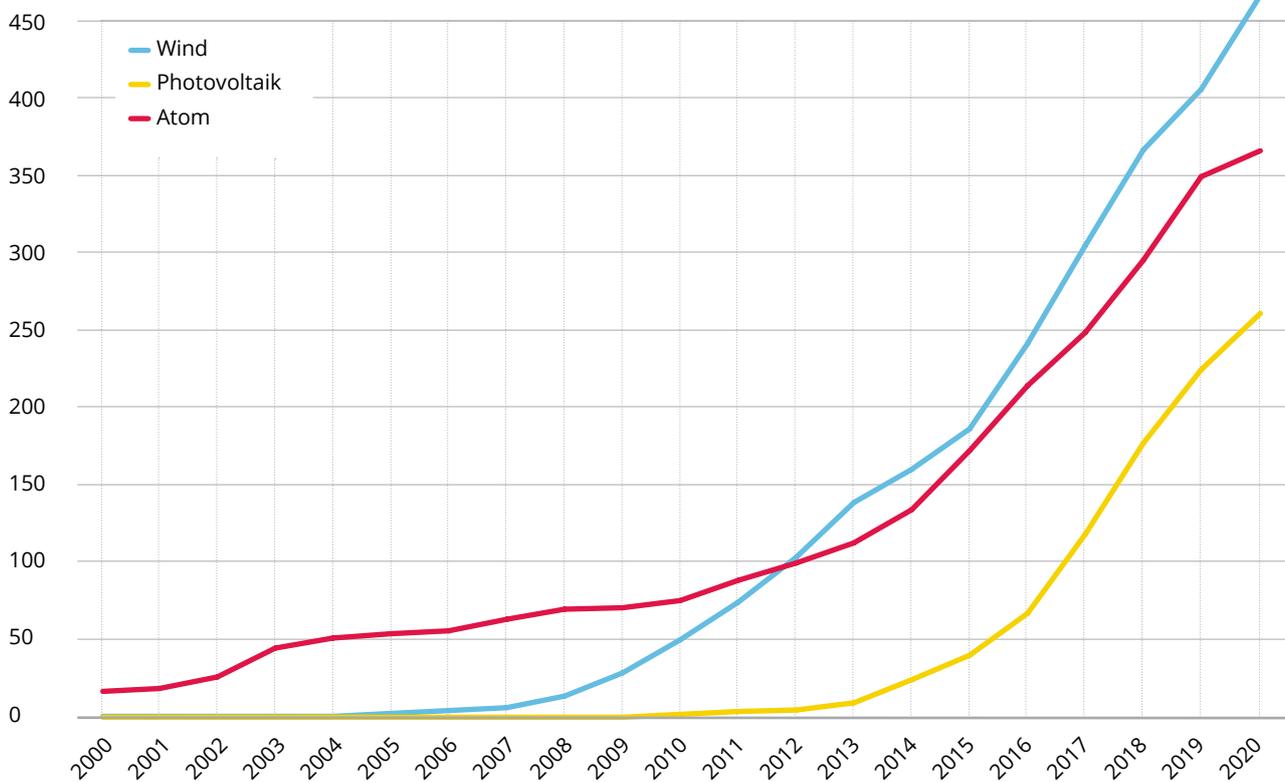


Abbildung 21:

Jährliche Stromerzeugung aus Windenergie, Photovoltaik und Atomkraft in China; Quelle: BP¹³⁹

Indien, energetisch das nächste China?

Indien, das mit derzeit 1,38 Milliarden Einwohner:innen demnächst China als bevölkerungsreichstes Land der Erde ablösen wird, weist trotz seines Status als Entwicklungs- und Schwellenland schon heute den drittgrößten Energieverbrauch aller Staaten der Erde auf. Ähnlich wie in China wurde in der Vergangenheit versucht, den wachsenden Strombedarf durch den Ausbau aller verfügbaren Erzeugungstechnologien zu befriedigen. Trotz eines niedrigen Pro-Kopf-Energieverbrauchs und niedriger Pro-Kopf-Emissionen entwickelt sich auch der CO₂-Ausstoß Indiens beängstigend. Dem Land wird in den nächsten 20 Jahren der weltweit größte Anstieg der Energienachfrage prognostiziert. Die Kombination aus einer wachsenden, sich industrialisierenden Wirtschaft und einer expandierenden, zunehmend urbanen Bevölkerung wird den Energieverbrauch weiter in die Höhe treiben. Die steigende Nachfrage soll gedeckt werden, ohne Probleme wie teure Energieimporte, Luftverschmutzung und Treibhausgasemissionen weiter zu verschärfen.¹⁴⁰

Auch in Indien steht deshalb außer Frage, dass die Entwicklung nicht auf Dauer entlang des fossilen Entwicklungspfads der alten Industriestaaten weitergehen kann.¹⁴¹ In den Jahren 2017 bis 2019 wurden dort durchschnittlich neun Gigawatt Photovoltaikleistung pro Jahr zugebaut – und sieben Gigawatt Kohlekraft. Der massive Ausbau fossiler Kraftwerkskapazitäten soll in den kommenden Jahren schrittweise reduziert und im Gegenzug der Ausbau der Erneuerbaren Energien zur Stromerzeugung bis 2030 auf eine Gesamtleistung von 450 Gigawatt gesteigert werden. Darüber hinaus sollen Wasserkraftwerke mit einer Leistung von 60 Gigawatt die Stromversorgung absichern.

Das Bemühen Indiens, im Rahmen seiner Entwicklungsanstrengungen nicht ungebremst zum Treiber der Erderhitzung zu werden, ist unübersehbar – und gleichzeitig unzureichend und widersprüchlich. Es gehört zu den Ländern, die es versäumt haben, den nationalen Klimabeitrag für 2030 (NDC) vor der Klimakonferenz in Glasgow zu aktualisieren. Allerdings hat Indien angekündigt, bis 2070 Klimaneutralität erreichen zu wollen. Dieses Ziel kommt zu spät. Zahlreiche neue Kohlekraftwerke sind im Bau und sollen bis zur Mitte des Jahrzehnts in Betrieb gehen.¹⁴² Indiens Rolle bei der Entschärfung des Ziels eines weltweiten Kohleausstiegs bei der 26. Weltklimakonferenz in Glasgow erklärt sich vor diesem Hintergrund.

Gleichzeitig bemüht sich das Land für die Umsetzung seiner Pläne zum Ausbau Erneuerbarer Energien händeringend um Investoren auch im Ausland. Beispielsweise soll im Bundesstaat Gujarat im Westen Indiens bis Mitte des Jahrzehnts das größte Hybridkraftwerk (mit Wind- und Solaranlagen) der Welt mit einer Gesamtleistung von 30 Gigawatt errichtet werden.

Für Projekte wie dieses und Länder wie Indien rief IEA-Exekutivdirektor Fatih Birol im Juni 2021 Investoren und Staaten in den Ländern des Globalen Nordens auf, ihre Investitionsanstrengungen in den Globalen Süden massiv zu erhöhen. In einem in Kooperation mit der Weltbank und dem Weltwirtschaftsforum

**Ohne entschlossene
Umlenkung großer
Geldströme zur
Finanzierung der
Energiewende im
Globalen Süden
kann weltweite
Klimaneutralität
nicht gelingen.**

erstellten Report hatte die IEA vorgerechnet, dass diese in naher Zukunft für 90 Prozent der weltweiten CO₂-Emissionen verantwortlich sein werden, ihnen aber derzeit nur 20 Prozent der Investitionsmittel für saubere Energien und entsprechende Infrastrukturen zur Verfügung stehen. Solange das so bleibe, sei es nahezu ausgeschlossen, dass die Welt bis 2050 Netto-Null-Emissionen erreichen kann. Dazu müssten die Investitionen in saubere Energie in den Ländern des Globalen Südens bis Ende der 2020er Jahre massiv auf etwa das Siebenfache – in Zahlen: auf mehr als eine Billion US-Dollar jährlich – erhöht werden.¹⁴³

Deshalb müssten die Entwicklungsbanken der reichen Industriestaaten und andere internationale Finanzinstitutionen entschlossener als bisher auf die Finanzierung der Energiewende in den Entwicklungsländern ausgerichtet werden, um ihnen bei der Installierung grüner Energiesysteme zu helfen. Dies habe absolute Priorität. Die nicht eingelöste Zusage der G7-Staaten aus dem Jahr 2009, bis 2020 jährlich 100 Milliarden US-Dollar für Klimaschutz und Anpassung an Klimafolgen im Globalen Süden bereitzustellen, markiere inzwischen eine Untergrenze der Unterstützung. Darüber hinaus müssten auch private Investitionen in ganz anderer Größenordnung in die Länder des Globalen Südens umgelenkt werden.

Birol wiederholte seinen eindringlichen Appell an die Regierungen des Globalen Nordens noch einmal im Vorfeld der Weltklimakonferenz von Glasgow. Die politischen Führer:innen der Welt müssten dafür sorgen, dass künftig private Energieinvestitionen aus dem Globalen Norden statt in Kohle, Öl und Erdgas in saubere Energietechnologien vor allem in die Länder des Globalen Südens fließen.¹⁴⁴ Der Aufruf des IEA-Chefs verhallte weitgehend ungehört. Denn auch in Glasgow wurde die vollständige Erfüllung der 100-Milliarden-Finanzzusage erneut in die Zukunft verschoben. Sie soll nun ab 2025 erreicht werden.¹⁴⁵

Die globale Energietransformation auf Basis Erneuerbarer Energien stößt also immer noch auf enorme Herausforderungen, aber spätestens seit den Beschlüssen zahlreicher Länder zur Klimaneutralität bis Mitte des Jahrhunderts wird die Grundsatzentscheidung nicht mehr in Frage gestellt. Im Corona-Jahr 2020 erlebten Windenergie- und Solaranlagen auch aufgrund von Sondereffekten in China und den USA ihren bis dahin beeindruckendsten Zubau (Abbildung 22). Ausreichend für die Zukunft ist auch das noch nicht annähernd. Gemäß dem Net-Zero-Leitszenario der IEA würde sich der jährliche globale Kapazitätsausbau an Photovoltaik, On- und Offshore-Windenergie vom bisherigen Spitzenwert von etwa 250 Gigawatt im Jahr 2020 bis 2030 glatt vervierfachen müssen, auf dann über 1.000 Gigawatt pro Jahr.¹⁴⁶

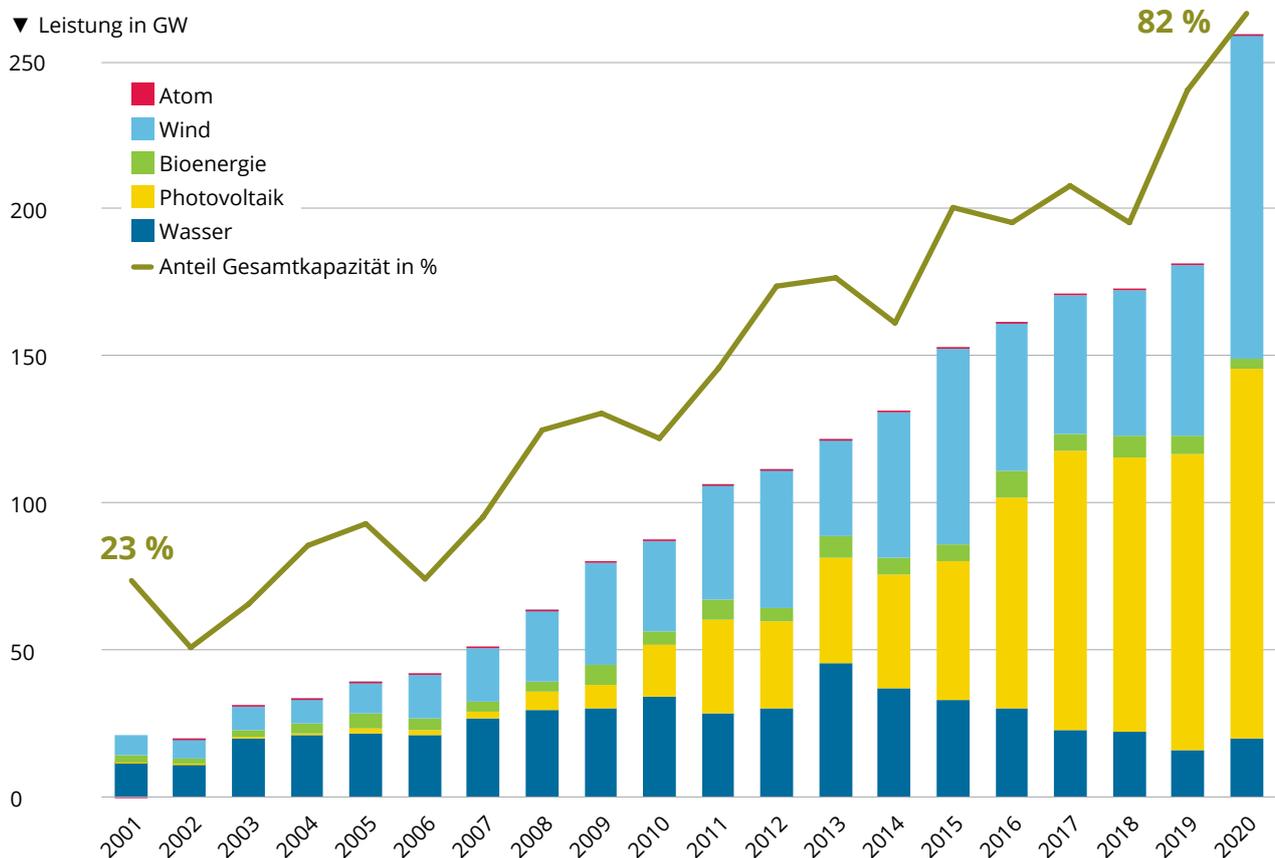


Abbildung 22:

Jährlich installierte Kraftwerksleistung mit Erneuerbaren und Atomkraft; Anteil Erneuerbarer Energien an gesamter neu installierter Leistung; Quelle: IRENA¹⁴⁷

Was Abbildung 22 jedoch auch nahelegt: Der Technologiewettbewerb unter den Erneuerbaren Energien in einem weitgehend strombasierten künftigen Welt-Energiesystem ist für die absehbare Zukunft entschieden: Wind, Sonne und Wasserkraft stehen im Zentrum, Geothermie und Bioenergie spielen, abgesehen von mit entsprechenden natürlichen Gegebenheiten besonders gesegneten Regionen, eine untergeordnete Rolle.

Megatrend 3:

Die Energiezukunft
ist erneuerbar –
und unumkehrbar

- Angetrieben von weiter sinkenden Kosten sind die erneuerbaren Energietechnologien auf Basis von Wind und Sonne weltweit auf dem Vormarsch.
- Weil gleichzeitig Strom aus der Verbrennung fossiler Energieträger systematisch teurer wird, ist eine Trendumkehr nicht mehr vorstellbar.
- Die Atomenergie spielt in Zukunft in Deutschland keine, in Europa und der Welt, wenn überhaupt eine Nebenrolle. Sie ist und bleibt zu teuer, ihre Risiken sind nicht beherrschbar und ihre Langzeitfolgen unkalkulierbar.
- Eine Renaissance der Atomkraft auf Basis neuer, kleinerer Reaktoren käme als Beitrag zur Lösung der Klimakrise selbst dann zu spät, wenn sich die finanz- und sicherheitstechnischen Risiken in Luft auflösen würden.

Die Energieversorgungstechnologien der Zukunft mit Wind und Sonne prägen schon heute in wichtigen Staaten und Staatenbünden die Neuinvestitionen im Stromsektor. Die Erneuerbaren Energien setzen sich nicht nur aus klimapolitischer Notwendigkeit gegen die Technologien des 20. Jahrhunderts durch, sondern auch wegen ihrer ständig wachsenden ökonomischen Konkurrenzfähigkeit. Die Energierevolution auf Basis von Wind- und Sonnenenergie hat den „Point of no Return“ erreicht.

Für die Klimarettung reicht es jedoch nicht, dass klimaschonende Energietechnologien die fossile Verbrennung aus den traditionellen Stromanwendungen verdrängen. Vielmehr wächst der Strom über seine angestammten Einsatzgebiete und damit über sich selbst hinaus. Aus Erneuerbaren Energien erzeugter Strom hat begonnen, Kohle, Öl und Erdgas auch in der Industrie, im Verkehrs- und im Wärmesektor abzulösen. Gleichzeitig wird der Energiehunger einer wachsenden, sich weiter industrialisierenden und digitalisierenden Menschheit selbst dann steigen, wenn es gelingt, Wohlstand für alle Menschen in Zukunft weniger energie- und ressourcenintensiv bereitzustellen als im zu Ende gehenden fossil-nuklearen Energiezeitalter.

Die Welt, wie wir sie kennen, hat ohne Strom aus Wind und Sonne als neues Fundament der Energieversorgung keine Zukunft.

Umgekehrt gilt: Ohne klimaverträglichen Strom aus Wind und Sonne als neues Fundament der Energieversorgung kann die Welt, wie wir sie kennen, nicht fortbestehen. Diese Bewertung hat der Weltklimarat IPCC in seinem sechsten Statusbericht vom Sommer 2021 auf der Basis tausender wissenschaftlicher Studien so eindringlich bestätigt wie nie zuvor. Der Bericht spiegelt den Erkenntnisfortschritt seit der Verabschiedung des Klimaabkommens von Paris, Ende 2015, wider. Fragen zum Beitrag des Menschen an der Erderhitzung waren gestern. Heute geht es um die Pfadsuche in die neue, klimaverträgliche Energieversorgung der Zukunft.

Im Weltmaßstab hat die Internationale Energieagentur mit ihrer Roadmap „Net Zero by 2050“ im Mai 2021 ein umfassendes Szenario vorgelegt, fast zeitgleich auch die Internationale Agentur für Erneuerbare Energien (IRENA) mit ihrem „World Energy Transitions Outlook – 1.5 °C Pathway.“¹⁴⁸ Vergleichbare Zukunftsentwürfe werden aktuell rund um den Globus entwickelt und

ausformuliert. Alles andere wäre auch unverantwortlich, angesichts des realen Klimageschehens und der politischen Beschlusslagen in fast allen für die Klimabelastung der Atmosphäre relevanten Volkswirtschaften. Mehr als 40 Länder haben sich zum Ziel gesetzt, bis etwa Mitte des 21. Jahrhunderts klimaneutral zu werden. Zusammen repräsentieren diese Staaten etwa 70 Prozent der globalen CO₂-Emissionen und ebenso 70 Prozent des Welt-Bruttoinlandsprodukts.^{149,150,151}

Ausnahmslos nehmen bei der Umgestaltung der Energiesysteme die Erneuerbaren Energien aus Wind, Sonne und – wo geologisch sowie historisch bedingt möglich – Wasserkraft die Schlüsselrolle ein.¹⁵² Die Energierevolution ist, wenn die Menschheit unter vergleichbaren Bedingungen wie heute überleben will, alternativlos geworden – ihr Erfolg jedoch alles andere als ein Selbstläufer. Die Größe der Aufgabe hat, wie viele andere auch, die IEA im Vorfeld der Weltklimakonferenz in Glasgow eindringlich beschrieben. Soll das von der Agentur entworfene Projekt „Net Zero by 2050“ eine Chance auf Verwirklichung haben, braucht es ein Vielfaches der aktuellen Investitionen in die globale Transformation. Das gilt insbesondere für die Energiesysteme der Länder des Globalen Südens, wo der Energiebedarf steil ansteigt. Hier muss demnach künftig etwa siebenmal mehr in klimaschonende Energie investiert werden als zuletzt, um global auf den 1,5-Grad-Pfad zu kommen.¹⁵³

Dazu sind die meisten dieser Staaten allein nicht in der Lage. Deshalb müssen die wohlhabenden Länder des Globalen Nordens – aus eigenem Interesse, aber auch als Reflex ihrer historischen Verantwortung für das Problem (vgl. Abbildung 8) – einen Großteil dieser Investitionen stemmen. Im Zentrum stehen dabei die traditionellen Industriestaaten, der Internationale Währungsfonds, die Weltbank und die internationalen Entwicklungsbanken, aber ebenso große private Investoren, die in der Vergangenheit in vielen dieser Länder in fossile Energien investiert haben.

Der weltumspannende energiewirtschaftliche Paradigmenwechsel hin zu einem klimaverträglichen neuen System hat begonnen und beschleunigt sich Jahr für Jahr. Die Option eines „Weiter so“ im hergebrachten fossil-nuklearen Energiesystem diskutieren in der wissenschaftlichen Community nicht einmal mehr Außenseiter:innen. Das ändert allerdings bisher nichts daran, dass gewichtige, auch weltumspannende Partikularinteressen – sowohl in Gestalt von Staaten als auch von Unternehmen – fortbestehen und mit Macht, Geld und Einfluss, verdeckt oder offen alles tun, um die Transformation mindestens hinauszuzögern. Die Motivlage liegt in aller Regel auf der Hand: Die einen versuchen, den Wert ihrer fossilen Assets zu retten, indem sie die Abscheidung, Nutzung oder unterirdische Lagerung des bei der Verbrennung erzeugten Kohlendioxids als Ausweg aus der Klimakrise propagieren. Die anderen beschwören seit Jahrzehnten eine Renaissance der Atomenergie, weil Kernkraftwerke ebenso wie die Erneuerbaren Energien bei der Stromerzeugung keine Treibhausgase emittieren.¹⁵⁴

Warum der Kampf gegen Windmühlenflügel scheitert

Jahrzehntelang dienten den Verfechter:innen des fossil-nuklearen Status quo der Weltenergieversorgung vor allem die hohen Kosten der Erneuerbaren Energien als zentrales Argument zur Abwehr der Energiewende. Auch die Physik wurde bemüht. Aufgrund ihrer nicht planbaren Verfügbarkeit („Was tun, wenn die Sonne nicht scheint und der Wind nicht weht?“) wurde den Erneuerbaren Energien die Fähigkeit abgesprochen, industriell geprägte Volkswirtschaften zuverlässig mit Energie zu versorgen. Mehr als vier Prozent, argumentierten die großen deutschen Stromversorger noch in den 1990er Jahren, könnten die Erneuerbaren auch langfristig nicht zum deutschen Strombedarf beitragen.¹⁵⁵

Dutzende Studien belegen, dass eine Energieversorgung auf Basis von Wind und Sonne ebenso zuverlässig funktionieren wird wie das bisherige Energiesystem.

Im Gegensatz zu dieser in der Realität längst widerlegten Behauptung war die Grundfrage nach der unstillen Einspeisung von Strom aus den neuen regenerativen Energiequellen natürlich berechtigt. Selbstverständlich braucht ein Industrie- und Hochtechnologiestandort wie Deutschland auch in Zukunft eine zu jeder Zeit verlässliche Energieversorgung. Inzwischen belegen jedoch dutzende Studien, dass Deutschland, Europa und die Welt sich auf Basis heute verfügbarer Technologien praktisch zu 100 Prozent aus den bekannten erneuerbaren Quellen mit ausreichend Energie versorgen können, ohne dass die Lichter häufiger ausgehen als in der Gegenwart.¹⁵⁶ Gestritten wird unter Fachleuten nur noch über die Geschwindigkeit und die Kosten eines Komplett austauschs der energetischen Basis der Menschheit.¹⁵⁷

Doch auch hier spricht nahezu alles für das neue Energiesystem, weil die zu erwartende Kostenentwicklung bei den Erneuerbaren auf der einen Seite und den fossil-nuklearen Energietechnologien auf der anderen Seite sich fundamental unterscheiden – selbst dann, wenn man die Klimaschäden außen vorlässe, die ein Festhalten am alten System aktuell und mehr noch in Zukunft verursachen würden.¹⁵⁸

Kostensenkende Technologiesprünge im fossil-nuklearen System sind nicht mehr zu erwarten, im Gegenteil: Wie bei Erdgas im Herbst 2021 können immer wieder (globale) Sondersituationen zu Preissprüngen nach oben führen. Vor allem aber erhält die Belastung der Atmosphäre mit Kohlendioxid in immer mehr Regionen der Erde einen – über die Zeit steigenden – Preis. Fatih Birol, der Chef der IEA, hat auch zu den Preisturbulenzen auf den Weltenergiemärkten im Herbst 2021 klar Position bezogen. Diese als erste Krise der globalen Energiewende zu interpretieren, gehe vollkommen fehl. Und: „Wir haben diese Krise nicht, weil wir zu viel saubere Energie haben, sondern zu wenig. Saubere Energie ist nicht der Grund für die Turbulenzen, aber sie ist in Zukunft Teil der Lösung.“¹⁵⁹

Auch die Kosten der Atomenergie wachsen, obwohl sie nicht mit steigenden CO₂-Zertifikatpreisen belastet ist, seit Jahrzehnten unaufhörlich – ausweislich des „World Nuclear Industry Status Report“ allein zwischen 2009 und 2019 um 26 Prozent.¹⁶⁰ Verantwortlich sind dafür vor allem lange Verzögerungen beim Bau der Anlagen, in der Folge hohe Kapitalkosten und auf Seiten der Technik

immer aufwändigere Sicherheitssysteme, hohe Demontagekosten stillgelegter Atomanlagen sowie die unkalkulierbaren Entsorgungsaufwendungen für die Behandlung und sichere Lagerung radioaktiver Abfälle über kaum vorstellbare Zeiträume.

Auf der anderen Seite sanken die Stromerzeugungskosten der Erneuerbaren Energien auch in den vergangenen Jahren weiter mit einer Geschwindigkeit, die sich auch optimistische Expert:innen kaum haben vorstellen können. Selbst wenn man die Kosten einrechnet, die mit dem Um- und Ausbau der Stromnetze im neuen System, mit notwendigen Back-up-Kapazitäten und der Ausbalancierung unsteter Stromquellen anfallen, werden die gesamten Systemkosten nicht höher ausfallen als im Fall des Fortbestands bzw. der stetigen schrittweisen Erneuerung der alten Energieinfrastruktur.

Kosten für Erneuerbare Energien weiter im Sinkflug

Neben dem Klimaschutz erweisen sich also die sinkenden Stromerzeugungskosten von Windenergie- und Photovoltaikanlagen seit 2015, dem Erscheinen des ersten Megatrend-Reports, als immer wichtigere Triebfeder für die Energiewende in vielen Ländern der Erde (Abbildung 23). Weltweit stürzten die Stromerzeugungskosten für PV-Freiflächenanlagen im vergangenen Jahrzehnt (2010 – 2020) um 85 Prozent regelrecht ab. In Deutschland wurde der Strom aus diesen Anlagen um 80 Prozent günstiger. Im weltweiten Mittel lagen die Kosten für eine Kilowattstunde im Jahr 2020 bei 5,7 USD-Cent.¹⁶¹

Auch danach ging die Entwicklung weiter, kaum beeinträchtigt durch die Corona-Krise. Schlag auf Schlag meldeten unterschiedliche Länder immer neue Auktionsrekorde aus der Ausschreibung von Photovoltaik-Projekten. Im April 2020 verzeichnete eine 1,5-Gigawatt-Ausschreibung in Abu Dhabi mit 1,35 USD-Cent pro Kilowattstunde das bis dahin weltweit niedrigste bezuschlagte Gebot für eine Kilowattstunde Solarstrom. Im August desselben Jahres ging es bei einer Auktion in Portugal noch weiter nach unten. Bezuschlagt wurde nach Angaben der Regierung in Lissabon ein Gebot mit 1,11 Eurocent pro Kilowattstunde.^{162, 163} Der Hauptgrund für die weltweite Entwicklung ist (jenseits der ebenfalls wichtigen lokalen Investitionsbedingungen) immer der gleiche: Die Anlagen- und die Betriebskosten sinken, die Wirkungsgrade der PV-Module steigen.

▼ Kosten in USD-Cent₂₀₂₀ pro Kilowattstunde

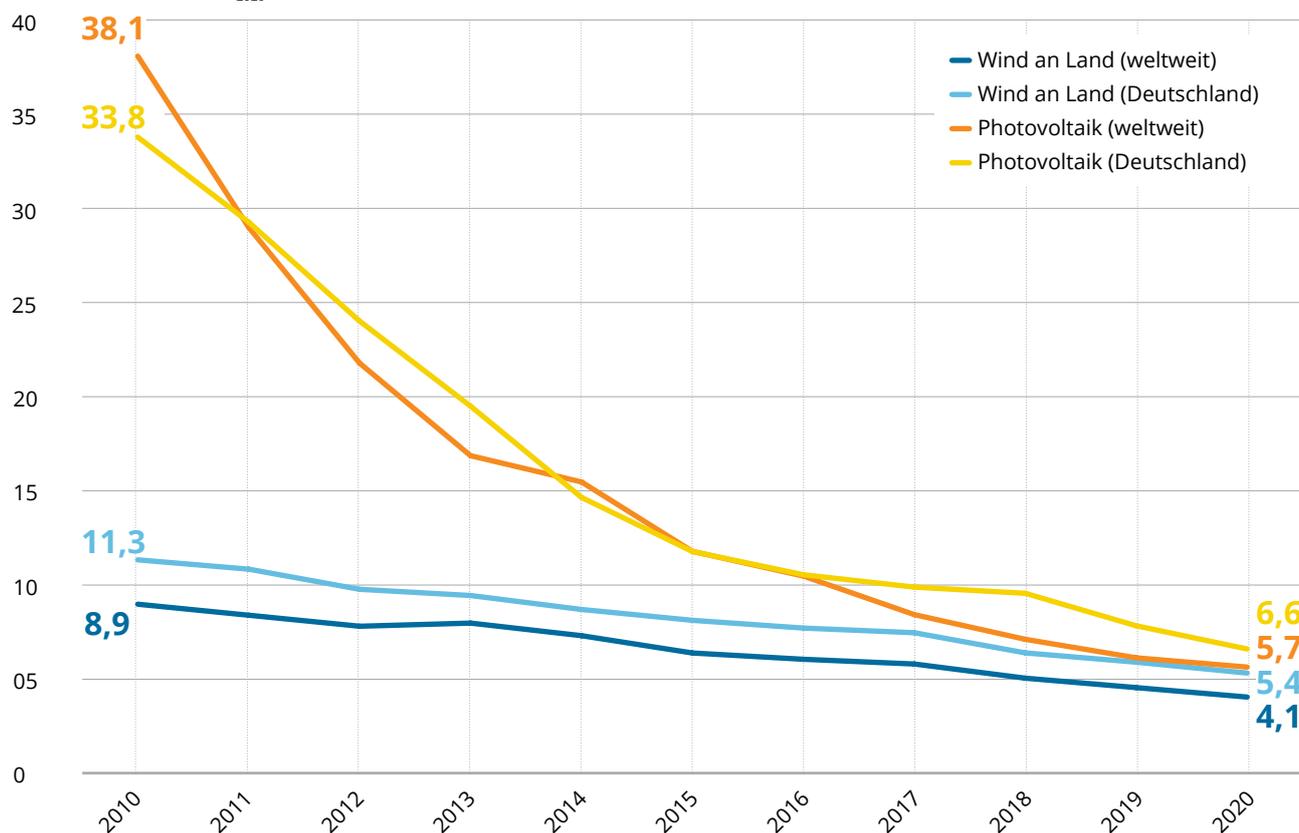


Abbildung 23:

Stromerzeugungskosten neuer Windenergie- und Solaranlagen; Quelle: IRENA¹⁶⁴

Die Kostenkurve bei der Windenergie an Land verläuft nicht mehr ganz so steil wie in der Frühphase der Entwicklung, aber immer noch beeindruckend. Hier sanken die Stromerzeugungskosten zwischen 2010 und 2020 im weltweiten Mittel um 54 Prozent, in Deutschland um 53 Prozent.¹⁶⁵ Wiederum sind sinkende Anlagenkosten und eine insgesamt wesentlich verbesserte technologische Effizienz die Hauptursachen für die Kostenreduktion.¹⁶⁶

Wind- und Solarenergie folgen hier im Prinzip Gesetzmäßigkeiten, die aus anderen grundlegenden Technologieentwicklungen bekannt sind. Neue Technologien werden, sobald sie einmal erfolgreich eingeführt sind, im Laufe ihrer frühen Entwicklungsphase sehr schnell günstiger, entweder infolge von Massenproduktion und Automatisierung oder weil die Anlagen immer größer werden (Economies of Scale), häufig auch wegen der Kombination von beidem. Diese Phase durchlaufen Wind- und Solarenergie seit ihrer industriellen Einführung vor rund 30 Jahren. Irgendwann flacht die Lernkurve ab, die jeweiligen Technologien sind weitgehend ausgereift und dann auch ausgereizt. Die Erneuerbaren Energien sind jedoch nach dem Maßstab großer Technologiezyklen immer noch jung – etwa im Vergleich zum Verbrennungsmotor. Deshalb ist von großem Interesse, ob und wie sich die Lernkurve in den kommenden Jahren weiterentwickelt. Dies kann hier nur anhand weniger Indikatoren beispielhaft beleuchtet werden.

Windenergie: Immer leistungsstärker, immer effizienter

Die durchschnittliche Generatorleistung einer in Deutschland errichteten Windenergieanlage hatte sich bis 2014 in zwanzig Jahren (1994 bis 2014) mehr als versiebenfacht.¹⁶⁷ Danach stieg sie bis 2020 mit ähnlicher Geschwindigkeit weiter auf durchschnittlich 3,4 Megawatt. Das Ende der Fahnenstange ist jedoch keineswegs erreicht. 2021 genehmigte Windenergieanlagen, die in den kommenden ein bis zwei Jahren errichtet und ans Netz gebracht werden, weisen eine durchschnittliche Leistung von 4,6 Megawatt auf. Bis 2030 rechnen Analyst:innen der Deutschen WindGuard mit einer Durchschnittsleistung neu installierter Onshore-Windturbinen von sechs Megawatt (Abbildung 24).¹⁶⁸

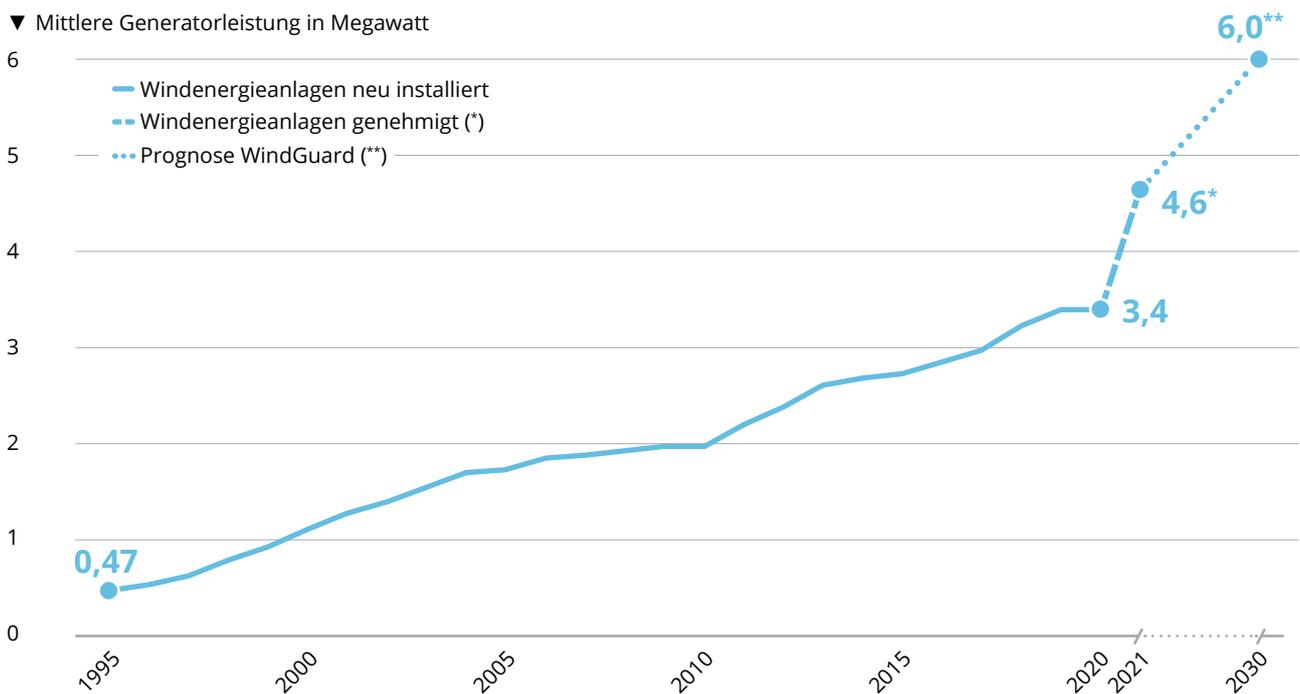


Abbildung 24:

Durchschnittliche Generatorleistung neuer Onshore-Windenergieanlagen in Deutschland im Jahr der Inbetriebnahme bzw. Genehmigung; Quellen: FA Wind, WindGuard¹⁶⁹

Gleichzeitig geht auch der technologische Reifungsprozess weiter, sodass neue Windturbinen wesentlich effizienter werden und aus jedem Kilowatt installierter Leistung unter ansonsten vergleichbaren Windbedingungen immer mehr Kilowattstunden Strom generieren. Der Effekt wird in der Darstellung (Abbildung 25) dadurch noch erheblich verstärkt, dass nach 2014 vor den deutschen Küsten die Errichtung von Offshore-Windparks Fahrt aufnahm. Zwar ist die Installation dieser Anlagen in Nord- und Ostsee wegen der anspruchsvolleren Technik (mechanische Belastung und Korrosion) und der aufwändigen Infrastruktur (Anbindung ans Festland, Wartungskosten etc.) zunächst deutlich teurer als bei Windparks an Land. Doch wird dieser Nachteil bei der Anfangsinvestition aufgewogen durch mehr und stetigeren Wind auf See. Dort drehen sich die Rotoren in rund neun von zehn Stunden des Jahres und kommen, gemessen an ihrer Maximalleistung, auf bis zu 4.000 Jahresvolllaststunden gegenüber 2.000 bis 2.500 Vollbenutzungsstunden moderner Windturbinen im Landesinneren.¹⁷⁰ Deshalb steigt die Strommengenlinie in Abbildung 25 nach 2015 deutlich steiler an als die Balken der installierten Leistung.

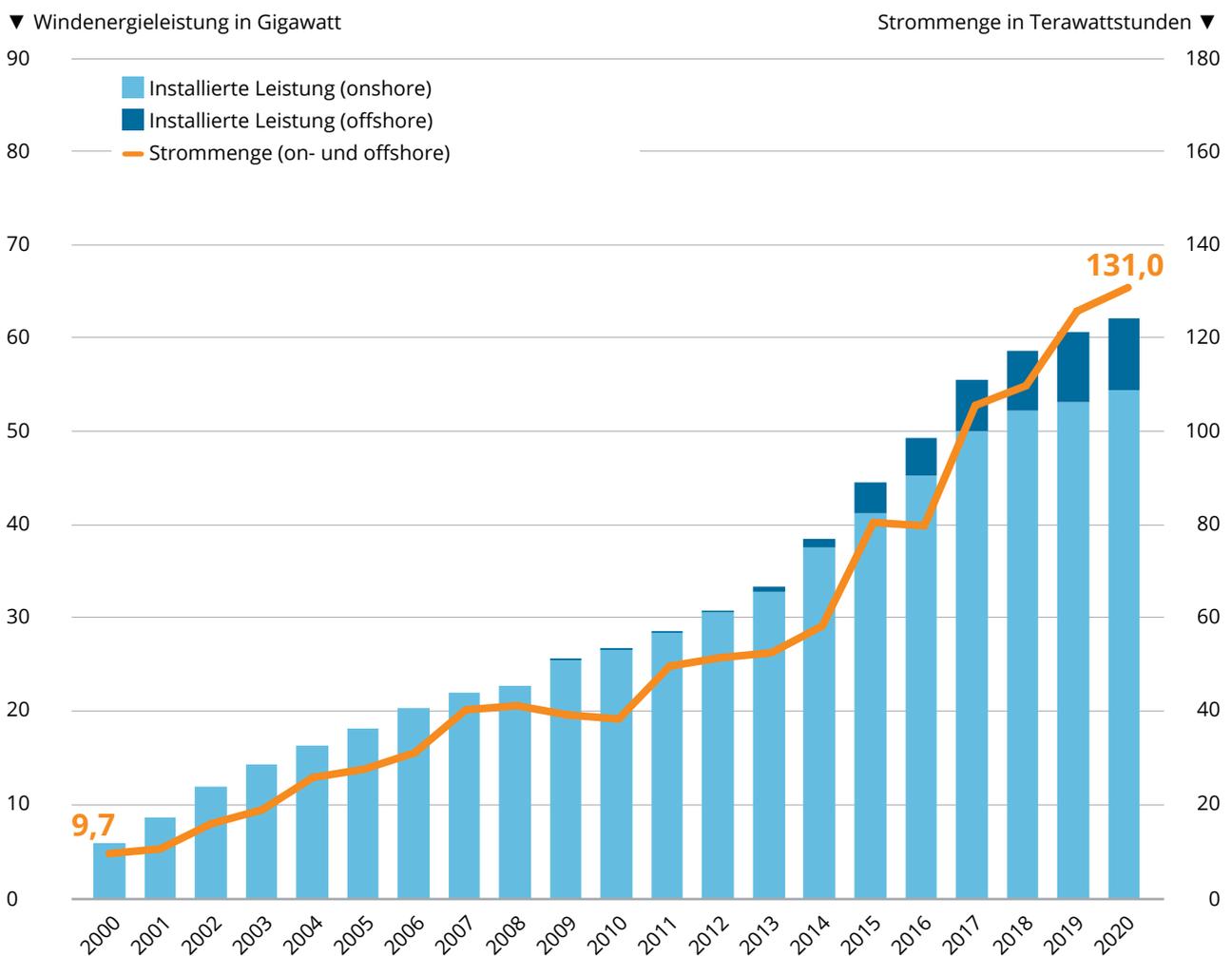


Abbildung 25:

Entwicklung der installierten Windenergieleistung und damit erzeugte Strommengen in Deutschland;

Quellen: BMWi, AGEE-Stat¹⁷¹

Nicht nur wegen der höheren Stromausbeute pro Leistungseinheit Windenergie ist der Trend hin zu immer höheren jährlichen Volllaststundenzahlen wichtig für die Wirtschaftlichkeit des neuen Stromsystems. Die Entwicklung reduziert darüber hinaus auch die Systemkosten, weil ein gleichmäßigeres Stromangebot bedeutet, dass geringere Anteile des Windstroms aufwändig zwischengespeichert werden müssen und sich auch der Aufwand für den Ausgleich der Schwankungen des Windstroms durch lange Stromtrassen, Speicher oder einen flexiblen Stromeinsatz bei den Verbraucher:innen verringert.

Gerade im Offshore-Bereich versprechen sich die Unternehmen von noch größeren Windturbinen erhebliche wirtschaftliche Vorteile und trauen sich diese technisch auch zu. Im Jahr 2020 weltweit errichtete Offshore-Windparks haben eine mittlere Turbinenleistung von 7,5 Megawatt, ein Anstieg um 15 Prozent gegenüber der Neuanlagenleistung im Jahr 2019 (Ø 6,5 MW).¹⁷² Gleichzeitig haben drei führende Herstellerunternehmen General Electric, Siemens-Gamesa und Vestas bereits Windräder mit Generatorleistungen im zweistelligen Megawattbereich angekündigt.¹⁷³ Im Sommer 2021 gab der Karlsruher Stromkonzern EnBW bekannt, eine Neuentwicklung des dänischen Herstellers Vestas mit einer Generatorleistung von 15 Megawatt und einem Rotordurchmesser von 236 Metern in seinem nordwestlich von Borkum geplanten 900-MW-Windpark einsetzen zu wollen. Der Offshore-Windpark soll ab 2025 Strom liefern und der erste in Deutschland sein, der ohne staatliche Förderung auskommt.¹⁷⁴

Photovoltaik: Mehr Strom aus weniger Fläche

Auch bei der Photovoltaik, insbesondere bei großen Freiflächenanlagen, ist die technologische Entwicklung längst nicht ausgereizt. Ein Indikator für den Technologiefortschritt kann beispielsweise die Fläche sein, die für die Installation einer bestimmten Stromerzeugungsleistung beansprucht wird. Für ein Megawatt elektrische Leistung bedeckte eine PV-Freiflächenanlage 2006 durchschnittlich vier Hektar, im Jahr 2018 genügte dafür eine Fläche von nur 1,3 Hektar.¹⁷⁵ Im Jahr 2021 rechnen Expert:innen nur noch mit 1,0 Hektar pro Megawatt.¹⁷⁶ Weil die Wirkungsgrade von Solarzellen in Zukunft absehbar weiter steigen, sind zusätzliche Effizienzgewinne bereits programmiert (Abbildung 26). Große Fortschritte werden darüber hinaus durch intelligente Doppelnutzungen von Flächen erwartet, auf denen eine landwirtschaftliche Nutzung und die Stromgewinnung aus PV-Anlagen Hand in Hand funktionieren („Agri-Photovoltaik“) und eine zusätzliche Versiegelung von Flächen weitgehend vermieden werden kann. Auch das technisch realisierbare Potenzial auf Dachflächen und anderen versiegelten Flächen ist im dicht besiedelten Deutschland enorm.

▼ Flächeninanspruchnahme in Hektar pro Megawatt

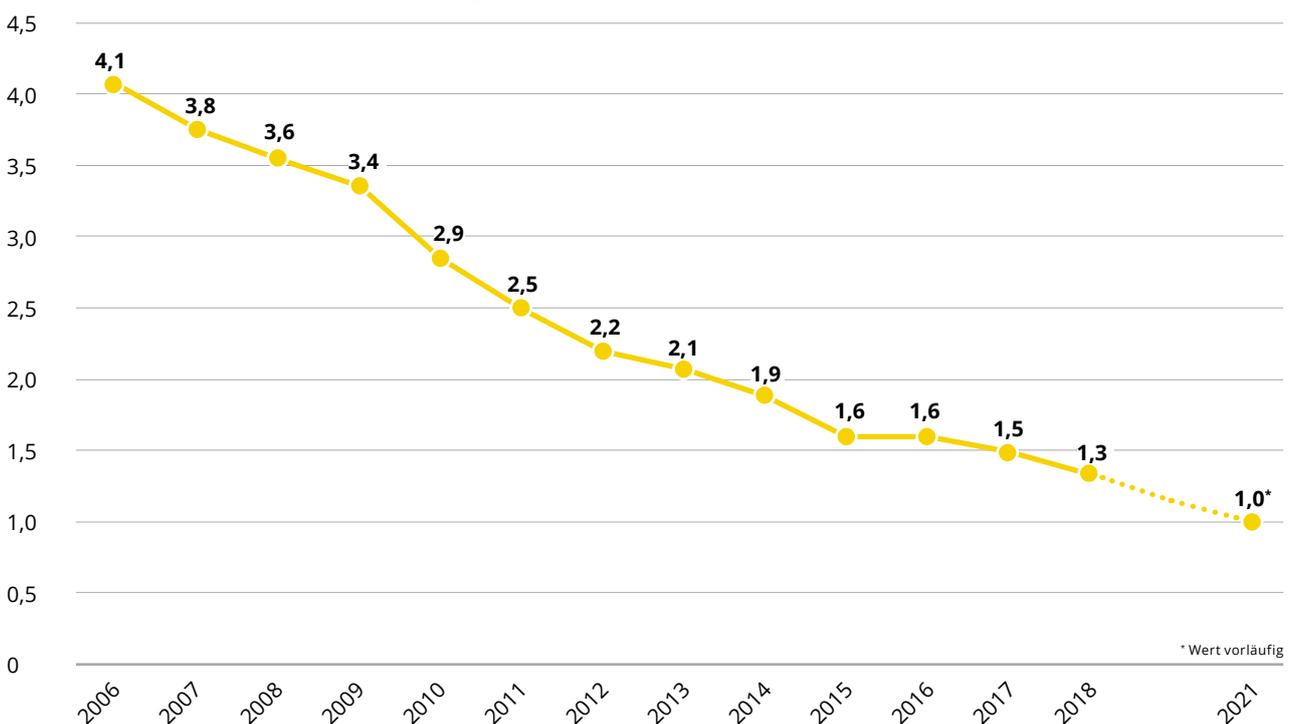


Abbildung 26:

Entwicklung der spezifischen Flächeninanspruchnahme von PV-Freiflächenanlagen im Jahr der Inbetriebnahme; Quellen: ZSW, Bosch & Partner, Thünen Institut, Fraunhofer ISE¹⁷⁷

Erneuerbare versus Fossile: Die Kostenschere öffnet sich

Insgesamt ist also damit zu rechnen, dass die technologische Weiterentwicklung die Kosten auf Seiten der Erneuerbaren Energien noch deutlich weiter nach unten drücken kann, während die der technisch ausgereizten konventionellen Kohle- und Gaskraftwerke CO₂-bedingt auch perspektivisch weiter steigen. Erneuerbare Energien sind deshalb weltweit nicht nur die zentralen Technologien zur Rettung des Weltklimas, ihr Siegeszug ist immer stärker auch ein Ergebnis schlichter Betriebswirtschaft. Diese Entwicklung zeichnete sich 2015 bereits ab. Sechs Jahre später ist die Lage eindeutig.

Zuletzt dokumentierte das Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (ISE) diesen Trend für Deutschland anhand eines Vergleichs der Stromerzeugungskosten, die hierzulande bei neu errichteten Kraftwerken auf Basis unterschiedlicher Technologien aktuell entstehen und in Zukunft zu erwarten sind.¹⁷⁸

▼ Stromerzeugungskosten in Eurocent pro Kilowattstunde

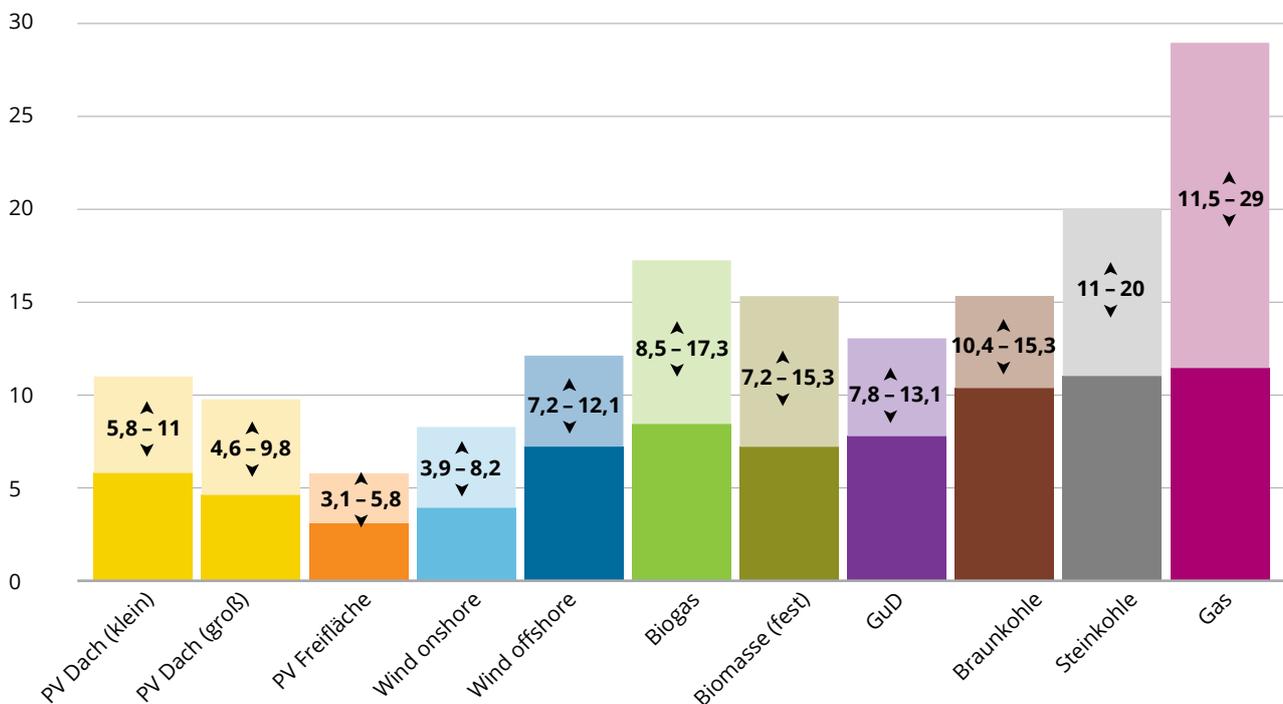


Abbildung 27:

Vergleich der Stromerzeugungskosten 2021 neu errichteter Kraftwerke in Deutschland;

Quelle: Fraunhofer ISE¹⁷⁹

Strom aus neuen Erneuerbaren-Anlagen ist heute schon kostengünstiger als Strom aus neuen fossilen Kraftwerken.

In Abbildung 27 dargestellt sind jeweils die zu erwartenden Ober- und Untergrenzen der Stromgestehungskosten von großen und kleinen PV-Dachanlagen, großen PV-Freiflächenanlagen, Windturbinen an Land und auf See sowie Bioenergieanlagen auf Basis von Biogas bzw. fester Biomasse. Auf Seiten der fossilen Kraftwerke schätzten die Forscher:innen die Stromkosten moderner und hocheffizienter Gas- und Dampfturbinenkraftwerke (GuD), von Braun- und Steinkohlekraftwerken und von Gasturbinen. Letztere produzieren Strom zwar teuer, können aber wegen ihrer schnellen und flexiblen Einsatzbereitschaft wichtig für einen verlässlichen Betrieb des Stromsystems sein. Erkennbar ist, dass schon heute Strom in neuen PV- und Windenergieanlagen günstiger erzeugt werden kann als Strom aus neuen Kohlekraftwerken¹⁸⁰ und sogar modernen GuD-Kraftwerken. Einen Sonderfall stellen Kraftwerke auf Basis von Bioenergie dar, deren Stromgestehungskosten in Zukunft weitgehend vom Preis der eingesetzten Biomasse bestimmt werden.

Diese Momentaufnahme verändert sich in der Zukunft nach allen Prognosen weiter systematisch zugunsten der Erneuerbaren, wenn die Kostendegression in diesem Segment wie erwartet weitergeht und wenn gleichzeitig die CO₂-Zertifikatpreise unter dem Druck ambitionierter, auch international verpflichtender Klimaziele steigen, mit denen die fossile Verbrennung in Kohle- und Gaskraftwerken belastet wird. Alles spricht dafür, dass sich die Preisschere zwischen klimaverträglicher und klimabelastender Stromerzeugung weiter öffnet.¹⁸¹

Das Fraunhofer-Institut wirft in der genannten Analyse einen Blick in diese Zukunft. Abgeschätzt werden die zu erwartenden Stromerzeugungskosten für Kraftwerke, die im Jahr 2040 errichtet werden. In dieser Perspektive spielen Anlagen auf Basis des Energieträgers Kohle nach dem in Deutschland dann vollzogenen Ausstieg aus der Kohleverstromung¹⁸² keine Rolle mehr. Gaskraftwerke haben noch eine, wenn auch in bestimmten Situationen wichtige Nebenrolle als Back-up-Kapazitäten in der dann von Erneuerbaren Energien dominierten Energieversorgung. Deutlich wird, dass sich die Kosten der Stromerzeugung in einem weitgehend von Erneuerbaren Energien dominierten Strommarkt weiter nach unten entwickeln (Abbildung 28). Aktuelle Zukunftsstudien ermitteln für die Windenergiebranche in Europa sogar noch deutlich günstigere Preise sowohl für Onshore- als auch für Offshore-Windturbinen als das Fraunhofer-Institut.¹⁸³ Es darf vermutet werden, dass wir bei den künftigen Stromkosten zwar nicht auf eine Art Flatrate zulaufen, dass jedoch die nachgelagerten Strompreisbestandteile für die Systemsteuerung, Netze und Netzsteuerung eine viel größere Rolle spielen werden als die Erzeugungskosten selbst. Sicher ist, dass die Stromverbraucher:innen des Jahres 2040 Preisschwankungen durch Entwicklungen auf den internationalen Energiemärkten wie beim Erdgas im Jahr 2021 kaum mehr fürchten müssen.

▼ Stromerzeugungskosten in Eurocent pro Kilowattstunde

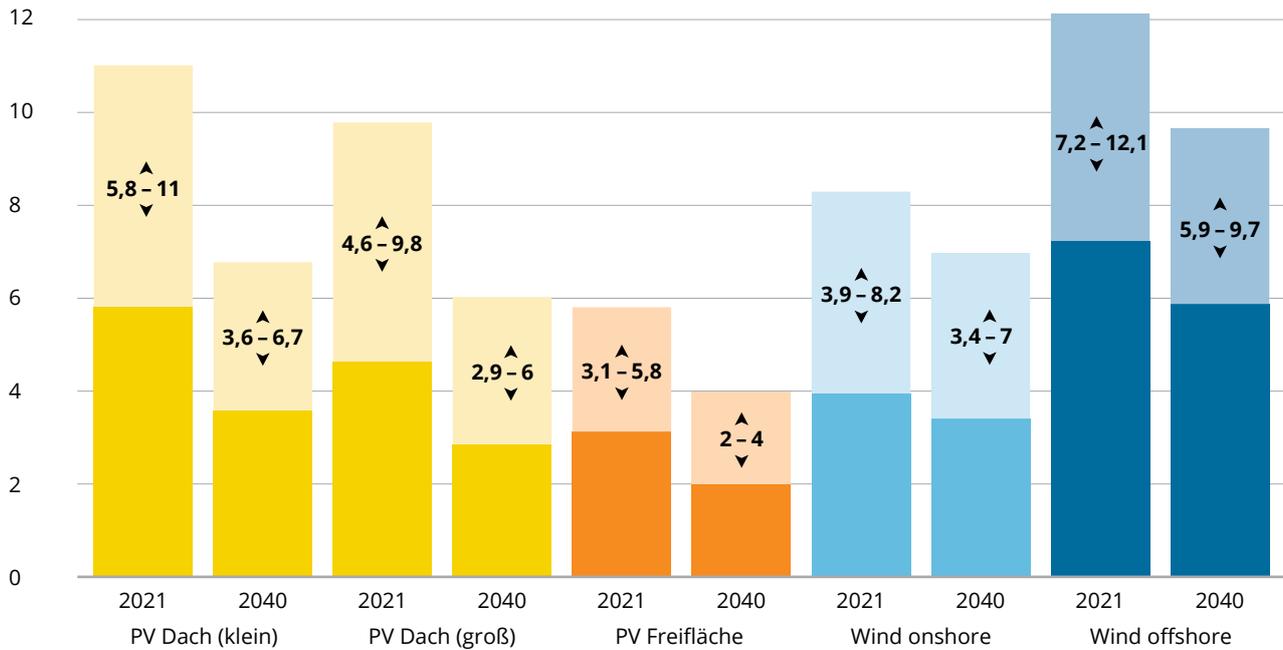


Abbildung 28:

Entwicklung der Stromerzeugungskosten bis 2040 in Deutschland; Quelle: Fraunhofer ISE¹⁸⁴

Vor diesem Hintergrund verwundert nicht, dass Stromversorger in Deutschland, die die Entwicklung hin zu nachhaltigen Energien in den vergangenen Jahren verschlafen, zum Teil auch hintertrieben haben, nun Ausschau halten nach zukunftstauglichen Geschäftsmodellen und dabei immer häufiger die Chancen des neuen klimaverträglichen Energiesystems erkennen. Viele Stadtwerke sind darunter, die in der Vergangenheit nicht immer zu den Vorreitern der Entwicklung gehört haben, aber auch die früher dominanten Stromriesen E.ON, EnBW, RWE und Vattenfall. Sie alle haben verstanden, dass die Zeiten, in denen die Verbrennung fossiler Brennstoffe dauerhaft gute Renditen versprach, zu Ende gehen.

Atomenergie: Renaissance fürs Klima?

**Die alten
Argumente gegen
eine Renaissance
der Atomenergie
sind auch die
neuen: zu teuer, zu
gefährlich, zu spät.**

Dass die Verfechter der Atomenergie vor dem Hintergrund weltweiter Extremwetterereignisse noch einmal die Chance sehen, ihre Technologie als klimaschonende Alternative zu den fossilen Kraftwerken ins Spiel bringen zu können, kann nicht verwundern. Überraschend ist eher, dass Anhänger:innen der Atomenergie, die ihr Stoppschild gegen die Erneuerbaren Energien in der Vergangenheit stets vor allem mit Kostenargumenten aufstellten, vergleichbare Bedenken bei den Kosten der Kernenergie – jetzt, wo es die von ihnen favorisierte Technik trifft – nicht mehr umtreiben. Die Wirtschaftlichkeit neuer Atomkraftwerke spielt bei der immer wieder aufflammenden Debatte um eine Wiederbelebung der Kernspaltung als Klimaretter kaum eine Rolle, was angesichts der realen Datenlage verwundert. Denn die alten Argumente gegen diese Technologie, auch solche jenseits der Sicherheits- und Risikodebatte, bestehen fort. Sie sind heute gewichtiger denn je.

Atomenergie war immer schon nicht nur sicherheitstechnisch, sondern auch finanztechnisch eine Hochrisikotechnologie.¹⁸⁵ Als Beleg genügt ein empirischer Blick zurück. Nie in der inzwischen mehr als 60-jährigen Geschichte seines kommerziellen Einsatzes¹⁸⁶ hat sich ein einziges Kernkraftwerk in einem liberalisierten Strommarkt ökonomisch durchgesetzt. Stets waren es Politiker:innen, die Strom aus der Kernspaltung oft gegen gesellschaftliche Widerstände, anfangs sogar aus den Reihen der Stromwirtschaft, forcierten. Private Investoren verlangten regelmäßig hohe Subventionen, wenn die Politik den Einsatz dieser Technologie von ihnen einforderte. Daran hat sich bis heute nichts geändert. Strom aus privatwirtschaftlich betriebenen Atomkraftwerken ist mehr als sechs Jahrzehnte nach seiner Einführung weiterhin und überall auf der Welt auf hohe Markteinführungshilfen angewiesen. Auch das macht diese Form der Stromerzeugung einzigartig und Neubauprojekte jenseits von Staatsbetrieben zu seltenen Ausnahmen.

In der gesamten EU (inklusive Großbritannien) wurde in den vergangenen drei Jahrzehnten nur an drei Standorten, in Finnland (Olkiluoto-3, 2005), Frankreich (Flamanville-3, 2007) und England (Hinkley Point C, zwei Blöcke, 2018/2019), offiziell mit dem Bau neuer Atomkraftwerke begonnen. Alle drei Vorhaben kämpfen mit langjährigen Bauverzögerungen und astronomischen Kostensteigerungen um das Vier- bis Sechsfache der anfangs angekündigten Projektkosten.¹⁸⁷ Die Stromerzeugungskosten des Projekts im französischen Flamanville dürften sich am Ende bei etwa 110 bis 120 Euro pro Megawattstunde einpendeln¹⁸⁸ und damit fast doppelt so hoch liegen wie die Vergütungen, die zuletzt an Betreiber:innen von PV- oder Windenergieanlagen in Deutschland gezahlt wurden.

Mit dem Bau von Hinkley Point C (zwei Blöcke) in England wurde 2018/2019 erst nach jahrelanger Verzögerung begonnen, die Inbetriebnahme soll Mitte des Jahrzehnts erfolgen. Für Unmut und Klagen vor dem Europäischen Gerichtshof, auch in anderen EU-Mitgliedstaaten,¹⁸⁹ sorgte eine Förderung, die den Betreibern, dem französischen Staatskonzern EDF und dem staatlichen chinesischen

Atomkonzern China General Nuclear Power Group, für jede dort künftig produzierte Kilowattstunde Atomstrom fast 11 Eurocent garantiert – und dies über 35 Jahre, plus Inflationsausgleich und inklusive Absicherung gegen eine vorzeitige Abschaltung aufgrund politischer Entscheidungen.

Auch in den USA gibt es wegen unkalkulierbarer Kosten kaum noch Neubauvorhaben, während die bestehende Reaktorflotte altert und inzwischen ein Durchschnittsalter von 40 Jahren aufweist.¹⁹⁰ Angesichts der Erfahrungen mit den Kosten neuer Atomkraftwerke wird dort darüber nachgedacht, die Stromverbraucher:innen schon während der Bauphase für die Errichtung der Reaktoren zur Kasse zu bitten – viele Jahre, bevor das Kraftwerk die erste Kilowattstunde Strom liefert, sofern es denn überhaupt zu Ende geführt wird.¹⁹¹

Einzig der Zubau von Atomkraftwerken in China sorgt seit Jahren dafür, dass die Bedeutung der Atomenergie an der Weltstromversorgung derzeit nur relativ abfällt, nämlich von einem Anteil von 17,5 Prozent an der globalen Stromerzeugung im Jahr 1996 auf einen Anteil von 10,1 Prozent im Jahr 2020. In absoluten Zahlen steigt die Stromproduktion aus Atomkraft aufgrund des chinesischen Ausbauprogramms leicht an. Doch auch in China verlängern sich die geplanten Bauzeiten dieser Kraftwerke regelmäßig um mehrere Jahre. Der Ausbau erfolgt nicht annähernd so dynamisch wie bei Wind und Sonne (Abbildung 20). Eine Folge der globalen Entwicklung: 2019 lagen die Erneuerbaren Energien (ohne Einrechnung der Wasserkraft) mit einem Anteil von über zehn Prozent an der Weltstromproduktion erstmals mit der Atomenergie gleichauf.¹⁹²

Dass die Internationale Atomenergie-Organisation (IAEO) in Wien die Kernenergie als potenziellen Klimaretter auch für die Zukunft empfiehlt, ist nicht verwunderlich. Zur Förderung der zivilen Nutzung der Kernkraft wurde die Agentur gegründet. Doch auch die Internationale Energieagentur (IEA) hält in ihrem Szenario zur globalen Klimaneutralität bis 2050 grundsätzlich an der Nutzung der Kernenergie fest. Die IEA geht davon aus, dass im Jahr 2050 fast 90 Prozent der weltweiten Stromerzeugung aus Erneuerbaren Energien stammt; der größere Teil der restlichen zehn Prozent jedoch aus Kernenergie.¹⁹³ Auch bezogen auf den gesamten Energiemix tragen die Erneuerbaren mit etwa zwei Drittel die Hauptlast der Energieversorgung. Gleichzeitig steigt auch der Einsatz der Atomenergie im IEA-Szenario bis 2050 fast auf das Doppelte gegenüber heute.

Der weltweite Anteil der Atomenergie an der Energieversorgung schrumpft – auch in den Szenarien der Befürworter.

Die Zahl beeindruckt – und relativiert sich schnell bei einem Blick auf die Einzelheiten. Die IEA geht in ihrem Net-Zero-Szenario für den Zeitraum von 2021 bis 2035 weltweit von einem jährlichen Nettozubau von 4,5 Gigawatt Atomkraft aus. Zum Vergleich: Der Zubau an Wind-, PV- und Wasserkraftleistung betrug allein im Corona-Jahr 2020 etwa 250 Gigawatt. Ab 2030 sollen die Erneuerbaren Energien jährlich mehr als 1.000 Gigawatt zusätzliche Leistung erbringen.¹⁹⁴ Gleichzeitig erwartet die IEA, trotz des Ausbaus der Atomkraft auf fast das Doppelte, dass deren Anteil an der Stromerzeugung in den Industriestaaten von derzeit etwa 18 Prozent bis 2050 auf zehn Prozent fällt. Zwei Drittel des weltweiten Zubaus großer Atomkraftwerke sollen nach der Erwartung der

IEA in Ländern des Globalen Südens stattfinden, was den Anteil von Atomkraft an der Stromerzeugung in diesen künftigen Wachstumsregionen aber nur von derzeit etwa fünf auf sieben Prozent im Jahr 2050 ansteigen ließe.

Interessant an diesem Szenario erscheint zweierlei: Warum sollten die Management- und Kostenprobleme, die derzeit fast jede AKW-Baustelle in den westlichen Industriestaaten zu einem ökonomischen Desaster machen, in den Ländern des Globalen Südens nicht auftreten? Und warum benötigt man die Atomkraft überhaupt für eine sichere Energieversorgung, wenn sie am Ende doch nur wenige Prozent zur Deckung des Strombedarfs beiträgt?¹⁹⁵ Wenn 90 Prozent der Weltstromversorgung durch risikoarme und kostengünstige Erneuerbare Energien bereitgestellt werden können, warum können es dann nicht nahezu 100 Prozent sein, um die in vielerlei Hinsicht risikoreiche Nutzung der Kernenergie zu vermeiden?¹⁹⁶

Kleine modulare Reaktoren – eine überflüssige Debatte

Bleiben die Neuentwicklungen, sogenannte kleine modulare Reaktoren (Small Modular Reactors, SMR), die aktuell in aller Munde sind¹⁹⁷ und die alle eines gemeinsam haben: Niemand auf der Welt kann sie kaufen, weil es sie (noch) nicht gibt, oder nur in Computeranimationen, wie Bill Gates, einer der Protagonisten dieser Neuentwicklungen, freimütig bekennt. Die smarten Reaktoren sollen kleiner ausfallen als die aktuellen Großkraftwerke – und trotzdem Kostenvorteile aufweisen. Diese Erwartung hat kürzlich das Bundesamt für die Sicherheit in der nuklearen Entsorgung (BASE) in einem Gutachten grundsätzlich in Frage gestellt.¹⁹⁸ Denn zunächst machen die vergleichsweise geringen Erzeugungsleistungen der zahlreichen, in mehreren Ländern diskutierten Reaktorkonzepte die Anlagen gegenüber den Großkraftwerken heutiger Bauart mit Leistungsgrößen von 1.000 bis 1.600 Megawatt nach aller Erfahrung teurer.¹⁹⁹ Dies soll durch weniger aufwändige Sicherheitssysteme und die modulare Bauweise der neuen Kleinreaktoren aufgewogen werden. Doch die (vermeintlichen) Vorteile würden, wenn überhaupt, erst wirksam, wenn tausende von Kleinreaktoren einer Bauart tatsächlich realisiert würden, was wiederum massive Proliferationsrisiken²⁰⁰ und neue Fragen der Abfallentsorgung auslösen würde.

Vor allem aber würden diese Reaktoren, selbst wenn alle von Expert:innen erwarteten Probleme rasch überwunden werden könnten, zum Klimaschutz kaum etwas beitragen, weil bis zur Realisierung eines solchen Programms deutlich über zwanzig Jahre benötigt würden: Zu klein, zu teuer, zu langsam, könnte man die Ergebnisse des BASE-Gutachtens zusammenfassen. Das ist durchaus nicht überraschend, denn neue modulare Reaktorkonzepte werden seit etwa vier Jahrzehnten diskutiert, ohne dass dies zu konkreten Ergebnissen geführt hätte.²⁰¹

Die Zukunftsperspektiven für die Kernenergie sind, realistisch betrachtet, dunkelgrau.

Dies hat offenbar auch die IEA erkannt. Sie fordert in ihrer Net-Zero-Roadmap die Industriestaaten auf, die Subventionierung der neuen Reaktorkonzepte auszuweiten, also das erneut zu versuchen, was in den vergangenen Jahrzehnten bezüglich der Einführung neuer Reaktortypen zu keinerlei greifbaren Ergebnissen geführt hat. Dabei scheint denkbar, dass in Einzelfällen genug Mittel zusammenkommen, um den einen oder anderen SMR-Prototyp tatsächlich zu realisieren – allerdings zu einem Zeitpunkt, zu dem längst entschieden ist, ob die Welt den schlimmsten Folgen der Klimakrise noch entrinnt oder nicht. Zum Klimaschutz werden sie nicht spürbar beitragen können.²⁰²

Die Zukunftsperspektiven für die Kernenergie sind, realistisch betrachtet, dunkelgrau.

Die EU konnte sich dennoch bisher nicht darauf einigen, der Atomkraft endgültig den Geldhahn abzudrehen, obwohl in nur noch drei von 27 Mitgliedstaaten (Frankreich, Finnland, Slowakei) Reaktoren errichtet werden. Dass die Nukleartechnik in Zukunft noch einmal ökonomisch gegen die neuen Leittechnologien Wind- und Solarenergie erfolgreich konkurrieren kann, ist realistischerweise kaum vorstellbar. Es erscheint nach all dem schwer nachvollziehbar, dass auch in der EU nicht über einen schrittweisen Ausstieg aus dieser Technologie entschieden, sondern im Gegenteil, seit Jahren ernsthaft die Frage diskutiert wird, ob Kernenergie in die Reihe derjenigen Technologien aufgenommen werden soll, die einen nachhaltigen Beitrag zur Stromversorgung der Europäischen Union leisten kann – es sei denn, die zivile Nutzung der Hochrisikotechnologie Atomkraft ist eng mit den militärstrategischen Interessen einiger Mitgliedstaaten verwoben.

15 Jahre ist es her, seit das Wissenschaftsmagazin „Nature“ einen Kommentar zur Frage des Sinns der Entwicklung und des Baus neuer Atomkraftwerke veröffentlichte. Unter dem Titel „Fifty Years of Hopes and Fears“ („Fünfzig Jahre voller Hoffnungen und Ängste“) schrieb der Kommentator: *„Die Atomwirtschaft braucht den Klimawandel mehr als der Klimawandel die Atomwirtschaft. Wenn wir ein katastrophale Erderwärmung noch abwehren wollen, warum sollten wir dafür die langsamste, die teuerste, die unwirksamste, die unflexibelste und riskanteste Option wählen? 1957 war es richtig, es mit der Atomenergie zu versuchen. Heute ist Atomenergie nur noch ein Hindernis beim Übergang in eine nachhaltige Elektrizitätsversorgung.“*²⁰³

Megatrend 4:

Die Energiezukunft
ist dezentral und
öffnet Chancen für
eine gerechtere Welt

- ➔ **Die Stromversorgung aus fossil und nuklear betriebenen Großkraftwerken geht nach über hundert Jahren zu Ende und macht Platz für ein dezentral geprägtes Energiesystem auf Basis von Wind und Sonne.**
- ➔ **Aus der Physik der Erneuerbaren Energien ergibt sich ein Mischsystem aus dezentraler Stromerzeugung in Millionen kleinen, aber auch einer erheblichen Anzahl großer Erzeugungsanlagen und einer zentral koordinierten Systemsteuerung.**
- ➔ **Wie bei der Stromerzeugung aus regenerativen Energien führen auch neue Stromanwendungen im Verkehrs- und Gebäudesektor zu dezentraleren Strukturen und einem insgesamt gleichmäßiger über die Fläche verteilten Stromverbrauch.**
- ➔ **Im Weltmaßstab führt das regenerative Energiesystem tendenziell zu mehr Gerechtigkeit, weil viele im bisherigen fossil-nuklearen Energiesystem benachteiligte Weltregionen künftig über große Energieressourcen verfügen.**

Bis vor zwanzig Jahren versorgten wenige hundert Großkraftwerke auf Basis von Kohle, Erdgas und Uran Deutschland flächendeckend mit ausreichend Elektrizität. In allen vergleichbaren Industriestaaten verhielt es sich ähnlich. Ebenso folgten die großen aufstrebenden Länder des Globalen Südens zielstrebig diesem seit den Frühzeiten der kommerziellen Stromerzeugung vor mehr als 100 Jahren vorgezeichneten Entwicklungspfad. Auch sie bedienten und bedienen sich der fossilen Brennstoffe, die in erdgeschichtlichen Zeiträumen entstanden sind und verfeuern sie in großen Kraftwerken.

Allen nationalen und internationalen Klimabeschlüssen zum Trotz stiegen die Treibhausgasemissionen bis heute fast unaufhörlich, allenfalls kurzzeitig unterbrochen durch Kriege, Zusammenbrüche politischer Systeme, Weltwirtschaftskrisen oder zuletzt durch die Corona-Pandemie (Abbildung 2). Dass der weitaus größte Rest der Ressourcen fast vollständig unter der Erde bleiben und das fossile Zeitalter schnell beendet werden muss, ist seit der Verabschiedung des Klimaabkommens von Paris im Grundsatz weltpolitischer Konsens – allerdings bisher im Wesentlichen auf dem Papier und ohne Entsprechung in der Realität.

Die dezentrale Natur der Energiewende

Energiewende bedeutet im Kern den Stopp des Einsatzes erdgeschichtlich verdichteter Sonnenenergie in Form von Kohle, Öl und Erdgas und ihren Ersatz durch in Echtzeit verfügbare Sonnen- und Windenergie. In Zukunft nutzt der Mensch die Energie der Sonne wieder so, wie es seine Vorfahren vor der Entdeckung der fossilen Erbschaft getan haben: direkt und ohne Umwege. Das hat weitreichende Konsequenzen: Um die unmittelbare Kraft der Sonne für die Befriedigung des Energiehungers einer wachsenden Weltgesellschaft nutzbar zu machen, müssen wir diese „verdünnte Energie“ einsammeln. Dafür braucht es in der Summe viel Fläche an vielen Standorten, aber nicht unbedingt Großkraftwerke mit hoher Leistung.

▼ Windenergie und Biomasse

Photovoltaik ▼

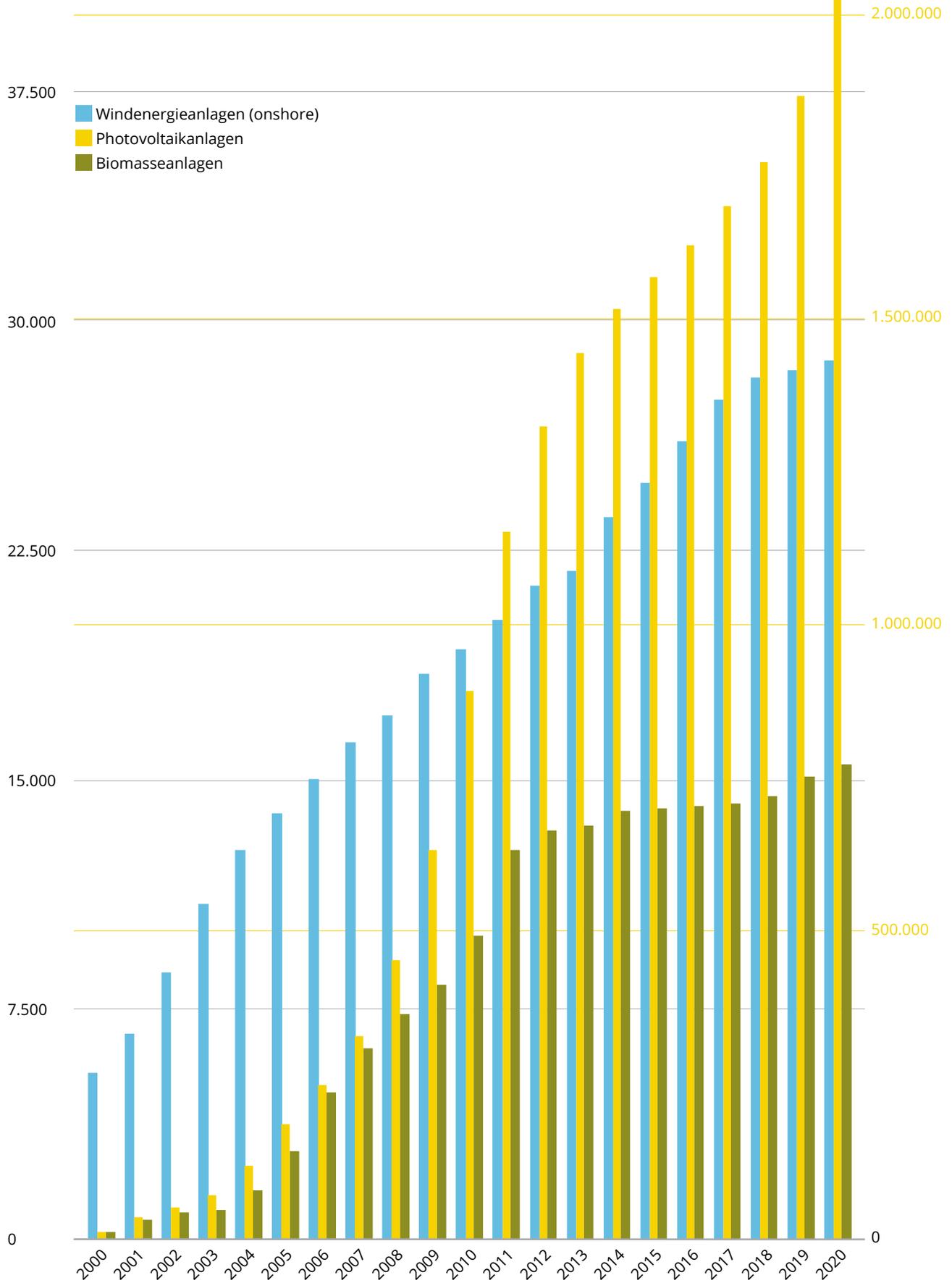


Abbildung 29:

Kumulierte Inbetriebnahmen Erneuerbare-Energien-Anlagen in Deutschland; Quellen: BNetzA, ÜNB²⁰⁴

Welche unmittelbaren Folgen dieser Paradigmenwechsel hat, zeigt beispielhaft Abbildung 29.

Epochaler Strukturwandel: Statt einiger hundert Kraftwerke versorgen künftig Millionen Erzeugungsanlagen Deutschland mit Strom...

Um die Jahrtausendwende genügten einige hundert Kohle- und Gaskraftwerke sowie 17 Atomkraftwerke, um Deutschland zu 90 Prozent mit Strom zu versorgen. Hinzu kamen traditionelle Wasserkraftwerke, ein paar tausend kleinere Windenergieanlagen und einige wenige Photovoltaik- und Biomasseanlagen, die in Summe gut sechs Prozent zur Stromversorgung beitrugen. Bis zur Weltklimakonferenz von Paris 2015 hatte sich die Struktur der Stromversorgung in Deutschland bereits tiefgreifend verändert. Mehr als 1,5 Millionen Photovoltaikanlagen, 25.000 Windräder und etwa 14.000 Bioenergieanlagen kamen gemeinsam mit der Wasserkraft auf gut 30 Prozent des nationalen Bruttostromverbrauchs.²⁰⁵ Danach ging die Entwicklung weiter. Ende 2020 deckten mehr als zwei Millionen Photovoltaikanlagen, 28.000 Windenergieanlagen an Land und 1.500 Anlagen vor den deutschen Küsten sowie gut 15.000 Anlagen auf Basis von Bioenergie rund 45 Prozent des deutschen Strombedarfs.²⁰⁶

Die Folgen des Übergangs

Der Übergang von einigen hundert Großkraftwerken zu Millionen meist sehr kleinen Anlagen zur Stromerzeugung ist das eine. Die Integration der neuen, kleinteiligen Erzeugung, die noch dazu nicht zu jeder Zeit zur Verfügung steht, zu einem neuartigen Gesamtsystem, das Strom und Wärme im Ergebnis genauso zuverlässig bereitstellt wie die Großkraftwerke auf Basis fossiler Energierohstoffe, ist das andere. Das Ziel einer nahezu kompletten Versorgung mit Erneuerbaren Energien bedeutet, dass zu jeder Minute des Jahres der Einsatz mehrerer Millionen Kleinkraftwerke koordiniert werden muss.

Seine Prägung und unübersehbare Differenz zur traditionellen Einbahnstraßenversorgung verdankt das neue Energiesystem noch einem anderen Umstand: Nämlich der in Teilen der Gesellschaft hohen Bereitschaft, die Rolle des reinen Energiekonsumenten zu verlassen. Wohnhäuser und Kleinbetriebe werden zu Kraftwerken, die Strom und Wärme für den Eigenbedarf, aber auch für Dritte produzieren. Die Dynamik, mit der dieser Paradigmenwechsel seit der Jahrtausendwende auch außerhalb Deutschlands in Gang kommt, beruht darauf, dass die technologische Entwicklung es zulässt, und dies für immer mehr Menschen zu attraktiven Konditionen. Das ist die tiefere Ursache, die der Energiewende in Deutschland eine dauerhaft stabile Akzeptanz sichert.

... und Verbraucher:innen werden gleichzeitig auch zu Stromproduzent:innen für den Eigenbedarf und für Dritte.

Mehr als zwei Millionen private Photovoltaikanlagen und hunderttausende Bürger:innen, die privat oder als Teilhaber:innen in Windenergie, Bioenergie oder Wasserkraft investieren, sprechen eine deutliche Sprache. Millionen Menschen in Deutschland fühlen sich als Treiber einer dezentralen, ökologischen Energiewende – und sie sind es auch. Wie tragend oder prägend die Säule der Prosumer²⁰⁷ im neuen Energiesystem nach dessen Vollendung sein wird, lässt sich im Einzelnen noch nicht absehen. Unstrittig ist jedoch schon lange, dass ein derart kleinteiliges Energiesystem ohne das Engagement vieler neuer Akteure nicht funktionieren kann.

Das Energiesystem kommt den Menschen näher

Eine weitere Konsequenz der Dezentralisierung des sich entwickelnden Energiesystems ist unübersehbar: In Ländern oder Regionen mit großer Bevölkerungsdichte und gleichzeitig vergleichsweise hohem Energiebedarf rücken die Anlagen zur Stromgewinnung wegen ihrer Größe und ihres Flächenbedarfs insgesamt näher an die Menschen. Das Energiesystem wird im Alltag sichtbarer. In den windreichen Regionen Norddeutschlands ist es heute in Gestalt von Windenergieanlagen allgegenwärtig, ebenso in den ländlichen Gebieten Süddeutschlands, wo Dachflächen ohne solare Energiegewinnung fast zur Rarität werden. Allen auch aufgeregten Debatten vor Ort zum Trotz hat eine in zahlreichen Umfragen immer wieder bestätigte Mehrheit der Menschen in Deutschland offenbar keine Probleme damit.²⁰⁸ Die sichtbare Veränderung von Kulturlandschaften ist der Preis, den die Gesellschaft für ein Energiesystem entrichtet, das am Ende ohne die Katastrophenrisiken der Atomenergie und ohne die Klimafolgen aus der Verbrennung fossiler Brennstoffe auskommt, die auch hierzulande von Jahr zu Jahr dramatischere Konsequenzen haben.

„Small is beautiful“ war und bleibt ein sympathischer Slogan der frühen Aktivist:innen gegen die fossil-nukleare Stromversorgung mit Großkraftwerken. Doch heute sind die Anlagen zur Produktion von Strom aus Erneuerbaren Energien häufig beides: dezentral über das Land verteilt, aber auch unübersehbar nicht länger nur „small“. Sie werden von einer Mehrheit als nächstes Kapitel eines Strukturwandels wahrgenommen, den es vor und während der Industrialisierung immer wieder gegeben hat und der nicht immer, aber häufig genug zu tun hatte mit der Schaffung und Sicherung der energetischen Basis einer Gesellschaft. Die Veränderungen der Kulturlandschaften des Ruhrgebiets oder der Braunkohlereviere am Niederrhein, in Mitteldeutschland oder in der Lausitz im vergangenen Jahrhundert und ihre aktuell sichtbare Weiterentwicklung bieten vielfältige Anschauungsmöglichkeiten und durchaus auch neue und überraschende Attraktionen.²⁰⁹

Dezentralität im Rahmen der Sektorenkopplung

Genau genommen war auch das traditionelle Energiesystem nur auf der Angebotsseite zentral strukturiert – mit Kraftwerken, die von Generation zu Generation immer leistungstärker wurden, jedoch ihren Strom sternförmig über die Übertragungsleitungen der verschiedenen Spannungsebenen bis in den letzten Winkel des Landes verteilten. Die Stromnachfrage der Haushaltskunden, des Handels, des Kleingewerbes oder der öffentlichen Hand war naturgemäß von Anfang an dezentral. Sicher, auch industrielle Großverbraucher sind an die öffentliche Stromversorgung und an entsprechend leistungsfähige Kraftwerke angeschlossen oder sie produzieren Strom und Wärme für den Eigenbedarf in eigenen Kraftwerken und speisen gegebenenfalls einen Teil des darin erzeugten Stroms in das öffentliche Netz. An diesem Punkt ändert sich im neuen System erst einmal nichts. Im Gegenteil, gemeinsame Projekte traditioneller Stromunternehmen mit großen industriellen Stromverbrauchern auf Basis Erneuerbarer

Energien spiegeln eine Kontinuität im Wandel, die vor wenigen Jahren noch nicht denkbar war.²¹⁰

Und doch hält die Energiewende auch für den privaten Energieeinsatz oder den der sonstigen Kleinverbraucher:innen einschneidende Veränderungen bereit. Sie bleiben in aller Regel an das öffentliche Stromnetz angeschlossen, doch die Nutzung des Stroms weitet sich aus und verändert sich tiefgreifend.

Der Grund sind neue Elektrizitätsanwendungen, die über den traditionellen Stromeinsatz hinausreichen und insgesamt den Stromverbrauch erhöhen. Im Rahmen der Sektorkopplung ersetzen etwa Strom und Umgebungswärme alte Heizsysteme wie Gas- oder Ölheizungen. Das Elektroauto bezieht seinen „Sprit“ nicht mehr an der Tankstelle, sondern aus der Steckdose oder Ladesäule. Der Prosumer, der sich für eine eigene Stromproduktion mittels privater PV-Anlage und möglicherweise einen Batteriespeicher entscheidet, kann den Strom für das Elektromobil und die Wärmepumpe teilweise selbst bereitstellen.

**Dezentrale
Energiewende
bedeutet auch den
Komplettumbau
weltweiter, seit
der Industrialisie-
rung gewachsener
Infrastrukturen und
ihren weitgehen-
den Ersatz.**

All diese strombasierten, dezentralen Veränderungen ersetzen Öl, Gas und Kraftstoffe, reduzieren deren Absatz und letztlich ihre Bedeutung. Auf lange Sicht werden weltumspannende Infrastrukturen überflüssig, die zu den aufwändigsten gehören, die der Mensch je geschaffen hat: Ölplattformen, Infrastrukturen zur Erdgasgewinnung, Verlade- und Transportinfrastrukturen, Pipelines, Raffinerien und am Ende das Tankstellen- und das Gasnetz sowie die Lkws, die Heizöl und Erdgas zum Kunden bringen. Was stattdessen, neben Wärmepumpen, Solaranlagen, Batterien und Ladesäulen bei den Endabnehmer:innen benötigt wird, ist eine Regionalisierung und Ertüchtigung des Stromnetzes, um den neuen Stromverbrauch im Wärme- und Mobilitätssektor befriedigen zu können. Auch hier ist absehbar, dass dieser zusätzliche Bedarf auf eine stärker verteilte, also auch dezentralere Struktur hinauslaufen wird als der heutige, der stark von den großen Ballungs- und Industriezentren geprägt ist.²¹¹ Strom aus Erneuerbaren Energien wird dabei, weil er günstig in Windenergie- und Solaranlagen hergestellt werden kann, zum universell einsetzbaren Sekundärenergieträger, der sogar bisher treibhausgasintensive Industrieprozesse dekarbonisiert. Dies funktioniert direkt mit Strom aus Wind oder Sonne und in Sonderfällen, wie der sogenannten Direktreduktion bei der Stahlproduktion, mit Wasserstoff und seinen Derivaten, die wiederum aus erneuerbarem Strom gewonnen werden. Wasserstoff aus der Wasserelektrolyse sichert darüber hinaus das dezentrale Stromsystem, das in Deutschland und anderen Ländern mit begrenzten Wasserkraftressourcen, vor allem von volatil anfallendem Strom aus Wind und Sonne getragen wird, gegen witterungsbedingte Stromknappheiten („Dunkelflaute“) ab.

Allerdings wäre es ein Kurzschluss zu glauben, dass ein solches System ohne „große“ Infrastrukturen auskommt. Einerseits werden zunehmend die Möglichkeiten der Digitalisierung genutzt und der kurzzeitigen Stromspeicherung, um möglichst viel Stromausgleich zwischen Erzeugern und Verbrauchern in den regionalen Verteilnetzen zu schaffen. Andererseits ist die europaweite Vernetzung des Stromsystems für die Funktionstüchtigkeit, die Effizienz und die Versorgungssicherheit unverzichtbar. Weil Strom aus Wind und Sonne in

unterschiedlichen Regionen, zu unterschiedlichen Zeiten in unterschiedlichen Mengen anfällt, müssen große Strommengen über große Strecken transportiert werden können.

Übertragungsleitungen machen das Gesamtsystem flexibel und effizient. Sie schaffen nicht nur die Möglichkeit, Strom von dort, wo er zu bestimmten Zeiten wetter- oder tageszeitabhängig vorrangig produziert wird, über weite Strecken in die industriell geprägten Verbrauchszentren zu transportieren. Die Verknüpfung ermöglicht darüber hinaus den intelligenten Stromaustausch, indem beispielsweise Zentren der Windenergieerzeugung in Deutschland mit Wasserspeichern im Norden oder Süden verbunden werden. Wenn hierzulande Stromknappheit herrscht, fließt Strom aus norwegischer oder österreichischer Wasserkraft über die Grenzen nach Deutschland, bei Stromüberschuss füllt Wind- oder Solarstrom aus Deutschland die Wasserspeicher im Norden oder Süden auf oder speist in den Partnerländern bei Bedarf auch direkt in deren Verteilnetze ein. Nicht zuletzt erschließen transnationale Netze auch erneuerbare Quellen an der Peripherie Europas und ermöglichen einen Stromaustausch, der letztlich den notwendigen Ausbau von Stromkapazitäten in Europa reduziert. Um es plastisch auszudrücken: Irgendwo weht immer der Wind.

Alles dezentral?

Dezentrale Kraftwerke werden insbesondere in den heute noch nicht elektrifizierten, vergleichsweise dünn besiedelten Regionen der Erde eine große Rolle bei der Befriedigung energetischer Grundbedürfnisse spielen. Ob es hier überhaupt noch notwendig sein wird, große, zusammenhängende Stromtransportnetze zu schaffen oder ob diese „Entwicklungsphase“ im neuen Solarzeitalter übersprungen werden kann, ist keineswegs sicher. Andererseits: Sogenannte Solar-Home-Systeme sind hilfreich bei der Befriedigung von strombasierten Grundbedürfnissen, insbesondere in großen Teilen Afrikas, wo weltweit die mit Abstand meisten Menschen bis heute keinerlei Zugang zu Strom haben. Große, regenerativ betriebene Kraftwerke in Form von Windparks – ob an Land oder vor den Küsten auf dem Meer – und solare PV-Freiflächenanlagen werden jedoch für eine nachhaltige Entwicklung und die Versorgung von Metropolen mit Millionen Einwohner:innen auf engem Raum in diesen Weltregionen mindestens so dringend gebraucht wie in den Industriezentren des Globalen Nordens.

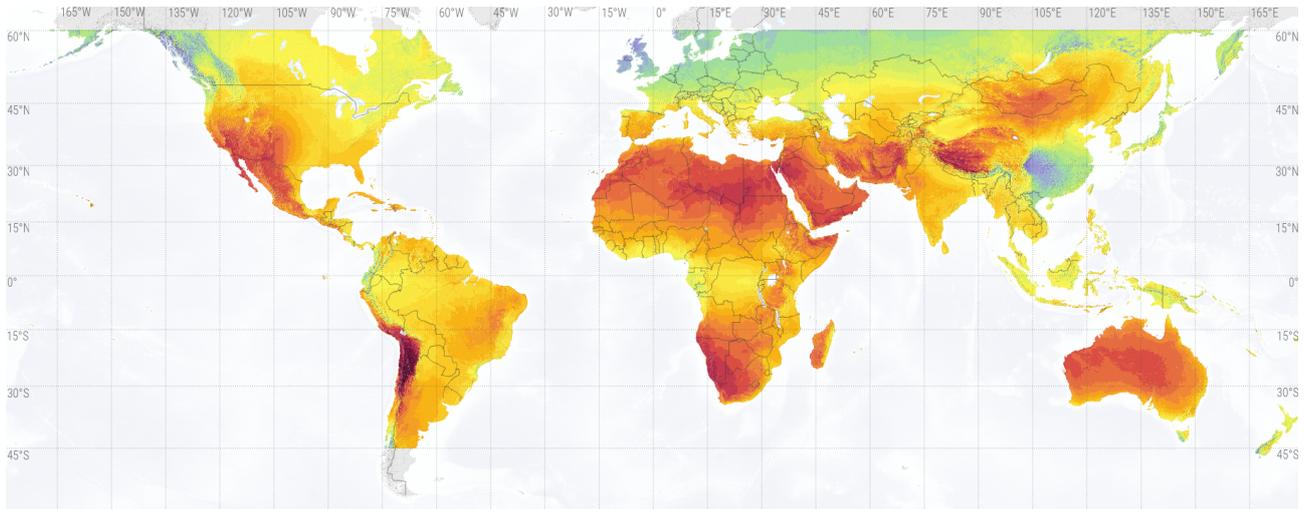
Über den Globus verteilt werden wir in den bevorstehenden Dekaden mit hoher Wahrscheinlichkeit eine Struktur einerseits aus Millionen kleinen Erzeugungseinheiten buchstäblich für den Hausgebrauch sehen. Andererseits wird die dezentrale Grundstruktur verknüpft sein mit mittleren, großen und auch sehr großen²¹² Kraftwerken, ebenfalls auf Basis erneuerbarer Energiequellen. Das Verhältnis von großen und kleinen Anlagen wird sich jeweils aus den natürlichen, politischen und gesellschaftlichen Gegebenheiten und Bedarfen ergeben. Es gehört zu den Stärken der neuen regenerativen Technologien, dass sie beides können, groß oder klein, ohne insgesamt an Leistung einzubüßen oder unwirtschaftlich zu werden.

Große Windparks in windreichen und weitgehend menschenleeren Regionen oder auf dem Meer können Elektrizität über die meisten Stunden des Jahres bereitstellen, was Kosten für die aufwändigere Speicherung großer Strommengen spart. Dies gilt im Prinzip überall, wo entsprechende Mittel für die Netzanbindung zur Verfügung stehen. Auch große PV-Freiflächenanlagen liefern die Kilowattstunde Strom kostengünstiger als kleine PV-Dachanlagen auf dem Einfamilienhaus – in Deutschland und mehr noch in vielen sonnenreichen und dünn besiedelten Regionen der Erde. Dort können solare Großkraftwerke – jenseits ohnehin unstrittiger, lokaler und netzferner Insellösungen – gezielt zum Aufbau einer industriellen Infrastruktur beitragen. Strom aus solchen größeren Solaranlagen verringert auch die Gesamtkosten für ein weitgehend auf Wind und Sonne basierendes System, das nicht nur Nächte und Wolkenphasen, sondern auch langanhaltende Windflauten zuverlässig und ohne Lieferunterbrechungen überstehen muss.

Eine Chance für den Globalen Süden

Das dezentrale Energiesystem auf Basis Erneuerbarer Energien entwickelt sich insgesamt zu einem Zukunftsversprechen für die Länder des Globalen Südens, die bisher zu den ärmeren Regionen der Welt zählen. Wenn die Stromerzeugungskosten weiter sinken, kann eine nachhaltige Entwicklung für diese Länder, in denen nach einem Report der IEA noch 770 Millionen Menschen²¹³ ganz ohne Zugang zu jeder Stromversorgung leben (davon allein 580 Millionen in Afrika), endlich mehr werden als ein auf ewig uneingelöstes Versprechen. Strom ist ein zentrales Gut – zur Bekämpfung der Armut, für den Zugang zu Bildung, zum Aufbau eines zeitgemäßen Gesundheitssystems und darüber hinaus für die Entwicklung von Gewerbe, Handel und Industrie, die für große Teile der Bevölkerung ein Leben in relativem Wohlstand erst ermöglichen.

Im Grundsatz macht der Wechsel der energetischen Basis der Weltenergieversorgung Hoffnung für die Mitte Afrikas und andere Regionen des tropischen Sonnengürtels. Der Austausch der energetischen Basis macht diese Länder potenziell zu privilegierten Zonen, wenn es um die Bereitstellung von Elektrizität geht. Die natürlichen Ressourcen stehen gerade in den am wenigsten entwickelten Ländern und Regionen überreichlich zur Verfügung und ihre dezentrale Nutzung muss nicht auf eine großflächig ausgebaute Netzinfrastruktur warten (Abbildung 30).



Langjähriges mittleres Stromerzeugungspotenzial für Photovoltaik



Abbildung 30:

Globales Photovoltaik-Stromerzeugungspotenzial: Chance zur Neuverteilung des globalen Wohlstands?; Quelle: World Bank Group²¹⁴

Die Vision für den Globalen Süden ist eine neue Form von Wohlstand, der ohne zerstörerische Technologien auskommt.

Die Verbreitung von Solarsystemen zur Befriedigung und Sicherung elementarer Grundbedürfnisse wie Licht, Kochen und Kühlen, Kommunikation oder zur zeitgemäßen Ausstattung mit Mobiltelefon, Radio, Kühlschrank oder auch Maschinen in Betrieben und Krankenhäusern hat schon vor Jahren begonnen.²¹⁵ Das kann jedoch nur der – zweifellos hilfreiche – Anfang sein. Denn nachhaltiger Wohlstand entsteht erst, wenn auch in den städtischen Zentren und Metropolen Afrikas oder Südasiens die sich dort entwickelnde Infrastruktur ausreichend und zuverlässig auf Strom aus Erneuerbaren-Energien-Anlagen als Alternative zu Dieselgeneratoren zurückgreifen kann, deren Treibstoff bis in die Gegenwart meist teuer importiert werden muss. Mit den reichlich vorhandenen erneuerbaren Ressourcen und der kontinuierlichen Reduktion der Investitionskosten stehen die Chancen dafür im Prinzip besser denn je. Die Vision ist eine energie- und ressourceneffizient gesicherte Lebensqualität und eine Form von Wohlstand, der ohne die zerstörerischen Technologien auskommt, auf denen die Entwicklung in den bisher privilegierten Staaten des Nordens basiert. Dafür gibt es in der Wirtschaftswissenschaft seit Langem den Begriff „Leap-Frogging“. Die sich entwickelnden Länder überspringen die Technologien, die andernorts erprobt wurden, sich jedoch als nicht nachhaltig erwiesen haben.

Ein solcher Entwicklungspfad, der die Umlenkung großer Investitionsströme vom Globalen Norden in den Globalen Süden zwingend erfordert, muss an sorgfältig definierte Voraussetzungen geknüpft werden. Diese Rahmenbedingungen müssen in enger Partnerschaft zwischen den beteiligten Ländern oder Staatengruppen festgelegt werden. Ansonsten droht das Risiko, dass sich die (neo-)kolonialen Verhältnisse des fossilen Zeitalters reproduzieren, in denen

von den natürlichen Reichtümern des Globalen Südens vor allem der Globale Norden und lokale, häufig korrupte Eliten profitierten und dies in Teilen der Welt bis heute tun.

Insbesondere müssen neuartige Energiepartnerschaften entwickelt werden, die sicherstellen, dass jedes einzelne Projekt nicht nur Geldtransfers – beispielsweise als Gegenleistung für die Produktion und den Export von Wasserstoff oder synthetischen Treibstoffen aus Erneuerbaren Energien – aus dem Norden auslöst, sondern gleichrangig die Einhaltung von Entwicklungszielen in den Herkunftsländern sicherstellt. Vor allem müssen die Projekte in den neuen Energiepartnerschaften vor Ort zu einer nachhaltigen Energieversorgung beitragen, dürfen nicht zu Lasten der lokalen Wasserversorgung, Ernährungssicherheit, Lebensmittelproduktion, Ökologie oder der Menschenrechte gehen.

Dies erscheint umso dringlicher, als sich in den vergangenen Jahren nicht alle Hoffnungen auf eine energiewendegetriebene Entwicklung im Globalen Süden erfüllt haben. Bis in das Jahr 2015 stieg deren Anteil an den weltweiten Neuinvestitionen in Erneuerbare Energien kontinuierlich an, während er in den Ländern des Globalen Nordens eher stagnierte, was seinerzeit auf Wirtschaftskrisen in großen Teilen der Welt zurückgeführt wurde. Es war absehbar, dass sich die noch vorhandene Lücke zwischen den Ländern des Globalen Nordens und des Südens vollends schließen würde. Dies geschah auch tatsächlich. Seit 2015 liegen die Länder des Globalen Südens bei den Investitionen in Erneuerbare Energien vorn (Abbildung 31).

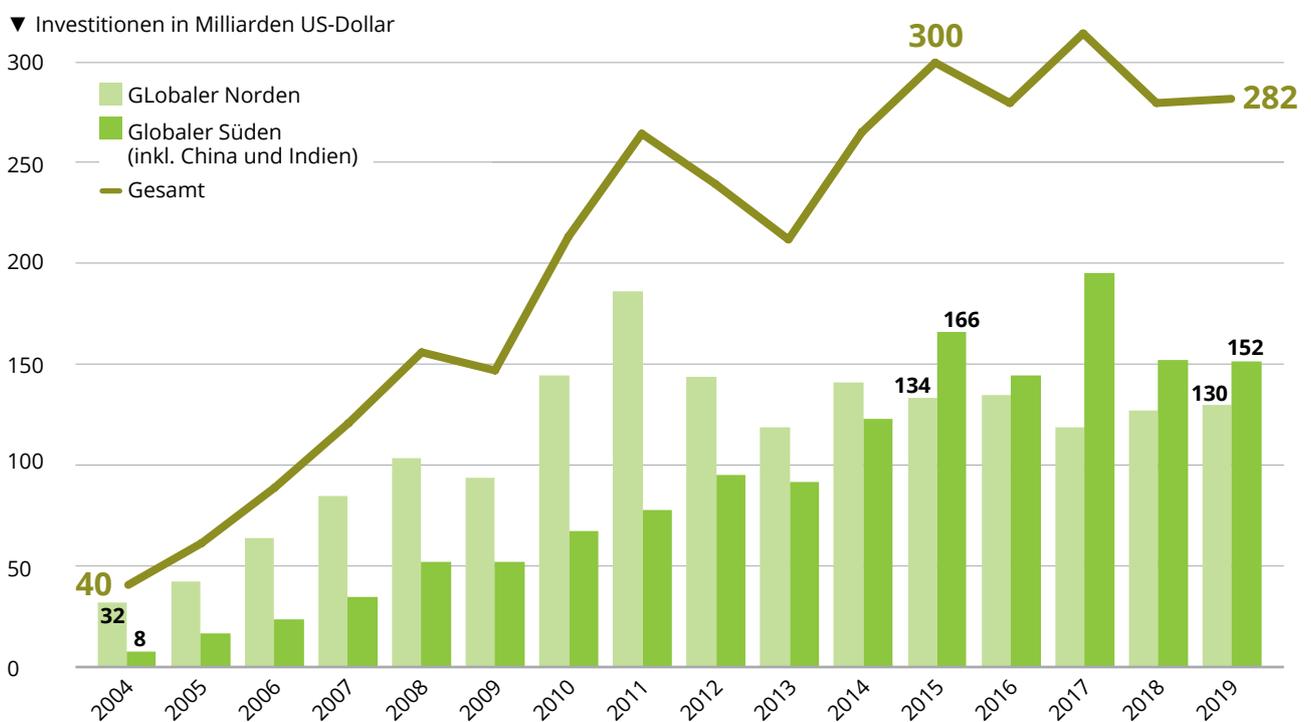


Abbildung 31:

Investitionen in Erneuerbare Energien nach Regionen; Quellen: UNEP, Frankfurt School-UNEP Centre, BloombergNEF²¹⁶

Weltweit allerdings stagnieren die Investitionen seit 2015, eine Tatsache, die durch die positive Entwicklung bei der installierten Leistung von Wind- und Solarenergie überdeckt wird. Diese steigt weiter Jahr für Jahr zuverlässig an (Abbildung 16, Abbildung 17). Der Grund für diese scheinbare Diskrepanz ist allerdings erfreulich: Jeder US-Dollar, der heute in Erneuerbare Energien investiert wird, führt nach einer Schätzung der IEA zu einem Output von viermal mehr sauberem Strom als noch vor zehn Jahren.²¹⁷

Auch die Gewichtung der Neuinvestitionen in die unterschiedlichen Stromerzeugungstechnologien bewegt sich seit 15 Jahren in die richtige Richtung (Abbildung 32). Im Jahr 2020 flossen mehr als zwei Drittel aller Investitionen in neue Kraftwerke in den Bereich der Erneuerbaren, der fossile Anteil kam nur noch auf ein knappes Viertel. Der Investitionsanteil der Atomenergie wächst ebenfalls leicht, was größtenteils der Ausbautwicklung in China, den Kostenexplosionen in den wenigen Projekten in den westlichen Industriestaaten und zunehmend teuren Nachrüstungsinvestitionen der insgesamt alternden Reaktorflotte geschuldet ist.

▼ Investitionsanteile in %

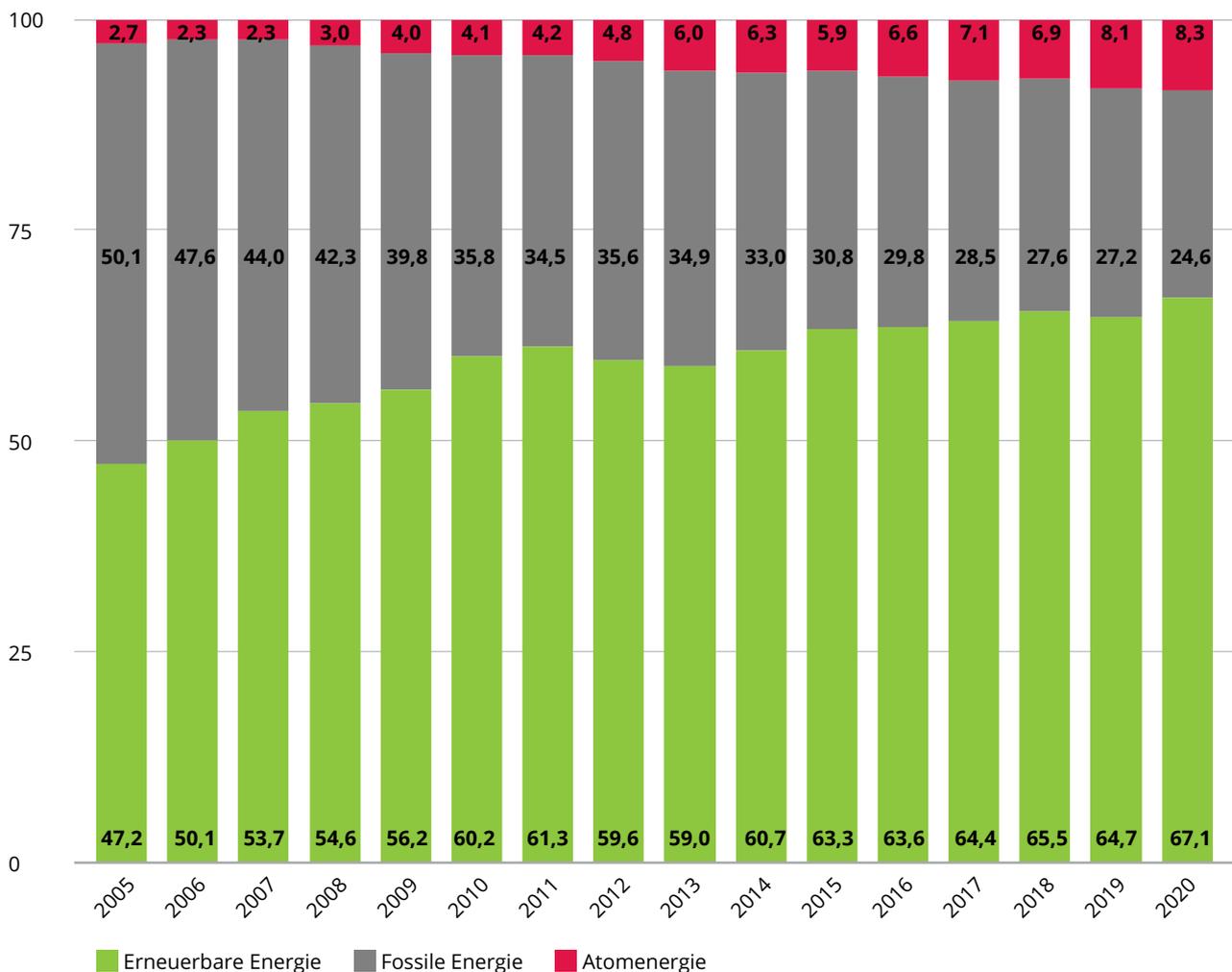


Abbildung 32:

Neuinvestitionen in regenerative Stromerzeugung nehmen weltweit zu; Quelle: IEA²¹⁸

**Zur Einhaltung
des 1,5-Grad-
Limits müssen sich
die Investitionen
in saubere Energie-
erzeugung mehr
als verdreifachen.**

Dennoch schlägt die IEA in ihrem Report zur Finanzierungssituation der weltweiten Energiewende zu Recht Alarm, insbesondere mit Blick auf die Länder des Globalen Südens jenseits von China. Diese erholen sich nur mühsam von den Folgen der COVID-19-Pandemie, spielen aber gleichzeitig eine entscheidende Rolle, wenn es um den weltweiten Erfolg oder Misserfolg der Energiewende geht. Denn in diesen Ländern leben (jenseits von China) fast zwei Drittel der Weltbevölkerung, doch weniger als ein Drittel der Investitionen in Erneuerbare Energien findet dort statt. Deshalb müsse alle Kraft darauf verwendet werden, in diesen Ländern über die internationalen Finanzierungsinstitutionen des reichen Nordens Investitionen in großem Stil auszulösen. Doch auch weltweit, mahnt die IEA weiter, bleiben die für 2021 erwarteten Investitionen in saubere Energien in Höhe von 750 Milliarden US-Dollar dramatisch hinter den zur Einhaltung der Klimaziele notwendigen Summen zurück. Um die 2-Grad-Schwelle der Erderhitzung einzuhalten, müssten sich demnach die Investitionen in saubere Energien in den 2020er Jahren verdoppeln; um unter dem Limit von 1,5 °C zu bleiben, sogar mehr als verdreifachen.²¹⁹

Megatrend 5:

Die Energiewende
ist elektrisch

- ➔ **Strom aus Erneuerbaren Energien wird mit der Energiewende zum universell einsetzbaren Energieträger auch jenseits seiner traditionellen Anwendungen.**
- ➔ **Die Dekarbonisierung des Verkehrssektors, des Wärmesektors und der Industrie erfolgt zu großen Teilen über den direkten oder indirekten Einsatz von Strom aus Erneuerbaren Energien.**
- ➔ **Aus der Umstellung der energetischen Basis von fossilen und nuklearen Brenn- und Spaltstoffen auf Erneuerbare Energien und grünen Strom ergibt sich auch für die betroffenen Branchen auf der Anwenderseite ein tiefgreifender technologischer Wandel.**
- ➔ **Das künftige strombasierte Energiesystem arbeitet wesentlich effizienter als das alte, weil durch die Umstellung auf Strom thermische Umwandlungsverluste in den Kraftwerken minimiert werden und auch die neuen Anwendungstechnologien die eingesetzte Energie in der Regel effektiver nutzen.**

Die Energiezukunft ist erneuerbar, weil die Stromerzeugung aus Wind und Sonne nicht nur das Klima schont, sondern bereits in vielen Regionen rund um den Globus auch ökonomisch gegenüber Strom aus Kohle-, Gas- und Atomkraftwerken konkurrenzfähig ist. Dieser Megatrend zieht einen weiteren nach sich: Als Konsequenz aus dem auch ökonomisch getriebenen Siegeszug der erneuerbaren Stromerzeugung ist die Abkehr von thermischen (Verbrennungs-) Prozessen nicht nur in den fossilen Kraftwerken zur Stromerzeugung selbst, sondern auch in anderen Anwendungen mit hohem Energiebedarf oder hohen Treibhausgasemissionen zu beobachten. Damit wächst Jahr für Jahr das Gewicht klimaverträglicher Elektrizität – und mit ihr die Hoffnung auf Fortschritte im Kampf gegen die Erderhitzung. Die Aussicht auf diese Entwicklung spiegelt sich in allen aktuellen Zukunftsszenarien: Die Energiewende ist erneuerbar. Und sie wird elektrisch sein.

Die Dimension der Elektrifizierung

Windenergie und Photovoltaik liefern, kaum noch bestritten, Strom in immer mehr Weltregionen preisgünstiger als alle anderen Stromerzeugungstechnologien. Dennoch werteten Skeptiker:innen diese Entwicklung lange Zeit nicht als Durchbruch im Kampf gegen die Klimaerhitzung. Ihr Argument: Die Energiewende sei nicht über die Dekarbonisierung des Elektrizitätssektors zu schaffen, weil dieser nur für etwa 20 Prozent der Emissionen verantwortlich sei. Das ist für Deutschland und vergleichbare Länder zwar derzeit richtig.²²⁰ Doch das Überschreiten der Grenzen des traditionellen Stromeinsatzes und die sich daraus ergebende Kopplung der Sektoren Energiewirtschaft, Mobilität und Wärme haben diese Debatte faktisch obsolet gemacht.

Die ausgreifende Nutzung klimaneutral hergestellten Stroms und die Möglichkeit zur Elektrifizierung großer Bereiche des Mobilitäts- und Wärmesektors eröffnen die Perspektive auf eine umfassende Dekarbonisierung der gesamten

Die Elektrifizierung auf Basis Erneuerbarer Energien sorgt nicht nur für sauberen Strom, sie ersetzt auch emissionsintensive Produktionsverfahren in weltweit verbreiteten Schlüsselindustrien.

Energiewirtschaft. Mehr noch, auch für die emissionsintensivsten Branchen der Industrie ergeben sich neue klimaschonende Produktionslinien, die ebenfalls von Strom aus Wind und Sonne profitieren.

Dies gilt nicht nur für Deutschland oder die EU, sondern überall auf der Welt, wo Klimaschutz auf der Agenda steht. Im Kern bedeutet Elektrifizierung, dass fossile bzw. nukleare Brenn- und Spaltstoffe nicht nur in der Stromerzeugung selbst durch Erneuerbare Energien ersetzt werden. Elektrifizierung bedeutet darüber hinaus, dass auch in Bereichen, in denen bisher fossile Energieträger – zum Beispiel Koks- und Kohle bei der Stahlherstellung – als Ausgangsstoffe oder Produktionsmittel für andere Produkte zum Einsatz kommen, direkt oder indirekt durch Strom aus Erneuerbaren Energien ersetzt werden.

In ihrer Net-Zero-Roadmap hält die IEA nicht nur einen Anstieg des globalen Erneuerbaren-Anteils an der Stromerzeugung von 29 Prozent (2020) über 61 Prozent (2030) bis auf 88 Prozent (2050) für erforderlich und realistisch, sondern auch eine weitgehende Elektrifizierung des Verkehrs- und Gebäudesektors sowie der energieintensiven Industrie, teils direkt mit Strom, teils indirekt mit aus erneuerbarem Strom über die Wasserelektrolyse hergestelltem Wasserstoff.²²¹

In einem von den Berliner Think Tanks Agora Energiewende und Agora Verkehrswende gemeinsam mit der Stiftung Klimaneutralität beauftragten deutschen Pendant mit dem Titel „Klimaneutrales Deutschland 2045“²²² stammt im Zieljahr nicht nur der weit überwiegende Teil des Stroms aus Windenergie und Photovoltaik. Auch der Anteil der Erneuerbaren Energien am deutschen Primärenergiemix wächst von aktuell etwa 17 Prozent über 36 Prozent im Jahr 2030 auf schließlich 85 Prozent bis 2045. Der größte Teil des Rests (12 Prozent) stammt aus Importen von synthetisch erzeugten Energieträgern (Power-to-X).

Die Elektrifizierung und massive Ausweitung der Aufgaben für die Stromversorgung bedeutet naturgemäß, dass der Strombedarf in Deutschland erheblich steigt. Die dafür benötigten Strommengen überkompensieren deutlich die Effizienzgewinne, die unabhängig davon in den traditionellen Stromanwendungen bis 2045 erreicht werden können (Abbildung 33, orange Linie).

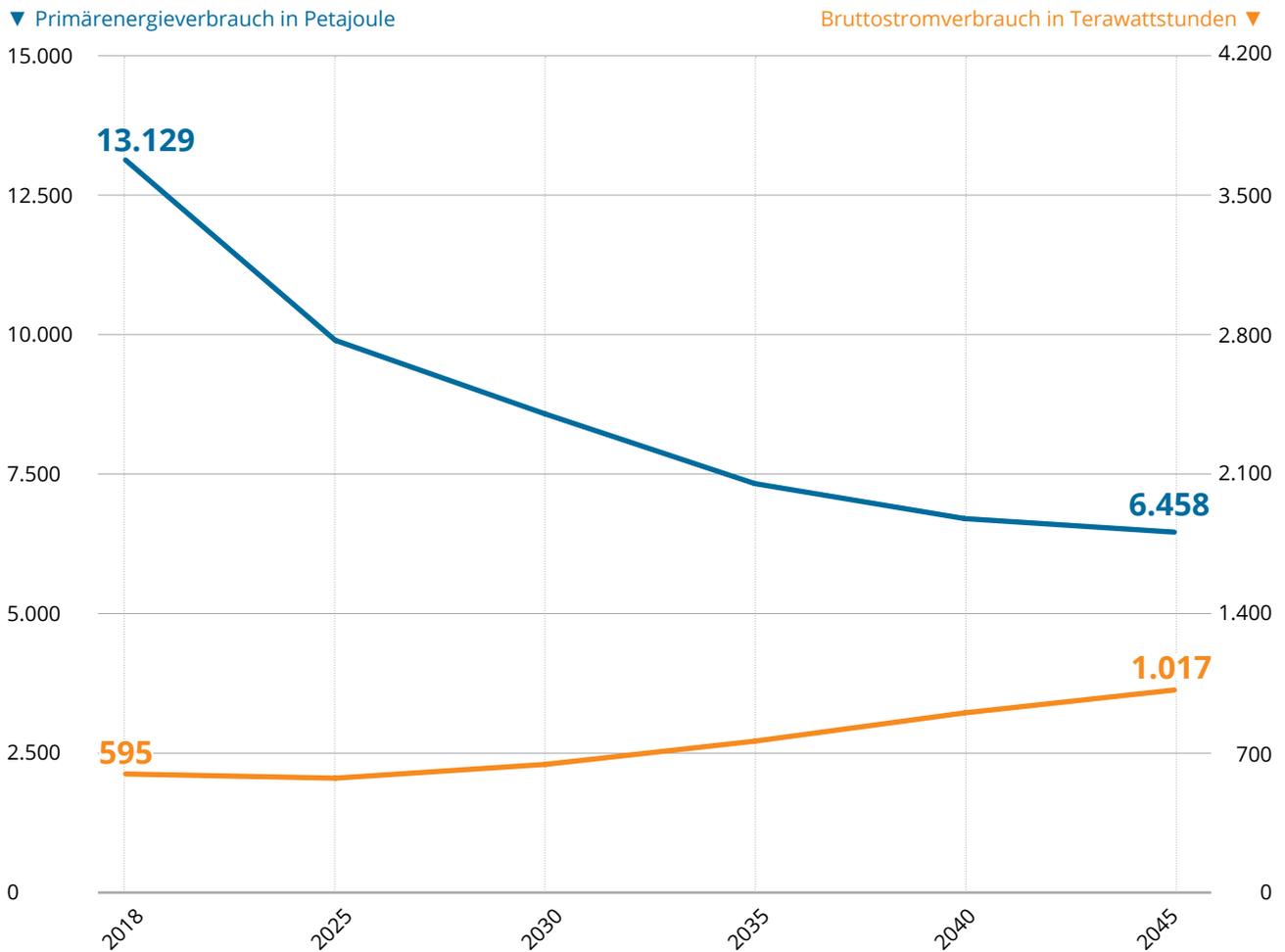


Abbildung 33:

Entwicklung des Primärenergieverbrauchs und des Bruttostromverbrauchs in Deutschland auf dem Weg zur Klimaneutralität bis 2045; Quellen: Prognos, Öko-Institut, Wuppertal Institut²²³

Im Szenario „Klimaneutrales Deutschland 2045“ wächst der Bruttostromverbrauch um mehr als 400 Terawattstunden von 595 TWh im Jahr 2018 auf 1.017 TWh 2045. Vom Anstieg des Stromverbrauchs entfallen etwa 160 TWh auf den Verkehr, 150 TWh auf die Wasserstoffherstellung und etwa 90 TWh auf die Industrie. Leicht rückläufig entwickelt sich der Stromverbrauch dagegen im Gebäudesektor. Effizienzverbesserungen bei Elektrogeräten, Beleuchtung und der Ersatz von Nachtspeicherheizungen und Elektroboilern sparen mehr Strom ein, als die Millionen zusätzlich angenommenen Wärmepumpen verbrauchen.²²⁴ Andere Szenarien rechnen mit vergleichbaren, teilweise sogar mit noch höheren Strombedarfen in einem klimaneutralen Deutschland.²²⁵

Da die IEA in ihrem weltweiten Net-Zero-Szenario ebenfalls von einer umfassenden Elektrifizierung weiter Bereiche der Energieversorgung und dem Einstieg in eine Wasserstoffwirtschaft ausgeht, erwartet sie mehr als eine Verdoppelung des Weltstrombedarfs bis 2050. Neben dem Anstieg des direkten Stromverbrauchs in den erweiterten Endverbrauchssektoren, der allein etwa 20 Prozent zur globalen CO₂-Reduzierung beitragen soll, rechnet die IEA mit einem enormen Anstieg des Stromverbrauchs für die Wasserstoffherstellung auf etwa 12.000 Terawattstunden. Diese Strommenge übertrifft den aktuellen jährlichen Bedarf Chinas und der USA zusammen.²²⁶

▼ Strommengen in Terawattstunden

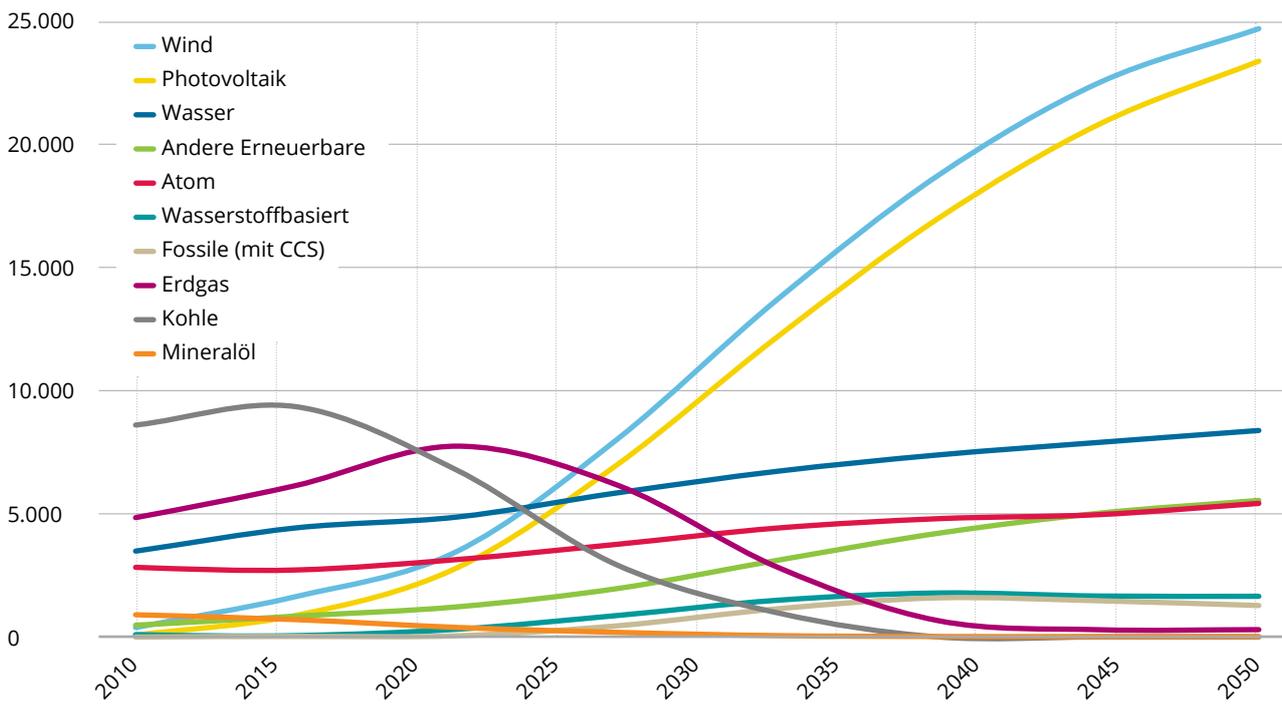


Abbildung 34:

Weltweite Stromerzeugung mit einzelnen Energieträgern im Szenario „Net Zero by 2050“; Quelle: IEA²²⁷

Energieeinsparung als Nebenwirkung der Elektrifizierung

Aus der Umstellung immer größerer Bereiche der Energieversorgung auf klimaschonenden erneuerbaren Strom ergibt sich eine weitere beeindruckende und auf den ersten Blick überraschende Nebenwirkung: Die Transformation erspart dem Energiesystem in Deutschland, Europa und der Welt enorm viel Energieeinsatz. Der Primärenergieverbrauch, also der Energiegehalt aller direkt oder zur Umwandlung in Sekundärenergieträger genutzten Energieträger, geht stark zurück.

Beispiel Deutschland: Der Strombedarf nimmt im Prozess der Dekarbonisierung wegen der Ausweitung auf andere wichtige Einsatzbereiche wie beschrieben erheblich zu. Gleichzeitig geht jedoch die Elektrifizierung einher mit einer Halbierung des Primärenergieverbrauchs von heute etwa 13.000 auf rund 6.500 Petajoule bei Erreichen der Klimaneutralität im Jahr 2045 (Abbildung 33, blaue Linie). Hauptgrund sind die durch die Umstellung auf Erneuerbare Energien stark sinkenden thermischen Verluste bei der Energieumwandlung in den konventionellen Kraftwerken und ein über die Zeit erheblicher Rückgang des Endenergieverbrauchs. 2045 erfolgt der Löwenanteil der Stromerzeugung in Windenergie-, Photovoltaik- und anderen Anlagen auf Basis regenerativer Energien und damit fast ohne Umwandlungsverluste.

In allen Kraftwerken, egal ob auf Basis von fossilen oder atomaren Brenn- oder Spaltstoffen, wird die jeweilige Energie eingesetzt, um Wasserdampf zu erzeugen, der seinerseits Turbinen zur Stromerzeugung antreibt. Ein erheblicher Anteil der eingesetzten Energie geht dabei als Abwärme, meist ungenutzt, verloren.²²⁸ Die Umwandlungsverluste liegen deutschlandweit in derselben Größenordnung wie der gesamte jeweilige Endenergieverbrauch der größten Sektoren Industrie, Verkehr oder aller Haushalte in Deutschland.²²⁹ Noch ungünstiger ist die Energiebilanz von Verbrennungsmotoren in Pkw, Bussen oder Lkw, wo nur etwa ein Viertel bis ein Drittel der eingesetzten Energie das Fahrzeug bewegt, während der große Rest der bereitgestellten Energie die Umgebung aufheizt (im Winter immerhin nutzbringend auch den Innenraum des Fahrzeugs).²³⁰

Die Tatsache, dass allein schon die Elektrifizierung des Energiesystems im Zuge der Energiewende sehr viel Energie einspart, heißt natürlich nicht, dass sich die Notwendigkeit eines sparsamen und effizienten Umgangs mit Energie damit erledigt hätte. Jeder Fortschritt auf der Verbrauchssseite macht das Energiesystem kostengünstiger und die rechtzeitige Umsetzung der Energiewende wahrscheinlicher. In manchen Bereichen – etwa bei der Gebäudedämmung – sind Fortschritte beim effizienten Einsatz von Energie sogar eine Voraussetzung für die erfolgreiche Elektrifizierung.²³¹

Alle bis dato genannten Zahlen ergeben sich aus Prognosen und Szenarien, von denen es inzwischen eine Vielzahl gibt. Diese unterscheiden sich in zahlreichen Details, aber nicht in der Grundperspektive. Strom wird in Zukunft eine dominante Rolle bei der Energieversorgung in allen Ländern spielen, in denen Entwicklung stattfindet. Und er wird nahezu klimaneutral aus regenerativen Energien erzeugt. Die Richtung stimmt und die Entwicklung ist in vollem Gang.

Freundliche Übernahme: Regenerativ erzeugter Strom wächst über sich hinaus

Weil sich jenseits der Elektrizitätserzeugung vergleichbare Fortschritte zur Dekarbonisierung anderer Energieverbrauchssektoren nicht abzeichnen, entwickelt sich Strom aus Erneuerbaren Energien zu einem universell einsetzbaren Sekundärenergieträger. Entweder direkt, indem er beispielsweise Elektroautos antreibt oder aber Wärmepumpen zur Raumheizung und Warmwasserbereitung. Oder indirekt, indem er mit Wasserstoff einen Energieträger verfügbar macht, der seinerseits als Energieträger oder industrieller Rohstoff ebenfalls zur Dekarbonisierung und zur Umsetzung der Energiewende beitragen kann, wo immer diese stockt.

Der Megatrend zur Elektrifizierung erschüttert schon jetzt Weltkonzerne sowohl auf der Angebots- als auch auf der Nachfrageseite in ihren Grundfesten. Die prägenden Unternehmen des Öl- und Gaszeitalters werden zwar nicht von heute auf morgen verschwinden, weil auch Öl und Erdgas nicht von heute auf morgen verschwinden. Doch sie werden sich auf eine anhaltende Schrumpfkur einrichten und auf die Suche nach neuen Geschäftsmodellen begeben müssen – oder untergehen (siehe Megatrend 1).

Mobilität: Fahren mit Strom

Eine ähnlich brisante Entwicklung erwartet die Automobilindustrie, sofern sie weiter auf Verbrennungsmotoren setzt, deren Restlaufzeiten in einer nach Klimaneutralität strebenden Welt absehbar begrenzt sind. Über Jahrzehnte haben die Unternehmen auf ihre Lobbymacht vertraut und sich verhalten, als seien Klimawandel, Luftschadstoffe und am Individualverkehr erstickende Städte das Problem der anderen. Sie machten die Autos effizienter und erhöhten im Gleichschritt Gewicht, Motorstärke und Glitzerfaktor. Das Ergebnis war Stillstand bei den CO₂-Emissionen über mehr als drei Jahrzehnte. Diese Phase geht nun zu Ende.

Viel zu lange glaubten gerade die Weltmarktführer in Deutschland, Europa und auch den USA an ihre alte Größe und wohl auch ihren eigenen Werbetexter:innen. Den bevorstehenden Durchbruch der Elektromobilität wollten sie nicht wahrhaben, bis sie schließlich vom lange belächelten Emporkömmling Tesla aus den USA abgehängt und von chinesischen Start-ups bedrängt wurden. Gemessen an der Marktkapitalisierung sind chinesische Newcomer wie BYD oder SAIC, obwohl in der Realwirtschaft ökonomische Zwerge im Vergleich zu BMW oder VW, heute schon fast auf Augenhöhe. Tesla spielt diesbezüglich schon seit Jahren in einer anderen Liga.

▼ Börsenwerte in Milliarden US-Dollar

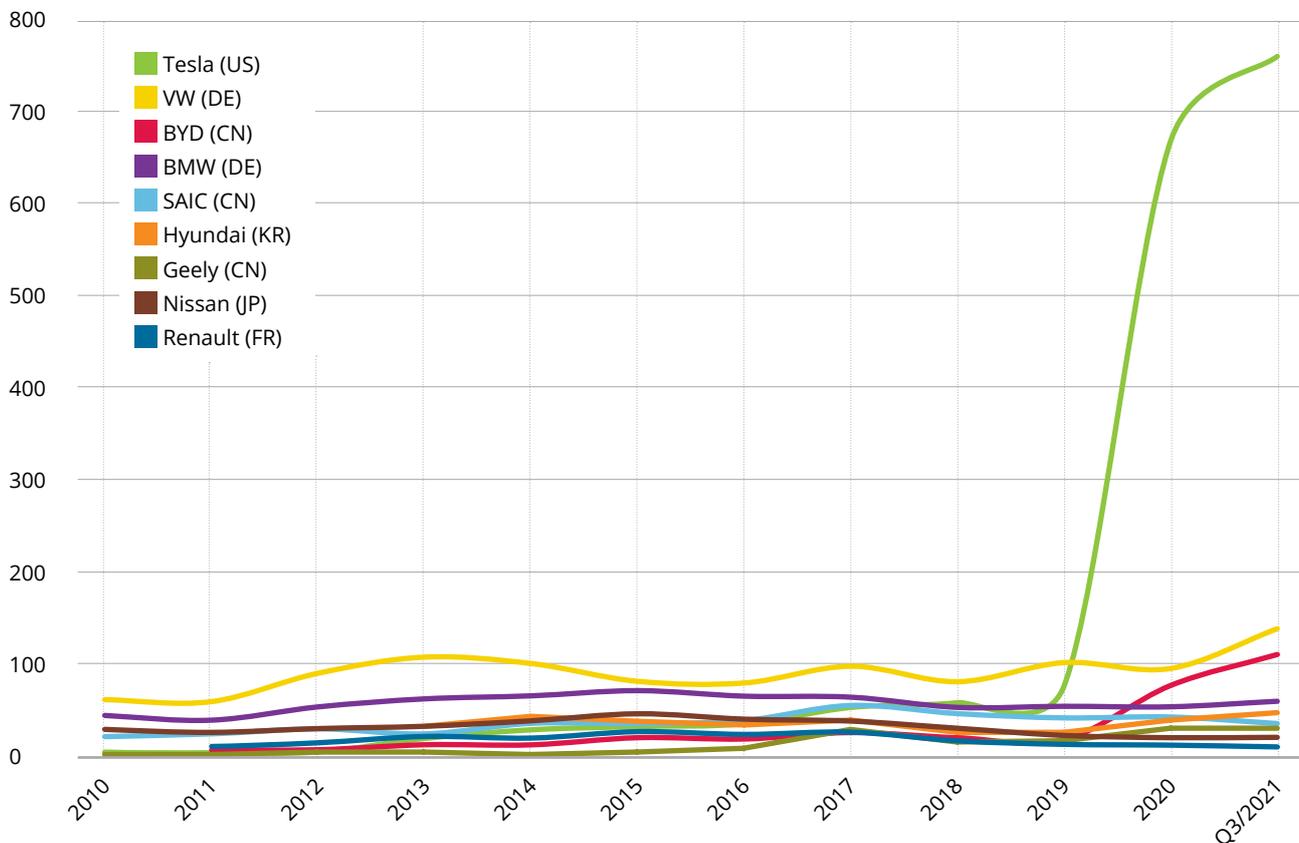


Abbildung 35:

Entwicklung der Marktwerte großer Autohersteller; Quelle: CompaniesMarketCap.com²³²

Die Anleger:innen an den Börsen haben offenbar klare Zukunftserwartungen, was mittlerweile auch die lange zögerlichen deutschen Traditionsunternehmen aufgeweckt hat. Eines nach dem anderen vollzieht den Schwenk in Richtung E-Mobilität. Deshalb steigen ihre Chancen, auch wenn manche noch hoffen, zweigleisig fahren und mit synthetischen Kraftstoffen dem Verbrennungsmotor auch im Pkw ein Überleben sichern zu können.

Zur Mitte des 21. Jahrhunderts fährt die weltweite PKW-Flotte praktisch vollständig elektrisch, aber auch die große Mehrzahl der LKW.

Was erwartet die IEA, die trotz ihres Net-Zero-Szenarios grüner Anwendungen nicht verdächtig ist? Bescheidene zwei Prozent der globalen Mobilität wurden 2020 elektrisch abgewickelt. Bis 2050, so die IEA in ihrem Net-Zero-Szenario, sollen es 45 Prozent sein. Mehr als 60 Prozent der 2030 weltweit verkauften Pkws sind dann Elektroautos (gegenüber fünf Prozent der Verkäufe im Jahr 2020). Und bis 2050 fährt die globale Pkw-Flotte praktisch vollständig elektrisch. Der Anstieg der weltweiten Verkäufe von Elektro-Pkw werde in den nächsten zehn Jahren mehr als zwanzigmal so hoch sein wie der Anstieg der Verkäufe von Verbrennungsmotoren in den letzten zehn Jahren. Bei den Lkw prognostiziert die IEA wegen der noch laufenden Entwicklung von Batterien mit höherer Energiedichte eine etwas langsamere Gangart, insbesondere im Schwerlastfernverkehr. Dennoch, so die Expert:innen in Paris, werden 2030 rund 25 Prozent und 2050 rund zwei Drittel aller schweren Lkw weltweit elektrisch betrieben.²³³

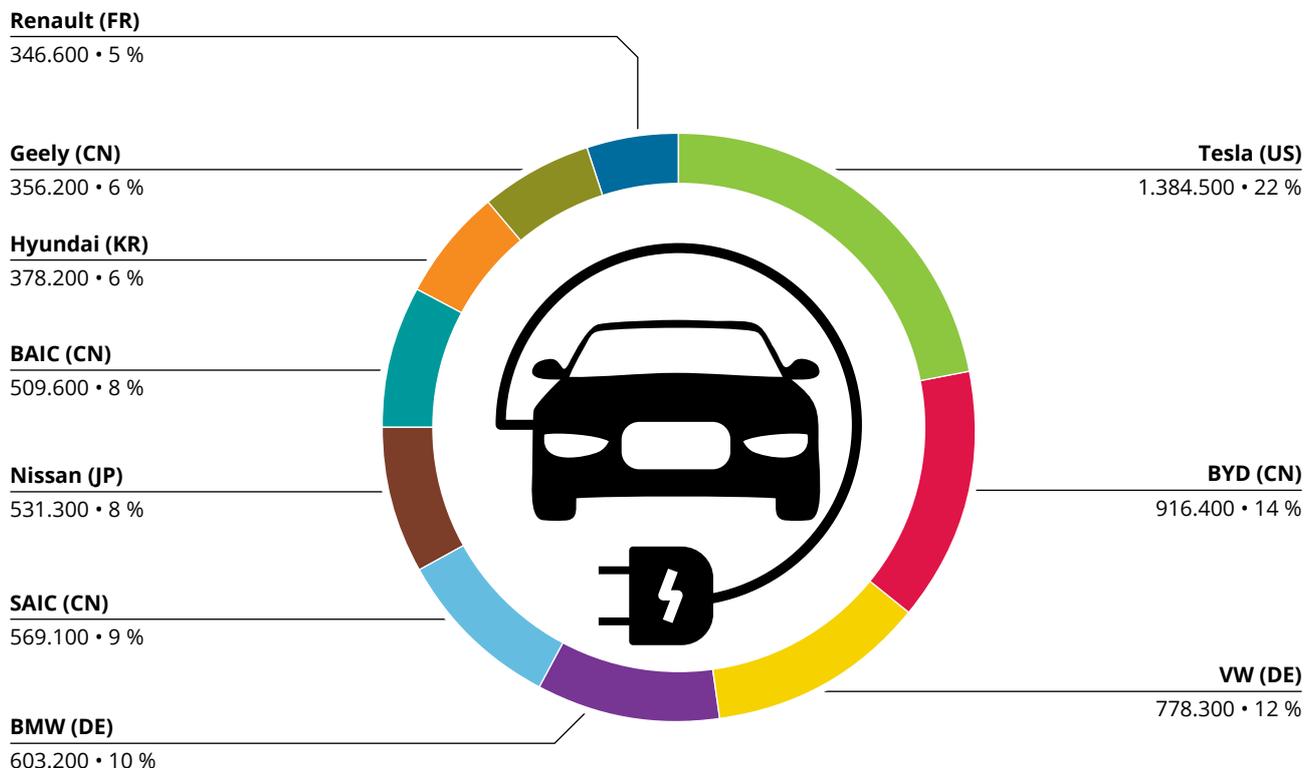


Abbildung 36:

Verkaufszahlen und Marktanteile von Herstellern an zugelassenen Elektro-Pkw, Stand 2020;

Quelle: ZSW²³⁴

Beim Kampf gegen die E-Mobilität, den manche mit Blick auf ihre potenzielle Kundschaft mit reichlich Nebelkerzen weiterführen, handelt es sich in Wahrheit schon jetzt um Nachhutgefechte. Grundsätzlich ist die Sache entschieden: Die Zukunft des Pkws ist direktelektrisch – und nicht nur die.

Batterieelektrisch angetriebene Elektromotoren in Pkw, aber auch in Lieferwagen und etwas später sogar in Lkw ersetzen den Verbrennungsmotor, der mehr als hundert Jahre die Automobilität geprägt hat. Es kann schneller gehen als gedacht. Inzwischen zeichnet sich eine Generation von Batterien ab, die so leistungsstark und kostengünstig sind, dass auch die fossile Busflotte zur Disposition steht, möglicherweise sogar der gesamte fossile Schwerlastverkehr.²³⁵ Falls es anders kommt, wird dieser – der Bahn nicht unähnlich – mit über die Fernstraßen gespannten Oberleitungen mit erneuerbarem Strom versorgt, in die sich die Lkw bei der Auffahrt auf die Autobahn ein- und bei ihrem Verlassen wieder ausklinken.

Gebäude: Strom macht Wärme

Mit strombasierten Systemen zu heizen war lange ein Tabu für alle ökologisch orientierten Endverbraucher:innen, weil die großen Elektrizitätsversorgungsunternehmen seit den 1970er Jahren mit Hilfe ineffizienter Nachtspeicherheizungen die Lasttäler ihrer schwer steuerbaren und ungeliebten Braunkohle- und Atomkraftwerke zu füllen suchten. Nun hat sich der Wind gedreht.

Klimaneutraler Strom aus Wind und Sonne hat das Potenzial, die Umgebungswärme aus Luft, Boden oder Grundwasser mit Hilfe von Wärmepumpen für die Heizung (und Kühlung) von Wohnungen, Büros und Betrieben effizient nutzbar zu machen. Die Heizungs- und Wärmetechnik des vergangenen Jahrhunderts – Ölheizungen, Gasbrenner, Nachtspeicherheizungen und Kohleöfen – geht in den Ruhestand. Außerdem können Prozesswärme und Prozessdampf im Rahmen industrieller Fertigungsprozesse, die bisher über die Verbrennung fossiler Brennstoffe bereitgestellt werden, künftig mit erneuerbarem Strom erzeugt werden (Power-to-Heat, PtH). Beides geschieht in Deutschland bereits.

Wärmepumpen in Ein- und Mehrfamilienhäusern können zu einem zentralen Baustein bei der Dekarbonisierung des Gebäudesektors werden. Das ist gerade in Deutschland nicht einfach, denn genau dort verfügt die Gaswirtschaft über eine opulent ausgebaute Infrastruktur und eines ihrer zentralen Geschäftsfelder. Gegen sie treten neue Wärmepumpen an, deren Wirtschaftlichkeit noch unter hohen Investitionskosten, vor allem aber unter einer Regulierung leidet, die den Strompreis für private Verbraucher:innen mit Steuern, Abgaben und Umlagen hochhält. Das wirkt sich wiederum negativ auf die Betriebskosten der Wärmepumpen aus. Gleichzeitig werben Erdgasbefürworter mit dem Versprechen, ihren klimabelastenden Brennstoff durch klimaneutral hergestellten Wasserstoff ersetzen zu wollen.

Das fragwürdige Versprechen an die Eigenheimbesitzer:innen: Alles kann im Wesentlichen bleiben, wie es ist. Im Heizungskeller wird Gas verbrannt, damit es im Haus gemütlich ist – irgendwann in der Zukunft wird es ein anderes Gas

sein – ansonsten bleibt alles beim Alten. Dass es wirklich so kommt, ist höchst zweifelhaft, weil klimaverträglich hergestellter Wasserstoff aller Wahrscheinlichkeit nach ein ebenso teures wie rares Gut bleibt und anderswo dringender gebraucht wird (siehe Megatrend 6). Ohne entschlossene politische Flankierung und Unterstützung wird sich allerdings auch die Wärmepumpe in Bestandsgebäuden kaum rechtzeitig gegen traditionelle Öl- und Gasheizungen durchsetzen können.²³⁶ Zur Einhaltung des gesetzlichen Ziels der Klimaneutralität bis 2045 ist dies jedoch eine notwendige Voraussetzung. Fünf bis sechs Millionen Wärmepumpen bis 2030 und 14 Millionen bis 2045 müssen dafür nach aktuellen Schätzungen deutsche Wohngebäude mit Raumwärme und Warmwasser versorgen.²³⁷ In den vergangenen Jahren wurde ein steter Anstieg bei der Neuinstallation von Heizungswärmepumpen registriert, mit einem neuen Rekord (140.000 Neuinstallationen) im Jahr 2020. Damit sind insgesamt mehr als eine Million Wärmepumpen in Deutschland in Betrieb.²³⁸

Industrie: Dekarbonisierung mit Strom

Solange für globale Schlüsselprodukte wie Stahl und Zement tragfähige Alternativen nicht zur Verfügung stehen, führt an der Dekarbonisierung ihrer Fertigungsprozesse kein Weg vorbei.

Auch bei der Dekarbonisierung der energieintensiven Industrie ist Strom aus Wind und Sonne Ausgangspunkt vieler Hoffnungen. Alle seriösen Prognosen gehen von einem Scheitern des globalen Klimaschutzes aus, wenn es nicht gelingt, die weltweit wichtigsten CO₂-intensiven Industrieprozesse, vor allem die Herstellung von Stahl, Chemiegrundstoffen und Zement, weitgehend zu dekarbonisieren. Diese drei Branchen allein waren 2019 für etwa 18 Prozent der globalen CO₂-Emissionen verantwortlich und für die Hälfte der gesamten Emissionen des Industriesektors.²³⁹ Stahl, Chemie und Zement gehören zu den weltweit verbreiteten Massenprodukten, die im Globalen Norden als Garanten der vergangenen und auch noch der gegenwärtigen Wohlstandsentwicklung galten und weiter gelten.²⁴⁰ Damit handelt es sich um Schlüsselprodukte, die auch die bevölkerungsreichen Länder des Globalen Südens für ihre weitere Entwicklung dringend benötigen und die ihnen – solange tragfähige Alternativen nicht zur Verfügung stehen – weder vorenthalten werden können noch sollen. Strom aus Erneuerbaren Energien kann direkt oder indirekt helfen, einen großen Teil der Kohlendioxidemissionen zu vermeiden.

In Teilbereichen der Industrie kann der Strombedarf, der bisher aus fossilen Kraftwerken gedeckt wurde, direkt durch Strom aus Erneuerbaren Energien ersetzt werden und so CO₂-Emissionen verringern. Bei anderen Prozessen hilft nur der „Umweg“ über grünen Wasserstoff, der zuvor durch Elektrolyse von Wasser mit viel erneuerbarem Strom hergestellt wurde. Darüber hinaus sind prozessbedingte Emissionen zu betrachten, die bei der Herstellung bestimmter Produkte nicht vermieden werden können. In diesen Fällen kann Treibhausgasneutralität nur über die Abscheidung und sichere Lagerung des Kohlendioxids (Carbon Capture and Storage, CCS) oder die Entwicklung alternativer Produkte erreicht werden. Die bezüglich ihrer Treibhausgasemissionen wichtigsten Prozesse finden auch in Deutschland in der Stahlproduktion, bei der Zementherstellung und in der chemischen Industrie statt.

Für die Stahlproduktion soll der traditionelle Hochofenprozess, bei dem große Mengen CO₂ entstehen (1,7 Tonnen CO₂ pro Tonne Rohstahl) Schritt für Schritt abgelöst werden durch sogenannte Direktreduktionsverfahren. Dabei wird Wasserstoff statt Koks zur Reduktion des Eisenerzes eingesetzt, sodass in diesem Produktionsschritt kein Kohlendioxid mehr entsteht. Der „grüne Wasserstoff“ für den Prozess soll perspektivisch mit grünem Strom hergestellt werden. Das Verfahren zur Direktreduktion ist technisch weitgehend erprobt und würde die Treibhausgasbelastung der Stahlerzeugung bei flächendeckender Umstellung bis 2050 allein in Deutschland um 50 Millionen Tonnen CO₂ jährlich verringern. Die Einführung der neuen Produktionslinie muss dabei nicht warten, bis ausreichende Mengen an klimaneutral erzeugtem Wasserstoff zur Verfügung stehen. Anfänglich könnten die Anlagen auch mit Erdgas betrieben werden, was die CO₂-Belastung bereits um etwa zwei Drittel gegenüber dem Status quo reduzieren würde. Dabei muss von vornherein durch eine entsprechende Regulierung sichergestellt sein, dass mit zunehmender Verfügbarkeit Schritt für Schritt die Umstellung auf klimaneutralen Wasserstoff erfolgt.²⁴¹

Nicht zuletzt eröffnet Strom aus Erneuerbaren Energien traditionellen und energieintensiven Industrien gerade in Deutschland eine klimaverträgliche Perspektive im internationalen Wettbewerb, der für manche Branche schon endgültig verloren schien. Der Sprung in die Spitzengruppe der klimaverträglichen Technologieentwicklung könnte sich als Chance erweisen, nicht nur dem Klimaschutz zu dienen, sondern auch diese Branchen und ihre Produkte nicht vollständig an andere Weltregionen zu verlieren, in denen auf Basis der alten klimabelastenden Technik zu deutlich geringeren Kosten produziert werden kann. An Vorschlägen für eine solche Regulierung herrscht kein Mangel, weder in Brüssel noch in Berlin.²⁴²

Die Chemieindustrie stellt eine Vielzahl von Produkten her, die in unterschiedlichsten Bereichen eingesetzt werden. Für den Klimaschutz maßgeblich ist vor allem die energieintensive Grundstoffindustrie. Für ihre (teilweise) Dekarbonisierung muss zudem ein ganzes Bündel an neuen Schlüsseltechnologien weiterentwickelt werden, die alle eines gemeinsam haben: Sie verbrauchen viel Strom, sodass ihr großflächiger Einsatz nur sinnvoll ist, wenn der zusätzliche Strombedarf mit Erneuerbaren Energien gedeckt wird.

Zudem benötigen einige der neuen Technologien grünen Wasserstoff für ihren Einsatz, der wiederum aus erneuerbarem Strom hergestellt werden muss. Insgesamt kann die zusätzliche, direkte und indirekte Nutzung von grünem Strom in der chemischen Industrie schon bis 2030 zu Einsparungen ihrer CO₂-Emissionen von bis zu einem Fünftel führen.²⁴³

Bei der Zementherstellung sind etwa zwei Drittel der CO₂-Emissionen prozessbedingt. Sie können deshalb weder direkt noch indirekt durch erneuerbaren Strom vermieden werden. In Deutschland ist die Zementindustrie für knapp drei Prozent der CO₂-Emissionen verantwortlich.²⁴⁴ Günstiger erneuerbarer Strom könnte bei der Vermeidung des übrigen Drittels der Emissionen helfen. Diese entstehen bisher beim Einsatz fossiler Brennstoffe und sogenannter Ersatzbrennstoffe²⁴⁵ beim Brennen von Kalkstein zu Zementklinker in Drehrohröfen.

Megatrend 6:

Energiewende braucht
Wasserstoff – für
„besondere Aufgaben“

- **Wasserstoff ist kein Energieträger zur Fortsetzung des fossilen Zeitalters mit anderen Mitteln.**
- **Weil Wasserstoff für seine Herstellung den Einsatz großer Mengen an grünem Strom erfordert, bleibt er ein rares und teures Gut und sollte nur eingesetzt werden, wo energieeffizientere elektrische Lösungen oder andere Alternativen dauerhaft nicht zur Verfügung stehen.**
- **Langfristig garantiert nur grüner Wasserstoff, bei dessen Herstellung so gut wie keine Treibhausgase in die Atmosphäre gelangen, Klimaneutralität.**
- **Gleichzeitig ist der Einsatz von Wasserstoff unverzichtbar bei der Dekarbonisierung wichtiger Industriebranchen, in nicht zu elektrifizierenden Segmenten der Mobilität sowie als Back-up z. B. als Speicher für künftige Energiesysteme, die abhängig von volatilen Energieträgern sind.**
- **Wegen der über die Welt ungleich verteilten neuen Leitenergien aus Wind und Sonne wird Deutschland voraussichtlich nach der Energiewende auf Energieimporte – nun in Form oder auf Basis von Wasserstoff – angewiesen bleiben, jedoch in geringerem Umfang als bisher.**

Hoffnungsträger Wasserstoff – nicht zum ersten Mal wird das leichteste aller chemischen Elemente als eine Art Allheilmittel gegen die Herausforderungen der künftigen Weltenergieversorgung in Stellung gebracht. Das war schon so, als unter dem Eindruck schwerer Ölpreiskrisen seit den 1970er Jahren die Verknappung und letztlich das Versiegen der fossilen Brennstoffe als ultimative Bedrohung des energieintensiven Lebensstils des wohlhabenden Teils der Menschheit wahrgenommen wurde.^{246,247} Diese Befürchtung hat sich inzwischen erübrigt. In Zeiten der Klimakrise besteht die Herausforderung darin, die immer noch überreichlich in der Erdkruste gespeicherten fossilen Ressourcen dort zu lassen, wo sie sind (vgl. Abbildung 5).

Doch nicht nur die Vorstellung von den zu Neige gehenden fossilen Vorräten hat sich seit damals erledigt. Auch die Verheißung einer auf Erneuerbaren Energien basierenden, weltweiten „Wasserstoffwirtschaft“ als umweltschonende Alternative zum Ölzeitalter, die quasi eins zu eins die obsoleten fossilen Systeme ersetzen sollte, entpuppte sich bald schon als Hirngespinnst. Allerdings setzte sich damals die Erkenntnis nur langsam durch, dass Wasserstoff als sogenannter Sekundärenergieträger erst unter höchstem Aufwand mit sehr viel grünem Strom über die Wasserelektrolyse gewonnen werden musste.²⁴⁸

Nicht zuletzt deshalb war es zwischenzeitlich ruhig geworden um das flüchtige Molekül und die mit ihm verbundenen Verheißungen einer sauberen Zukunft im energetischen Überfluss. In der ersten Auflage dieses Reports über die „Megatrends der globalen Energiewende“ von 2015 fand Wasserstoff auf mehr als 70 Seiten nur ein einziges Mal Erwähnung. Wasserstoff als zwar begrenzter, jedoch unverzichtbarer Baustein der Energiewende war jenseits kleiner Fachzirkel vor sechs Jahren kaum ein Thema.

Dabei hatten die Staatschefs und die Regierungschefin der G7-Staaten in eben jenem Jahr 2015 – im Vorfeld der Weltklimakonferenz von Paris – die Richtungsänderung gerade eingeleitet, die dann die Wiedergeburt der Wasserstoffdebatte befeuerte. Im oberbayerischen Schloss Elmau riefen Barack Obama, Angela Merkel und Co. die „*Dekarbonisierung der Weltwirtschaft im Laufe dieses Jahrhunderts*“ als neues Ziel aus.²⁴⁹ Von nun an stand nicht nur in Deutschland mehr auf der Tagesordnung als der Ausstieg aus der fossilen Verbrennung. Jetzt ging es im Wortsinn ums Ganze, nämlich um die vollständige Dekarbonisierung ganzer Gesellschaften, inklusive ihrer jeweiligen energie- und emissionsintensiven Industrien.

Auch deshalb erlebt Wasserstoff nun seinen nächsten Hype. Allerdings wird das kleinste aller Moleküle nicht mehr wie in der Vergangenheit als „Öl des 21. Jahrhunderts“ beworben – zumindest nicht hierzulande –, sondern in einer realistischeren Rolle als vielseitig einsetzbarer „Stoff für besondere Aufgaben“.

Wasserstoff ist nicht das Öl des 21. Jahrhunderts

Trotz erheblicher Unterschiede in den Details zeigen sämtliche für Deutschland, Europa oder die Welt erdachten Energiewendeszenarien große Gemeinsamkeiten: Der Megatrend der Dekarbonisierung stützt sich vor allem auf Energieeffizienz und Elektrifizierung. Der Ausbau der Erneuerbaren Energien aus Photovoltaik und Windkraft muss den Löwenanteil der erzielbaren Treibhausgasreduktionen liefern. Das ist bei den Szenarien so, die die Klimaneutralität der EU in den Blick nehmen.^{250,251} In der deutschen Diskussion geht beispielsweise die Studie „Klimaneutrales Deutschland 2045“ von einer Vervierfachung der Stromerzeugung aus Erneuerbaren Energien aus, mit dem Ziel, den Elektrizitätsbedarf im Jahr 2045 zu fast 90 Prozent²⁵² direkt aus Wind, Sonne und Co. zu decken. Und auch die weltweiten Vorstellungen von einer nachfossilen Energiewelt, wie etwa der IEA-Report „Net Zero by 2050“ oder der „World Energy Transitions Outlook 2021 – 1.5 °C Pathway“ von IRENA²⁵³, folgen auf ihrem Weg zur Klimaneutralität bis Mitte des Jahrhunderts dem gleichen Muster.

Energieeffizienz, Erneuerbare Energien und eine weitgehende Elektrifizierung des Energiesystems bringen demnach die Energiewende weit voran. Aber klar bleibt immer auch: Niemals ist das allein die komplette Lösung. In keinem der Szenarien übernimmt erneuerbarer Strom 100 Prozent der Verantwortung für das neue Energiesystem. Dafür gibt es Gründe: Zum einen würde der Betrieb eines Energiesystems, das sich ausschließlich auf die direkte Nutzung von Strom aus Erneuerbaren Energien stützen wollte, exponentiell teurer, je mehr es sich der Vollversorgung annähert.²⁵⁴ Zum andern gibt es im Mobilitätssektor Bereiche, die bisher weder direkt mit Strom noch über die Zwischenspeicherung mit Batterien funktionieren. Schließlich entziehen sich auch grundlegende Industrieprozesse und die Produktion bestimmter chemischer Grundstoffe, die im bestehenden System zu hohen Treibhausgasemissionen führen, der Dekarbonisierung allein über Stromanwendungen.

Die Vision einer umfassenden Wasserstoffwirtschaft bleibt ebenso eine Illusion, wie die Vorstellung einer vollständig dekarbonisierten Welt ganz ohne den Einsatz von grünem Wasserstoff.

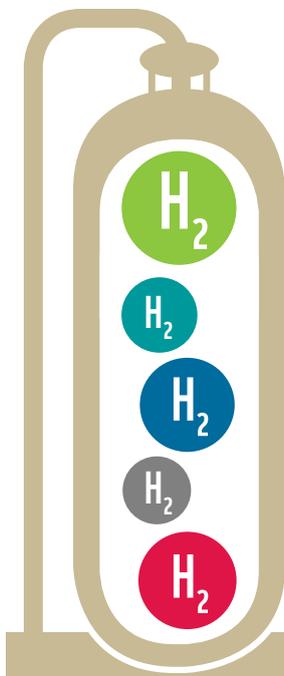
Für vollständige Klimaneutralität als Ziel braucht es also neben grünen Elektro-
nen (Strom aus Erneuerbaren Energien) auch grüne Moleküle (grüner Wasser-
stoff) als Ergänzung für Sektoren, die einer direkten Elektrifizierung weder heu-
te noch in der absehbaren Zukunft zugänglich sind. Die Energiewende braucht
den vielseitig einsetzbaren Wasserstoff also als Energieträger und als Roh- und
Brennstoff für Teile der Industrie und des Transportsektors. Mit anderen Wor-
ten: Wasserstoff ist unverzichtbar, weil ohne ihn das Ziel der Klimaneutralität,
das sich viele Staaten rund um den Globus für die Mitte dieses Jahrhunderts
gesetzt haben, nach heutigem Wissen nicht erreicht werden kann.

Aber: Die Vision einer umfassenden Wasserstoffwirtschaft bleibt, was sie immer
schon war: eine Illusion. Wasserstoff wird nicht gebraucht als Energieträger,
der am Ende Öl, Erdgas und Kohle eins zu eins ersetzt. Dafür ist er ein zu teures
Gut und die Umwandlung von Strom in Wasserstoff zu ineffizient. Seine Her-
stellung in der klimaneutralen Variante ist stromintensiv, seine Handhabung,
der Transport, vor allem aber zentrale Anwendungen sind systematisch wenig
effektiv, weil sie mit großen Umwandlungsverlusten verbunden sind. Als Resul-
tat münden praktisch alle Szenarien, die das künftige klimaneutrale Energie-
system regional oder weltweit modellieren, in einen Endzustand, in dem Was-
serstoff gezielt die Lücken füllt, die direkt- oder batterieelektrischen Lösungen
nicht zugänglich sind. Wasserstoff ist dafür unverzichtbar, wird aber auch nur
für diese „besonderen Aufgaben“ gebraucht.

Die begrenzte, gleichwohl wichtige Rolle von Wasserstoff in den dekarbonisier-
ten Gesellschaften des Jahres 2050 spiegelt sich in den Ergebnissen der Szena-
rien. Je nach Ausgestaltung im Detail trägt Wasserstoff zwischen 13 und 24 Pro-
zent zum Endenergiebedarf bei.²⁵⁵ Zur Wahrheit gehört aber auch, dass dieser
eher moderate Beitrag, soll er denn so aufgesetzt werden wie prognostiziert, ein
sehr kostspieliger sein wird. Soll im Jahr 2050 tatsächlich etwa ein Fünftel des
globalen Endenergiebedarfs aus Wasserstoff bereitgestellt werden, braucht es
Strommengen aus erneuerbaren oder anderen klimaneutralen Quellen, die je
nach Szenario in der Größenordnung der gesamten heutigen Weltstromproduk-
tion von 27.000 Terawattstunden pro Jahr liegen oder sie sogar deutlich über-
treffen.²⁵⁶

Dies lässt die Dimension der Herausforderung erahnen. Deutschland und
Europa haben mit der Ankündigung und Verabschiedung umfangreicher För-
derprogramme ihre Ambitionen bei der Etablierung von Wasserstoff als eine
neue, zusätzliche Säule der Energiewende angemeldet und stehen dennoch wie
alle anderen erst ganz am Anfang. Die Anschubhilfen in der Nationalen Was-
serstoffstrategie²⁵⁷ und ihrem europäischen Pendant²⁵⁸ sollen den industriellen
Einstieg in die Produktion und Nutzung von klimaschonendem Wasserstoff
auf Basis Erneuerbarer Energien auslösen. Nach einer Abschätzung von Ago-
ra Energiewende wären für den Markthochlauf auf EU-Ebene bis mindestens
2030 jährliche Fördersummen zwischen 10 und 24 Milliarden Euro notwendig,
finanziert voraussichtlich aus Einnahmen des CO₂-Zertifikatehandels und der
zusätzlichen CO₂-Bepreisung.²⁵⁹

Der Preis für grünen Wasserstoff übertrifft den, den die Industrie traditionell für treibhausgasintensiv erzeugten grauen Wasserstoff bezahlt, derzeit um das Zwei- bis Dreifache.²⁶⁰ Grauer Wasserstoff wird auf Basis von Kohlenwasserstoffen, meist Erdgas, über den Prozess der Dampfreformierung hergestellt oder in Elektrolyseanlagen, die überwiegend Strom aus fossilen Kraftwerken nutzen. Dieser Wasserstoff hat heute einen Anteil von 98 Prozent an der industriellen Nutzung. Damit die grüne Variante gegenüber der grauen konkurrenzfähig wird, müsste der CO₂-Preis auf mindestens 200 Euro pro Tonne steigen. Dies ist nicht absehbar, obwohl der bei der Herstellung von grünem Wasserstoff eingesetzte Strom aus Wind und Sonne Jahr für Jahr günstiger wird und auch die Elektrolyseure voraussichtlich von bevorstehenden Skaleneffekten profitieren. Staatliche Förderprogramme mit langem Atem sind also nötig, wenn grüner Wasserstoff zu einem wirksamen Faktor bei der Dekarbonisierung werden soll. Mindestens bis zum Beginn des nächsten Jahrzehnts wird es wohl dauern, bis ein Wasserstoffmarkt ohne staatliche Eingriffe funktioniert.²⁶¹ Bis auf Weiteres bleibt grüner Wasserstoff ein teures und vor allem rares Gut, das ohne staatliche Anschubfinanzierung weder erzeugt noch angewendet wird.



- Grün:** Erzeugung durch Elektrolyse von Wasser mit Strom aus Erneuerbaren Energien. Produktion ist CO₂-frei, wenn der eingesetzte Strom vollständig aus erneuerbaren Quellen stammt.
- Türkis:** Erzeugung durch Pyrolyse (thermische Spaltung) von Kohlenwasserstoffen, vornehmlich mit Erdgas. Dabei entsteht als weiteres Reaktionsprodukt fester Kohlenstoff. Methode wird noch nicht groß-industriell eingesetzt, könnte Kostenvorteile generieren, da Kohlenstoff weiterverwendet oder deponiert werden kann.
- Blau:** Erzeugung über Dampfreformierung von Kohlenwasserstoffen. Sie ist mit einem CO₂-Abscheidungs- und Speicherverfahren gekoppelt (CCS). Das CO₂ gelangt so größtenteils nicht in die Atmosphäre.
- Grau:** Erzeugung über Dampfreformierung von Kohlenwasserstoffen, meist Erdgas. Dabei werden, je nach eingesetztem Ausgangsstoff, erhebliche Mengen CO₂ freigesetzt.
- Rot:** Erzeugung durch Elektrolyse von Wasser mit klimaneutralem Strom aus Atomkraftwerken.

Abbildung 37:

Die Wasserstoff-Farbenlehre; Quellen: BMBF, Öko-Institut^{262,263}

Aus all dem ergibt sich für die Politik die Notwendigkeit, nicht nur im Zeitraffertempo die Rahmenbedingungen für eine neu entstehende Branche zu entwickeln und bereitzustellen, sondern darüber hinaus klare Prioritäten zu setzen, in welchen Sektoren der Wasserstoff eingesetzt werden soll, der in der Hochlaufphase und danach erzeugt wird.

Wasserstoffstrategien: Die Steuerungsaufgabe der Politik

Bei der Etablierung einer grünen Wasserstoffinfrastruktur, die die hergebrachten Wasserstoff-Wertschöpfungsketten ohne Klimaschutzbezug hinter sich lässt, müssen zwei strategische Ziele parallel verfolgt werden:

1. Der Hochlauf einer grünen Wasserstoffproduktion mit dem Ziel einer schnellen Kostensenkung durch Skaleneffekte und parallel der Verteuerung der traditionellen fossilen H₂-Erzeugung durch steigende CO₂-Kosten.
2. Die Konzentration aller Anwendungen von grünem Wasserstoff in Bereichen, für die energieeffizientere Dekarbonisierungspfade nicht zur Verfügung stehen und in denen frühzeitig spürbare Treibhausgaspotenziale erschlossen werden können.

Insbesondere der zweite Ansatz ist entscheidend, weil die Wasserstoffproduktion mit erneuerbarem Strom wegen der dabei unumgänglichen Umwandlungsverluste gegenüber der direktelektrischen Nutzung dieses Stroms immer einen zusätzlichen Kapazitätsausbau der Erneuerbaren Energien erfordert. Zusätzliche Effizienzverluste kommen bei einigen H₂-Anwendungen noch hinzu, weil auch sie im Vergleich zu einem direkt- oder batterieelektrischen Einsatz des grünen Stroms mit hohen Umwandlungsverlusten verbunden sind. Wo immer ein effizienter direktelektrischer Einsatz von grünem Strom möglich ist, sollte deshalb auf den Umweg über Wasserstoff verzichtet werden.

Trotzdem sollte es keine Missverständnisse geben: Es geht in den kommenden Jahren bei der Wasserstoffstrategie um den effizienten Einsatz knapper öffentlicher Mittel, nicht darum, Technologiepfade zu verbieten, wenn Unternehmen diese weiterverfolgen wollen. Die Richtschnur der Politik muss aber sein, öffentliche Gelder jeweils in den Technologiepfad zu investieren, der mit dem geringsten Energieeinsatz den größten Klimaschutzeffekt verspricht.

Bisher hat im Rahmen der deutschen Wasserstoffstrategie die notwendige Priorisierung allerdings nicht stattgefunden, sondern es droht eine Verteilung der zur Verfügung stehenden Mittel nach dem Gießkannenprinzip.²⁶⁴

Wohin mit dem grünen Wasserstoff?

Wasserstoff kann aufgrund seiner vielseitigen Einsetzbarkeit im Prinzip fast überall, in der Industrie, im Verkehrssektor, in der Energiewirtschaft und sogar in Gebäuden zur Dekarbonisierung beitragen. Weil grüner Wasserstoff aber auf absehbare Zeit ein sowohl knappes als auch teures Gut bleiben wird, ist zu hoffen, dass sich die Auswahl der künftigen Einsatzbereiche letztlich an den erzielbaren Klimaschutzeffekten orientieren wird. Das gilt weltweit, nicht nur für Deutschland und Europa. Erste Hinweise für eine solche Priorisierung von Anwendungen ergeben sich aus zahlreichen Modellierungen künftiger Energiesysteme, die in jüngster Zeit unter dem Druck der Klimakrise entstanden sind.

Aus den Szenarien, die meist auf Klimaneutralität bis spätestens Mitte des Jahrhunderts zielen, lassen sich drei Kategorien von Anwendungen identifizieren; nämlich Anwendungen,

- » deren umfassende Verfolgung übereinstimmend erwartet und befürwortet wird,
- » deren Zukunft aufgrund dynamischer technologischer Entwicklungen noch unterschiedlich bewertet wird,
- » die in den meisten oder allen Szenarien ausscheiden, weil sich effizientere Lösungen ohne Wasserstoff anbieten oder bereits durchsetzen.

Alternativlos

A	Düngemittel • Hydrierung • Methanol • Hydrocracken • Entschwefelung
B	Schifffahrt* • Mobile Maschinen und Geräte • Chemischer Rohstoff • Stahl • Langfrist-Stromspeicher
C	Langstreckenflüge* • Küsten- und Binnenschifffahrt • Entlegener Zugverkehr • Oldtimer-Fahrzeuge* • Dezentrale Methanisierung
D	Mittelstreckenflüge • Lkw (Fernverkehr) und Reisebusse • Industrielle Hochtemperaturwärme • Stromerzeugung
E	Kurzstreckenflüge • Lokale Fähren • Gewerbliche Raumwärme • Inselnetze • Grüner Energieimport • Unterbrechungsfreie Stromversorgung
F	Leichtflugzeuge • Ländlicher Zugverkehr • Lkw (Nahverkehr) • Verteilerverkehr • Industrielle Niedertemperaturwärme • Wohnraumwärme
G	U-Bahnen und Stadtbusse • Brennstoffzellen-Pkw • Stadtlieferfahrzeuge • Zwei- und Dreiräder • Massenproduktion von E-Fuels • Regelleistung

Unwirtschaftlich

* Sehr wahrscheinlich mittels Wasserstoff erzeugte E-Fuels oder Ammoniak

Abbildung 38:

Einsatzbereiche für sauberen Wasserstoff und dessen Wirtschaftlichkeit; Quelle: Gregor Hagedorn, Wolf-Peter Schill, Martin Kittel²⁶⁵

Wasserstoff für die Industrie

Auch in einer zunehmend dekarbonisierten Welt wird die Industrie vorerst der wichtigste Abnehmer von dann klimaneutralem Wasserstoff sein. Vor allem wird grüner Wasserstoff zum Schlüssel der Dekarbonisierung energie- und emissionsintensiver Industriebranchen, wo es bis auf Weiteres keine Alternativen gibt. Dazu gehört die Eisen- und Stahlproduktion, die allein weltweit für etwa sieben Prozent der CO₂-Emissionen verantwortlich ist (siehe Megatrend 5).²⁶⁶ Hier wird Wasserstoff das bisher eingesetzte Reduktionsmittel Koks Kohle ablösen. Vordringlich ist die Umsetzung neuer dekarbonisierter Herstellungspfade insbesondere in Situationen, in denen in naher Zukunft Investitionen in Ersatzanlagen anstehen. Wird hier der Technologiewechsel verpasst, drohen Neuinvestitionen in alte klimabelastende Technologien und Anlagen, die dann weit über 2050 hinaus betrieben werden.

Ähnlich wie für Eisen und Stahl gilt dies auch für die Zementherstellung und Teile der Grundstoffchemie, insbesondere für die Herstellung von Kunststoffen, wo Wasserstoff auch als industrieller Rohstoff eingesetzt wird. Auch bei der industriellen Herstellung von Ammoniak (NH₃) sowie für den Einsatz in Raffinerien kann Wasserstoff in der grünen Variante relativ kurzfristig wirksame Emissionsminderungen auslösen.²⁶⁷

Ein Teil der Treibhausgasemissionen der Industrie stammt derzeit aus der Bereitstellung von Hochtemperaturprozesswärme. Sie kann in einigen Anwendungen effektiver direktelektrisch mit erneuerbarem Strom dekarbonisiert werden, in anderen Fällen kann Wasserstoff das Mittel der Wahl sein.

Wasserstoff im Transportsektor

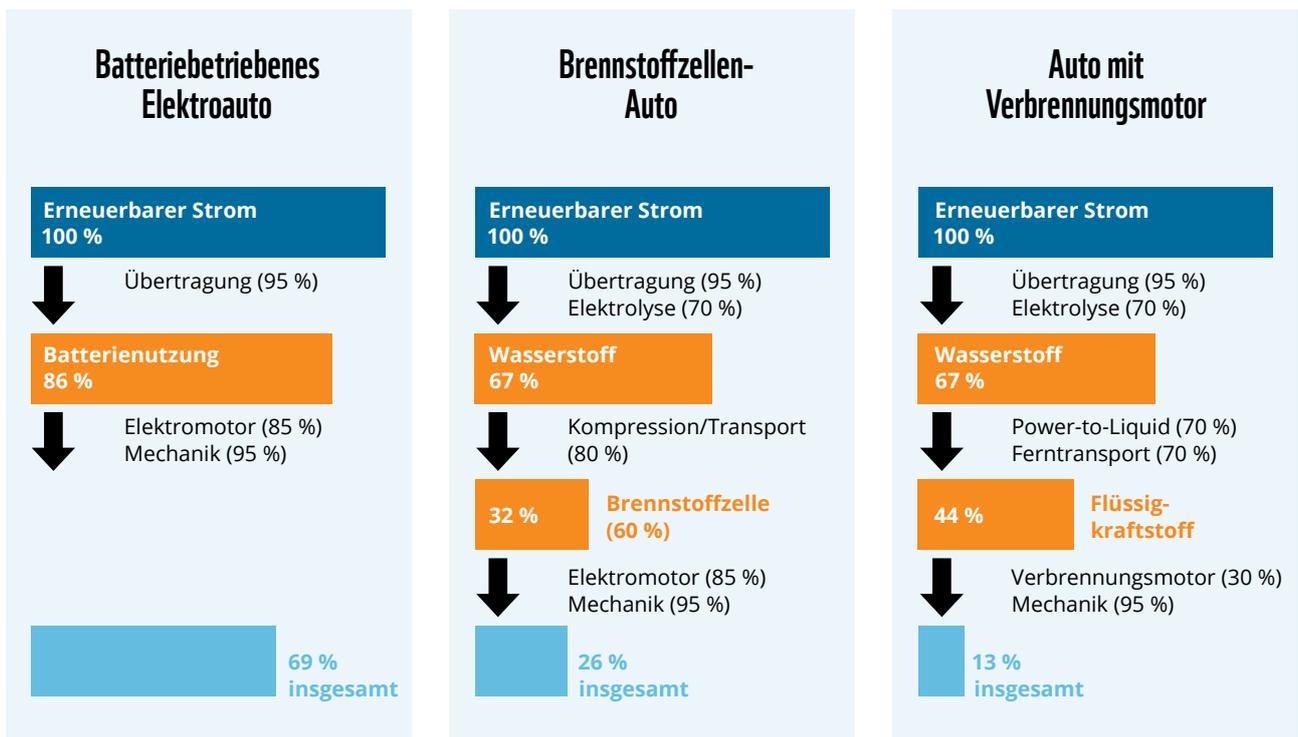
Im Transportsektor hat sich der zu erwartende Anwendungsbereich für grünen Wasserstoff wegen der dynamischen Fortschritte in der Batterietechnik in den vergangenen Jahren deutlich verkleinert, insbesondere weil sich damit im Pkw-Bereich der Batterieantrieb gegenüber dem Wasserstoffauto mit Brennstoffzellentechnik durchsetzt.

Dennoch bleiben Kernanwendungen, in denen Wasserstoff eine wichtige Rolle spielt. Dazu gehören vor allem der Langstreckenflugverkehr und die Hochseeschifffahrt. Kerosin und Schiffsdiesel werden schrittweise umgestellt werden müssen auf synthetische Flug- und Schiffstreibstoffe auf Basis von (grünem) Wasserstoff. Inwieweit Kurzstreckenflüge und Binnenschifffahrt ebenfalls diesen Weg gehen, mit batterieelektrischen Technologien konkurrieren (oder im Fall der Kurzstreckenflüge in einer dekarbonisierten Gesellschaft nicht mehr angeboten werden), hängt von der weiteren Entwicklung ab.

Immer mehr Lkw-Hersteller bereiten sich auf die Serienfertigung batterieelektrisch angetriebener Laster vor. Als Option im Spiel bleibt aber auch die Umstellung auf Brennstoffzellen-Lkws, die eine entsprechende Tankinfrastruktur für den Schwerlastfernverkehr voraussetzen würde.

Die Diskussion über den motorisierten Individualverkehr geht zwar in der Öffentlichkeit weiter, doch spricht hier infolge der Fortschritte in der Batterietechnik, der Entwicklung in China und der eindeutigen Effizienzvorteile alles für die Elektromobilität ohne Umweg über den Einsatz von Wasserstoff oder die Brennstoffzelle (Abbildung 39). Alle großen deutschen Automobilhersteller setzen inzwischen auf Elektromobilität.²⁶⁸

Noch weniger realistisch erscheint wegen weiterer Effizienzverluste der Einsatz synthetischer Kraftstoffe in Pkws mit konventionellen Verbrennungsmotoren. Das Gleiche gilt inzwischen auch für den Lieferverkehr mit Kleintransportern.



Hinweis: Einzelwirkungsgrade in Klammern. Durch Multiplikation der Einzelwirkungsgrade ergeben sich die kumulierten Gesamtwirkungsgrade in den Kästen.

Abbildung 39:

Einzel- und Gesamtwirkungsgrade von Pkws mit unterschiedlichen Antriebskonzepten;

Quellen: Agora Verkehrswende, Agora Energiewende²⁶⁹

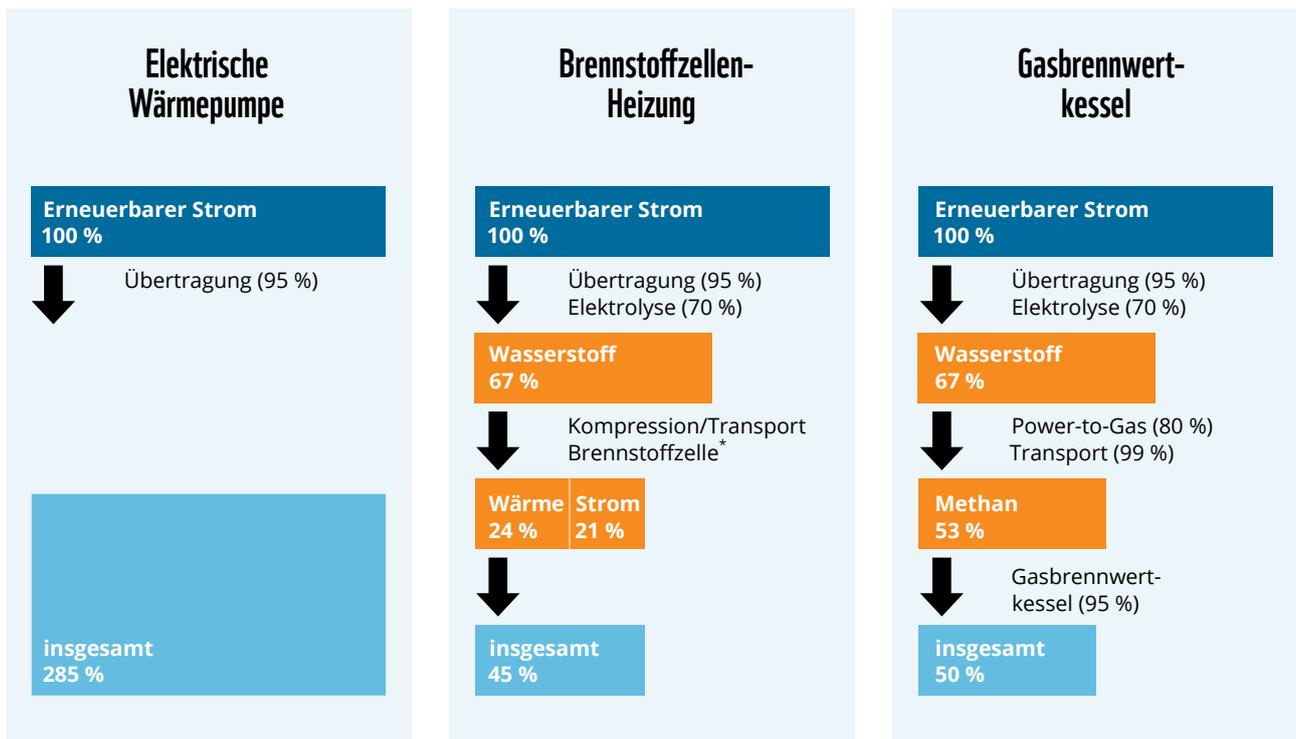
Wasserstoff im Stromsektor

Inwieweit Wasserstoff im dekarbonisierten Stromsektor eine Rolle spielen wird, hängt entscheidend von den spezifischen Gegebenheiten des jeweiligen Landes ab. Ein großer Anteil an fluktuierenden Erneuerbaren Energien, insbesondere aus Wind und Sonne (wie er sich beispielsweise in Deutschland abzeichnet), erfordert steuerbare Kraftwerke oder andere zuverlässige Back-up-Systeme insbesondere für die sogenannte kalte Dunkelflaute, also längere Zeiträume, in denen in der kalten Jahreszeit weder der Wind weht noch die Sonne scheint.

In Deutschland können mit grünem Wasserstoff betriebene Gaskraftwerke auf lange Sicht die Sicherheitsreserve bilden. Bestehende Gaskraftwerke werden entsprechend umgerüstet, Neuanlagen und Infrastrukturen von vornherein „H₂-ready“²⁷⁰ errichtet.²⁷¹ Diese Kraftwerke kommen in der Regel nur wenige Stunden im Jahr zum Einsatz. Die eigentliche Herausforderung besteht deshalb darin, durch eine entsprechende Regulierung ihre Refinanzierung sicherzustellen, damit diese Investitionen auch tatsächlich ausgelöst werden. Trotzdem wird perspektivisch grüner Wasserstoff in erheblichem Umfang in diesem Bereich eingesetzt werden müssen, um die Sicherheit der Versorgung dauerhaft garantieren zu können. Dies gilt, solange keine alternativen Back-up-Systeme zuverlässig zur Verfügung stehen. Dazu gehört ein erweiterter transnationaler Stromverbund innerhalb der EU, zum Beispiel der bereits angelaufene Stromaustausch mit Wasserkraftkapazitäten in Skandinavien, oder darüber hinaus. Eine bereits eingesetzte Option ist die Flexibilisierung großer Stromverbraucher (Demand Response).²⁷² Auch weitere Technologien zur Langzeitspeicherung – zum Beispiel Druckluftspeicher, fortschrittliche geothermische Energiesysteme, thermische Speicher, Großbatterien – können in der Perspektive als Alternative zu wasserstoffbasierten Gaskraftwerken Bedeutung gewinnen. Alle diese Alternativen würden den Bedarf an grünem Wasserstoff in diesem Sektor mindern.

Wasserstoff im Gebäudesektor

In den Szenarien für eine vollständig dekarbonisierte Zukunft spielt Wasserstoff zum Heizen von Gebäuden oder für die Warmwasserbereitung nur eine geringe Rolle. Das gilt insbesondere für den Bereich der Ein- und Zweifamilienhäuser, die schrittweise energetisch saniert und anschließend mit Wärmepumpen ausgestattet werden. So können durch die Nutzung der erneuerbaren Umgebungswärme Gesamtwirkungsgrade von mehreren hundert Prozent erzielt werden. Im Jahr 2030 sollen in Deutschland fünf bis sechs Millionen Wärmepumpen installiert sein und 14 Millionen bis 2045, wenn die Klimaneutralität erreicht sein soll. Damit werden Umgebungswärme und erneuerbarer Strom allmählich das klimabelastende Heizen mit Erdgas ablösen. Dies ermöglicht einen bei Weitem effizienteren Einsatz des regenerativen Stroms aus Wind und Sonne gegenüber einer Umstellung von Erdgas auf grünen Wasserstoff unter Weiternutzung des bestehenden Gasverteilnetzes (Abbildung 40).²⁷³ Diese Methode ist überall einsetzbar und nützlich, wo es Jahreszeiten gibt wie in Deutschland – und ein Stromnetz.



* Wirkungsgrade:
80 Prozent (Kompression/Transport) und 85 Prozent (Brennstoffzelle insgesamt, davon 45 Prozent Wärme, 40 Prozent Strom)

Hinweis: Einzelwirkungsgrade in Klammern. Durch Multiplikation der Einzelwirkungsgrade ergeben sich die kumulierten Gesamtwirkungsgrade in den Kästen. Für die Wärmepumpe wird eine Jahresarbeitszahl von drei angenommen.

Abbildung 40:

Heizsysteme der Zukunft im Effizienzvergleich; Quellen: Agora Verkehrswende, Agora Energiewende²⁷⁴

Obwohl die Physik hier eine eindeutige Sprache spricht, ist um die Zukunft des Heizens in Deutschland schon jetzt ein harter Konflikt entstanden, weil weder die Gaswirtschaft noch Teile der traditionellen Heizungshersteller einen Großteil ihres bisherigen Geschäftsmodells aufgeben wollen. Also wird kräftig für den wasserstoffbasierten Wärmemarkt der Zukunft geworben. Das zentrale Argument lautet, dass auf diese Weise ein schneller Wasserstoff-Markthochlauf gefördert werde.²⁷⁵

Tatsächlich wird Wasserstoff voraussichtlich im Wärmemarkt der Zukunft eine begrenzte Rolle spielen können, jedoch nicht bei den Ein- und Zweifamilienhäusern, sondern im Bereich der Fernwärmeversorgung. In vielen Städten ist heute ein Großteil der Wohneinheiten an fossil befeuerte Heiz(kraft)werke angeschlossen. Diese Anlagen werden im Zuge des Ausstiegs aus der fossilen Verbrennung schrittweise ersetzt durch Anlagen auf Basis erneuerbarer Wärme, eine systematische Abwärmenutzung und neu zu installierende Großwärmepumpen. Allerdings stehen der flächendeckenden Einführung von Wärmepumpen, die mit vergleichsweise niedrigen Temperaturen arbeiten, in urbanen Räumen noch einige Herausforderungen im Wege, vor allem die häufig schlechte Dämmung von Altbauten, der Netz- und der Platzmangel, insbesondere bei städtischen Wohnungen. Auch gibt es Situationen, in denen keine Wärmepumpen installiert werden können oder weder die Wärmemenge noch die in den Fernwärmenetzen erreichbaren Temperaturen ausreichen, um die angeschlossenen Heizungen zu betreiben. Hier kann grüner Wasserstoff einspringen und die sogenannte Residuallast decken.

Wasserstoff: Langfristig alles auf grün

Wasserstoff steht als Energieträger und mehr noch als Rohstoff einer dekarbonisierten Industrie für das Versprechen der drei wichtigsten Wirtschaftsböcke, die Welt binnen einer Generation komplett auf den Pfad globaler Nachhaltigkeit zurückzuführen. Er ist der Stoff für die schwierigen Fälle, in denen sich Klimaneutralität nicht auf dem direkten Weg über Strom aus erneuerbaren Quellen erreichen lässt. Das bedeutet, dass mindestens in der langen Perspektive auch die Herstellung des Wasserstoffs möglichst vollständig klimaneutral erfolgen muss.

Wasserstoff kann seine Dekarbonisierungsfunktion nur vollständig erfüllen, wenn er die Atmosphäre nicht selbst bei seiner Herstellung mit Treibhausgasen belastet. Dennoch kann es Situationen geben, in denen der Einsatz von blauem (und nach einer erfolgreichen Technologieentwicklung möglicherweise auch türkistem) Wasserstoff in der Hochlaufphase der Wasserstoffnutzung hilft, ambitionierte Klimaschutzziele schneller zu erreichen. Der mit Dampfreformierung und CCS erzeugte blaue Wasserstoff ist aufgrund begrenzter CO₂-Abscheideraten und der Vorkettenemissionen von Erdgas nie komplett klimaneutral. In welchem Ausmaß die Vorkette, also schon die Gewinnung, der Transport und das weitere Handling von Methan, die Atmosphäre belastet, ist Gegenstand kontroverser Diskussionen.²⁷⁶ Dennoch kann blauer Wasserstoff die Klimabelastung im Vergleich zu konventionell aus Erdgas hergestelltem grauem Wasserstoff reduzieren (Abbildung 37).

Im Ergebnis können über diesen Pfad schneller größere Wasserstoffmengen beispielsweise zur Dekarbonisierung der Stahlherstellung bereitgestellt werden als über den Pfad der Wasserelektrolyse allein, der zunächst den (zeitaufwändigen) Zubau zusätzlicher Windenergie- und Solaranlagen voraussetzt. Bedingung für eine solche zweigleisige Strategie wäre aber, dass parallel der Markthochlauf von grünem Wasserstoff konsequent verfolgt wird, sodass auf lange Sicht eine komplett klimaneutrale Versorgung mit grünem Wasserstoff möglich wird und sogenannte Lock-in-Effekte zuverlässig vermieden werden. Die sukzessive Beendigung des Einsatzes von erdgasbasiertem blauem Wasserstoff muss durch entsprechende Regulierung und Überwachung gewährleistet sein.²⁷⁷

Wichtig für einen erdgasbasierten Einstieg in die grüne Wasserstofftechnologie ist vor allem der Nachweis, dass dieser tatsächlich weitgehend treibhausgasfrei erfolgt. Inwieweit dies gelingt, hängt von zahlreichen Faktoren ab, die je nach Standort der Erdgasförderung, den Transportentfernungen, der Vollständigkeit der CO₂-Abscheidung nach der Dampfreformierung und der Dichtigkeit bei der anschließenden Lagerung stark variieren. Ziel muss es sein, den sogenannten Methanschlupf, Lecks beim Transport und in der H₂-Infrastruktur weiter zu reduzieren.

Wohin und woher kommt der Bedarf an klimaneutralem Wasserstoff?

Überall auf der Welt sollte gelten, dass Wasserstoff nur dort eingesetzt wird, wo (elektrische) Alternativen fehlen. Allerdings geht es in vielen Ländern zunächst darum, eine eigene klimaneutrale Stromversorgung mit Hilfe Erneuerbarer Energien aufzubauen oder ihre Industrialisierung auf dieser Basis voranzubringen. Gerade in Ländern mit herausragendem Potenzial bieten die Erneuerbaren Energien Chancen für eine nachholende Industrialisierung, die zugleich das Klima schont. Voraussetzung ist eine Finanzierungsbasis, zu der die Ländern des Globalen Nordens im Rahmen ihrer Verpflichtungen im internationalen Klimaschutz, aber auch darüber hinaus beitragen müssen.

Dabei kann grüner Wasserstoff eine wesentliche Rolle spielen. Schließlich bieten sich in mit Wind und Sonne gesegneten Weltregionen auch Möglichkeiten zum Aufbau neuer, exportorientierter Wirtschaftskluster, die Wasserstoff oder seine Derivate als Exportgut vermarkten oder auch daraus abgeleitete Produkte wie Chemiegrundstoffe oder Stahl. Doch gerade diese Potenziale für neue H₂-Cluster sind abhängig vom Ausbau der sauberen Energieerzeugung in diesen Regionen.

Mit Blick auf Deutschland und Europa gehen die meisten Energieszenarien davon aus, dass ein künftig vorrangig auf Sonne und Wind gegründetes Energie- und Wirtschaftssystem nicht allein auf Basis dieser einheimischen Erneuerbarer Energien vollständig dekarbonisiert werden kann. Insbesondere nicht, wenn dazu auf erhebliche Mengen Wasserstoff zurückgegriffen werden muss. Dafür reicht die Fläche in einem dicht besiedelten Land mit hohem Energiebedarf voraussichtlich nicht aus, jedenfalls solange keine anderen natürlichen Potenziale für steuerbare Kraftwerke zum Beispiel auf Basis von Wasserkraft

zur Verfügung stehen. Wie hoch der Importanteil von Wasserstoff sein wird, hängt unter anderem davon ab, wie schnell und wie grundlegend sich die erneuerbaren Energietechnologien im jeweiligen Land weiterentwickeln (siehe Megatrend 3).

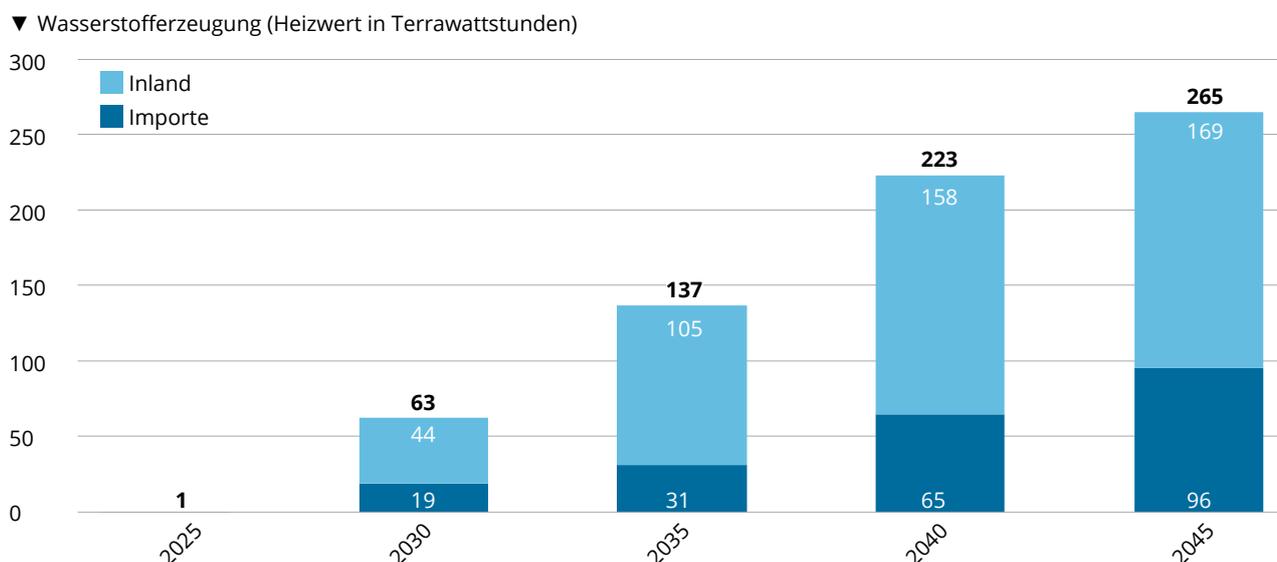


Abbildung 41:

Wasserstoff in Deutschland: für die Industrie, zur Absicherung gegen die Dunkelflaute und für Fernwärme; Quelle: Prognos, Öko-Institut, Wuppertal Institut²⁷⁸

Schätzungen zufolge liegt die Nachfrage nach treibhausgasfreiem Wasserstoff in Deutschland im Jahr 2045, nach Vollzug der Dekarbonisierung, bei 265 Terawattstunden (das entspricht acht Millionen Tonnen des Brennstoffs).²⁷⁹ Die Mehrzahl der Prognosen geht davon aus, dass Deutschland seinen Importbedarf an Wasserstoff zum größeren Teil aus dem europäischen Ausland decken wird. Ein weiterer Teil der Importe wird demnach über Pipelines oder Schifffahrtswege aus Weltregionen mit günstigen Voraussetzungen für die Produktion von mit erneuerbarem Strom erzeugtem Wasserstoff eingeführt werden.²⁸⁰

Zusätzlich zu Wasserstoff werden weitere, auf erneuerbarem Strom basierende Energieträger eingesetzt. Insgesamt ergibt sich so in dem genannten Szenario für 2045 ein Bedarf an Wasserstoff und sonstigen synthetischen Brenn- und Rohstoffen in Höhe von 422 Terawattstunden, von denen wahrscheinlich mehr als Dreiviertel importiert werden müssen.²⁸¹ Das klingt etwa im Vergleich zur gesamten deutschen Stromerzeugung, die 2020 rund 572 Terawattstunden umfasste,²⁸² auf den ersten Blick wie der Aufbau einer extrem hohen Importabhängigkeit. Die Aussage relativiert sich jedoch angesichts der aktuellen Importabhängigkeit Deutschlands von Erdöl, Erdgas und Kohle von umgerechnet etwa 2.600 Terawattstunden.²⁸³ Die Importabhängigkeit Deutschlands basiert derzeit auf nur wenigen Ländern und ist somit doppelt kritisch zu bewerten. Auch wenn eine Abhängigkeit von Importen bei Wasserstoff zu einem Teil bestehen bleibt, wird diese jedoch von mehr Ländern getragen, was einen Vorteil in puncto Energiesicherheit darstellt.

Megatrend 7:

Ohne Digitalisierung
keine Energie-
wende und keine
Dekarbonisierung

- **Die Digitalisierung der Energiebranche ist beides: Voraussetzung und Schlüssel für ein zuverlässiges und zukunftsfähiges Energiesystem.**
- **Bei der Umsetzung der Energiewende wachsen IT- und Energiesektor zusammen mit dem Ziel, Energieangebot und Energiebedarf zu jeder Zeit zur Deckung zu bringen.**
- **Künstliche Intelligenz wird schon in wenigen Jahren helfen, das neue, smarte Energiesystem effizienter, kostengünstiger und sicherer zu machen.**
- **Digitaler Wandel und Dekarbonisierung befeuern sich gegenseitig und transformieren alle Kernindustrien – überall auf der Welt.**

Die Digitalisierung gibt es auch ohne Energiewende, die Energiewende jedoch nicht ohne Digitalisierung. Das ist die erste denkwürdige Erkenntnis im Zusammenhang mit dem Megatrend, um den es im Folgenden gehen soll. Die Energiewende auf Basis fluktuierender Erneuerbarer Energien kann ohne umfassende Digitalisierung ihr Potenzial nicht ausschöpfen. Insofern ist die an sich wichtige Debatte über die Größe des ökologischen Fußabdrucks, den der allumfassende digitale Wandel von Wirtschaft und Gesellschaft bezogen auf das Weltklima hinterlässt, im Zusammenhang mit den Megatrends der Energiewende von begrenzter Bedeutung. Wir haben schlicht nicht die Wahl.

Richtig bleibt: Vor dem Hintergrund der Klimakrise muss die digitale Transformation, wie alle künftige Wirtschaften, möglichst energie- und ressourceneffizient gestaltet werden – mit energieeffizient hergestellten Geräten, mit Rechenzentren, die ihren Energiebedarf intelligent drosseln und möglichst klimaneutral decken und mit digitalen Infrastrukturen, die nicht unnötig aufgebläht sind. Doch dies unterscheidet den weltweiten Siegeszug der Informations- und Kommunikationstechnologien in Zeiten des Klimawandels nicht von anderen Branchen und Sektoren der Wirtschaft. In zahlreichen Studien wird versucht, den Klimaeffekt des durch die Digitalisierung bedingten zusätzlichen Wachstums, der Milliarden Geräte, der Infrastrukturen und der bei ihrem Betrieb benötigten Energie abzuschätzen. Demnach können aktuell etwa 1,8 bis 3,2 Prozent der globalen Treibhausgasemissionen diesem Bereich zugeordnet werden („direkte Effekte“).

Doch gleichzeitig entfaltet die Digitalisierung ihr Potenzial vor allem als umfassende Effizienztreiberin durch die intelligente Verknüpfung der kleinteiligen erneuerbaren Energieträger im neuen Energiesystem (z. B. Laststeuerung), durch Einsparungen im öffentlichen Personenverkehr oder dessen Ersatz (z. B. Home Office), durch eine intelligente Transportlogistik (z. B. weniger Leerfahrten), beim Heizen und Kühlen von Gebäuden (z. B. automatisierte Heizungssteuerung), durch die energetische Optimierung von Produktionsprozessen in der Industrie und bei der Ausbringung von Düngemitteln in der Landwirtschaft. Diesen alle Bereiche umfassenden, sogenannten „indirekten Effekten“ wird in den Studien eine Reduktion von Treibhausgasemissionen um bis zu 20 Prozent zugeschrieben.²⁸⁴

Energiewende sofort – die Illusion der frühen Jahre

Als die Energiewende-Debatte schon bald nach der Veröffentlichung des Berichts „Die Grenzen des Wachstums“ des Club of Rome im Jahr 1972 erstmals die Öffentlichkeit elektrisierte, gab es unter den Anhänger:innen dieser Denkrichtung wohl niemanden, der sich die Umkehr bis Mitte des 21. Jahrhunderts vorstellte.²⁸⁵ In Deutschland veröffentlichte das damals eben erst gegründete Öko-Institut 1980 die Studie „Energiewende – Wachstum und Wohlstand ohne Erdöl und Uran“.^{286,287} In dem dort entwickelten Szenario sollte vor allem eine effizientere Energienutzung den damals exponentiell steigenden Energieverbrauch eindämmen. Erneuerbare Energien sollten perspektivisch die Hälfte zur Versorgung beisteuern, „heimische Kohle“ die andere Hälfte. Vor allem aber wurde aufs Tempo gedrückt. Nicht nur der Ausstieg aus der Atomenergie sollte nach den Vorstellungen der frühen Anti-AKW-Bewegung „sofort“ erfolgen, auch der Rest der Energiewende wurde seinerzeit in sehr überschaubaren Zeiträumen erwartet.

Rückblickend ist es eine Binsenwahrheit: Selbst bei bestem politischem Willen (den es nicht gab) und maximalen technisch-wissenschaftlichen Anstrengungen zur Umsetzung der Ideen (die es auch nicht gab) war die Vorstellung einer „Energiewende sofort“ reine Phantasie. Es fehlte praktisch alles zu ihrer Umsetzung: bezahlbare Erzeugungs- und effiziente Anwendungstechnologien, Infrastrukturen wie Stromnetze für ein dezentrales Energiesystem. Vor allem aber fehlte die Digitalisierung, ohne die ein Energiesystem auf Basis von Millionen fluktuierend stromproduzierenden Windenergie- und Solaranlagen nicht denkbar war und ist.

Das neue Stromsystem: Komplexer und sicherer?

Auf der anderen Seite startete – vor allem ausgelöst durch die Regelungen des deutschen Erneuerbare-Energien-Gesetzes – der Siegeszug der Wind- und Solarenergie mit anfangs allenfalls punktueller Unterstützung durch neue digitale Möglichkeiten. Die digitale Ausstattung der beginnenden Energiewende war zu dieser Zeit aber auch noch nicht systemrelevant. Einen Anteil von einigen Prozent volatiler Stromeinspeisung aus Sonne und Wind verkräftete das traditionelle Stromsystem ohne größere technische Veränderungen. Doch die Zeit des Nischendaseins der neuen Erneuerbaren Energien erwies sich bald als Übergangsphase. Je höher der Anteil der volatilen Energien aus Wind und Sonne an der Stromversorgung wurde, umso dringlicher stellte sich die Frage: Was, wenn die Sonne nicht scheint und der Wind nicht weht? Die Frage war und ist naheliegend, die Antwort heute ist beruhigend: Im Jahr 2021, mehr als vierzig Jahre nach dem Start der Diskussion über harte und weiche Energiepfade im Deutschen Bundestag,²⁸⁸ sind alle Technologien und Verfahren zur Lösung dieser zentralen Systemfrage im Prinzip verfügbar.

**Möglicherweise
gebührt die größte
Faszination der
Perspektive, dass
sich auf Basis von
Wind und Sonne ein
ebenso zuverlässiges
Energiesystem
errichten lässt wie
auf Basis von
Kohle, Öl, Erdgas
und Uran.**

Vielleicht ist die aufregendste Nachricht auf dem Weg in das neue Energiezeitalter deshalb gar nicht die Dezentralität des neuen Energiesystems. Diese ergibt sich zwangsläufig aus der Physik der verfügbaren Schlüsseltechnologien, die unmittelbar in nutzbare Energie umwandeln, was die Natur eben dezentral, in Form von Sonne, Wind oder anderen erneuerbaren Energiequellen bietet. Vielleicht gebührt die größte Faszination der Perspektive, dass sich auf Basis von Wind und Sonne ein ebenso zuverlässiges Energiesystem errichten lässt wie auf Basis von Kohle, Öl, Erdgas und Uran. Die jedem Laien eingängige Behauptung, dass ein Stromsystem nicht funktionieren könne, wenn es auf Energiequellen aufbaut, die nicht jederzeit zur Verfügung stehen, erweist sich nicht nur als zu schlicht gedacht, sondern dank der heute verfügbaren digitalen Möglichkeiten als falsch. Das neue System wird den Energiebedarf ebenso zuverlässig decken wie das alte. Allerdings ist es erheblich komplizierter.

Abbildung 42 stellt die auf das jeweilige Jahr bezogene Dauer der ungeplanten Unterbrechungen der Stromversorgung (System Average Interruption Duration Index, SAIDI) in Minuten dar, die jede Stromverbraucherin und jeder Stromverbraucher in Deutschland statistisch zu erdulden hatte. Die erste Botschaft dieser Grafik: Die durchschnittlichen Stromausfälle für Endkund:innen lagen in den vergangenen 15 Jahren stets zwischen etwas mehr als 10 und etwas mehr als 20 Minuten pro Jahr. Damit zählt die Stromversorgung in Deutschland zu den zuverlässigsten der Welt, obwohl bisher nur in wenigen Ländern so große Anteile fluktuierenden Stroms im Netz sind wie hierzulande.

▼ Durchschnittliche Stromversorgungsunterbrechung in Minuten/Jahr

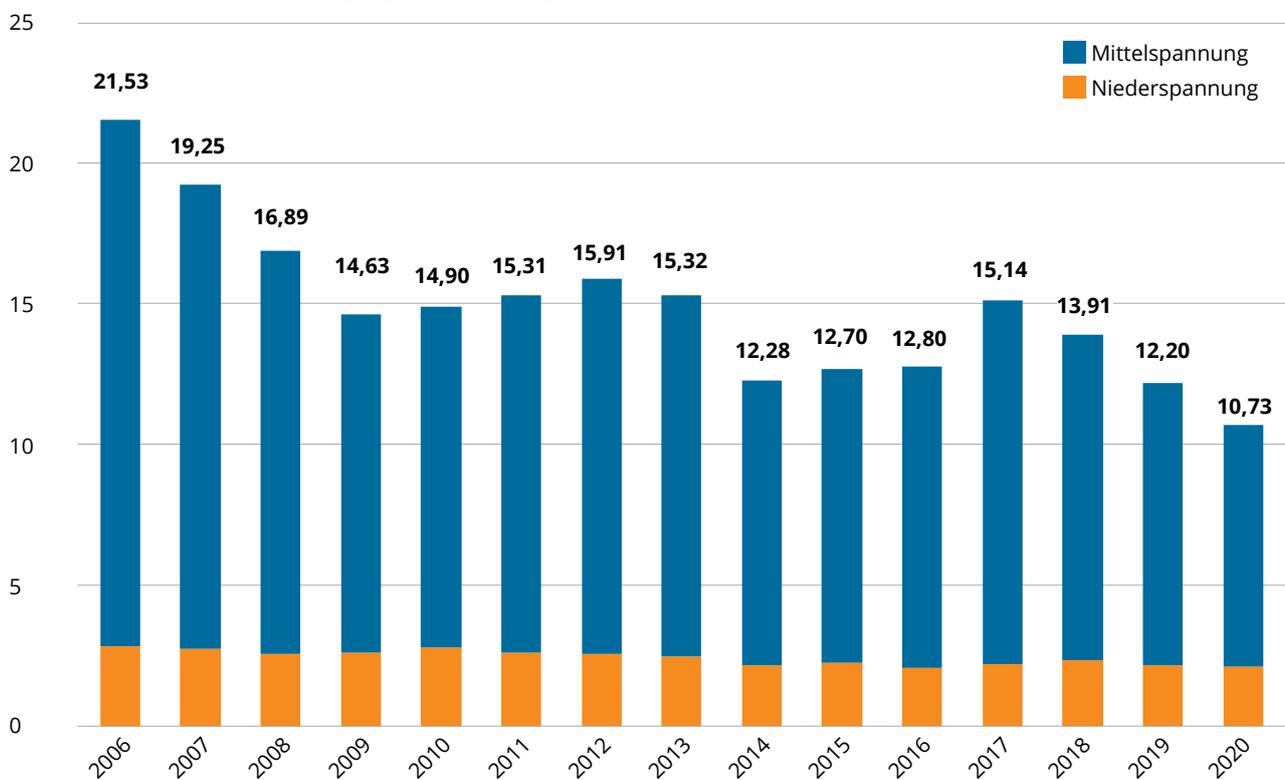


Abbildung 42:

Jährliche ungeplante Unterbrechungen der Stromversorgung in Deutschland; Quelle: BNetzA²⁸⁹

Zu Beginn der Zeitreihe, im Jahr 2006, betrug der Anteil der Erneuerbaren Energien am Bruttostromverbrauch in Deutschland 11,6 Prozent, wobei noch mehr als die Hälfte (6,2 Prozent) aus kontinuierlich verfügbaren, steuerbaren Erneuerbare-Energien-Anlagen (Wasserkraft, Bioenergie, Klärgas etc.) stammte.²⁹⁰ Dann nahm der Siegeszug der Wind- und Sonnenenergie Fahrt auf. 2020 erreichten die Erneuerbaren einen Anteil von 45,4 Prozent am deutschen Stromverbrauch, davon 32,8 Prozent aus Wind und Sonne. Der Verlauf der SAIDI-Kurve über die Zeit legt die auf den ersten Blick erstaunliche Vermutung nahe, dass das Stromsystem mit dem Zuwachs der schwankenden Erneuerbaren Energien (noch) zuverlässiger funktioniert als zuvor. Das ist die zweite Botschaft. Eine mögliche Erklärung für dieses Phänomen könnte sein, dass der Aufwand, das um Größenordnungen komplexer gewordene System zu steuern und durch Kraftwerksreserven abzusichern, mit dem Zuwachs der Erneuerbaren Schritt hält. Eine Ursache ist jedoch auch, dass es im fraglichen Zeitraum nicht nur den Siegeszug von Wind und Sonne in der Stromversorgung gegeben hat, sondern gleichzeitig revolutionäre Fortschritte bei der Digitalisierung der Steuerung komplexer Systeme.

Die Eigenschaft, die die Quellen der neuen Energietechnologien grundlegend von den hergebrachten unterscheidet, ist ihre Volatilität. Die vielleicht größte Herausforderung bei der Errichtung des neuen Energiesystems besteht deshalb darin, Energieangebot und -nachfrage zu jeder Sekunde, zu jeder Stunde, Tag für Tag, Woche für Woche und Jahr für Jahr zur Deckung zu bringen.

In Zukunft bestimmt nicht länger nur die Nachfrage das Angebot, also den Kraftwerkseinsatz, sondern die Nachfrage hat auch, jedenfalls partiell, dem volatilen Angebot zu folgen. Das Angebot, das bisher per Knopfdruck herauf- oder heruntergefahren wurde, ist jetzt volatil und vom Menschen nur in begrenztem Umfang zu beeinflussen. Wenn die Sonne scheint und der Wind weht, steht Strom in großen Mengen – in Zukunft sogar regelmäßig im Übermaß – zur Verfügung. Dann heißt es, Verbrauch und Nachfrage zu steigern und Infrastrukturen bereitzuhalten, die den Überschussstrom anderweitig sinnvoll nutzen oder zwischenspeichern und zu jenen Zeiten wieder zur Verfügung stellen, in denen die Sonne untergegangen ist oder der Wind Pause macht. Diese Prinzipumkehr erfordert Flexibilität, präzise Wetterprognosen und höchste Geschwindigkeit in der Steuerung. Das alles geht nur mit Systemintelligenz und den neuen Informations- und Kommunikationstechnologien (IT).

In der Vergangenheit mussten nur Verbräuche prognostiziert werden. Das war vergleichsweise einfach, zumal sich in jedem entwickelten Energiesystem fixe Verbrauchsmuster herausbilden, die den Strombedarf an jedem Werktag, jedem Sonntag und jedem Feiertag zu jeder Stunde hinreichend exakt vorhersehbar machen. Es war vergleichsweise einfach, eine überschaubare Anzahl von Kraftwerken entlang dieser Erfahrungskurven zu steuern. Diese Ära geht gerade zu Ende. In der regenerativen Welt auf Basis fluktuierender Energien wird sie abgelöst durch eine Vielzahl an Einflussfaktoren. Komplexe Steuerungsmechanismen treten an die Stelle der Leistungssteuerung großer Kraftwerksblöcke. Nun muss nicht mehr nur die Summe des Verbrauchs prognostiziert werden,

sondern gleichzeitig auch das Angebot, das aus Millionen kleinen und großen Erzeugungsanlagen in alle Ebenen des Stromnetzes eingespeist wird. Über die Mengen bestimmen die Tageszeit, die Jahreszeit und nicht zuletzt das Wetter, das nicht nur regional unterschiedlich ist, sondern sich mitunter sehr schnell und schwer prognostizierbar ändert. Wann scheint wo die Sonne, wann weht wo der Wind, wann bedeckt wo Schnee die Solaranlagen, wann lichtet sich der zähe Morgennebel – oder auch nicht?²⁹¹

Die Erzeugungsschwankungen müssen prognostiziert und gemessen, die erhobenen Daten übertragen und verarbeitet werden, letzteres in Echtzeit. Da aber die Erzeugung nicht mehr nur in einigen hundert Großkraftwerken stattfindet, sondern in Millionen dezentraler PV-Anlagen und Windräder, entstehen allein schon hier ganz neue Aufgaben und Herausforderungen.

Digitalisierung und Kleinteiligkeit als Prinzip des neuen Energiesystems

IT-Systeme müssen schrittweise und im Ergebnis flächendeckend implementiert und vernetzt werden. Die Datenerfassung erfolgt in früher unvorstellbar hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung. Die heute üblichen Viertelstundewerte stellen noch ein vergleichsweise grobes zeitliches Raster dar. Mehr und mehr geht es um Sekundenwerte und Echtzeitübertragung.

Die neuen Erfordernisse lassen sich am Beispiel der privaten Haushalte am einfachsten erklären: Im alten Markt hatte der Stromzähler des Haushaltskunden nur eine Aufgabe, nämlich den Verbrauch des Kunden kontinuierlich zu erfassen – und einmal im Jahr kam der „Stromableser“. In Zukunft wird, wenn der Haushalt über seine eigene Erzeugung, seinen eigenen Speicher, seine eigene Wärmepumpe und sein eigenes Elektroauto verfügt, nicht nur Strom konsumiert und dem Netz entnommen, sondern auch ins Netz eingespeist, und dies hoch individualisiert. Die Anlagen der Haushalte dienen dennoch auch der Stabilisierung und Regelung des Netzes. Stromflüsse in beide Richtungen müssen erfasst und abgerechnet werden. Und das nicht einmal im Jahr, sondern (mindestens) jede Viertelstunde. Aus einem Wert pro Haushalt pro Jahr werden vier pro Stunde, 96 pro Tag und 35.040 Werte pro Jahr. Später, wenn es um kontinuierliche Echtzeiterfassung geht, werden es noch viel mehr.

Dass derartige Datenmengen nicht mehr wie bisher der „Stromableser“ oder der Kunde bzw. die Kundin selbst durch Abschreiben der Zählerstände und anschließende Übermittlung per Postkarte an seinen Stromversorger bewältigen kann, versteht sich von selbst – auch weil aus ihm/ihr mehr geworden ist als ein Verbraucher oder eine Verbraucherin. Die Digitalisierung ermöglicht die automatisierte Fernauslesung von tausenden Werten pro Haushalt. Wenn dann nicht nur Verbrauchs-, sondern auch Erzeugungswerte für die Prozesse erfasst werden müssen, wird jeder Haushalt in Zukunft vollautomatisiert zigtausende Messwerte pro Jahr liefern. Bei rund 50 Millionen Zählpunkten ist es eine fundamental neue Herausforderung, Milliarden von Daten sicher zu verarbeiten, eindeutig zuzuordnen und vor allem, ihnen jederzeit einen energiewirtschaftlichen Sinn zu geben.

Dabei ist die Datenerfassung nur die notwendige Voraussetzung für die eigentliche Aufgabe, die zuverlässige Steuerung des Gesamtsystems – das ist die Aufgabe der digitalisierten Energiewirtschaft und der Serviceunternehmen, die künftig im Maschinenraum der Energiewende ihre Dienste anbieten und das System funktionsfähig halten. Im Zentrum der digitalen Transformation des Energiesystems stehen deshalb intelligente Messsysteme an jedem Verbrauchs- und Einspeisepunkt, vor allem aber digitale Steuerungseinheiten (Smart Meter Gateways), die es den Energieversorgungsunternehmen erlauben, das System zu steuern. All dies muss die Politik mit einheitlichen, verbindlichen Regeln und Standards unterlegen und dabei sicherstellen, dass die ungeheuren Datenmengen mit ebenso ungeheurem Missbrauchspotenzial zuverlässig verschlüsselt, vor Hackern geschützt und nur denen zugänglich bleiben, für die sie bestimmt sind. Allein die Festlegung entsprechender Standards hat Jahre in Anspruch genommen und ist mit dem Inkrafttreten entsprechender Regelungen längst nicht abgeschlossen.^{292,293}

Der erreichte Reifegrad der neuen regenerativen Energietechnologien und ihre rasante Kostendegression stehen für Erfolge bei der Hardwareentwicklung der Energiewende. Doch hinreichend ist das allein noch nicht. Zur notwendigen energiewirtschaftlichen Zeitenwende verdichtet sich der Siegeszug der Erneuerbaren Energien und – nicht zu vergessen – der Fortschritt auf dem Feld der Energieeffizienz erst durch die digitale Revolution, die auch anderswo die Geschäftsmodelle ganzer Branchen verändert.

Die nächste Stufe: Künstliche Intelligenz und selbstlernende Systeme

Der sogenannte Smart Meter Rollout, von dem bisher die Rede war, stellt letztlich eine notwendige Voraussetzung für den sicheren Betrieb eines Energiesystems dar, in das größtenteils wetterabhängiger Strom volatil eingespeist wird. Er stattet Millionen Haushalte und andere Verbraucher:innen und Einspeiser:innen von Energie mit ausreichend Sensoren aus, um die für die sichere Datenerfassung und Steuerung des Systems notwendigen Messdaten generieren und möglichst in Echtzeit übermitteln zu können. Das ist die erste Stufe der Digitalisierung der Energiewende. Die zweite Stufe steht schon vor der Tür. Sie soll die vielfältigen Möglichkeiten Künstlicher Intelligenz (KI) in das neue System integrieren.

Der Einsatz von KI kann in Teilen die Energiewende über die digitale Datenverarbeitung hinaus wesentlich erleichtern.

Der Einsatz von KI im Sinne selbstlernender Systeme kann die Energiewende über die digitale Datenverarbeitung hinaus wesentlich erleichtern. So können Kosten gesenkt, Stromnetzausbau vermieden, die Natur besser geschützt und letztlich auch die gesellschaftliche Akzeptanz der Energiewende insgesamt erhöht werden – vorausgesetzt natürlich, dass Datenschutz und Datensicherheit der massenhaft erhobenen, in Teilen sensiblen Daten umfassend gewährleistet sind und dies auch glaubhaft gemacht werden kann.²⁹⁴ Das ist der Preis, den Politik und Wirtschaft zu zahlen haben, damit die Akzeptanz der Energiewende auch in Zukunft fortbesteht.

Bezogen auf die Stromerzeugung kann KI bei der Optimierung der Standortwahl für Wind- und Solaranlagen helfen, sie kann die Anlagensteuerung durch präzisere Kurzzeitprognosen verbessern, die Wartung und Instandhaltung von Erzeugungsanlagen durch eine intelligente Überwachung erleichtern, Sicherheitsrisiken (etwa durch Vereisung von Windenergieanlagen oder plötzliche Böen) frühzeitig erkennen und so verringern und den Schutz gefährdeter Vogelarten durch technische Kollisionsvermeidungsmaßnahmen verbessern. KI hat das Potenzial, die Anlagen auf Basis wesentlich verbesserter Angebots- und Nachfrageprognosen insgesamt wirtschaftlicher zu betreiben. Schließlich profitiert auch das Stromnetz von einem systemdienlicheren und effizienteren Betrieb, was letztlich auch den Netzausbaubedarf verringern kann.²⁹⁵

Die Energiebranche steht insgesamt am Anfang einer Transformation, die in der Telekommunikation schon stattgefunden hat – vom Festnetztelefon zur allumfassenden individuellen Vernetzung. Wir erleben das Zusammenwachsen von Informationstechnologie und Energiesektor. Neue Unternehmen der Energiebranche definieren sich nicht mehr als Energieversorger, sondern in einem umfassenderen Sinn als Dienstleister auf dem Feld der Energie. Ihre künftigen Geschäftsmodelle basieren auf einer ständig wachsenden Datenmenge und der Fähigkeit, die dezentrale Energieerzeugung ihrer Kund:innen jederzeit mit deren Verbrauch zur Deckung zu bringen. Die Unternehmen entwickeln sich zu IT-Plattformen, die den Einsatz von Millionen Energieerzeugungs- und -verbrauchsanlagen koordinieren und darüber hinaus die bisher weitgehend voneinander getrennten Energiesektoren Strom, Wärme und Mobilität miteinander vernetzen.

Systemicherheit durch schlaue Netze und günstige Großbatterien

2015, im Jahr der Klimakonferenz von Paris, galt das Problem der Stromspeicherung vielen als Achillesferse einer klimaverträglichen Energiewende. Der Grund: Das neue Energiesystem auf Basis fluktuierender Energien benötigt für die kurze, die mittlere und die lange saisonale Frist jeweils unterschiedliche Speichertechnologien, und diese galten seinerzeit als zu teuer, technisch nicht ausgereift oder beides.

Inzwischen kommt Entlastung aus zwei Richtungen: Zum einen eröffnen die neuen digitalen Möglichkeiten den schnelleren und effizienteren Ausgleich zwischen Erzeugung und Verbrauch, was letztlich den Speicherbedarf auch in einem System mit überwiegend fluktuierender Stromeinspeisung erheblich verringert. Zum anderen übertrifft die Kostenentwicklung bei den Batteriespeichern die optimistischsten Prognosen des Jahres 2015 bei Weitem (Abbildung 43).

▼ Kapazitätsgewichtete Batteriepreisentwicklung in US-Dollar pro Kilowattstunde

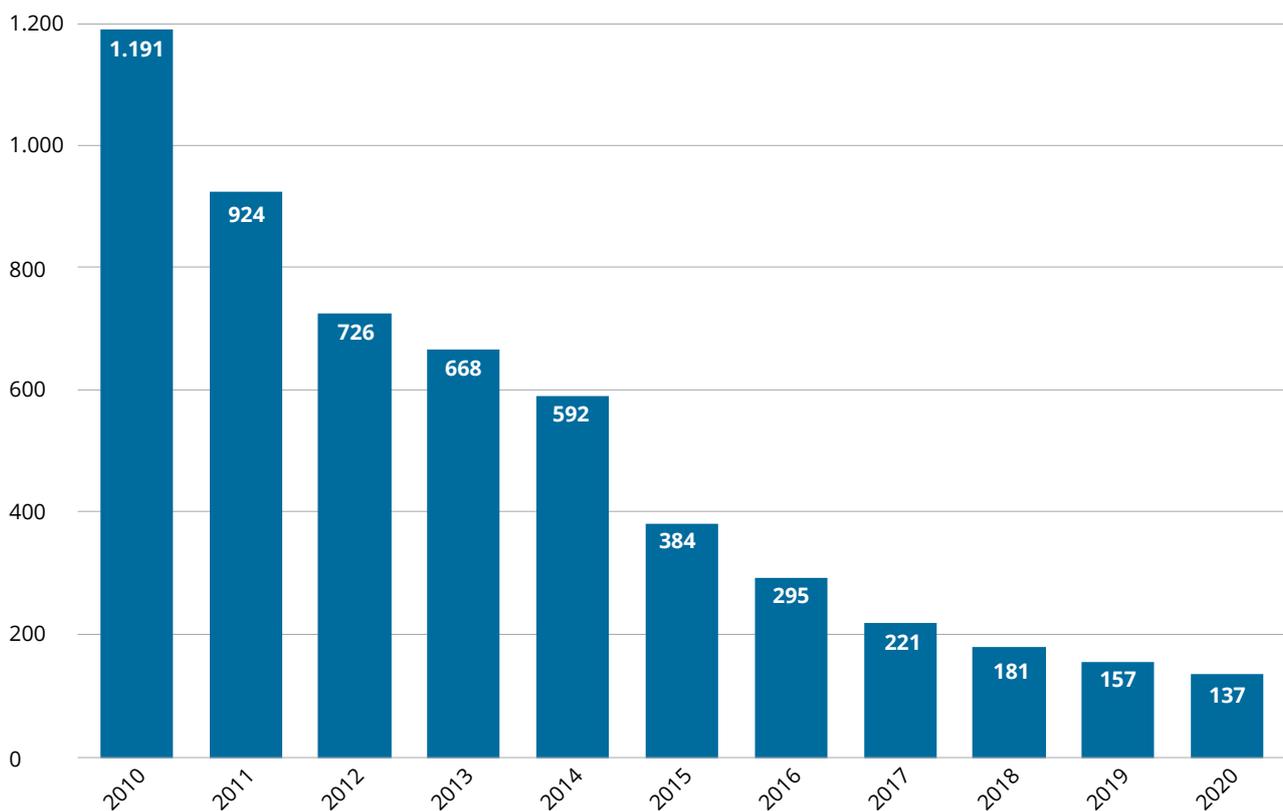


Abbildung 43:

Preissturz bei Lithium-Batterien im letzten Jahrzehnt; Quelle: BloombergNEF²⁹⁶

2015 gingen die optimistischsten Prognosen von einer durchschnittlichen Kostendegression für Lithium-Batterien um 45 Prozent bis 2020 aus, tatsächlich eingetreten waren 64 Prozent.²⁹⁷ Seit 2010 wurde ein Preisrückgang binnen eines Jahrzehnts um 89 Prozent registriert, und alle Prognosen gehen davon aus, dass sich die Entwicklung fortsetzt. Die Grenze von 100 US-Dollar pro Kilowattstunde soll demnach 2023 erreicht sein, was nach Angaben des Forschungsunternehmens BloombergNEF bedeutet, dass dann E-Autos für den Massenmarkt zum selben Preis angeboten werden können wie Pkws mit Verbrennungsmotoren. Weitere Durchbrüche werden durch Rückgriff auf andere Metalle und Chemikalien sowie Fortschritte bei der Entwicklung von Festkörperbatterien erwartet, an der sich unter anderem auch Volkswagen an vorderer Front beteiligt.²⁹⁸ Bis 2030 wird ein Batteriepreis von nur noch 58 US-Dollar pro Kilowattstunde erwartet.

Die Preisentwicklung verläuft bei ortsfesten Batterien praktisch parallel zu den Autobatterien. Damit ergeben sich auch im Stromnetz neue Möglichkeiten zum Ausgleich fluktuierender Stromeinspeisung und zur Zwischenspeicherung von überschüssigem erneuerbarem Strom, der bisher abgeregelt wurde. Der Markt für immer leistungsstärkere Großbatterien mit inzwischen teils dreistelliger Megawattleistung entwickelt sich dynamisch – in den USA, Australien, Japan und auch in Europa.²⁹⁹ Im Sommer 2021 kündigte Siemens gemeinsam mit einem regionalen Energieversorger die Errichtung eines 100-Megawatt-Batteriespeichers im oberfränkischen Wunsiedel an.³⁰⁰

Großspeicher, die das umgebende Netz bei Kälte sicher durch windstille Nächte bringen, sind keine Utopie mehr. Das genügt noch nicht zur Überbrückung der sogenannten kalten Dunkelflaute, die im Extremfall mehrere Tage andauern kann. Doch hierfür stehen, wenn die traditionellen Kraftwerke auf fossiler Basis endgültig abgeschaltet sind, Gasturbinen bereit. Diese müssen dann nur noch wenige Stunden im Jahr hochgefahren werden, wenn die kalte Dunkelflaute tatsächlich aufzieht. Anfangs werden sie noch mit Erdgas, später, wenn nötig, mit Wasserstoff befeuert.

Jenseits des Stroms: Digitalisierung der Industrie im Zeichen ihrer Dekarbonisierung

Das beim G7-Gipfel von 2015 erstmals formulierte Ziel einer vollständigen Dekarbonisierung der großen Volkswirtschaften der Welt war auch ein Aufruf an die Industrie, sich dem Klimaschutz nicht länger zu verweigern. Nur Monate später legte die Weltgemeinschaft in Paris nach und demonstrierte mit dem dort verabschiedeten Klimaabkommen, dass es ihr Ernst war. Nach kurzer Schockstarre haben die Beschlüsse der Politik die Veränderungsbereitschaft in weiten Teilen der Wirtschaft entfacht. Seither treiben digitaler Wandel und Energiewende die Wirtschaft in dieselbe Richtung.

Und seither steht nicht mehr, wie noch 2015, die Energiewirtschaft allein im Fokus der großen Umbrüche. Digitaler Wandel und Dekarbonisierung betreffen alle Kernindustrien gleichermaßen, weil sie in der Regel durch hohen Energieverbrauch und emissionsintensive Produktionsprozesse auch Verursacher großer Treibhausgaslasten sind. In allen klimarelevanten Branchen, der Automobil-, Stahl-, Chemie- und Zementwirtschaft, werden Produktionslinien modifiziert, in Teilen auf den Kopf gestellt. Und bei all diesen Veränderungen stehen die Chancen, die der digitale Wandel eröffnet, im Vordergrund.

Das betrifft auch Deutschland, wo der klimapolitisch getriebene Wandel der Industrie, inklusive neuer dekarbonisierter Produktionsverfahren und Produkte gerade beginnt. Neuartige Kooperationen bahnen sich an, sicher auch neue Konkurrenzverhältnisse. Anknüpfungspunkte liegen beispielsweise in der Elektrifizierung der Autobranche, der Digitalisierung des Wohnens und sogar der Landwirtschaft.

Die Zukunft ist offen, aber ohne Zweifel digital. Der Wettlauf um die besten Plätze in die neue digitale Energiewendewelt hat begonnen.

Die Zukunft ist offen, aber ohne Zweifel digital. Treten Auto- und Energiebranche künftig als Verbündete auf oder doch als Konkurrenten? Wer betreibt am Ende die Ladenetze für die Elektromobilität? Welche Unternehmen tun sich zusammen, wenn es um die zweite Generation der Elektrofahrzeuge geht? Fusionieren die großen Automarken mit den Großen der IT-Branche oder doch eher mit kleinen Start-ups, wenn das autonome Fahren Realität wird? Versuchen sie es allein, wie Tesla? Oder bauen Apple, Google und Co. die klimaverträglichen Autos der Zukunft? Wer versorgt die Chemieindustrie mit grünem Strom und grünem Wasserstoff und bringt sie auf den Pfad der Klimaneutralität? Sicher scheint nur, dass viele der primär klimapolitisch motivierten Innovationen durch die weitgefächerten Möglichkeiten der Digitalisierung zusätzlich befeuert werden.

Deutschland und Europa sind bei der digital beschleunigten Dekarbonisierung von Wirtschaft und Gesellschaft keineswegs allein. Sie erfasst alle Wirtschaftszentren der Welt, auch die zukünftigen. Ein Wettlauf wurde gestartet, es ist der Wettlauf um die besten Plätze in der neuen digitalen Energiewendewelt. Das ist der größte aller Megatrends und am Ende eine gute Nachricht. Denn der Wettlauf dient dem Überleben des Planeten, wie wir ihn kennen.

Fazit

Die Energiewende ist unumkehrbar, aber ihr Erfolg nicht absehbar

Wenn eine Entwicklung über einen längeren Zeitraum in eine stabile Richtung treibt, dann ist das ein Trend. Megatrends sind Trends, die sich zeitgleich, umfassend und in vielen Regionen der Erde durchsetzen. Wenn mehrere solcher Megatrends über eine lange Zeitspanne in die gleiche Richtung drängen, ist das Ergebnis eine Transformation.

Auf die Megatrends der globalen Energiewende trifft das zu. Trotzdem ist die fundamentale Transformation, die sich daraus ergibt, kein Selbstläufer, ganz im Gegenteil. Auslöser der Megatrends ist ein von der Völkergemeinschaft definiertes Oberziel. Es geht um die möglichst weitgehende Bewahrung der Welt vor den Folgen der Erderhitzung und um die Wiederherstellung eines natürlichen Gleichgewichts, das die Menschheit in den vergangenen hundert Jahren – anfangs unwissentlich, dann trotz vielfältiger Anzeichen und unzähliger Mahnungen vor allem aus Umweltbewegung und Wissenschaft – erstmals im globalen Maßstab gestört hat.

Neben dem Oberziel Klimaneutralität spielen bei dieser Transformation Unterziele eine Rolle, die für die Umsetzbarkeit des Oberziels entscheidend sein können: Denn Menschen wollen nicht nur irgendwie *überleben*, sondern in Würde, in Frieden, bei guter Gesundheit und in einem angemessenen Wohlstand *leben*. Menschen wollen darüber hinaus ihre natürlichen Lebensgrundlagen bewahren, weil sie deren Eigenwert erkennen, vor allem aber, weil letztlich diese Grundlagen es sind, die das gute Leben ermöglichen.

Von Paris nach Glasgow: Die Energiewende auf dem Weg zur Unumkehrbarkeit

Die in dieser Zwischenbilanz der globalen Energiewende beschriebenen Megatrends sind mit zwei Ausnahmen (Elektrifizierung, Wasserstoff) die gleichen wie 2015 vor der Weltklimakonferenz von Paris. Die doppelte Frage an alle Megatrends lautet: Wie haben sie sich verändert und was haben sie bewirkt? Was ist passiert in den sechs Jahren zwischen Paris und Glasgow?

Das wichtigste Ergebnis der beschriebenen Megatrends beweist ihre Wirkmächtigkeit und ihre Wucht: Sie haben die Energiewende im globalen Maßstab unumkehrbar gemacht. Das in Paris gegenüber vorherigen Beschlüssen im Rahmen der UN-Klimaverhandlungen verschärfte Klimaziel hatte daran einen wesentlichen, vielleicht entscheidenden Anteil.³⁰¹ Vereinzelt Versuche, die im Jahr 2021 immer noch darauf abzielen, die Unumkehrbarkeit in Frage zu stellen, haben etwas Anachronistisches. Sie werden von der Wirklichkeit der Energiewende überholt.

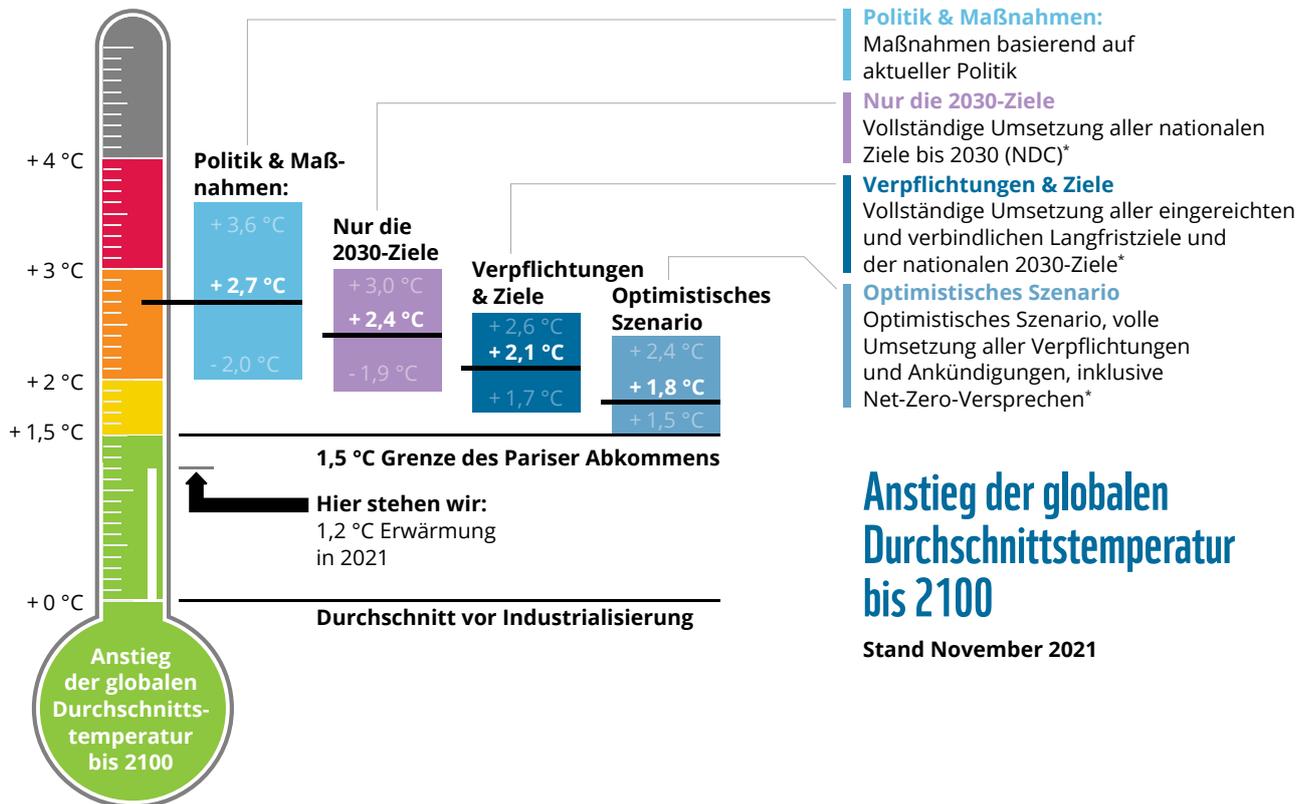
Trotz aller Blockaden, die die weltweiten Anstrengungen zur Eindämmung der Klimakrise seit Paris und zuletzt erneut in Glasgow auch geprägt haben und weiter begleiten: Der fundamentale Unterschied zur Situation des Jahres 2015 ist die global akzeptierte Unumkehrbarkeit der Energiewende. Damals war in Teilen von Politik und Wirtschaft und nicht nur unter Außenseiter:innen die Auffassung verbreitet, dass es mit der Klimakrise so schlimm schon nicht kommen werde. Viele hegten und nährten noch die Hoffnung, der Fokus der öffentlichen Aufmerksamkeit werde sich über kurz oder lang wieder anderen Themen zuwenden. Das ist heute undenkbar. Es ist anders gekommen, weil die reale Klimakrise die Abwendung vom Thema verhindert hat und in Zukunft weiter verhindern wird.

Die drei größten Wirtschaftsblöcke der Welt – Europa, Nordamerika und China – haben grundsätzlich verstanden, dass die Physik der Erde nicht verhandelbar ist, und sich dem Konzept der Klimaneutralität verschrieben. Und dies, obwohl die politischen Spannungen zwischen den drei Machtzentren seit 2015 massiv zugenommen haben. Insofern entwickelt sich die globale Energiewende sogar gegen den geopolitischen Trend, wonach jeder sich selbst der Nächste ist. Jüngste Beispiele: In Glasgow verständigten sich China und die USA und damit die beiden mit Abstand größten Treibhausgasemittenten überraschend auf ein gemeinsames Vorgehen auf allen Feldern des Klimaschutzes und der Energiewende. In der gemeinsamen Erklärung versprechen die USA und China, auf allen wichtigen Feldern der Klimapolitik bilateral und mit Dritten zusammenzuarbeiten und auf Basis des Pariser Abkommens den Prozess der Dekarbonisierung und Elektrifizierung zu beschleunigen.³⁰² Und zum Jahreswechsel 2021/2022 hat die neue Bundesregierung angekündigt, Klimapolitik zu einem Schwerpunkt ihrer G7-Präsidentschaft zu machen.

Natürlich gibt es begründete Zweifel gegenüber politischen Bekenntnissen zum Klimaschutz. Gerade bei diesem Thema haben die Menschen insbesondere auch in Deutschland gelernt, dass Absichtserklärungen keine Umsetzungsgarantien sind.

Die Wahrscheinlichkeit, dass die von den Vertragsstaaten zur Weltklimakonferenz (COP 26) in Glasgow am Ende eingereichten nationalen Klimaschutzbeiträge (Nationally Determined Contributions, NDCs) ausreichen,³⁰³ das Treibhaus Erde auf den 1,5-Grad-Pfad zurückzuführen, war von Anfang an gering.³⁰⁴ Die Skepsis vieler Beobachter im Vorfeld der Weltkonferenz hat sich in dieser Hinsicht bestätigt.

Die Analysten des Climate Action Tracker fühlten der Welt auch während der 26. Weltklimakonferenz beständig den Puls. Das Ergebnis ist in Abbildung 44 dargestellt und zeigt, dass die bis zur Konferenz in Glasgow eingereichten nationalen Klimabeiträge bei weitem noch nicht ausreichen, die Ziele des Pariser Abkommens einzuhalten. Selbst wenn die von verschiedenen Ländern vor der Glasgow-Konferenz verkündeten Langfrist- und Netto-Null-Ziele alle vollständig umgesetzt würden. Für diesen Fall käme die 1,5-Grad-Schwelle des Pariser Abkommens mit einer erwarteten Erderhitzung von 1,8 °C aber immerhin in Sichtweite.



* Wenn die NDC-Ziele für 2030 schwächer sind als die prognostizierten Emissionswerte im Rahmen von Politik & Maßnahmen, werden die Werte aus Politik und Maßnahmen verwendet.

Abbildung 44:

Abschätzung der zu erwartenden Erderhitzung bis 2100 bei unterschiedlich intensiven Klimaschutzanstrengungen der Vertragsstaaten des Abkommens von Paris; Quelle: [Climat Action Tracker](#)³⁰⁵

Dennoch kann die 26. Weltklimakonferenz nicht unbedingt als gescheitert bewertet werden. Auf der Habenseite gab es die Einigung über die Finalisierung des „Regelbuchs“ des Paris-Abkommens, was die Verbindlichkeit und Transparenz der künftig eingereichten Klimabilanzen der Vertragsstaaten erhöht und die befürchteten Doppelzählungen beim Handel mit Emissionsminderungszertifikaten mindestens eindämmt. Dazu vorwärtsweisende Vereinbarungen zum internationalen Waldschutz, zur Minderung der globalen Emissionen des besonders klimawirksamen Methans sowie zur Unterstützung Südafrikas bei der Beschleunigung einer sozial gerechten Energiewende weg von der Kohle durch die EU, die USA, Großbritannien, Frankreich und Deutschland. Jenseits der offiziellen Beschlüsse zeugte bei dieser Vertragsstaatenkonferenz eine nie dagewesene Zahl freiwilliger Vereinbarungen zwischen staatlichen, öffentlichen und privaten Akteur:innen zum Waldschutz, zum Ausstieg aus dem Verbrennungsmotor, zur beschleunigten Einführung grünen Wasserstoffs oder zu einer grünen Finanzwirtschaft vom zunehmenden Willen zur Beschleunigung des Prozesses. Die große Mehrzahl der Verantwortlichen akzeptiert erkennbar, dass die Zeit der Deklarationen jetzt endet und die Phase des entschlossenen Handelns und einer neuen Ernsthaftigkeit endlich beginnen muss.

**Rund um den
Globus wachsen
branchenüber-
greifend zahllose
Unternehmen, die
man in Summe
"Dekarbonisie-
rungswirtschaft"
nennen kann.**

Die in diesem Report zusammengetragenen aktuellen Daten bestätigen diese Tendenz. Sie belegen, dass sich die 2015 diskutierten Megatrends der globalen Energiewende weiter verfestigt und verstärkt haben. Es gibt exponentielle Wachstumskurven bei klimaschonenden Technologien – Schlüsseltechnologien, die mittlerweile fast überall auf der Welt konkurrenzfähig sind. Nicht zuletzt gibt es zahllose kleine, viele mittlere und auch schon sehr große Unternehmen, die sich dem Klimaschutz verschrieben und eines gemeinsam haben: Sie expandieren. Rund um den Globus sind neue Industrien entstanden, die man in Summe die „Dekarbonisierungswirtschaft“ nennen könnte. Um auf den 1,5-Grad-Pfad einzuschwenken, hält die Internationale Energieagentur – eine Organisation, die 1974 von den OECD-Staaten zur Sicherung der Ölversorgung der westlichen Industriestaaten gegründet wurde – Investitionen in saubere Energietechnologien in Höhe von jährlich fast vier Billionen US-Dollar (4.000 Milliarden US-Dollar) bis 2030 für unverzichtbar. Das Marktvolumen der Wind- und Solarindustrie, der Hersteller von Lithium-Ionen-Batterien, Elektrolyseuren und Brennstoffzellen summiert sich bis zum Jahr 2050 auf dem 1,5-Grad-Pfad auf spektakuläre 27 Billionen US-Dollar. Das wäre mehr, als heute die Ölindustrie weltweit umsetzt.³⁰⁶

Die offene Frage: Klimakrise oder Klimakatastrophe

Zweifel an der grundsätzlichen Richtung der Entwicklung kann es nach all dem nicht mehr geben. Die Megatrends der globalen Energiewende setzen sich fort, die Energiewende hört nicht mehr auf, selbst wenn sich einzelne Regierungen mal hier mal da demonstrativ von ihr abwenden. Klimaverträgliche Energieträger werden das Zeitalter der Fossilen ablösen, die Dekarbonisierung von Wirtschaft und Gesellschaft hat auf breiter Front begonnen, die Megatrends der Elektrifizierung, der Digitalisierung und Dezentralisierung der Energiewirtschaft sowie der zielgerichtete Einsatz von klimaneutral hergestelltem Wasserstoff treiben die Entwicklung voran.

Doch eine Frage bleibt, die auch noch nach dem Klimagipfel von Glasgow völlig offen erscheint und über den Erfolg oder Misserfolg der globalen Energiewende letztlich entscheidet. Es ist die Frage nach der Dynamik der Transformation. Sind die Megatrends weltweit ausgeprägt und dynamisch genug, um die Folgen der Erderhitzung in erträglichen Grenzen zu halten? Oder müssen diese Folgen für große Teile der Menschheit erst unerträglich werden, um zu wirklichen Durchbrüchen zu kommen? Anders gefragt: Muss aus der *Klimakrise* erst die von wirklich allen Entscheider:innen als solche erkannte *Klimakatastrophe* werden, damit eine ausreichende Fokussierung auf diese globale Herausforderung stattfindet?

Viel wird davon abhängen, wie schnell die Einsicht, gemeinsam im selben Rettungsboot zu sitzen und gemeinsam rudern zu müssen, bis wieder fester Boden unterm Kiel ist, wächst. In Glasgow war es trotz wichtiger Fortschritte im Detail,³⁰⁷ noch nicht so weit. Zunächst ging das entwürdigende Schauspiel um die Transformations- und Anpassungshilfen des Nordens für den Süden weiter,

dann entzauberten Indien und China, im letzten Moment die klare Festlegung auf den Ausstieg aus der Kohle im Schlussdokument der Konferenz und setzten stattdessen eine weiche Formulierung durch, in der zwar erstmals überhaupt die Kohle als Streichkandidatin bei der Versorgung der Welt mit Energie genannt wurde, aber nur noch von einer Verringerung ihres Einsatzes die Rede war.

Dennoch ist die Situation alles andere als hoffnungslos, denn eine Dynamisierung der Megatrends zeichnet sich deutlich ab:

- » Immer mehr Menschen fordern lautstark die Beschleunigung der Energiewende. Die einen, weil sie die Physik der Krise immer besser verstehen; die anderen, weil sie sie selbst als Bedrohung erleben oder schon als ihre persönliche Realität. Mit jedem weiteren Extremwetterereignis wächst der Druck auf Politik und Wirtschaft, die Dekarbonisierung voranzutreiben. Die Bewegung „Fridays for Future“ ist als globale politische Jugendbewegung erst der Anfang. Sie wird über sich hinauswachsen, weil die reale Klimakrise alle Altersgruppen treffen kann und bereits trifft – nicht irgendwo und in Zukunft, sondern hier und jetzt.
- » Die Konstruktion des Klimaabkommens von Paris sieht vor, dass sich das Ambitionsniveau der Klimaziele jedes einzelnen Vertragsstaates über die Zeit so lange systematisch erhöht, bis Klimaneutralität erreicht ist. Unterschiede, etwa zwischen Staaten, die selbst nicht über große Lagerstätten fossiler Energien verfügen und diese in der Vergangenheit im Wesentlichen importiert und konsumiert haben, und solchen, die ihre Volkswirtschaften auf heimischen fossilen Ressourcen und deren einträglichen Export aufbauen konnten, sind nachvollziehbar. Sie brachen auch im Schlussakkord von Glasgow wieder auf, als Indien und China den Konsens spät noch einmal aufschnürten. Die Unterschiede ändern aber nichts an dem Megatrend, der die fossilen Reichtümer der Förderländer in einem sich selbst beschleunigenden Prozess entwertet, schon weil die Mechanik des Vertrags von Paris die Abnehmerländer zur Reduzierung ihres fossilen Energiekonsums zwingt.
- » Weil das Klimaabkommen von Paris den Pfad der Dekarbonisierung völkerrechtlich verbindlich vorschreibt, entsteht eine Glaubwürdigkeit des Prozesses – und daraus Planungssicherheit. Nicht nur die Wirtschaft richtet sich darauf ein, sondern alle gesellschaftlichen Gruppen bauen Schritt für Schritt ihre Konsumgewohnheiten um, aus Einsicht in die Notwendigkeit oder aus Einsicht in die Kostenentwicklung bei der Verbrennung fossiler Energieträger. Autofahren mit Verbrennungsmotor wird immer teurer, Heizen mit Öl und Erdgas ebenso, Autofahren und Heizen mit sauberem Strom dagegen nicht.
- » Die Mechanik des Klimaabkommens hat eine fundamentale Neuausrichtung der Innovationsphantasie der technisch-wissenschaftlichen Welt, wenn nicht ausgelöst, so doch entscheidend gefestigt. Eine ganze, global vernetzte Generation von Wissenschaftler:innen denkt Innovation aus der Perspektive der Dekarbonisierung und wird dabei mit öffentlichen und privaten Mitteln großzügig unterstützt. Schon in den vergangenen Jahren führte dies zu

Ergebnissen, die beeindruckender kaum sein könnten. Die Diskussion über zu geringe Reichweiten batterieelektrischer Pkws erledigt sich schneller, als es 2015 selbst optimistische Expert:innen zu hoffen wagten. Windräder an Land, die heute genehmigt werden, erreichen eine mittlere Generatorleistung von knapp 5 Megawatt (MW), 2015 waren es noch 2,8 MW. Die Prognose für 2030 liegt bei 6 MW. Auf dem Meer sind 15 MW-Anlagen für Mitte des Jahrzehnts angekündigt. PV-Freiflächenanlagen nehmen aufgrund gestiegener Leistungsdichte heute pro Megawatt nur noch ein Viertel der Fläche in Anspruch als vor 15 Jahren.

- » Schließlich und vielleicht ist dies am Ende der alles entscheidende Fortschritt: Die Neuausrichtung der weltweiten Innovationsphantasie erfasst selbstverständlich auch die bevölkerungsreichen Staaten des Globalen Südens. Entscheider:innen, die sich dort heute entschließen, erstmals ein verlässliches Stromsystem zur Versorgung der Bevölkerung und zur Industrialisierung ihrer Länder aufzubauen, landen nicht mehr zwangsläufig bei Kohlekraftwerken. Im Gegensatz zu früher gibt es heute Alternativen auf dem Weltmarkt und zunehmend auch in den sich entwickelnden Ländern selbst. Die alte Technik wird international, infolge völkerrechtlich verbindlicher Verträge oder aus Sorge um die eigene Reputation der Lieferländer, nicht mehr angeboten und zunehmend geächtet. Chinas Ankündigung, sein Engagement für neue Kohlekraftwerke im Ausland zu beenden,³⁰⁸ folgt den eindringlichen Appellen des Generalsekretärs der Vereinten Nationen, António Guterres. Sie muss umgesetzt werden. Dann aber wird sich dem auch kein anderes Land, das über diese Technologien oder entsprechende Finanzierungsmöglichkeiten verfügt, dauerhaft mehr entziehen können.
- » Der Megatrend der Elektrifizierung von Mobilität und Wärmesektor wirkt als zusätzlicher Innovationsmotor und wie ein Treibsatz zur Beschleunigung der Transformation. Neue industrielle Kerne entstehen, zum Teil aus bestehenden Unternehmen heraus, zum Teil aber auch aus Start-ups, quasi aus dem Nichts. Die Märkte, die die Newcomer vorfinden, sind Weltmärkte von Anfang an, weil ihre neuartigen Produkte alte, weltweit verbreitete funktional ersetzen. Der Prozess ist in vollem Gange, mit der Umstellung der Automobilindustrie auf batterieelektrische Antriebe an der Spitze. Weltkonzerne ringen um ihre Vormachtstellung mit Unternehmen, die vor wenigen Jahren noch niemand kannte.

Über Erfolg oder Misserfolg der Transformation entscheidet am Ende nicht nur die Innovationsdynamik der Ingenieur:innen oder die Entschlossenheit von Investoren, sondern mindestens ebenso der effiziente Einsatz begrenzter Mittel an der richtigen Stelle. Effizienter Einsatz bedeutet hier zweierlei: Wofür werden öffentliche und private Mittel eingesetzt und wo werden sie eingesetzt?

Der Staat achtet auf effektiven Mitteleinsatz, indem er neue Infrastrukturen klug entwickelt. Die Technologieneutralität staatlicher Förderung findet ihre Grenzen, wo die Bereitstellung öffentlicher Mittel erkennbar ineffektiv erfolgt, etwa wenn die Unterstützung unterschiedlicher neuer Infrastrukturen demselben Zweck

dient und keinen Zusatznutzen erwarten lässt. Hier muss die Politik Prioritäten setzen und vermeiden, dass unnötig teure Doppelstrukturen entstehen.³⁰⁹

Mindestens so wichtig für den globalen Erfolg der Energiewende ist der Ort des Einsatzes öffentlicher und mehr noch privater Mittel. Die Lenkung der Finanzströme in den Globalen Süden ist für den mittel- und langfristigen Erfolg entscheidend. Die Ausstattung mit Investitionsmitteln zum Aufbau sauberer Energiesysteme wird darüber entscheiden, ob diese Länder bei ihrer weiteren Entwicklung dem fossilen Pfad der Industriestaaten folgen, wie es bisher im Wesentlichen der Fall war, oder ihn in Zukunft klimaneutral ausrichten.³¹⁰ In diesen Ländern leben zwei Drittel der Weltbevölkerung, aber nur jeder fünfte US-Dollar wird bisher dort in Energiewendetechnologien investiert.³¹¹ Jenseits der Verantwortung der Industrieländer für einen Null-Emissionspfad zu Hause, ist es daher notwendig, dass sie zusätzlich gezielt im Rahmen von Partnerschaften in die Entwicklung von Energiewendetechnologien anderswo investieren.³¹²

Welche Rolle für Deutschland?

Deutschland wurde und wird im internationalen Klimadiskurs geschätzt, teilweise sogar bewundert. Hoch angerechnet werden dem Land:

- » Die seit den Zeiten der früheren Bundesumweltminister:innen Klaus Töpfer (CDU), Angela Merkel (CDU) und Jürgen Trittin (Bündnis 90/Die Grünen) weitgehend unabhängig von der parteipolitischen Zusammensetzung der jeweiligen Regierungen besetzte Rolle als Treiber in der internationalen Klimadiplomatie, bestätigt auch bei der Aushandlung des Klimaabkommens von Paris, bei der die deutsche Delegation unter Umweltministerin Barbara Hendricks (SPD) eine anerkannt treibende Rolle spielte.
- » Die Entwicklung der Wind- und Solarenergie zu kostengünstigen Schlüsseltechnologien für das 21. Jahrhundert, an der die Stromverbraucher:innen hierzulande mit dem Konzept des Erneuerbare-Energien-Gesetzes einen zentralen Anteil hatten.

Zu den gleichzeitig erfolgreichsten und kurzsichtigsten Argumenten gegen das deutsche Engagement in der Energiewende zählt der Hinweis darauf, dass Deutschland wegen seiner sinkenden und der anderswo steigenden Emissionen nur (noch) zwei Prozent zu den globalen Treibhausgasemissionen beitrage und folglich „*nicht allein die Welt retten*“ könne. Die Aussage entspricht im Grunde der Wahrheit, allerdings nur der halben. Zum einen stammen die gut zwei Prozent der hierzulande emittierten Treibhausgase von nur etwa einem Prozent der Weltbevölkerung. Zum anderen gehören natürlich auch die historischen Emissionen aller Länder seit Beginn der Industrialisierung zu einer ehrlichen Bilanz – und hier liegt der Beitrag Deutschlands mit seinen vergleichsweise wenigen Einwohner:innen bei immerhin 5,3 Prozent. Als viertgrößter Emittent der Geschichte trägt Deutschland eine historische Verantwortung und muss schon deshalb seinen Beitrag zur weltweiten Dekarbonisierung leisten.

Wichtiger erscheint, dass Deutschland als in der Klimapolitik traditionell engagiertes Land und noch dazu viertgrößte Volkswirtschaft der Welt in Sachen Energiewende unter Beobachtung der Staatengemeinschaft steht. Die Frage, ob die Deutschen ihre Energiewende erfolgreich bewältigen und im internationalen Vergleich gestärkt aus ihr hervorgehen, spielt eine wichtige Rolle bei der Entscheidung, ob und wie andere sich ebenfalls auf den Weg begeben.

Taugt Deutschland bei der Energiewende international (noch) als Vorbild?

Einerseits gehört das Land weiterhin zu den Staaten mit den höchsten Stromanteilen aus Wind und Sonne, andererseits ist im Ausland nicht verborgen geblieben, dass Deutschland als traditionelles Kohleland den Ausstieg aus der Kohleverstromung nur unter großen Schmerzen beschlossen hat; darüber hinaus zu einem im internationalen Vergleich späten Zeitpunkt und zu hohen Kosten. Bei der Treibhausgas Eindämmung im Verkehrssektor und im Gebäudereich sind die Erfolge entweder nicht vorhanden (Verkehr und Mobilitätswende) oder überschaubar (Gebäudeeffizienz).

Am beeindruckendsten lässt sich die nicht immer eindeutige, oft zwiespältige Energiewendepolitik Deutschlands ausgerechnet im Vorzeigebereich der Erneuerbaren Energien dokumentieren. Deutschland ist in die Energiewende, die anfangs vor allem am Ausbaugrad von Wind- und Solarenergie gemessen wurde, dynamisch aufgebrochen, um dann, als Ökostrom überraschend schnell zu einer ernsthaften Konkurrenz für die traditionelle Energiewirtschaft heranzuwachsen, die Bremse zu ziehen. Dafür wurde der Zusammenbruch der fulminant gestarteten, noch jungen Zukunftstechnologien riskiert oder (im Fall der Photovoltaik-Industrie) sogar sehenden Auges in Kauf genommen.

Dass der Zubau der Erneuerbaren Energien dennoch phasenweise gut vorankam, war nicht Ergebnis aktiver politischer Entscheidungen, sondern vor allem Spätfolge früh gesetzter Rahmenbedingungen, insbesondere der Regelungen im Erneuerbare-Energien-Gesetz und des anhaltenden Engagements von Unternehmen und Privatpersonen. Trotz politisch angezogener Handbremse stieg der Anteil der Erneuerbaren an der Stromversorgung immer weiter, allerdings nicht in dem Maß, in dem es zur Einhaltung des Abkommens von Paris notwendig gewesen wäre.

Die weitgehende gestalterische Abstinenz der Politik in den vergangenen Jahren rächte sich zuletzt. Ohne Umsteuern und einen erfolgreichen Neustart durch die neue Bundesregierung besteht die Gefahr, dass Deutschland beim Aufbruch in Richtung Klimaneutralität hinterherhinkt oder sich bestenfalls in der Rolle des Mitläufers wiederfindet. Das wäre auch eine schwere Zukunftshypothek für den Wirtschaftsstandort Deutschland.

Das Dilemma der neuen Bundesregierung: Selbst schnellstmöglich ist noch zu langsam

Die weltweite Energiewende ist unumkehrbar geworden, weil sich die globalen Megatrends, die den Transformationsprozess vorantreiben, nach dem Inkrafttreten des Klimaabkommens von Paris verstetigt und weiter verstärkt haben. Doch diese gute Nachricht trägt nicht weit genug, weder für die neue Bundesregierung noch für Verantwortliche in anderen Regionen der Erde. Die Extremwetterereignisse der vergangenen Jahre waren jedenfalls in Teilen Ausdruck einer Belastung, die physikalisch existiert und selbst durch über Legislaturperioden durchgehaltene proaktive Klimaschutzpolitik von niemandem mehr wirksam reduziert werden kann. Einmal emittiert, bleiben die entscheidenden Treibhausgase für Zeiträume in der Atmosphäre, die sich nicht in Legislaturperioden bemessen, sondern in Jahrzehnten oder Jahrhunderten. Der Befund ist bitter, aber nicht zu ändern: Selbst schnellstmöglich ist aus dieser Perspektive noch zu langsam. Was Menschen im Jahr 2021 auf allen Kontinenten erlebt und erlitten haben, war erst das Wetterleuchten, noch nicht das Gewitter.

Deshalb läuft auf absehbare Zeit jede Regierung Gefahr, immer häufiger reagieren zu müssen und immer seltener agieren zu können, so wie im und nach dem Sommer 2021 im Westen Deutschlands. Man kann die Hoffnung hegen, dass Katastrophen, wie sie auch Teile der hier lebenden Bevölkerung durchlitten haben, seltene Ausnahmen bleiben. Die Wahrscheinlichkeit, dass Extremwetterereignisse und milliarden schwere Nothilfen zu regelmäßigen Begleitern unseres Lebens werden, lässt sich durch aktive Klimapolitik nicht ausschließen, aber reduzieren. An aktiver Klimapolitik hat es in den vergangenen Jahren gemangelt.

Die ressourcen- und energieintensiven Lebensstile, die eine weiter wachsende, globale Mittelschicht für sich in Anspruch nimmt, sind Teil des Problems. Zwar verändern sich Lebensstile naturgegeben, weil sich Gesellschaften weiterentwickeln. Aber in einer Demokratie kann der Staat die Richtung solcher Veränderungen nicht per Dekret verfügen. Die Menschen selbst können das Problem durch ihr Verhalten entschärfen, aber nicht lösen. Dafür ist mittel- und langfristige die Politik zuständig. Sie muss den Rahmen so setzen, dass es für die Einzelne und den Einzelnen attraktiver wird, ihr und sein Leben klimaschonender zu gestalten. Politik kann schmutzige Energien teurer und saubere günstiger machen. Dazu gibt es neuerdings für jedermann und jede Frau einen Preis auf das wichtigste Treibhausgas CO₂, der wachsen muss und wachsen wird. Zudem gibt es seit mehr als 20 Jahre die Förderung Erneuerbarer Energien, einen Zuschuss für Elektroautos oder mehr Platz für Radfahrer:innen auf den Straßen.

Tröstlich ist, dass die Energiewende zwar keine Garantien zur rechtzeitigen Rückkehr in ein globales Klimagleichgewicht bietet, aber sofort wirksame Veränderungen bereithält, die für Menschen schlicht und einfach aus sich heraus attraktiv sind: Städte werden leiser, dank Elektromobilität und weniger Autos; die Luft wird ohne Verbrennungsmotoren sauberer; die Wohnungen behaglicher wegen eines besseren Raumklimas nach der Sanierung. All das und vieles mehr sind Nebeneffekte einer Entwicklung, die man auch „Änderungen von Lebensstilen“ nennen kann. Vor Jahrzehnten nannten Politiker:innen es: Mehr Lebensqualität. Und niemand hat protestiert.

Die Energiewende ist unumkehrbar geworden, irgendwann zwischen Paris 2015 und Glasgow 2021. Diese Unumkehrbarkeit ist ein Wirksamkeitsnachweis multilateraler, wertebundener Politik. Die Energiewende ist auch unumkehrbar geworden, weil es keine Anzeichen dafür gibt, dass sich die hier beschriebenen Megatrends abschwächen. Aber: Megatrends brauchen Zeit, qua Definition. Einiges lässt befürchten, dass sich die Megatrends der globalen Energiewende Zeit nehmen, die die Menschheit nicht mehr hat.

Die Politik darf das nicht interessieren. Sie ist verpflichtet, alles dafür zu tun, damit die verbleibende Zeit zur Abwendung der Klimakatastrophe reicht. Auf die Geschwindigkeit der Energiewende kommt es jetzt an, mehr als auf alles andere. Mit ihr wachsen die Chancen für ein gutes, mindestens für ein glimpfliches Ende.

**Die Verpflichtung aller
Klimapolitik lautet heute:
Machen. Die Megatrends
der Energiewende
beschleunigen. Und im
Wettlauf mit der Zeit
alles dafür tun, die
Klimakrise und ihre Aus-
wirkungen einzudämmen.**

Abbildungen

Abbildung 1:	Globale wetterbedingte Schadensereignisse in den vergangenen 40 Jahren	14
Abbildung 2:	Alarmierende Bilanz: Die Entwicklung der weltweiten Treibhausgasemissionen von 1990 bis 2018 nach Sektoren	17
Abbildung 3:	Prognosen zum Zubau Erneuerbarer Energien (ohne Wasserkraft) weltweit und ihre tatsächliche Entwicklung	19
Abbildung 4:	Die Zusagen der Vertragsstaaten des Klimaabkommens von Paris zur Weltklimakonferenz in Glasgow bis Oktober 2021 reichen bei Weitem nicht, um 2050 Klimaneutralität zu erreichen	20
Abbildung 5:	CO ₂ -Emissionen bei der Nutzung der Reserven und Ressourcen von Kohle, Öl und Erdgas	34
Abbildung 6:	Dekarbonisierung made in USA: Kumulierte Veränderung der Kraftwerksleistung verschiedener Stromerzeugungstechnologien im Zeitraum 2005 bis 2020	39
Abbildung 7:	Dekarbonisierung made in Europe: Kumulierte Veränderung der Kraftwerksleistung verschiedener Stromerzeugungstechnologien im Zeitraum 2005 bis 2020	40
Abbildung 8:	Historische Emissionen, historische Verantwortung: Anteil an weltweiten CO ₂ -Emissionen von 1750 bis 2019	42
Abbildung 9:	Neu installierte bzw. stillgelegte Kohlekraftwerksleistung von 2010 bis 2020	43
Abbildung 10:	Prozentualer Anteil des Kohlestroms am jährlichen Strommix	44
Abbildung 11:	Entwicklung der weltweit installierten Kraftwerksleistung seit 2001	45
Abbildung 12:	Historischer und prognostizierter Zubau weltweiter Kohlekraftwerksleistung (mit und ohne Engagement Chinas im Ausland)	48
Abbildung 13:	Zubau und Stilllegung von Kraftwerksleistung in den USA während der Amtszeiten der US-Präsidenten George W. Bush, Barack Obama und Donald Trump	51
Abbildung 14:	Jährlicher Netto-Zubau Solarenergieleistung in Deutschland und Anteil am Ausbau in Europa	57
Abbildung 15:	Jährlicher Netto-Zubau Onshore-Windenergieleistung in Deutschland und Anteil am Ausbau in Europa	58
Abbildung 16:	Entwicklung der weltweit installierten Solarenergieleistung seit 2000	61
Abbildung 17:	Entwicklung der weltweit installierten Windenergieleistung seit 2000	62
Abbildung 18:	Jährlich weltweit installierte Kraftwerksleistung	63
Abbildung 19:	Entwicklung der weltweit installierten Kraftwerksleistung mit Erneuerbaren Energien und Atom seit 2001	65
Abbildung 20:	Entwicklung der in China installierten Kraftwerksleistung mit Erneuerbaren Energien und Atom seit 2000	67
Abbildung 21:	Jährliche Stromerzeugung aus Windenergie, Photovoltaik und Atomkraft in China	67

Abbildung 22: Jährlich installierte Kraftwerksleistung mit Erneuerbaren und Atomkraft; Anteil Erneuerbarer Energien an gesamter neu installierter Leistung	70
Abbildung 23: Stromerzeugungskosten neuer Windenergie- und Solaranlagen	76
Abbildung 24: Durchschnittliche Generatorleistung neuer Onshore-Windenergieanlagen in Deutschland im Jahr der Inbetriebnahme bzw. Genehmigung	77
Abbildung 25: Entwicklung der installierten Windenergieleistung und damit erzeugte Strommengen in Deutschland	78
Abbildung 26: Entwicklung der spezifischen Flächeninanspruchnahme von PV-Freiflächenanlagen im Jahr der Inbetriebnahme	80
Abbildung 27: Vergleich der Stromerzeugungskosten 2021 neu errichteter Kraftwerke in Deutschland	81
Abbildung 28: Entwicklung der Stromerzeugungskosten bis 2040 in Deutschland	83
Abbildung 29: Kumulierte Inbetriebnahmen Erneuerbare-Energien-Anlagen in Deutschland	91
Abbildung 30: Globales Photovoltaik-Stromerzeugungspotenzial: Chance zur Neuverteilung des globalen Wohlstands?	97
Abbildung 31: Investitionen in Erneuerbare Energien nach Regionen	98
Abbildung 32: Neuinvestitionen in regenerative Stromerzeugung nehmen weltweit zu	99
Abbildung 33: Entwicklung des Primärenergieverbrauchs und des Bruttostromverbrauchs in Deutschland auf dem Weg zur Klimaneutralität bis 2045	104
Abbildung 34: Weltweite Stromerzeugung mit einzelnen Energieträgern im Szenario „Net Zero by 2050“ der IEA	105
Abbildung 35: Entwicklung der Marktwerte großer Autohersteller	108
Abbildung 36: Verkaufszahlen und Marktanteile von Herstellern an zugelassenen Elektro-Pkw, Stand 2020	109
Abbildung 37: Die Wasserstoff-Farbenlehre	117
Abbildung 38: Einsatzbereiche für sauberen Wasserstoff und dessen Wirtschaftlichkeit	119
Abbildung 39: Einzel- und Gesamtwirkungsgrade von Pkws mit unterschiedlichen Antriebskonzepten	121
Abbildung 40: Heizsysteme der Zukunft im Effizienzvergleich	123
Abbildung 41: Wasserstoff in Deutschland: für die Industrie, zur Absicherung gegen die Dunkelflaute und für Fernwärme	126
Abbildung 42: Jährliche ungeplante Unterbrechungen der Stromversorgung in Deutschland	130
Abbildung 43: Preissturz bei Lithium-Batterien im letzten Jahrzehnt	135
Abbildung 44: Abschätzung der zu erwartenden Erderhitzung Erderhitzung bis 2100 bei unterschiedlich intensiven Klimaschutzanstrengungen der Vertragsstaaten des Klimaabkommens von Paris	142

Quellen & Anmerkungen

- 1 UNFCCC (2021): Decision -/CP.26, Glasgow Climate Pact, Abs. 15 – 18; https://unfccc.int/sites/default/files/resource/cop26_auv_2f_cover_decision.pdf.
- 2 Munich Re, NatCatSERVICE (2021): Zahl der relevanten Schadenereignisse 1980 – 2019; <https://www.munichre.com/de/risiken/naturkatastrophen-schaeden-nehmen-tendenziell-zu.html>; ergänzt mit Werten für 2020 aus dem Vortrag von Peter Höppe, ehem. Leiter Geo Risks Research, Munich Re; https://www.business.ruhr/fileadmin/user_upload/Einladungsversand/GreenTech/Klima_Wasser_BMR_Hoeppe_2021.pdf.
- 3 United Nations – Department of Economic and Social Affairs (2019): World Population Prospects 2019; <https://population.un.org/wpp/Publications/>.
- 4 Auch Angela Merkel, die angebliche „Klimakanzlerin“, war da keine Ausnahme. Gegen die Klimaerhitzung sei während ihrer langjährigen Regierungszeit „nicht ausreichend viel passiert“, sagte sie auf ihrer letzten Sommerpressekonferenz im Juli 2021; <https://www.faz.net/aktuell/politik/inland/merkel-gesteht-versaeumnisse-bei-der-klimapolitik-ein-17448755.html>.
- 5 WWF, LichtBlick (Hrsg., 2015): Megatrends der globalen Energiewende; <https://www.wwf.de/fileadmin/fm-wwf/Publikationen-PDF/Megatrends-der-globalen-Energiewende.pdf>.
- 6 William F. Lamp et al. (2021): A review of trends and drivers of greenhouse gas emissions by sector from 1990 to 2018, Environ. Res. Lett. 16 073005; <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/abee4e>.
- 7 William F. Lamp et al. (2021): A review of trends and drivers of greenhouse gas emissions by sector from 1990 to 2018, Environ. Res. Lett. 16 073005; <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/abee4e>.
- 8 Der Rückgang der Treibhausgasemissionen im Corona-Jahr 2020 sind in Abbildung 2 noch nicht erfasst.
- 9 IEA (2021): World Energy Outlook 2021, Executive Summary; <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2021/executive-summary>.
- 10 Heinrich-Böll-Stiftung (Hrsg., 2006): Mythos Atomkraft – Ein Wegweiser, S. 11 ff.; https://www.boell.de/sites/default/files/Mythos_Atomkraft_komprimiert_mit_Bildern.pdf.
- 11 Deutsche Umwelthilfe (2006): Chronik eines verschleppten Problems; http://www.duh.de/uploads/media/Hintergrundpapier_Forsmark_in_Deutschland.pdf.
- 12 Abgesehen von der AfD, die die Behauptung, Deutschland allein mache sich auf den Weg, mit eiserner Realitätsverweigerung weiterverbreitet (z. B. Alice Weidel in DIE ZEIT vom 08.07.2021).
- 13 IEA Historie; <https://www.iea.org/about/history>.
- 14 IEA: World Energy Outlook; <https://www.iea.org/topics/world-energy-outlook>. Greenpeace (2010): energy [r]evolution; <http://www.greenpeace.org/international/Global/international/publications/climate/2010/fullreport.pdf>. IRENA (2021): Data & Statistics; <https://www.irena.org/Statistics/View-Data-by-Topic/Capacity-and-Generation/Statistics-Time-Series>.
- 15 Fatih Birol anlässlich der Vorstellung des Leitszenarios „Net Zero by 2050“ der Internationalen Energieagentur (IEA) am 18.05.2021 in Paris.

- 16 IEA (2021): Net Zero by 2050 – A Roadmap for the Global Energy Sector; https://iea.blob.core.windows.net/assets/beceb956-0dcf-4d73-89fe-1310e3046d68/NetZeroBy2050-ARoadmapfortheGlobalEnergySector_CORR.pdf.
- 17 COP – Conference of the Parties: Regelmäßige Konferenzen der Vertragsparteien der Weltklimakonvention der Vereinten Nationen zur Umsetzung der 1992 in Rio de Janeiro ins Leben gerufenen und zwei Jahre später in Kraft getretenen Konvention.
- 18 IEA (2021): World Energy Outlook 2021; <https://iea.blob.core.windows.net/assets/ed3b983c-e2c9-401c-8633-749c3fefb375/WorldEnergyOutlook2021.pdf>.
- 19 IEA (2021): World Energy Outlook 2021, Executive Summary; <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2021/executive-summary>.
- 20 Einige der Faktoren treffen auf andere Weltregionen ebenso zu, manche sind spezifisch deutsch.
- 21 Verbale Attacken gegen Protagonist:innen einer mahnenden Argumentation zum Schutz des Klimas – in Deutschland etwa auf die prominenten Klimaforscher Hans Joachim Schellnhuber und Stefan Rahmstorf – sind bis heute an der Tagesordnung.
- 22 DWD, Pressekonferenz am 09.03.2021: Wetterextreme dem Klimawandel zuordnen – Klimabilanz 2020; https://www.dwd.de/DE/presse/pressekonferenzen/DE/2021/PK_09_03_2021/pressekonferenz.html.
- 23 World Weather Attribution Initiative (2021): Rapid attribution analysis of the extraordinary heatwave on the Pacific Coast of the US and Canada June 2021; <https://www.worldweatherattribution.org/wp-content/uploads/NW-US-extreme-heat-2021-scientific-report-WWA.pdf>.
- 24 Deshalb war der Ratschlag mancher Erwachsener, sie könnten doch auch samstags oder sonntags „streiken“, an Albernheit kaum zu überbieten.
- 25 FAZ vom 21.05.2021: RWE und BASF planen Megawindpark in der Nordsee; <https://www.faz.net/aktuell/wirtschaft/unternehmen/rwe-und-basf-kooperieren-fuer-gemeinsamen-offshore-windpark-17352780.html>.
- 26 Stiftung 2° – Deutsche Unternehmer für Klimaschutz; <https://www.stiftung2grad.de>; Am 18.11.2021 umbenannt in Stiftung KlimaWirtschaft; <https://klimawirtschaft.org/stiftung-2-wird-zur-stiftung-klimawirtschaft-7529>.
- 27 Stiftung 2° (2021): Eine Umsetzungsoffensive für Klimaschutz. Jetzt; <https://www.stiftung2grad.de/umsetzungsoffensive-klimaneutralitaet-7176>.
- 28 Bundesverfassungsgericht, Pressemitteilung vom 29.04.2021: Verfassungsbeschwerden gegen das Klimaschutzgesetz teilweise erfolgreich; <https://www.bundesverfassungsgericht.de/Shared-Docs/Pressemitteilungen/DE/2021/bvg21-031.html>.
- 29 Bezirksgericht Den Haag, Urteil vom 26.05.2021 (Az.: C/09/571932); <https://uitspraken.rechtspraak.nl/inziendocument?id=ECLI:NL:RBDHA:2021:5339>.
- 30 Green Legal Impact, Meldung vom 26.05.2021: Shell von niederländischem Gericht verurteilt; <https://www.greenlegal.eu/shell-verurteilt/>.
- 31 Tagesschau vom 26.05.2021: Ein Urteil wie ein „Paukenschlag“; <https://www.tagesschau.de/wirtschaft/unternehmen/klimaschutz-shell-prozess-101.html>.

- 32 OPEC-Mitgliedstaaten sind: Algerien, Angola, Äquatorialguinea, Ecuador (bis 2020), Gabun, Indonesien (bis 2016), Irak, Iran, Katar (bis 2018), Republik Kongo, Kuwait, Libyen, Nigeria, Saudi-Arabien, Venezuela sowie die Vereinigten Arabischen Emirate.
- 33 IEA (2021): Net Zero by 2050 – A Roadmap for the Global Energy Sector; <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>.
- 34 California News Times vom 23.05.2021: Member countries push back against IEA's net zero road map; <https://californianewstimes.com/member-countries-push-back-against-ieas-net-zero-road-map/354929/>.
- 35 Oilprice.com vom 21.05.2021: OPEC Slams IEA's Net-Zero Report as 'Destabilizing'; <https://oilprice.com/Energy/Crude-Oil/OPEC-Slams-IEAs-Net-Zero-Report-As-Destabilizing.html>.
- 36 The Telegraph-Interview vom 25.06.2000: Sheikh Yamani predicts price crash as age of oil ends; <http://www.telegraph.co.uk/news/uknews/1344832/Sheikh-Yamani-predicts-price-crash-as-age-of-oil-ends.html>.
- 37 Christophe McGlade, Paul Ekins (2015): The geographical distribution of fossil fuels unused when limiting global warming to 2 °C, Nature, Vol. 517, S. 187 – 190; <https://www.nature.com/articles/nature14016>.
- 38 Dan Welsby, James Price, Steve Pye, Paul Ekins (2021): Unextractable fossil fuels in a 1.5 °C world, Nature, Vol. 597, S. 230 – 234; <https://www.nature.com/articles/s41586-021-03821-8.pdf>.
- 39 IPCC-Sonderbericht (2018): 1,5 °C globale Erwärmung – Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger; https://www.de-ipcc.de/media/content/SR1.5-SPM_de_181130.pdf.
- 40 IPCC (2021): AR6 Climate Change 2021 – The Physical Science Basis; <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>. BGR (2020): Energiestudie 2019, S. 41; https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Energie/Downloads/energiestudie_2019.pdf.
- 41 Sehr plastisch macht diesen Sachverhalt beispielsweise die ablaufende Weltklima-Uhr des Mercator Research Institute on Global Commons and Climate Change (MCC), die auf den jeweils aktuellen Szenarien des IPCC beruht; <https://www.mcc-berlin.net/forschung/co2-budget.html>.
- 42 Reserven bezeichnen mit aktuellem Stand der Technik wirtschaftlich förderbare Rohstoffe. Ressourcen bezeichnen die bekannten Vorkommen ohne Aussage zur Wirtschaftlichkeit oder technischen Machbarkeit der Förderung.
- 43 IPCC (2021): AR6 Climate Change 2021 – The Physical Science Basis; <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>. BGR (2020): Energiestudie 2019, S. 41; https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Energie/Downloads/energiestudie_2019.pdf.
- 44 IEA (2021): World Energy Investment 2021; <https://iea.blob.core.windows.net/assets/5e6b3821-bb8f-4df4-a88b-e891cd8251e3/WorldEnergyInvestment2021.pdf>.
- 45 IEA (2021): World Energy Outlook 2021; <https://iea.blob.core.windows.net/assets/88dec0c7-3a11-4d3b-99dc-8323ebfb388b/WorldEnergyOutlook2021.pdf>.
- 46 Breakbulk vom 15.06.2021: (Global) IEA Predicts Clean Energy Spending Surge; <https://breakbulk.com/Articles/energy-investment-to-rally-in-2021>.
- 47 New York Times vom 26.10.2021: Australia Pledges 'Net Zero' Emissions by 2050. Its Plan Makes That Hard to Believe; <https://www.nytimes.com/2021/10/26/world/australia/net-zero-delay.html>.

- 48 Renew Economy vom 27.10.2021: If all 2030 climate targets are met, the planet will heat by 2.7 °C. That's not OK; <https://reneweconomy.com.au/if-all-2030-climate-targets-are-met-the-planet-will-heat-by-2-7%E2%84%83-thats-not-ok/>.
- 49 Tagesschau vom 16.07.2021: „Grönland stoppt Suche nach Erdöl“; <https://www.tagesschau.de/wirtschaft/weltwirtschaft/groenland-arktis-erdoel-klimaschutz-101.html>.
- 50 Fossil Free Deutschland, Kampagne von 350.org; <https://gofossilfree.org/de/>.
- 51 Rockefeller Brothers Fund, Pressemitteilung vom 22.09.2014: Fund Announces Plans to Divest from Fossil Fuels; <http://www.rbf.org/post/fund-announces-plans-divest-fossil-fuels>.
- 52 WWF (2015): Norwegen – Kohle fliegt aus dem Pensionsfonds; <https://blog.wwf.de/keine-kohle-fuer-kohle/>.
- 53 Drei der acht Kraftwerke mit den meisten CO₂-Emissionen im Jahr 2018 innerhalb der EU werden von RWE betrieben und emittierten zusammen 74,8 Mio. t CO₂; vgl. Transport & Environment (2019): Top 10 EU GHG emitters; <https://www.transportenvironment.org/discover/shipping-company-carrying-your-christmas-presents-joins-eus-top-10-polluters/>. Im Jahr 2019 emittierte RWE gemäß eigenem Konzernbericht mit der Stromerzeugung 88,1 Mio. t CO₂; <https://www.rwe.com/-/media/RWE/documents/09-verantwortung-nachhaltigkeit/cr-berichte/rwe-nichtfinanzieller-bericht-2020.pdf>.
- 54 Bloomberg Green vom 12.03.2021: France's Biggest Insurer Dumps German Power Giant Over Coal; <https://www.bloomberg.com/news/articles/2021-03-12/france-s-biggest-insurer-dumps-german-power-giant-over-coal>.
- 55 Allianz (2021): Statement on Coal-based Business Models; https://www.allianz.com/content/dam/onemarketing/azcom/Allianz_com/responsibility/documents/Allianz-Statement-coal-based-business-models.pdf.
- 56 Insurance Journal vom 01.04.2021; Zurich Insurance Deepens Climate Change Strategy; <https://www.insurancejournal.com/news/international/2021/04/01/608002.htm>.
- 57 Insuring Our Future (2020): The 2020 Scorecard on Insurance, Fossil Fuels and Climate Change; <https://insureourfuture.co/wp-content/uploads/2020/12/IOF-REPORT-FINAL-1.pdf>.
- 58 Willis Towers Watson: Mining Risk Review 2020; <https://willistowerswatson.turtl.co/story/mining-risk-review-2020-ungated/page/1>.
- 59 PPCA (2021): New PPCA members tip the scales towards 'consigning coal to history' at COP26; <https://www.poweringpastcoal.org/news/press-release/new-ppca-members-tip-the-scales-towards-consigning-coal-to-history-at-cop26>.
- 60 PPCA (2021): PPCA triggers a global shift towards consigning coal to history; <https://www.poweringpastcoal.org/news/PPCA-news/ppca-triggers-a-global-shift-towards-consigning-coal-to-history>.
- 61 Im Herbst 2021 betrieben E.ON (über seine Tochter PreussenElektra), RWE, Vattenfall und EnBW noch sechs Atomkraftwerke, die bis Ende 2022 vom Netz gehen. Neben den Zwischen- und Endlagerprojekten, die voraussichtlich noch Generationen nach uns beschäftigen, hat auch die Brennelementefabrik Gronau den deutschen Atomausstieg bisher überlebt.

- 62 Eigentümer der LEAG sind die Lausitz Energie Bergbau AG und die Lausitz Energie Kraftwerke AG. Beide Unternehmen gehören je zu 50 Prozent der Energetický a Průmyslový Holding (EPH) und der PPF Investments. EPH ist zudem alleinige Gesellschafterin der Mitteldeutschen Braunkohlegesellschaft mbH (MIBRAG) und betreibt nahe Hannover das Steinkohlekraftwerk Mehrum; <https://www.epholding.cz/en/business-areas/#mibrag> sowie <https://www.epholding.cz/en/business-areas/#mehrums>.
- 63 Elf Steinkohleblöcke in Baden-Württemberg betreibt EnBW mehrheitlich in Kraft-Wärme-Kopplung und ist zudem Eigentümerin von Block S (875 MW) im Braunkohlekraftwerk Lippendorf nahe Leipzig, dessen zwei Blöcke (1.750 MW) von der LEAG betrieben werden.
- 64 tagesschau.de vom 15.11.2021: Energieversorger RWE: 50 Gigawatt Ökostrom bis 2030; <https://www.tagesschau.de/wirtschaft/unternehmen/rwe-50-milliarden-investitionen-101.html>.
- 65 Engine No. 1; <https://engine1.com/>.
- 66 Reuters vom 26.05.2021: Chevron investors back proposal for more emissions cuts; <https://www.reuters.com/business/energy/chevron-shareholders-approve-proposal-cut-customer-emissions-2021-05-26/>.
- 67 Moody's Investors Service vom 01.10.2015: US coal industry outlook remains dim on falling consumption and weak met coal prices; https://www.moody.com/research/Moodys-US-coal-industry-outlook-remains-dim-on-falling-consumption--PR_335795.
- 68 eia: Annual Energy Review – Electricity Net Generation; <https://www.eia.gov/totalenergy/data/annual/index.php>.
- 69 The Wall Street Journal vom 08.06.2021: Vogtle Nuclear Plant in Georgia Faces More Construction Delays; <https://www.wsj.com/articles/vogtle-nuclear-plant-in-georgia-faces-more-construction-delays-11623172361>.
- 70 Mycle Schneider, Antony Froggatt (2020): The World Nuclear Industry – Status Report 2020, S. 195 ff.; https://www.worldnuclearreport.org/IMG/pdf/wnisr2020-v2_lr.pdf.
- 71 eia (2021): Annual Energy Outlook 2021; <https://www.eia.gov/outlooks/aeo/electricity/sub-topic-02.php>.
- 72 IRENA (2021): Data & Statistics; <https://www.irena.org/Statistics/View-Data-by-Topic/Capacity-and-Generation/Statistics-Time-Series>.
- 73 Global Energy Monitor (2021); <https://globalenergymonitor.org/projects/global-coal-plant-tracker/dashboard/>. BP Statistical Review of World Energy (2021); <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>.
- 74 IRENA (2021): renewable electricity capacity and generation statistics; <https://www.irena.org/Statistics/Download-Data>; Global Energy Monitor (2021); <https://globalenergymonitor.org/projects/global-coal-plant-tracker/dashboard/>.
- 75 Deutsche Welle vom 30.06.2021: Faktencheck – Wie viel Verantwortung hat China für den Klimawandel?; <https://www.dw.com/de/faktencheck-china-verantwortung-schuld-klimawandel-co2-aussto%C3%9F/a-57832748>.

- 76 Die häufig vorgebrachte Behauptung, Deutschland trage derzeit nur etwa zwei Prozent zu den weltweiten CO₂-Emissionen bei, ist zwar korrekt; dabei wird aber in aller Regel unterschlagen, dass hier nur etwa ein Prozent der Menschen leben und die historischen Emissionen weitaus höher sind.
- 77 Our World in Data (2020): CO₂ and Greenhouse Gas Emissions; <https://ourworldindata.org/co2-emissions#co2-emissions-by-region>.
- 78 Beispiele für Pro-Kopf-Emissionen im Jahr 2019: USA: 16,1 Tonnen pro Jahr (t/a); Deutschland: 8,4 t/a; EU-28: 6,4 t/a; China: 7,1 t/a; Indien: 1,9 t/a; Quelle: Our World in Data.
- 79 Our World in Data (2020): CO₂ and Greenhouse Gas Emissions; <https://ourworldindata.org/co2-emissions#co2-emissions-by-region>.
- 80 Ember (2020): Global Electricity Review 2020 – Graph Data; <https://ember-climate.org/project/data-global-electricity-review/>.
- 81 Global Coal Plant Tracker (2021); <https://globalenergymonitor.org/projects/global-coal-plant-tracker/dashboard/>.
- 82 Ember (2021): Global Electricity Review; <https://ember-climate.org/data/global-electricity/>.
- 83 Aus dem Ausstieg („phase-out“) aus der Kohle wurde eine Verminderung („phase-down“), vgl. UNFCCC (2021): Decision -/CP.26, Glasgow Climate Pact, Abs. 20; Öl und Erdgas werden in dem Beschluss als Treiber der Klimakrise gar nicht thematisiert. https://unfccc.int/sites/default/files/resource/cop26_auv_2f_cover_decision.pdf.
- 84 Artikel 3, Absatz 1 und Artikel 4, Absatz 1 der Klimarahmenkonvention – United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC); <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/conveng.pdf>.
- 85 IRENA (2021): renewable electricity capacity and generation statistics; <https://www.irena.org/Statistics/Download-Data>.
- 86 IPCC-Sonderbericht (2018): 1,5 °C globale Erwärmung – Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger; https://www.de-ipcc.de/media/content/SR1.5-SPM_de_181130.pdf.
- 87 UNFCCC (2021): UNFCCC (2021): Decision -/CP.26, Glasgow Climate Pact (Advance unedited version), Absatz 17; https://unfccc.int/sites/default/files/resource/cop26_auv_2f_cover_decision.pdf.
- 88 UNFCCC (2021): Decision -/CMA.3, Glasgow Climate Pact (Advance unedited version), Absatz 29; https://unfccc.int/sites/default/files/resource/cma3_auv_2_cover%20decision.pdf.
- 89 Dies bezieht sich nicht nur auf die Reduktionsverpflichtungen der Industriestaaten, sondern auch auf deren Bereitschaft, bei der Finanzierung der Energiewende im Globalen Süden und den dort auftretenden wachsenden Klimaschäden finanziell zu helfen.
- 90 China's Achievements, New Goals and New Measures for Nationally Determined Contribution (Unofficial Translation), eingereicht bei den Vereinten Nationen am 29.10.2021; <https://www.unfccc.int/sites/ndcstaging/PublishedDocuments/China%20First/China%E2%80%99s%20Achievements,%20New%20Goals%20and%20New%20Measures%20for%20Nationally%20Determined%20Contributions.pdf>.
- 91 Gemäß Datenlage des BP Statistical Review of World Energy lag der Anteil Chinas an der globalen Kohlestromerzeugung im Jahr 2020 bei 52 Prozent.

- 92 Chinas Pläne würden, übertragen auf die Welt, eher auf eine Erhitzung um 3 °C hinauslaufen. Auf diesem Pfad blieb das Land auch beim Weltklimagipfel in Glasgow, an dem Präsident Xi Jinping nicht teilnahm.
- 93 Manager Magazin vom 16.07.2021: In China gibt es jetzt auch einen Emissionshandel; <https://www.manager-magazin.de/politik/weltwirtschaft/klimawandel-china-startet-weltgroesstes-emissionshandelssystem-a-cc8c45ef-c339-474a-ba88-aa2c5fed67dc>.
- 94 Nach Datenlage von Global Coal Plant Tracker gingen 2020 in China 41 Gigawatt Kohlekraftwerkskapazität in Betrieb, weltweit waren es insgesamt 54,9 Gigawatt; <https://globalenergymonitor.org/projects/global-coal-plant-tracker/dashboard/>.
- 95 Centre for Research on Energy and Clean Air, CREA (2021): 4.5 times as much overseas coal capacity linked to China cancelled or shelved than progressed to construction; <https://energyandcleanair.org/wp/wp-content/uploads/2021/06/CH-Overseas-Coal-Briefing.pdf>.
- 96 Tagesschau vom 22.09.2021: Aus für Kohlekraftwerkbau im Ausland; <https://www.tagesschau.de/ausland/asien/un-china-kohlekraft-101.html>.
- 97 IEA (2021): World Energy Outlook 2021; <https://iea.blob.core.windows.net/assets/ed3b983c-e2c9-401c-8633-749c3fefb375/WorldEnergyOutlook2021.pdf>.
- 98 IEA (2021): World Energy Outlook 2021, Executive Summary; <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2021/executive-summary>.
- 99 E3G (2021): No New Coal by 2021; <https://www.e3g.org/publications/no-new-coal/>.
- 100 Giles Parkinson: Fossil fuels face \$30 trillion losses from climate, renewables, in: Renew Economy vom 28.04.2015; <http://reneweconomy.com.au/2014/fossil-fuels-face-30-trillion-losses-from-climate-renewables-11465>.
- 101 Das deutsche Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) gilt weltweit als Musterbeispiel einer staatlich initiierten Technologieentwicklung, die schließlich zu einer eigenständigen Wachstumsdynamik und am Ende zu einem Technologiewechsel in vielen Ländern führte.
- 102 eia (2021): international data – electricity; <https://www.eia.gov/international/data/world/electricity/electricity-capacity>.
- 103 ICAP (2021): Emissions Trading Worldwide – Status Report 2021; <https://icapcarbonaction.com/en/icap-status-report-2021>.
- 104 Hinter China, den USA, Australien, Brasilien, Mexiko und Spanien; Quelle: IRENA, renewable electricity capacity and generation statistics; <https://www.irena.org/Statistics/Download-Data>; eigene Auswertung.
- 105 Hinter China, den USA, Vietnam und Japan; Quelle: IRENA, renewable electricity capacity and generation statistics; <https://www.irena.org/Statistics/Download-Data>; eigene Auswertung.
- 106 BMWi, AGEE-Stat (2021): Zeitreihen zur Entwicklung der erneuerbaren Energie in Deutschland; https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Navigation/DE/Service/Erneuerbare_Energien_in_Zahlen/Zeitreihen/zeitreihen.html.
- 107 FA Wind (2021): Analyse der Ausbausituation der Windenergie an Land im Jahr 2020; https://www.fachagentur-windenergie.de/fileadmin/files/Veroeffentlichungen/Analysen/FA_Wind_Zubauanalyse_Wind-an-Land_Gesamtjahr_2020.pdf.

- 108 Deutsche WindGuard (2021): Status des Offshore-Windenergieausbaus in Deutschland Jahr 2020; https://www.wind-energie.de/fileadmin/redaktion/dokumente/publikationen-oeffentlich/themen/06-zahlen-und-fakten/Status_des_Offshore-Windenergieausbaus_-_Jahr_2020.pdf.
- 109 BMWi, AGEE-Stat (2021), Zeitreihen zur Entwicklung der erneuerbaren Energie in Deutschland; https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Navigation/DE/Service/Erneuerbare_Energien_in_Zahlen/Zeitreihen/zeitreihen.html.
- 110 IRENA (2021): renewable electricity capacity and generation statistics; <https://www.irena.org/Statistics/Download-Data>.
- 111 FAZ vom 17.03.2021: Strom für Grüne Industrie – „Brutal günstig und unvorstellbar viel“; <https://www.faz.net/aktuell/wirtschaft/klima-energie-und-umwelt/energiewende-chemische-industrie-fordert-mehr-oekostrom-17248364.html>. Deutschlandfunk vom 01.08.2021: Ohne Ökostrom keine Investitionen, Interview mit BDI-Präsident Russwurm; https://www.deutschlandfunk.de/bundesverband-der-deutschen-industrie-russwurm-regierung.868.de.html?dram:article_id=501082.
- 112 Stiftung 2° (2021): Eine Umsetzungsoffensive für Klimaschutz. Jetzt; <https://www.stiftung2grad.de/umsetzungsoffensive-klimaneutralitaet-7176>.
- 113 Koalitionsvertrag zwischen SPD, Bündnis 90/Die Grünen und FDP: Mehr Fortschritt wagen. Bündnis für Freiheit, Gerechtigkeit und Nachhaltigkeit, S. 56; https://www.spd.de/fileadmin/Dokumente/Koalitionsvertrag/Koalitionsvertrag_2021-2025.pdf.
- 114 Während sich die Beschäftigtenzahl zwischen 2000 und 2011 vervierfachte, sank die Bruttobeschäftigung im letzten Jahrzehnt kontinuierlich. Von rund 417.000 Arbeitnehmer:innen im Jahr 2011 waren 2018 noch 304.000 in der Erneuerbaren-Branche tätig; vgl. Marlene O'Sullivan, Dietmar Edler (2020): Gross Employment Effects in the Renewable Energy Industry in Germany – An Input-Output Analysis from 2000 to 2018, Sustainability 2020, 12 (15) 6163; <https://doi.org/10.3390/su12156163>. Bis Herbst 2021 gingen tausende weitere Stellen allein in der Windbranche verloren.
- 115 IRENA (2021): Data & Statistics; <https://www.irena.org/Statistics/View-Data-by-Topic/Capacity-and-Generation/Statistics-Time-Series>.
- 116 Prognos, Öko-Institut, Wuppertal Institut (2021): Klimaneutrales Deutschland 2045, S. 25; <https://www.agora-energiewende.de/veroeffentlichungen/klimaneutrales-deutschland-2045/>.
- 117 Prognos, Öko-Institut, Wuppertal Institut (2021): Klimaneutrales Deutschland 2045, S. 25; <https://www.agora-energiewende.de/veroeffentlichungen/klimaneutrales-deutschland-2045/>.
- 118 Ariadne-Report (2021): Deutschland auf dem Weg zur Klimaneutralität 2045 – Szenarien und Pfade im Modellvergleich, S. 42 ff.; <https://ariadneprojekt.de/publikation/deutschland-auf-dem-weg-zur-klimaneutralitaet-2045-szenarienreport/>.
- 119 IRENA (2021): Data & Statistics; <https://www.irena.org/Statistics/View-Data-by-Topic/Capacity-and-Generation/Statistics-Time-Series>.
- 120 Prognos, Öko-Institut, Wuppertal Institut (2021): Klimaneutrales Deutschland 2045, S. 25; <https://www.agora-energiewende.de/veroeffentlichungen/klimaneutrales-deutschland-2045/>.
- 121 Das EEG wurde schon damals mit Unterstützung von Parlamentarier:innen aller seinerzeit im Deutschen Bundestag vertretenen Fraktionen beschlossen.

- 122 2020 boten 83 Staaten, auf nationaler oder bundesstaatlicher/provinzieller Ebene, Einspeisetarife oder Prämienzahlungen für Erneuerbare Energien. In 116 Ländern existieren Ausschreibungssysteme für Strom aus regenerativen Quellen, REN 21 (2021): Global Status Report Policy, S. 79 f.; https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2021_Full_Report.pdf.
- 123 Von 2006 bis 2019 wurden 251,5 Mrd. Euro auf Basis des EEG für 1.746 TWh erneuerbaren Strom gezahlt, davon 103 Mrd. Euro für 322 TWh Strom aus Solaranlagen und 58,1 Mrd. Euro für 804 TWh Strom aus Windrädern an Land; BNetzA (2021): EEG in Zahlen 2019, Tab. 3.3, 3.5; https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Sachgebiete/ElektrizitaetundGas/Unternehmen_Institutionen/ErneuerbareEnergien/ZahlenDatenInformationen/start.html.
- 124 Die Ampelregierung will die EEG-Umlage ab 2023 nicht mehr über den Strompreis, sondern aus Haushaltsmitteln über einen neu einzurichtenden Klima- und Transformationsfonds (KTF) finanzieren.
- 125 IEA (2021): Renewables 2021. Analysis and forecast to 2026; <https://iea.blob.core.windows.net/assets/5ae32253-7409-4f9a-a91d-1493ffb9777a/Renewables2021-Analysisandforecastto2026.pdf>.
- 126 IRENA (2021): renewable electricity capacity and generation statistics; <https://www.irena.org/Statistics/Download-Data>.
- 127 IRENA (2021): renewable electricity capacity and generation statistics; <https://www.irena.org/Statistics/Download-Data>.
- 128 IEA (2021): World Energy Investment 2021; <https://iea.blob.core.windows.net/assets/5e6b3821-bb8f-4df4-a88b-e891cd8251e3/WorldEnergyInvestment2021.pdf>.
- 129 IRENA (2021): renewable electricity capacity and generation statistics; <https://www.irena.org/Statistics/Download-Data>.
- 130 Siehe dazu ausführlich Megatrend 3.
- 131 IRENA (2021): renewable electricity capacity and generation statistics; <https://www.irena.org/Statistics/Download-Data>.
- 132 IEA (2021): World Energy Outlook 2021, S. 88 f; <https://iea.blob.core.windows.net/assets/88dec0c7-3a11-4d3b-99dc-8323ebfb388b/WorldEnergyOutlook2021.pdf>.
- 133 IRENA (2021): renewable electricity capacity and generation statistics; <https://www.irena.org/Statistics/Download-Data>.
- 134 Statista (2021): Installierte Leistung der Wasserkraftanlagen weltweit in den Jahren 2010 bis 2020; <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/468382/umfrage/installierte-leistung-von-wasserkraftanlagen-weltweit/>.
- 135 Ingenieur.de vom 20.07.2021: Die 10 größten Wasserkraftwerke der Welt; <https://www.ingenieur.de/technik/fachbereiche/rekorde/die-top-10-groessten-wasserkraftwerke-weltweit/>.
- 136 BP Statistical Review of World Energy (2021); <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2021-full-report.pdf>.
- 137 BP Statistical Review of World Energy (2021); <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2021-full-report.pdf>.

- 138 IRENA (2021): renewable electricity capacity and generation statistics; <https://www.irena.org/Statistics/Download-Data>.
- 139 BP (2021): Statistical Review of World Energy; <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>.
- 140 IEA (2021): India Energy Outlook 2021, Special Report; <https://www.iea.org/reports/india-energy-outlook-2021>.
- 141 Tagesschau.de vom 01.11.2021: Indien will Klimaneutralität bis 2070; <https://www.tagesschau.de/ausland/indien-klimaziel-101.html>.
- 142 Climate Action Tracker (2021): Länderbericht Indien; <https://climateactiontracker.org/countries/india/>
- 143 IEA (2021): Financing clean energy transitions in emerging and developing economies, Executive Summary; <https://www.iea.org/reports/financing-clean-energy-transitions-in-emerging-and-developing-economies>.
- 144 IEA (2021): World Energy Outlook 2021, Launch Event, 19:30 – 22:45; <https://www.youtube.com/watch?v=rnum4VH6sh0>.
- 145 UNFCCC (2021): Decision -/CP.26, Glasgow Climate Pact (Advance unedited version), Absatz 27; https://unfccc.int/sites/default/files/resource/cop26_auv_2f_cover_decision.pdf.
- 146 IEA (2021): Net Zero by 2050 – A Roadmap for the Global Energy Sector. S. 73 ff.; <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>.
- 147 IRENA (2021): renewable electricity capacity and generation statistics; <https://www.irena.org/Statistics/Download-Data>.
- 148 IRENA (2021): World Energy Transitions Outlook – 1.5 °C Pathway; https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2021/Jun/IRENA_World_Energy_Transitions_Outlook_2021.pdf.
- 149 IEA (2021): Net Zero by 2050 – A Roadmap for the Global Energy Sector. S. 32 ff.; <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>. IRENA (2021); World Energy Transitions Outlook – 1.5 °C Pathway; https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2021/Jun/IRENA_World_Energy_Transitions_Outlook_2021.pdf. EU-KOM (2021): A Clean Planet for all – A European strategic long-term vision for a prosperous, modern, competitive and climate neutral economy; <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52018DC0773>.
- 150 Am 26.10.2021 veröffentlichte das Umweltprogramm der Vereinten Nationen (UNEP) seinen Emissions Gap Report 2021, in dem ebenfalls über die wachsende Zahl von Ländern berichtet wird, die sich Klimaneutralität zum Ziel gesetzt haben (hier: 49 Länder und die EU, die zusammen etwa ein Drittel der Weltbevölkerung repräsentieren). Die Zahlen von IEA und UNEP sind unter anderem deshalb nicht miteinander vergleichbar, weil sie sich z. T. auf alle Treibhausgasemissionen beziehen, z. T. nur auf CO₂ und auch, weil bei der IEA neben gesetzlichen Regelungen auch Regierungsbeschlüsse oder politische Ankündigungen erfasst sind. UNEP (2021): Emissions Gap Report 2021, S. 18 ff.; <https://www.unep.org/resources/emissions-gap-report-2021>.
- 151 Zur Problematik der mangelnden Vergleichbarkeit der verkündeten Langfristziele siehe auch Joeri Rogelj et al. (2021): Net-zero emissions targets are vague: three ways to fix, Nature, Vol. 591, S. 365 – 368; <https://doi.org/10.1038/d41586-021-00662-3>.
- 152 Zum Beispiel in Ländern wie Norwegen und Island, die reich an Wasserkraft sind.

- 153 IEA (2020): World Energy Investment 2020; <https://www.iea.org/reports/world-energy-investment-2020>.
- 154 Ein nicht zu vernachlässigender CO₂-Fußabdruck entsteht bei der Gewinnung der nuklearen Brennstoffe („Urananreicherung“), bei der Errichtung der Kraftwerke, dem Abriss stillgelegter Anlagen und der Entsorgung der Abfälle.
- 155 Anzeige der deutschen Stromversorger in zahlreichen Tageszeitungen im Jahr 1993; <https://klima-luegendetektor.de/2012/10/11/energiwirtschaft-die-scharfsten-kritiker/>. Der tatsächliche Anteil der Erneuerbaren am deutschen Stromverbrauch betrug 2019 fast 43 Prozent und 2020 rund 46 Prozent; https://static.agora-energiwende.de/fileadmin/Projekte/2019/Jahresauswertung_2019/171_A-EW_Jahresauswertung_2019_WEB.pdf sowie https://static.agora-energiwende.de/fileadmin/Projekte/2021/2020_01_Jahresauswertung_2020/200_A-EW_Jahresauswertung_2020_WEB.pdf.
- 156 In Deutschland verpflichtet das Energiewirtschaftsgesetz das BMWi zum fortlaufenden „Monitoring der Versorgungssicherheit“ (§ 51 EnWG) insbesondere für den Stromsektor. Zuletzt wurde die Versorgungssicherheit bis 2030 in einem umfangreichen Gutachten im April 2021 bestätigt; vgl. r2b energy consulting, Consentec, Fraunhofer ISI, TEP Energy (2021): Monitoring der Angemessenheit der Ressourcen an den europäischen Strommärkten – Projektbericht; <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Studien/angemessenheit-der-ressourcen-an-den-europaeischen-strommaerkten.pdf>.
- 157 Agora Energiewende (2017): Erneuerbare vs. fossile Stromsysteme – ein Kostenvergleich; https://static.agora-energiwende.de/fileadmin/Projekte/2016/Stromwelten_2050/Gesamtkosten_Stromwelten_2050_WEB.pdf.
- 158 Das gilt selbst für Deutschland, das nicht zu den hauptbetroffenen Regionen gehört. Nach dem Dürresommer 2018 stellte die Bundesregierung 340 Millionen Euro Soforthilfe für die Landwirtschaft bereit. Für den Wiederaufbau nach der Flutkatastrophe im Sommer 2021 legte die Bundesregierung den nationalen Solidaritätsfonds „Aufbauhilfe 2021“ mit einem Volumen von bis zu 30 Milliarden Euro auf.
- 159 IEA (2021): World Energy Outlook 2021, Launch Event, 03:00 – 09:00; <https://www.iea.org/events/world-energy-outlook-2021-launch-event>.
- 160 Mycle Schneider, Antony Froggatt (2020): The World Nuclear Industry – Status Report 2020, S. 32; https://www.worldnuclearreport.org/IMG/pdf/wnisr2020-v2_lr.pdf.
- 161 IRENA (2020): Renewable Power Generation Costs in 2020; https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2021/Jun/IRENA_Power_Generation_Costs_2020.pdf.
- 162 pv magazine vom 27.08.2020: Portugals zweite Photovoltaik-Auktion erzielt ein Weltrekordtief von 1,114 Cent pro Kilowattstunde; <https://www.pv-magazine.de/2020/08/27/portugals-zweite-photovoltaik-auktion-erzielt-ein-weltrekordtief-von-1114-cent-pro-kilowattstunde/>.
- 163 Zum Vergleich: 2015 berichteten wir in der ersten Fassung dieses Reports über den bis dahin niedrigsten Zuschlagswert für einen 200-Megawatt-Solarpark in Dubai. Er lag seinerzeit bei 5 Eurocent pro Kilowattstunde.
- 164 IRENA (2021): Renewable Power Generation Costs in 2020; <https://www.irena.org/publications/2021/Jun/Renewable-Power-Costs-in-2020>.

- 165 IRENA (2021): Renewable Power Generation Costs in 2020; <https://www.irena.org/publications/2021/Jun/Renewable-Power-Costs-in-2020>.
- 166 Ein wichtiger Grund für die weniger ausgeprägte Kostendegression ist der hohe Anteil an Stahl, der in Windrädern verbaut wird. Der Stahlpreis zeigt sich am Weltmarkt sehr volatil und zog zuletzt aufgrund des globalen Baubooms erheblich an.
- 167 Von \varnothing 0,37 MW auf \varnothing 2,69 MW pro Windturbine; vgl. Abbildung 20 in: WWF, LichtBlick (Hrsg., 2015): Megatrends der globalen Energiewende; <https://www.wwf.de/fileadmin/fm-wwf/Publikationen-PDF/Megatrends-der-globalen-Energiewende.pdf>.
- 168 Im November 2021 kündigte Vestas ein neues Onshore-Modell an, das ab 2024 mit Leistungsgrößen von 6,8 bis 7,2 MW ausgeliefert werden soll; Vestas Pressemitteilung vom 23.11.2021; <https://www.vestas.com/en/media/company-news/2021/vestas-introduces-the-v162-6-8-mw--expanding-the-event-c3458514>.
- 169 Fachagentur Windenergie an Land; Quartalsanalysen zur Zubauentwicklung in Deutschland; <https://www.fachagentur-windenergie.de/veroeffentlichungen/zubauentwicklung/>. Deutsche WindGuard (2021): Volllaststunden von Windenergieanlagen an Land, Kap. 3.3; <https://www.lee-nrw.de/data/documents/2020/11/23/532-5fbb61e5e6bb2.pdf>.
- 170 Fraunhofer IWES (2020): Windmonitor; http://windmonitor.iee.fraunhofer.de/windmonitor_de/3_Onshore/5_betriebsergebnisse/1_volllaststunden/ sowie http://windmonitor.iee.fraunhofer.de/windmonitor_de/4_Offshore/5_betriebsergebnisse/1_Volllaststunden/. BDEW (2021): Jahresvolllaststunden 2020; <https://www.bdew.de/service/daten-und-grafiken/jahresvolllaststunden/>.
- 171 BMWi, AGEE-Stat (2021): Zeitreihen zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland; https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Navigation/DE/Service/Erneuerbare_Energien_in_Zahlen/Zeitreihen/zeitreihen.html.
- 172 IRENA (2021): Renewable Power Generation Costs in 2020, S. 94; https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2021/Jun/IRENA_Power_Generation_Costs_2020.pdf.
- 173 Energie & Management vom 12.02.2021: Vestas bringt 15-MW-Windturbine auf den Markt; <https://www.energie-und-management.de/nachrichten/erneuerbare/detail/vestas-bringt-15-mw-windturbine-auf-den-markt-141278>.
- 174 EnBW, Pressemitteilung vom 09.07.2021: Meilenstein bei Deutschlands erstem förderfreien Offshore-Windpark: EnBW setzt auf 15-Megawatt-Turbinen von Vestas; <https://www.enbw.com/unternehmen/presse/enbw-plant-mit-vestas-windkraftanlagen.html>.
- 175 ZSW, Bosch & Partner (2019): Vorbereitung und Begleitung bei der Erstellung eines Erfahrungsberichts gemäß § 97 EEG, Teilvorhaben II c, Solare Strahlungsenergie, S. 86; https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Downloads/bmw_de/zsv-boschundpartner-vorbereitung-begleitung-eeg.pdf.
- 176 Fraunhofer ISE (2021): Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland, S. 43; <https://www.ise.fraunhofer.de/de/veroeffentlichungen/studien/aktuelle-fakten-zur-photovoltaik-in-deutschland.html>.

- 177 ZSW, Bosch & Partner (2019): Vorbereitung und Begleitung bei der Erstellung eines Erfahrungsberichts gemäß § 97 EEG, Teilvorhaben II c, Solare Strahlungsenergie, S. 86; https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Downloads/bmwi_de/zsv-boschundpartner-vorbereitung-begleitung-ee.pdf. Thünen Institut (2019): Inanspruchnahme von Landwirtschaftsfläche durch Photovoltaik-Freiflächenanlagen 2015 bis 2018, Tab. 4; https://literatur.thuenen.de/digbib_external/dn061015.pdf. Fraunhofer ISE (2021): Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland. S. 43; <https://www.ise.fraunhofer.de/de/veroeffentlichungen/studien/aktuelle-fakten-zur-photovoltaik-in-deutschland.html>.
- 178 Fraunhofer ISE (2021): Stromgestehungskosten Erneuerbare Energien; https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/DE2021_ISE_Studie_Stromgestehungskosten_Erneuerbare_Energien.pdf.
- 179 Fraunhofer ISE (2021): Stromgestehungskosten Erneuerbare Energien; https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/DE2021_ISE_Studie_Stromgestehungskosten_Erneuerbare_Energien.pdf.
- 180 Hier handelt es sich um Kostenanalysen für Kraftwerke, die real in Deutschland nicht mehr gebaut werden, denn seit August 2020 verbietet § 53 KVBG den Neubau von Kohlekraftwerken. Bis vor wenigen Jahren gab es allerdings noch zahlreiche Neubauprojekte, die größtenteils vor Baubeginn von Gerichten oder den Projektierern selbst gestoppt wurden.
- 181 Für das Ausmaß dieses Trends spielen weitere Faktoren wie die künftige technische Leistungsfähigkeit der Anlagen (z. B. Lebensdauer, Volllaststunden bei Windenergieanlagen, Wirkungsgradentwicklung bei Solarzellen) und die künftigen Kapital- und Betriebskosten eine Rolle.
- 182 Die Stromerzeugung aus Kohle soll gemäß § 2 Abs. 2 KVBG spätestens Ende 2038 in Deutschland beendet sein; http://www.gesetze-im-internet.de/kvbgbg/_2.html.
- 183 ETIPWind, Wind Europe (2021): Getting fit for 55 and set for 2050 Electrifying Europe with wind energy, Kap. 2.3; <https://energycentral.com/system/files/ece/nodes/485830/etipwind-flagship-report-fit-for-55-set-for-2050.pdf>.
- 184 Fraunhofer ISE (2021): Stromgestehungskosten Erneuerbare Energien; https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/DE2021_ISE_Studie_Stromgestehungskosten_Erneuerbare_Energien.pdf.
- 185 Gerd Rosenkranz (2020): Atomkraft? Nicht schon wieder; <https://www.boell.de/de/2020/03/09/atomkraft-nicht-schon-wieder>. Ausführlich dazu Gerd Rosenkranz (2011): Mythen der Atomkraft – Wie uns die Energielobby hinters Licht führt, S. 78 ff., oekom Verlag, München.
- 186 Das weltweit erste Atomkraftwerk zur Stromerzeugung startete die damalige Sowjetunion 1954 in Obninsk nahe Moskau.
- 187 Le Monde vom 20.07.2020: Visualisez en graphiques l'énorme dérapage financier de l'EPR de Flamanville; https://www.lemonde.fr/les-decodeurs/article/2019/06/24/epr-de-flamanville-visualisez-comment-le-cout-et-la-duree-du-chantier-ont-triple-depuis-2007_5480745_4355770.html.
- 188 Mycle Schneider, Antony Froggatt (2020): The World Nuclear Industry – Status Report 2020, S. 145 ff.; https://www.worldnuclearreport.org/IMG/pdf/wnisr2020-v2_lr.pdf.
- 189 Vom EuGH wurde 2020 eine Klage Österreichs, der sich Luxemburg angeschlossen hatte, wegen Verstoßes gegen das EU-Beihilferecht abgewiesen; vgl. Pressemitteilung vom 22.09.2020; <https://curia.europa.eu/jcms/upload/docs/application/pdf/2020-09/cp200112de.pdf>.

- 190 Im Bau sind derzeit noch die beiden Blöcke Vogtle-3 und Vogtle-4 im US-Bundesstaat Georgia.
- 191 Mycle Schneider, Antony Froggatt (2020): *The World Nuclear Industry – Status Report 2020*, S. 197; https://www.worldnuclearreport.org/IMG/pdf/wnisr2020-v2_lr.pdf.
- 192 BP (2021): *Statistical Review of World Energy 2021*, S. 65; <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2021-full-report.pdf>. Siehe dazu auch Megatrend 3.
- 193 Neben der Kernenergie werden auch fossile Kraftwerke mit anschließender CO₂-Abscheidung als klimaschonende Teillösung genannt.
- 194 IEA (2021): *Net Zero by 2050 – A Roadmap for the Global Energy Sector*, S. 113 ff.; <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>.
- 195 Eine der Antworten auf diese Frage ergibt sich (insbesondere in Erdregionen mit zugespitzten Nachbarschaftskonflikten) aus dem vielfach beschriebenen zivil-militärischen Doppelcharakter der Atomtechnik und dem damit verbundenen Missbrauchspotenzial. Die Option auf die militärische Weiterentwicklung der zivilen Technik, spielt hier fast immer eine Rolle. Auch bei den offiziellen Atommächten kann es im Hintergrund (neben der Stromerzeugung) um die Sicherung des atomtechnischen Spezialwissens gehen, das so nicht aus den Militärhaushalten allein finanziert werden muss. Siehe z. B. Gerd Rosenkranz (2011): *Mythen der Atomkraft – Wie uns die Energielobby hinters Licht führt*. S. 38 ff., oekom Verlag, München.
- 196 Die IEA macht für den Fall des weitgehenden Verzichts auf die Atomkraft (und gleichzeitig den Verzicht auf die Abscheidung und Speicherung von CO₂) eine Rechnung auf, die ausschließlich auf die Kosten abstellt, die für die Errichtung zusätzlicher Wind- und PV-Kapazitäten aufzubringen wären.
- 197 DIE ZEIT online vom 03.04.2021: *Atomkraft – Sie ist wieder da*; <https://www.zeit.de/2021/10/atomkraft-fukushima-ausstieg-klimaschutz-china-kohle>. DER SPIEGEL online vom 10.05.2021: *Verteufelte Klimaschutz-Energie – Redet endlich über Atomstrom! Eine Kolumne von Nikolaus Blome*; <https://www.spiegel.de/politik/deutschland/atomkraft-nutzen-zur-rettung-des-klimas-kolumne-a-16ceb5e9-cc8a-405c-8585-f20c4cb91e93>.
- 198 BASE (2021): *Small Modular Reactors – Was ist von den neuen Reaktorkonzepten zu erwarten?*; https://www.base.bund.de/DE/themen/kt/kta-deutschland/neue_reaktoren/neue-reaktoren_node.html sowie Öko-Institut, TU-Berlin, Physikerbüro Bremen (2021): *Sicherheitstechnische Analyse und Risikobewertung einer Anwendung von SMR-Konzepten (Small Modular Reactors)*; <https://www.base.bund.de/SharedDocs/Downloads/BASE/DE/berichte/kt/gutachten-small-modular-reaktors.pdf>.
- 199 Aktuell werden diese Reaktorkonzepte in zahlreichen Ländern diskutiert, insbesondere den USA, China, Russland, Großbritannien, Indien, Kanada, Südkorea, Argentinien und seit Herbst 2021 auch wieder vermehrt in Frankreich. Ausführlich dazu: Mycle Schneider, Antony Froggatt (2020): *The World Nuclear Industry – Status Report 2020*, S. 254 – 265; https://www.worldnuclearreport.org/IMG/pdf/wnisr2020-v2_lr.pdf.
- 200 Proliferation bezeichnet die illegale Verbreitung von zum Bau von Atomwaffen geeigneten Spaltstoffen.
- 201 Vgl. z. B. Gerd Rosenkranz, Irene Meichsner, Manfred Kriener (1992): *Die Neue Offensive der Atomwirtschaft – Treibhauseffekt, Sicherheitsdiskussion, Markt im Osten*, S. 242 ff, Verlag C. H. Beck, München.

- 202 Mycle Schneider, Antony Froggatt (2020): The World Nuclear Industry – Status Report 2020, S. 254 ff.; https://www.worldnuclearreport.org/IMG/pdf/wnisr2020-v2_lr.pdf.
- 203 Walt Patterson (2007): Fifty years of hopes and fears, Nature, Vol. 449, S. 664; <https://www.nature.com/articles/449664a.pdf>.
- 204 Eigene Berechnungen auf Basis des Marktstammdatenregisters der Bundesnetzagentur; <https://www.marktstammdatenregister.de/MaStR/> und der jährlichen Anlagenstammdaten zur EEG-Jahresabrechnung der Übertragungsnetzbetreiber; <https://www.netztransparenz.de/EEG/Anlagenstammdaten>.
- 205 Der Erneuerbaren-Anteil am Bruttostromverbrauch lag im Jahr 2015 bei 31,5 Prozent, vgl. BMWi, AGEE-Stat (2021): Zeitreihen zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland, S. 41; <https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Downloads/zeitreihen-zur-entwicklung-der-erneuerbaren-energien-in-deutschland-1990-2020.pdf>.
- 206 Der Anteil von 45 Prozent wird wegen des in den vergangenen Jahren eingebrochen Ausbaus der Windenergie, der nach dem Corona-Jahr 2019 wieder anziehenden Konjunktur, eines kühlen Winters und gegenüber 2020 geringerer Windausbeute im Jahr 2021 nicht erreicht werden.
- 207 Der Kunstbegriff „Prosumer“ setzt sich aus den Wörtern „Producer“ (englisch für Hersteller) und „Consumer“ (englisch für Verbraucher:in) zusammen. Im Energiebereich steht Prosumer für Verbraucher:innen, die sowohl Strom beziehen (konsumieren) als auch z. B. über eine Solaranlage auf dem Dach Strom produzieren und ins Netz einspeisen, vgl. auch BMWi (2016): Was ist ein Prosumer?; <https://www.bmwi-energiewende.de/EWD/Redaktion/Newsletter/2016/06/Meldung/direkt-erklaert.html>.
- 208 Siehe beispielhaft die Zusammenstellung von Akzeptanz-Umfragen der Fachagentur Windenergie an Land; <https://www.fachagentur-windenergie.de/themen/akzeptanz/umfragesynopsen/>.
- 209 Dazu zählen etwa in Nordrhein-Westfalen der „Emscher Landschaftspark“ in der Ruhr-Metropole; <https://www.rvr.ruhr/themen/oekologie-umwelt/startseite-emscher-landschaftspark/>, die „Industriekultur“ im Ruhrgebiet; <https://www.ruhr-tourismus.de/de/industriekulturruhr.html> und das „Wunderland Kalkar“ am Niederrhein; <https://www.wunderlandkalkar.eu/de> oder das länderübergreifende Erholungsgebiet „Lausitzer Seenland“ in Brandenburg und Sachsen; <https://www.lausitzerseenland.de/>.
- 210 FAZ vom 21.05.2021: RWE und BASF planen Megawindpark in der Nordsee; <https://www.faz.net/aktuell/wirtschaft/unternehmen/rwe-und-basf-kooperieren-fuer-gemeinsamen-offshore-wind-park-17352780.html>.
- 211 Agora Energiewende (2017): Energiewende und Dezentralität – Zu den Grundlagen einer politisierten Debatte; https://www.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2016/Dezentralitaet/Agora_Dezentralitaet_WEB.pdf.
- 212 In diesen Zusammenhang spielt die große Wasserkraft eine Sonderrolle: a) weil sie nicht zu den neuen regenerativen Energien zählt, sondern schon seit Beginn des kommerziellen Stromeinsatzes ab der vorletzten Jahrhundertwende eine wichtige Rolle spielte, b) weil die größten Kraftwerke der Welt, vornehmlich in China und Südamerika, fast alle Wasserkraftwerke sind und c) weil diese zwar das Klima nicht oder sehr viel weniger belasten als fossil befeuerte Kraftwerke gleicher Größenordnung es tun würden, jedoch viele andere kritische und teilweise verheerende Auswirkungen in ihren Einzugsgebieten aufweisen, vgl. EUWID (2017): Zehn größte Kraftwerke der Welt – neunmal Wasserkraft und ein Atomkraftwerk; <https://www.euwid-energie.de/zehn-groesste-kraftwerke-der-welt-neun-mal-wasserkraft-und-ein-atomkraftwerk/10/>.

- 213 IEA (2021): Data and Projections – Access to affordable, reliable, sustainable and modern energy for all; <https://www.iea.org/reports/sdg7-data-and-projections/access-to-electricity>.²¹⁴ World Bank Group (2019): Global Solar Atlas 2.0; <https://globalsolaratlas.info>. Karte entwickelt von Solargis im Auftrag der World Bank Group und mit finanzieller Unterstützung durch Energy Sector Management Assistance Program (ESMAP). Nutzungslizenz © CC BY 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).
- 215 Engie Mobisol; <https://plugintheworld.com>.
- 216 UNEP, Frankfurt School-UNEP Centre, BloombergNEF (2020): Global Trends in Renewable Energy Investment 2020, S. 62; https://www.fs-unep-centre.org/wp-content/uploads/2020/06/GTR_2020.pdf.
- 217 IEA (2021): World Energy Investment 2021; <https://iea.blob.core.windows.net/assets/5e6b3821-bb8f-4df4-a88b-e891cd8251e3/WorldEnergyInvestment2021.pdf>.
- 218 IEA (2014): World Energy Outlook 2014; <https://iea.blob.core.windows.net/assets/c6871b0c-fef8-41fb-93ab-91d6ea651d96/WEIO2014.pdf>. IEA (2019): Global power investment by technology (2005 – 2018); <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-power-investment-by-technology-2005-2018>. IEA (2020): World Energy Outlook 2020; <https://www.iea.org/reports/world-energy-investment-2020>. IEA (2020): World Energy Investment 2020; <https://www.iea.org/reports/world-energy-investment-2020/power-sector>.
- 219 IEA (2021): World Energy Outlook 2021, S. 86; <https://iea.blob.core.windows.net/assets/88dec0c7-3a11-4d3b-99dc-8323ebfb388b/WorldEnergyOutlook2021.pdf>.
- 220 BMWi (2020): Energieeffizienz in Zahlen – Entwicklungen und Trends in Deutschland 2020; <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/energieeffizienz-in-zahlen-2020.pdf>.
- 221 IEA (2021): Net Zero by 2050 – A Roadmap for the Global Energy Sector, S. 73 ff.; <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>.
- 222 Prognos, Öko-Institut, Wuppertal Institut (2021): Klimaneutrales Deutschland 2045; <https://www.agora-energiewende.de/veroeffentlichungen/klimaneutrales-deutschland-2045/>.
- 223 Prognos, Öko-Institut, Wuppertal Institut (2021): Klimaneutrales Deutschland 2045 – Langfassung, S. 14, 16; https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2021/2021_01_DE_KNDE2045/KNDE2045_Langfassung.pdf.
- 224 Prognos, Öko-Institut, Wuppertal Institut (2021), S. 16; a. a. O.
- 225 Ariadne-Report (2021): Deutschland auf dem Weg zur Klimaneutralität 2045 – Szenarien und Pfade im Modellvergleich; <https://ariadneprojekt.de/publikation/deutschland-auf-dem-weg-zur-klimaneutralitaet-2045-szenarienreport/>. Dena (2018): dena-Leitstudie Integrierte Energiewende, Szenario EL95, S. 195 ff.; https://www.dena.de/fileadmin/dena/Dokumente/Pdf/9261_dena-Leitstudie_Integrierte_Energiewende_lang.pdf. Volker Quaschnig (2016): Sektorkopplung durch die Energiewende; <https://www.volker-quaschnig.de/publis/studien/sektorkopplung/Sektorkopplungsstudie.pdf>.
- 226 IEA (2021): Net Zero by 2050 – A Roadmap for the Global Energy Sector, S. 71; <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>.
- 227 IEA (2021), S. 115; a. a. O.

- 228 Ausnahmen sind Kraft-Wärme-gekoppelte Anlagen, in denen beides, Strom und Wärme, parallel bereitgestellt werden.
- 229 Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen (2020): Energieflussbild 2019 für die Bundesrepublik Deutschland; <https://ag-energiebilanzen.de/9-0-Energieflussbilder.html>.
- 230 Futurezone (2018): Von Benzin bis Wasserstoff: Autoantriebe im Vergleich; <https://futurezone.at/produkte/von-benzin-bis-wasserstoff-autoantriebe-im-vergleich/400010235>.
- 231 Es ist wenig sinnvoll, schlecht gedämmte Häuser mit Wärmepumpensystemen zu heizen, die dafür unnötig groß dimensioniert werden müssen und im Betrieb zu viel Strom benötigen.
- 232 CompaniesMarketCap.com (2021): Largest automakers by market capitalization, Stand 9/2021; <https://companiesmarketcap.com/automakers/largest-automakers-by-market-cap/>.
- 233 IEA (2020): Global EV Outlook; https://iea.blob.core.windows.net/assets/af46e012-18c2-44d6-becd-bad21fa844fd/Global_EV_Outlook_2020.pdf.
- 234 ZSW (2021): Datenservice Erneuerbare Energien – Bestand an Elektro-Pkw weltweit; <https://www.zsw-bw.de/mediathek/datenservice.html#c8590>.
- 235 Transport & Environment (2021): Die Dekarbonisierung des Lkw-Fernverkehrs in Deutschland; https://www.transportenvironment.org/sites/te/files/publications/2021_04_TE_Dekarbonisierung_des_Lkw_Fernverkehrs_in_Deutschland_kurzfassung_final.pdf.
- 236 Es gibt bereits eine Reihe von Förderprogrammen von BAFA und KfW; https://www.bafa.de/SharedDocs/Downloads/DE/Energie/ew_waermepumpen_foerderuebersicht.html.
- 237 Prognos, Öko-Institut, Wuppertal Institut (2021): Klimaneutrales Deutschland 2045, S. 17; <https://www.agora-energiewende.de/veroeffentlichungen/klimaneutrales-deutschland-2045/>. Ariadne-Report (2021): Deutschland auf dem Weg zur Klimaneutralität 2045 – Szenarien und Pfade im Modellvergleich, S. 47; <https://ariadneprojekt.de/publikation/deutschland-auf-dem-weg-zur-klimaneutralitaet-2045-szenarienreport/>.
- 238 Bundesverband Wärmepumpe (2021): Branchenstudie 2021; https://www.waermepumpe.de/uploads/tx_bcpagflip/BWP_Branchenstudie2021_Update.pdf.
- 239 IEA (2020): The challenge of reaching zero emissions in heavy industry; <https://www.iea.org/articles/the-challenge-of-reaching-zero-emissions-in-heavy-industry>.
- 240 In Deutschland sind diese drei Branchen für etwa 13 Prozent der Treibhausgasemissionen und mehr als die Hälfte der Industrieemissionen verantwortlich.
- 241 Agora Energiewende, Wuppertal Institut (2019): Klimaneutrale Industrie: Schlüsseltechnologien und Politikoptionen für Stahl, Chemie und Zement, S. 166 f.; https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2018/Dekarbonisierung_Industrie/164_A-EW_Klimaneutrale-Industrie_Studie_WEB.pdf.
- 242 Agora Energiewende, Agora Verkehrswende, Stiftung Klimaneutralität (2021): Das Klimaschutz-Sofortprogramm – 22 Eckpunkte für die ersten 100 Tage der neuen Bundesregierung; https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2021/2021_06_DE_100Tage_LP20/A-EW_229_Klimaschutz-Sofortprogramm_WEB.pdf.

- 243 Agora Energiewende, Wuppertal Institut (2019): Klimaneutrale Industrie – Schlüsseltechnologien und Politikoptionen für Stahl, Chemie und Zement, S. 177 ff.; https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2018/Dekarbonisierung_Industrie/164_A-EW_Klimaneutrale-Industrie_Studie_WEB.pdf.
- 244 Agora Energiewende, Wuppertal Institut (2019), S. 201 ff.; a. a. O.
- 245 Ersatzbrennstoffe sind unter anderem Altreifen, Altöl, Tiermehl und Kunststoffabfälle.
- 246 DER SPIEGEL 23/2000: Die leise Revolution; <https://www.spiegel.de/politik/die-leise-revolution-a-73d9476a-0002-0001-0000-000016597481?context=issue>.
- 247 DER SPIEGEL 39/2000: Jenseits des Erdöls; <https://www.spiegel.de/politik/jenseits-des-erdoels-a-13782ee3-0002-0001-0000-000017436578?context=issue>.
- 248 Siehe z. B. Jeremy Rifkin (2002): Die H₂-Revolution, Campus Verlag, Frankfurt/Main; DIE ZEIT online vom 07.10.2004: Die Mär vom Wasserstoff; <https://www.zeit.de/2004/42/Wasserstoff>.
- 249 G7-Gipfel (2015): Abschlusserklärung – An morgen denken. Gemeinsam handeln, S. 17; <https://www.bundesregierung.de/resource/blob/974430/398758/b2a8d4e26f0198195f810c572510733f/2015-06-08-g7-abschluss-deu-data.pdf>.
- 250 Ioannis Tsiropoulos, Wouter Nijs, Dalius Tarvydas, Pablo Ruiz (2020): Towards net-zero emissions in the EU energy system by 2050, EUR 29981 EN, Publications Office of the European Union; <http://dx.doi.org/10.2760/062347>.
- 251 McKinsey (2020): Net-Zero Europe; <https://www.mckinsey.com/business-functions/sustainability/our-insights/how-the-european-union-could-achieve-net-zero-emissions-at-net-zero-cost>.
- 252 Sechs Prozent entfallen demnach auf Gaskraftwerke, die aus Erneuerbaren Energien erzeugten Wasserstoff als Brennstoff nutzen, fünf Prozent werden durch zwischengespeicherten oder importierten Strom gedeckt.
- 253 IRENA (2021): World Energy Transitions Outlook 2021 – 1.5 °C Pathway; https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2021/Jun/IRENA_World_Energy_Transitions_Outlook_2021.pdf.
- 254 Der Grund ist, dass für eine Komplettversorgung sehr hohe Leistungsreserven aus Erneuerbaren Energien für alle denkbaren Extremsituationen vorgehalten werden müssten. Deshalb ist der günstigere Weg Flexibilität (Lastmanagement, Stromaustausch mit dem Ausland, Speicherung von grünem Wasserstoff zur Verbrennung in Gaskraftwerken usw.).
- 255 The Energy Transitions Commission (2021): Making the Hydrogen Economy Possible: Accelerating Clean Hydrogen in an Electrified Economy; <https://energy-transitions.org/wp-content/uploads/2021/04/ETC-Global-Hydrogen-Report.pdf>.
- 256 BP (2021): Statistical Review of World Energy 2020, S. 59; <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2020-full-report.pdf>.
- 257 BMBF (2020): Die Nationale Wasserstoffstrategie; <https://www.bmbf.de/bmbf/shareddocs/downloads/files/die-nationale-wasserstoffstrategie.pdf>.
- 258 Europäische Kommission (2020): A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe; https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/hydrogen_strategy.pdf.

- 259 Agora Energiewende, Guidehouse (2021): Making renewable hydrogen cost-competitive, S. 7 – 29; https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2020/2020_11_EU_H2-Instruments/A-EW_223_H2-Instruments_WEB.pdf.
- 260 Agora Energiewende, Guidehouse (2021), S. 11; a. a. O.
- 261 Agora Energiewende, Guidehouse (2021), S. 55 f.; a. a. O.
- 262 BMBF (2020): Die Nationale Wasserstoffstrategie; <https://www.bmbf.de/bmbf/shareddocs/downloads/files/die-nationale-wasserstoffstrategie.pdf>.
- 263 Öko-Institut (2020): Wasserstoff sowie wasserstoffbasierte Rohstoffe; <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Wasserstoff-und-wasserstoffbasierte-Brennstoffe.pdf>.
- 264 Im Rahmen eines „Aktionsplans“ zur Nationalen Wasserstoffstrategie schlägt die Bundesregierung insgesamt 38 Maßnahmen vor.
- 265 Gregor Hagedorn, Wolf-Peter Schill, Martin Kittel, basierend auf Michael Liebreich/Liebreich Associates (2021): Clean Hydrogen Ladder, Version 4.1; Nutzungslizenz © CC BY 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>); https://drive.google.com/file/d/1X-oH04NH1477eig_BmYjtD9mHyTcoiVc/view.
- 266 IEA (2020): The challenge of reaching zero emissions in heavy industry; <https://www.iea.org/articles/the-challenge-of-reaching-zero-emissions-in-heavy-industry>.
- 267 Öko-Institut (2020): Wasserstoff sowie wasserstoffbasierte Rohstoffe; <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Wasserstoff-und-wasserstoffbasierte-Brennstoffe.pdf>.
- 268 ecomento vom 08.11.2019: Warum Volkswagen auf Batterie- statt Wasserstoff-Stromer setzt; <https://ecomento.de/2019/11/08/volkswagen-setzt-auf-batterie-statt-wasserstoff-elektroautos/>. ecomento vom 20.10.2021: Audi-Chef bekräftigt Batterie-Fokus, Wasserstoff für Pkw „schlicht absurd“; <https://ecomento.de/2021/10/20/audi-chef-bekraeftigt-batterie-fokus-wasserstoff-fuer-pkw-schlicht-absurd/>. ecomento vom 15.10.2021: BMW-Chef: Wir sind bereit für Verbrenner-Verbot ab 2030; <https://ecomento.de/2021/10/15/bmw-bereit-fuer-verbrenner-verbot-ab-2030/>. ecomento vom 22.07.2021: Daimler-Chef stellt bei Mercedes-Benz „Weichen für vollelektrisches Zeitalter“; <https://ecomento.de/2021/07/22/mercedes-benz-stellt-weichen-fuer-vollelektrisches-zeitalter/>.
- 269 Agora Verkehrswende, Agora Energiewende (2018): Die zukünftigen Kosten strombasierter synthetischer Brennstoffe, S. 12; https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2017/SynKost_2050/Agora_SynCost-Studie_WEB.pdf.
- 270 Zu den dringlichen Steuerungsaufgaben der Politik gehört, „H₂-Readiness“ tragfähig zu definieren. In der aktuellen Debatte rund um das Thema Wasserstoff gibt es unterschiedliche Verständnisse davon, was „H₂-Ready“ bedeutet.
- 271 Aurora Energy Research (2021): The impact of weather in a high renewables power system; https://nkro22cl16pbxrpzy39bez-k-wpengine.netdna-ssl.com/wp-content/uploads/2021/03/Aurora_Weather-Years-Strategic-Insight-Report_excerpt_120321-002-CO.pdf.
- 272 Diese erhalten zum Beispiel attraktive Stromtarife für die Bereitschaft, ihre Stromnachfrage in bestimmten Situationen zu drosseln oder komplett herunterzufahren.

- 273 Agora Verkehrswende, Agora Energiewende, Frontier Economics (2018): Die zukünftigen Kosten strombasierter synthetischer Brennstoffe; https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2017/SynKost_2050/Agora_SynCost-Studie_WEB.pdf.
- 274 Agora Verkehrswende, Agora Energiewende, Frontier Economics (2018), S 13; a.a.O.
- 275 Frontier Economics (2021): Die Rolle von Wasserstoff im Wärmemarkt; <https://www.frontier-economics.com/media/4590/wasserstoff-im-waermemarkt.pdf>.
- 276 Robert W. Howarth, Mark Z. Jacobson (2021): How green is blue hydrogen?, Energy Science & Engineering, Vol. 9, S. 1676 – 1687; <https://doi.org/10.1002/ese3.956>.
- 277 Öko-Institut (2020): Wasserstoff sowie wasserstoffbasierte Rohstoffe, S. 4 f., 104; <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Wasserstoff-und-wasserstoffbasierte-Brennstoffe.pdf>.
- 278 Prognos, Öko-Institut, Wuppertal Institut (2021): Klimaneutrales Deutschland 2045 – Langfassung, S. 105; https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2021/2021_01_DE_KNDE2045/KNDE2045_Langfassung.pdf.
- 279 Prognos, Öko-Institut, Wuppertal Institut (2021), S. 105; a. a. O.
- 280 Im Rahmen einer wissenschaftlichen Studie zum Thema “Neues Strommarktdesign für die Integration fluktuierender Erneuerbarer Energien” stellte der Bundesverband Erneuerbare Energie e. V. (BEE) im Dezember 2021 Vorschläge vor, bei deren Umsetzung “ein Import von grünem Wasserstoff zur direkten Nutzung” für die Umsetzung der Energiewende in Deutschland nicht zwingend notwendig sei; http://klimaneutrales-stromsystem.de/pdf/Strommarktdesignstudie_BEE_final_Stand_14_12_2021.pdf.
- 281 Prognos, Öko-Institut, Wuppertal Institut (2021), S. 19; a. a. O.
- 282 AGEB (2021): Stromerzeugung nach Energieträgern (Strommix) in Deutschland, Stand 2/2021; <https://ag-energiebilanzen.de/28-0-Zusatzinformationen.html>.
- 283 BMWi (2021): BMWi (2021): Energiedaten – Gesamtausgabe (Stand 27.09.2021); <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Artikel/Energie/energiedaten-gesamtausgabe.html>.
- 284 Siehe beispielhaft und zusammenfassend: Bitkom (2020): Klimaschutz durch digitale Technologien – Chancen und Risiken; https://www.bitkom.org/sites/default/files/2020-05/2020-05_bitkom_klimastudie_digitalisierung.pdf.
- 285 Donella H. Meadows, Dennis L. Meadows et al. (1972): Die Grenzen des Wachstums – Bericht des Club of Rome zur Lage der Menschheit; <https://www.dartmouth.edu/library/digital/publishing/meadows/ltg/>.
- 286 Florentin Krause, Hartmut Bossel, Karl-Friedrich Müller-Reißmann (1980): Energiewende – Wachstum und Wohlstand ohne Erdöl und Uran, S. Fischer Verlag.
- 287 Die Kohle stand nicht im Fokus des Buches, denn Auslöser waren die Ölpreiskrisen der 1970er Jahre und die Auseinandersetzung um die Atomenergie. Eine öffentliche Diskussion über den Treibhauseffekt gab es noch nicht, wenngleich er in der Publikation am Rande erwähnt wird.
- 288 Deutscher Bundestag (1980): Bericht der Enquete-Kommission „Zukünftige Kernenergie-Politik“; BT-Drs. 8/4341; <https://dserver.bundestag.de/btd/08/043/0804341.pdf>.

- 289 BNetzA (2021): Kennzahlen der Versorgungsunterbrechungen Strom (2006 – 2020); https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Sachgebiete/ElektrizitaetundGas/Unternehmen_Institutionen/Versorgungssicherheit/Versorgungsunterbrechungen/Auswertung_Strom/start.html. Der SAIDI-Index (System Average Interruption Duration Index) ist nicht der einzige, jedoch einer der wichtigsten Indizes, die die Zuverlässigkeit der Stromversorgung widerspiegeln.
- 290 BMWi (2021): Zeitreihen zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland; <https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Downloads/zeitreihen-zur-entwicklung-der-erneuerbaren-energien-in-deutschland-1990-2020.pdf>.
- 291 Auch das Phänomen einer Sonnenfinsternis muss, obwohl exakt vorhersehbar, erst einmal bewältigt werden, wenn allein in Deutschland mehr als 50 Gigawatt Photovoltaikleistung am Netz sind. Die Systemverantwortlichen sehen das sportlich: Sie wissen, wenn im Jahr 2045 um die 400 Gigawatt am Netz sind, herrscht an jedem Tag, an dem eine Wolkenfront auf- oder abzieht, „Sonnenfinsternis“.
- 292 Gesetz zur Digitalisierung der Energiewende (BGBl I 2016, S. 2034 ff.); http://www.bgbl.de/xaver/bgbl/start.xav?startbk=Bundesanzeiger_BGBl&jumpTo=bgbl116s2034.pdf.
- 293 Der Smart Meter Rollout, also der Einbau der intelligenten Stromzähler, hat 2020 begonnen, ist aber weiter Gegenstand andauernder Auseinandersetzungen – auch vor Gericht.
- 294 Hendrik Zimmermann, David Frank (Germanwatch, Hrsg., 2019): Künstliche Intelligenz für die Energiewende: Chancen und Risiken; <https://www.germanwatch.org/de/17095>.
- 295 Hendrik Zimmermann, David Frank (2019), S. 29 f.; a. a. O.
- 296 BloombergNEF vom 16.12.2020: Annual battery price survey finds prices fell 13 % from 2019; <https://about.bnef.com/blog/battery-pack-prices-cited-below-100-kwh-for-the-first-time-in-2020-while-market-average-sits-at-137-kwh/>.
- 297 Energiezukunft vom 06.02.2021: Batteriepreise sinken auf Rekordtief; <https://www.energiezukunft.eu/mobilitaet/batteriepreise-sinken-auf-rekordtief/>.
- 298 Energyload vom 03.09.2021: Feststoffbatterien: Welche Unternehmen stehen am Start?; <https://energyload.eu/stromspeicher/feststoffbatterien/feststoffbatterien-markt/>.
- 299 Ingenieur.de vom 28.06.2021: Die größten Energiespeicher der Welt; <https://www.ingenieur.de/technik/fachbereiche/energie/batterie-die-groessten-energiespeicher-der-welt/>.
- 300 Siemens, Pressemitteilung vom 19.07.2021: Siemens plant einen der leistungsstärksten Batteriespeicher Europas in Bayern; <https://press.siemens.com/global/de/pressemitteilung/siemens-plant-einen-der-leistungstaerksten-batteriespeicher-europas-bayern>.
- 301 Bis zur Vertragsstaatenkonferenz in Paris (COP 21) sollte die Erderhitzung stets auf 2 °C gegenüber dem vorindustriellen Zeitalter begrenzt werden. In dem Übereinkommen von Paris lautet die Formulierung in Art. 2 Abs. 1a: „*Begrenzung des Anstiegs der globalen Durchschnittstemperatur auf deutlich unter 2 °C über dem vorindustriellen Niveau und Fortsetzung der Bemühungen zur Begrenzung des Temperaturanstiegs auf 1,5 °C*“; https://ec.europa.eu/clima/eu-action/international-action-climate-change/climate-negotiations/paris-agreement_de.
- 302 US Department of State, Pressemitteilung vom 10.11.2021: U.S.-China Joint Glasgow Declaration on Enhancing Climate Action in the 2020s; <https://www.state.gov/u-s-china-joint-glasgow-declaration-on-enhancing-climate-action-in-the-2020s/>.

- 303 Nationally Determined Contributions bezeichnen ein Konzept, nach dem die Vertragsstaaten des Übereinkommens von Paris nationale Klimaschutzziele ausarbeiten, international kommunizieren und regelmäßig aktualisieren müssen; <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/nationally-determined-contributions-ndcs/nationally-determined-contributions-ndcs>.
- 304 WWF, Pressemitteilung vom 17.06.2021: Trippelschritte Richtung Glasgow; <https://www.wwf.de/2021/juni/trippelschritte-richtung-glasgow>.
- 305 Climate Action Tracker (2021): Warming Projections Global Update; https://climateactiontracker.org/documents/997/CAT_2021-11-09_Briefing_Global-Update_Glasgow2030CredibilityGap.pdf.
- 306 IEA (2021): World Energy Outlook 2021, S. 27 – 30; <https://iea.blob.core.windows.net/assets/88dec0c7-3a11-4d3b-99dc-8323ebfb388b/WorldEnergyOutlook2021.pdf>.
- 307 Etwa bei der Verabschiedung des Regelbuchs.
- 308 Tagesschau vom 22.09.2021: Aus für Kohlekraftwerkbau im Ausland; <https://www.tagesschau.de/ausland/asien/un-china-kohlekraft-101.html>.
- 309 Zum Beispiel beim Aufbau einer Ladesäulen-Infrastruktur und gleichzeitig eines Wasserstoff-Tankstellennetzes für Pkw.
- 310 Dies gilt insbesondere für Länder des Globalen Südens, die selbst über große fossile Ressourcen verfügen.
- 311 IEA (2021): World Energy Outlook 2021, S. 86; <https://iea.blob.core.windows.net/assets/88dec0c7-3a11-4d3b-99dc-8323ebfb388b/WorldEnergyOutlook2021.pdf>.
- 312 WWF (2021): Mind the Ambition Gap, Internationale Finanztransfers als Instrument zur Einhaltung nationaler CO₂-Budgets; <https://www.wwf.de/fileadmin/fm-wwf/Publikationen-PDF/Klima/Mind-the-ambition-gap.pdf>.



Mehr WWF-Wissen
in unserer App.
Jetzt herunterladen!



iOS



Android



Auch über einen
Browser erreichbar.

Unterstützen Sie den WWF

IBAN: DE06 5502 0500 0222 2222 22



best brands

2020 das deutsche
markenranking

**WWF ist die beste
Nachhaltigkeits-
organisation 2020**

Best Brands Awards 02/2020
wwf.de/bestbrands



Unser Ziel

Wir wollen die weltweite Zerstörung der Natur und Umwelt stoppen und eine Zukunft gestalten, in der Mensch und Natur in Einklang miteinander leben.

WWF Deutschland
Reinhardtstraße 18 | 10117 Berlin
Tel.: +49 30 311 777-700
info@wwf.de | wwf.de