



Vorwort zur 1. Auflage

Die Energie- und Klimaproblematik ist endlich dort angekommen, wo sie hingehört: in der breiten Öffentlichkeit. Dabei sind die Zusammenhänge von Energieverbrauch und Klimaerwärmung bereits seit vielen Jahrzehnten bekannt. Schon Ende der 1980er-Jahre erklärte die damalige deutsche Bundesregierung Klimaschutz zum Regierungsziel. Zahlreiche Experten forderten bereits damals den schnellen Umbau unserer Energieversorgung. Die dafür nötigen Schritte erfolgten allerdings bestenfalls halbherzig. Dabei lässt sich das Klimaproblem nicht aussitzen. Von Jahr zu Jahr wird immer deutlicher erkennbar, dass der Klimawandel bereits eingesetzt hat. Die Prognosen der Klimaforscher sind verheerend. Gelingt es uns nicht, die Notbremse zu ziehen, werden die katastrophalen Folgen des Klimawandels unsere heutigen Vorstellungsgrenzen weit überschreiten. Die Verleihung des Friedensnobelpreises im Jahr 2007 an den Klimapolitiker Al Gore und den Weltklimarat, die seit Jahren eindringlich vor den Klimafolgen warnen, sind eher ein Zeichen der Hilflosigkeit als einer nahenden Lösung des Problems.

Neben den Klimafolgen zeigen immer neue Rekorde bei den Preisen für Erdöl oder Erdgas, dass diese unseren Bedarf nicht mehr lange decken können und schnellstmöglich andere Alternativen erschlossen werden müssen.

Die Lösung ist dabei recht simpel. Sie lautet: regenerative Energien. Diese wären in der Lage, in nur wenigen Jahrzehnten unsere gesamte Energieversorgung vollständig zu übernehmen. Nur so können wir unsere Abhängigkeit von immer teurer werdenden und Krisen verursachenden Energieträgern wie Erdöl oder Uran beenden und unseren Energiehunger nachhaltig klimaverträglich stillen.

Der Weg dahin ist aber für viele noch ziemlich unklar. Oft traut man den regenerativen Energien nicht zu, eine wirkliche Alternative zu bieten. Dabei unterschätzt man völlig deren Möglichkeiten und prophezeit ein Zurück zur Steinzeit, wenn einmal das Erdöl und die Kohle erschöpft sein werden.

Dieses Buch soll solche Vorurteile zerstreuen. Es beschreibt klar und verständlich, welche verschiedenen Techniken und Potenziale zur Nutzung regenerativer Energien existieren, wie diese funktionieren und wie sie eingesetzt werden können. Das Zusammenspiel der verschiedenen Technologien ist dabei stets im Fokus. Am Beispiel Deutschlands wird auf-

gezeigt, wie eine nachhaltige Energieversorgung aussehen kann und wie diese umzusetzen ist. Dabei dient dieses Buch weniger als Handlungskatalog für eine zögerliche Politik, sondern soll vielmehr allen Leserinnen und Lesern Wege aufzeigen, selbst Beiträge für eine klimaverträgliche Energiewirtschaft zu leisten. Neben der Erläuterung von Energiesparmaßnahmen liefert das Buch dazu konkrete Planungshilfen für die Realisierung eigener regenerativer Energieanlagen.

Das Buch ist bewusst so geschrieben, dass es einem breiten Leserkreis die nötigen Informationen bietet. Es soll sowohl den Einstieg in die verschiedenen Technologien ermöglichen als auch für Personen mit einigen Vorkenntnissen interessante Hintergrundinformationen liefern.

Damit ist dieses Buch eine wichtige Ergänzung zu dem von mir verfassten und bereits beim Hanser Verlag erschienenen Fachbuch „Regenerative Energiesysteme“. Das große Interesse an dem mittlerweile in der sechsten Auflage erschienenen und ins Englische und ins Arabische übersetzten Fachbuch hat gezeigt, dass ein Bedarf an entsprechender Literatur besteht. Als Rückmeldung zu diesem Fachbuch und zu zahlreichen meiner Vorträge wurde stets das Interesse an einem allgemeinverständlichen, aber dennoch umfassenden Buch geäußert. Das neue Buch soll nun diese Lücke schließen und damit auch eine Unterstützung bei der Gestaltung einer nachhaltigen Energieversorgung liefern.

An dieser Stelle danke ich meiner Frau Cornelia, meinem Vater Günter, meinem Onkel Manfred sowie Friedrich Sick, die mit ihren Anregungen zum Entstehen dieses Buches beigetragen haben. Ein ganz besonderer Dank gilt auch dem Carl Hanser Verlag und im Speziellen Erika Hotho, Franziska Kaufmann und Mirja Werner für die Unterstützung und Realisierung dieses Buches.

Berlin, im Sommer 2008

Prof. Dr. Volker Quaschning

Vorwort zur 6. Auflage

Die sehr guten Verkaufszahlen und die positive Resonanz zu diesem Fachbuch haben gezeigt, dass die Thematik und die Art der Darstellung auf ein breites Interesse stoßen. Trotz sorgfältigster Prüfung lassen sich kleinere Fehler und Unstimmigkeiten nicht vermeiden. Ein besonderer Dank gilt daher allen Leserinnen und Lesern, die mit Hinweisen zur Beseitigung von Fehlern beigetragen haben. Die sechste Auflage wurde wieder umfassend aktualisiert. Sie enthält alle aktuellen Daten zu erneuerbaren Energien, Energiewende und Klimaschutz. Ein eigener Abschnitt erläutert, welche Schritte nötig wären, um das Pariser Klimaschutzabkommen einzuhalten und so die Lebengrundlagen der künftigen Generationen zu bewahren. Es bleibt zu hoffen, dass dieses Buch damit einen Beitrag leisten kann, die Energiewende auf das nötige Tempo zu steigern.

Berlin, im Sommer 2021

Prof. Dr. Volker Quaschning

Hochschule für Technik und Wirtschaft HTW Berlin

www.volker-quaschning.de

1 Unser Hunger nach Energie

Wer kennt sie nicht, die TV-Kultserie Raumschiff Enterprise. Dank ihr wissen wir bereits heute, dass man sich in nicht allzu ferner Zukunft aufmachen wird, die unendlichen Weiten des Weltraums zu erforschen. Die Energiefrage ist dann längst gelöst. Der im Jahr 2063 erfundene Warpantrieb liefert unbegrenzt Energie, mit der Captain Kirk sein Raumschiff Enterprise mit Überlichtgeschwindigkeit zu neuen Abenteuern steuern kann. Energie ist im Überfluss vorhanden, auf der Erde herrschen Friede und Wohlstand und Umweltprobleme gibt es nicht mehr. Doch vollkommen gefahrlos ist auch diese Art der Energieversorgung nicht. Einen Warpkernbruch schaut man sich am besten aus sicherer Entfernung an, wie seinerzeit den Super-GAU eines antiken Kernkraftwerks. Und auch das Warpplasma ist eine nicht ganz ungefährliche Materie, wie der regelmäßige Fernsehserienzuschauer zu berichten weiß.

Leider – oder manchmal auch zum Glück – sind die Fiktionen der Traumfabriken weit vom wirklichen Leben entfernt. Die Erfindung des Warpantriebs erscheint aus heutiger Sicht recht unwahrscheinlich, auch wenn dies eingefleischte Star-Trek-Fans anders sehen mögen. Derzeit ist man noch nicht einmal ansatzweise in der Lage, die vergleichsweise simple Kernfusion zu beherrschen. Somit müssen wir zur Lösung unseres Energieproblems auf heute bekannte und auch funktionierende Techniken mitsamt ihren Problemen zurückgreifen.

In der Realität hatte die Energienutzung schon immer spürbare Einflüsse auf die Umwelt. Die aus heutiger Sicht mangelhafte Verbrennung von Holz und die damit verbundenen gesundheitsschädlichen Abgase rund um die Feuerstätten haben beispielsweise die Lebenserwartung unserer Ahnen deutlich reduziert. Eine schnell steigende Weltbevölkerung, zunehmender Wohlstand und der damit verbundene Energiehunger haben den Bedarf an Energie sprunghaft ansteigen lassen. Waren die durch den Energiebedarf ausgelösten Umweltprobleme bislang stets regional begrenzt, haben die Auswirkungen unseres Energiehungers mittlerweile eine globale Dimension erreicht. Das globale Klima droht chaotische Verhältnisse anzunehmen. Unser Energieverbrauch ist dabei Hauptauslöser der weltweiten Klimaerwärmung. Resignation oder Furcht sind aber die falschen Antworten auf die immer größer werdenden Probleme. Es gibt Alternativen zur heutigen Energieversorgung. Es ist möglich, eine langfristig sichere und bezahlbare Energieversorgung aufzubauen, die nur

minimale und beherrschbare Umweltauswirkungen haben wird. Dieses Buch beschreibt, wie diese Energieversorgung aussehen muss und welchen Beitrag jeder Einzelne leisten kann, damit wir doch noch gemeinsam das Klima retten können. Zuerst ist es aber erforderlich, die Ursachen der heutigen Probleme näher zu betrachten.

1.1 Energieversorgung – gestern und heute

1.1.1 Von der französischen Revolution bis ins 20. Jahrhundert

Zu Zeiten der französischen Revolution, also gegen Ende des 18. Jahrhunderts war in Europa die tierische Muskelkraft die wichtigste Energiequelle. Damals standen 14 Millionen Pferde und 24 Millionen Rinder mit einer Gesamtleistung von rund 7,5 Milliarden Watt als Arbeitstiere zur Verfügung [Köni99]. Dies entspricht immerhin der Leistung von mehr als 100 000 Mittelklasseautos.



Leistung und Energie oder andersherum

Die Begriffe Leistung und Energie hängen untrennbar zusammen. Obwohl alle die Unterschiede schon mal im Physikunterricht gehört haben sollten, werden beide Begriffe gerne verwechselt und fehlerhaft verwendet.

Die *Energie* ist die gespeicherte Arbeit, also die Möglichkeit Arbeit zu verrichten. Energie heißt auf Englisch „energy“ und trägt das Formelzeichen E . Die Arbeit heißt auf Englisch „work“ und wird mit dem Formelzeichen W abgekürzt.

Die *Leistung* (engl.: „power“, Formelzeichen: P) gibt an, in welcher Zeit die Arbeit verrichtet oder die Energie verbraucht wird.

$$P = \frac{W}{t} \quad \left(\text{Leistung} = \frac{\text{Arbeit}}{\text{Zeit}} \right)$$

Wenn zum Beispiel eine Person einen Eimer Wasser hochhebt, ist dies eine Arbeit. Durch die verrichtete Arbeit wird die Lageenergie des Wassereimers vergrößert. Wird der Eimer doppelt so schnell hochgehoben, ist die benötigte Zeit geringer, die Leistung ist doppelt so groß, auch wenn die Arbeit die gleiche ist.

Die Einheit der Leistung ist Watt (Abkürzung: W). Für die Abkürzung der Einheit Watt wird der gleiche Buchstabe wie für das Formelzeichen der Arbeit verwendet, was die Unterscheidung nicht gerade erleichtert.

Die Einheit der Energie ist Wattsekunde (Ws) oder Joule (J). Daneben werden noch andere Einheiten verwendet. *Anhang A.1* beschreibt eine Umrechnung zwischen verschiedenen Energieeinheiten.

Da die benötigten Leistungen und Energien oft sehr groß sind, werden häufig Vorsatzzeichen wie Mega (M), Giga (G), Tera (T), Peta (P) oder Exa (E) verwendet (vgl. *Anhang A.1*).

Das zweite Standbein der damaligen Energieversorgung war Brennholz, und zwar mit strategischer Bedeutung. Heute geht man davon aus, dass die Verlagerung des Machtzentrums aus dem Mittelmeerraum in die Gebiete nördlich der Alpen unter anderem auf den dortigen Waldreichtum und die damit verbundenen Energiepotenziale zurückzuführen ist. Nachdem die islamische Welt noch bis ins 15. Jahrhundert auf der iberischen Halbinsel eine Vormachtstellung bewahren konnte, schwand ihr Einfluss unter anderem durch Holzmangel. Es fehlte zunehmend an Brennholz zum Einschmelzen von Metall für Schiffskanonen und andere Waffen. Energiekrisen sind also nicht erst eine Erfindung des späten 20. Jahrhunderts.



Abbildung 1.1 Brennholz, Arbeitstiere, Wind- und Wasserkraft deckten noch im 18. Jahrhundert weitgehend die weltweite Energieversorgung.

Neben Muskelkraft und Brennholz wurden bis in die Anfänge des 20. Jahrhunderts auch andere erneuerbare Energien intensiv genutzt. Ende des 18. Jahrhunderts waren in Europa zwischen 500 000 und 600 000 Wassermühlen im Einsatz. Die Windkraftnutzung fand vor allem in flachen Gegenden mit hohem Windangebot Verbreitung. In den vereinigten Niederlanden waren zum Beispiel Ende des 17. Jahrhunderts rund 8 000 Windmühlen in Betrieb.

Fossile Energieträger waren lange Zeit nur von untergeordneter Bedeutung. Steinkohle aus Lagerstätten unter der Erdoberfläche war als Energieträger zwar durchaus bekannt, wurde jedoch weitgehend gemieden. Erst als der Mangel an Holz in einigen Gebieten Europas zu Energieengpässen führte, begann man, die Kohlevorkommen zu erschließen. Die höhere Energiedichte der Steinkohle erwies sich außerdem als vorteilhaft bei der Stahlherstellung. Ihr Vormarsch ließ sich nicht mehr bremsen: Während um das Jahr 1800 noch 60 Prozent der Steinkohle in Haushalten für Heizzwecke diente, überwog bereits 40 Jahre später der Einsatz in Eisenhütten und in der Produktion.



Fossile Energieträger – gespeicherte Sonnenenergie

Fossile Energieträger sind konzentrierte Energieträger, die in sehr langen Zeiträumen aus tierischen oder pflanzlichen Überresten entstanden sind. Zu den fossilen Energieträgern zählen Erdöl, Erdgas, Steinkohle, Braunkohle und Torf. Die Ausgangsstoffe fossiler Energieträger konnten nur durch Umwandlung von Sonnenstrahlung über Jahrtausende entstehen. Somit sind fossile Energieträger eine Form von gespeicherter Sonnenenergie.

Chemisch gesehen basieren fossile Energieträger auf organischen Kohlenstoff-Verbindungen. Bei der Verbrennung mit Sauerstoff entsteht daher nicht nur Energie in Form von Wärme, sondern immer auch das Treibhausgas Kohlendioxid sowie weitere Verbrennungsprodukte.

Um 1530 förderten Kohlebergwerke in Großbritannien ungefähr 200 000 Tonnen, um 1750 etwa 5 Millionen Tonnen und im Jahr 1854 bereits 64 Millionen Tonnen. Hauptkohleförderländer waren neben Großbritannien die USA und Deutschland, die um das Jahr 1900 gemeinsam einen Anteil von 80 Prozent an der Weltproduktion besaßen [Köni99].



Erneuerbare Energien – gar nicht so neu

Die Vorkommen an fossilen Energieträgern wie Erdöl, Erdgas oder Kohle sind begrenzt. Sie werden in einigen Jahrzehnten verbraucht und damit einfach weg sein. Erneuerbare Energieträger „erneuern“ sich hingegen von selbst. Entzieht ein Wasserkraftwerk beispielsweise einem Fluss die Kraft des Wassers, hört dadurch der Fluss nicht auf zu fließen. Der Energiegehalt des Flusses erneuert sich von selbst, indem die Sonne Wasser verdunstet und der Regen den Fluss wieder speist.

Erneuerbare Energien werden auch als regenerative Energien oder alternative Energien bezeichnet. Andere erneuerbare Energieformen sind beispielsweise Windenergie, Biomasse, Erdwärme oder Sonnenenergie. Auch die Sonne wird in rund 4 Milliarden Jahren einmal erloschen sein. Verglichen mit den wenigen Jahrzehnten, die uns fossile Energieträger noch zur Verfügung stehen, ist dieser Zeitraum aber nahezu unendlich groß.

Übrigens werden erneuerbare Energien bereits wesentlich länger genutzt als fossile Energieträger, obwohl zwischen traditionellen und heutigen Anlagen zur Nutzung erneuerbarer Energien technologische Quantensprünge liegen. Neu sind erneuerbare Energien deshalb dennoch nicht – nur die Erkenntnis, dass erneuerbare Energien langfristig die einzige Option für eine sichere und umweltverträgliche Energieversorgung sind.

Ende des 20. Jahrhunderts stieg die weltweite Kohleförderung schließlich auf annähernd 4 Milliarden Tonnen an. Die Kohleförderung in Deutschland und in Großbritannien hat mit einem Anteil von unter drei Prozent am Weltmarkt ihre einstige Vormachtstellung verloren. Kraftwerke zur Stromerzeugung nutzen heute einen Großteil der Kohle. Hauptförderländer sind derzeit mit deutlichem Abstand China und die USA.

1.1.2 Die Epoche des schwarzen Goldes

Wie Kohle besteht Erdöl aus Umwandlungsprodukten von tierischen und pflanzlichen Stoffen, der Biomasse der Urzeit. Über einen Zeitraum von Millionen von Jahren lagerten sich Plankton und andere Einzeller in wenig durchlüfteten Meeresbecken ab und wurden eingeschlossen. Aufgrund von Sauerstoffmangel konnten sie sich nicht zersetzen. Chemische Umwandlungsprozesse machten aus ihnen schließlich Erdöl und Erdgas. Die ursprünglich eingelagerte Biomasse hat wiederum ihren Ursprung in der Sonne, sodass die fossilen Energieträger wie Kohle, Erdöl oder Erdgas nichts anderes als Langzeitkonserven der Sonnenenergie sind. Die ältesten Öllagerstätten sind etwa 350 Millionen Jahre alt. Das Gebiet um den Persischen Golf, wo heute das meiste Öl gefördert wird, lag noch vor 10 bis 15 Millionen Jahren vollständig unter dem Meeresspiegel.

Die Erschließung von Erdölvorkommen erfolgte wesentlich später als die der Steinkohlevorkommen. Heute kaum mehr vorstellbar, doch lange Zeit mangelte es an sinnvollen Anwendungen für den flüssigen Energieträger. Anfangs schmierte man Erdöl auf die Haut, um Hauterkrankungen zu heilen. Seine leichte Entzündlichkeit im Vergleich zu Stein- und Holzkohle gaben Erdöl den Ruf eines äußerst gefährlichen Brennstoffs. In kleinen Mengen wurde Erdöl bereits vor Jahrtausenden als Heil- und Beleuchtungsmittel verwendet. Die Petroleumlampe und später die Erfindung von Verbrennungsmotoren brachten Ende des 19. Jahrhunderts schließlich den Durchbruch.

Der eigentliche Beginn der industriellen Mineralölförderung war im August 1859. In diesem Jahr stieß der Amerikaner Edwin L. Drake in der Nähe von Titusville im amerikanischen Bundesstaat Pennsylvania bei einer Bohrung in etwa 20 Metern Tiefe auf Erdöl. Besonders ein Name verbindet sich mit der weiteren Erdölförderung in Amerika: John Davison Rockefeller. Er gründete 1862 im Alter von 23 Jahren eine Erdölfirma, aus der die Standard Oil und später die Exxon Corporation hervorgingen, und vereinigte große Bereiche der amerikanischen Ölwirtschaft.

Es dauerte dennoch bis ins 20. Jahrhundert hinein, bis fossile Energieträger und speziell das Erdöl den Energiemarkt beherrschten. Im Jahr 1860 wurden weltweit gerade einmal 100 000 Tonnen Öl gefördert. 1895 waren es bereits 14 Millionen Tonnen. Nach einer Gewerbestatistik des Deutschen Reichs aus dem Jahr 1895 waren 18 362 Windmotoren, 54 529 Wassermotoren, 58 530 Dampfmaschinen und 21 350 Verbrennungskraftmaschinen im Einsatz [Gas05]. Die Hälfte der Antriebsaggregate wurde selbst damals noch mit regenerativen Energieträgern betrieben.

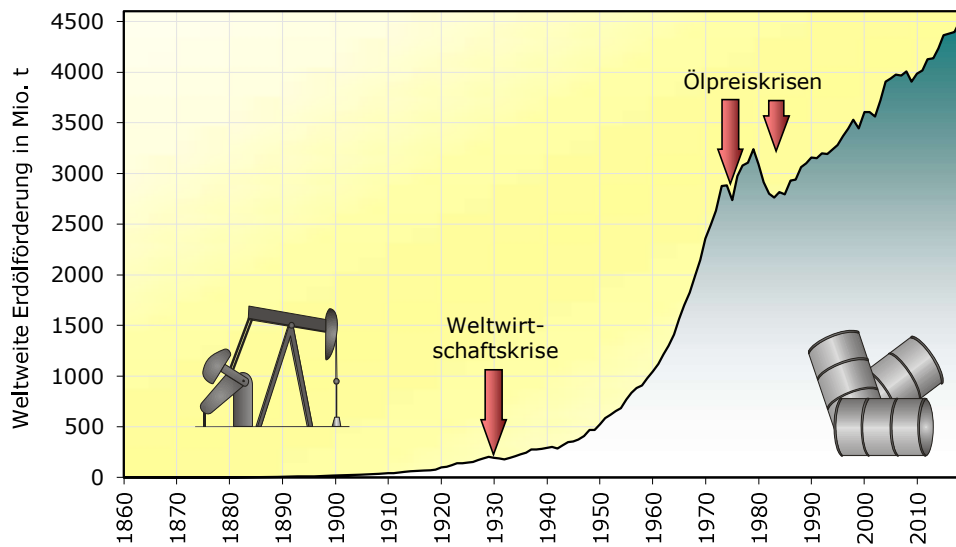


Abbildung 1.2 Erdölförderung seit dem Jahr 1860

Im 20. Jahrhundert stieg die Erdölförderung sehr stark an. Im Jahr 1929 kletterte sie bereits auf über 200 Millionen Tonnen, um dann in den 1970er-Jahren auf über 3000 Millionen Tonnen emporzuschnellen (Abbildung 1.2). Heute ist Erdöl der wichtigste Energieträger der meisten Industrieländer. Etwa 1700 Liter Erdöl pro Jahr verbraucht ein durchschnittlicher Bundesbürger, Kleinkinder und Rentner eingeschlossen. Das entspricht 10 gut gefüllten Badewannen.

Die große Abhängigkeit von einem Energieträger kann für eine Gesellschaft durchaus problematisch sein, wie uns die Vergangenheit vor Augen geführt hat. 1960 wurde die Organisation der Erdölexportländer OPEC (Organization of the Petroleum Exporting Countries) gegründet. Das Ziel der OPEC, deren Sitz sich in Wien befindet, ist die Koordinierung und Vereinheitlichung der Erdölpolitik der Mitgliedsländer. Hierzu zählen Algerien, Ecuador, Gabun, Indonesien, Irak, Iran, Katar, Kuwait, Libyen, Nigeria, Saudi-Arabien, Venezuela und die Vereinigten Arabischen Emirate. Zusammen kontrollierten sie Ende des 20. Jahrhunderts etwa 40 Prozent der weltweiten Erdölförderung. Als Folge des Jom-Kippur-Kriegs zwischen Israel, Syrien und Ägypten setzten die OPEC-Staaten im Jahr 1973 eine Verknappung der Fördermengen durch. Die Folge war die erste Ölkrise mit drastisch gestiegenen Ölpreisen. Ausgelöst durch Förderausfälle und Verunsicherung nach der Revolution im Iran und dem folgenden ersten Golfkrieg kam es im Jahr 1979 zur zweiten Ölkrise mit Ölpreisen von bis zu 38 US-Dollar pro Barrel.

Drastisch gestiegene Erdölpreise warfen das Trendwachstum der Weltwirtschaft und des Energieverbrauchs um etwa vier Jahre zurück. Die Industrienationen, die stets niedrige Ölpreise gewohnt waren, reagierten geschockt. Autofreie Sonntage und Förderprogramme zur Nutzung erneuerbarer Energien waren die Folge. Differenzen zwischen den einzelnen OPEC-Staaten führten wieder zu steigenden Förderquoten und zu einem starken Preis-

verfall Ende der 1980er-Jahre. Damit verringerte sich auch das Engagement der Industrienationen zur Nutzung regenerativer Energien wieder stark.



Vom elsässer Heringsfass zum Erdölbarrel

Die kommerzielle Erdölförderung im europäischen Kulturkreis hat ihren Ursprung in Pechelbronn im Elsass und geht auf das Jahr 1735 zurück. Dort begann man auch, Erdölprodukte in Fässer abzufüllen. Hierzu wählte man gereinigte Heringstonnen. Gesalzener Hering wurde damals in großen Mengen in Fässern verkauft, sodass diese Fässer vergleichsweise billig waren. Mit zunehmender Ölproduktion wurden später eigens Fässer der eingeführten Größe gefertigt. Den Fassboden strich man blau, um einer Verwechslung mit Fässern für Nahrungsmittel vorzubeugen. Als in den USA die kommerzielle Erdölförderung begann, übernahmen die Unternehmen die Techniken aus dem Elsass. Dazu gehörten auch die Heringsnormfässer, die nun die englische Bezeichnung Barrel für Fass trugen. Seitdem hat sich das Heringsfassvolumen als internationale Maßeinheit für Erdöl gehalten. Die Abkürzung für Barrel lautet bbl, was für „blue barrel“ steht, und bedeutet ein Fass mit blauem Boden.

1 petroleum barrel (US) = 1 bbl (US) = 158,987 l (Liter)

Der dramatische Preisverfall für Rohöl von fast 40 US-Dollar pro Barrel auf 10 Dollar führte zu wirtschaftlichen Problemen einiger Förderländer und machte es auch unattraktiv, neue Ölquellen zu erschließen. Im Jahr 1998 konnte die Einigkeit der OPEC-Staaten weitgehend wieder hergestellt werden. Man verständigte sich auf geringere Förderquoten, um einen weiteren Preisverfall zu stoppen. Der Preis stieg, und zwar stärker als anfänglich beabsichtigt. Nun rächten sich die fehlenden Investitionen in Energiesparmaßnahmen. Der Wirtschaftsboom in China und anderen Ländern kurbelte die Nachfrage nach Erdöl weiter an, die nun kaum noch zu decken war. In der Folge kletterten die Ölpreise auf immer neue Rekordhochs. Auch wenn der Ölpreis durch die Finanzkrise zwischenzeitlich stark fiel, sind wegen der begrenzten Vorkommen immer wieder neue Rekordpreise zu erwarten.

Dennoch hat sich seit Anfang der 1980er-Jahre einiges grundlegend geändert. Der Energieverbrauch stagnierte in vielen Industrieländern trotz anhaltendem Wirtschaftswachstum auf hohem Niveau und es setzte sich die Erkenntnis durch, dass Energieverbrauch und Brutto-sozialprodukt nicht zwangsläufig aneinander gekoppelt sind. Steigender Wohlstand ist auch bei stagnierendem oder sinkendem Energieverbrauch möglich. Nichtsdestotrotz wurde wegen der lange Zeit anhaltenden niedrigen Ölpreise versäumt, wirkliche Alternativen aufzubauen und Einsparmöglichkeiten zu nutzen.

Dies zeigt sich vor allem im Automobilsektor. Die Autos wurden schneller, komfortabler, schwerer und PS-stärker, aber nur geringfügig sparsamer. Heute steht der glückliche Jahreswagenbesitzer mit 50 PS mehr als vor 20 Jahren im Stau, was jedoch durch die Klimaanlage und eine Hightech-Stereoanlage erheblich angenehmer ist. Dafür ist auch der Tank größer, damit das schwerere Auto bei fast gleichem Verbrauch noch den Weg bis zu nächstbilligeren Tankstelle schafft. Als Folge der Klimadiskussion und der hohen Ölpreise müssen nun die Automobilkonzerne im Zeitrafftempo dem Auto Eigenschaften hinzufügen, die in den letzten Jahrzehnten kaum gefragt waren: Sparsamkeit und geringer Aus-

stoß von Treibhausgasen. Da viele Automobilunternehmen sich mit den neuen Anforderungen schwertun, setzen sie weiterhin auf altbewährte Konzepte: Sie verhindern oder verwässern durch ihren Einfluss auf die Politik die für den Klimaschutz dringend erforderlichen strengen Einsparvorgaben. Oder sie versuchen wie der VW-Konzern mit illegalen Methoden bestehende Vorschriften zu umgehen. Hätte Volkswagen die in den USA gezahlten Strafen in die Entwicklung emissionsfreier Elektroautos gesteckt, wäre das Unternehmen in diesem Bereich sicher weltweit führend und hätte ganz nebenbei einen enormen Beitrag zum Klimaschutz geleistet. Möglicherweise wird sich der VW-Skandal im Nachhinein für Deutschland noch als großer Glücksfall herausstellen. Er hat die technischen Einspargrenzen herkömmlicher Verbrennungsmotoren aufgezeigt und den Umstieg auf Elektroautos erheblich beschleunigt. Am Ende hat er vielleicht sogar verhindert, dass deutsche Autohersteller durch ein kompromissloses Festhalten an alten Technologien international komplett den Anschluss verlieren.

Eigentlich ist Erdöl aber viel zu schade, um es nur zu verbrennen. Neben dem Einsatz als Energieträger, vor allem als Heizöl und Motorkraftstoff, ist Erdöl auch ein wichtiger Rohstoff in der chemischen Industrie. Es dient beispielsweise als Ausgangsstoff zur Herstellung von Kunststoffstühlen, Plastiktüten, Nylonstrümpfen, Polyesterhemden, Duschgels, Duftwässern oder Vitamintabletten.

1.1.3 Erdgas – der jüngste fossile Energieträger

Erdgas gilt als der sauberste fossile Energieträger. Bei der Verbrennung von Erdgas entstehen weniger Schadstoffe und weniger klimaschädliches Kohlendioxid als bei der Verbrennung von Erdöl oder Kohle. Das ändert aber nichts an der Tatsache, dass bei der Verbrennung von Erdgas für einen wirksamen Klimaschutz ebenfalls deutlich zu viele Treibhausgase entstehen.

Das Ausgangsmaterial zur Entstehung von Erdgas bildeten meist Landpflanzen in den flachen Küstengewässern der Tropen, zu denen vor 300 Millionen Jahren auch die norddeutsche Tiefebene zählte. Aufgrund fehlenden Sauerstoffs in den Küstensümpfen konnte das organische Material nicht verwesen und es entstand Torf. Mit der Zeit lagerten sich neue Schichten aus Sand und Ton auf dem Torf ab, der sich im Lauf der Jahrtausende in Braun- und Steinkohle umwandelte. Durch hohe Drücke in Tiefen von einigen Kilometern und die dort herrschenden Temperaturen von 120 bis 180 Grad entstand daraus dann das Erdgas.

Erdgas ist jedoch nicht gleich Erdgas, sondern ein Gemisch verschiedener Gase, je nach Vorkommen mit ganz unterschiedlicher Zusammensetzung. Der Hauptbestandteil ist Methan. Oft enthält das Gas größere Mengen an Schwefelwasserstoff. Dieser ist giftig und riecht bereits in geringen Konzentrationen extrem nach faulen Eiern. Darum muss Erdgas häufig erst in Erdgasaufbereitungsanlagen mit chemischen-physikalischen Prozessen gereinigt werden. Da in einer Erdgaslagerstätte meist auch Wasser enthalten ist, muss das Gas getrocknet werden, um unnötig hohe Korrosionen in den Erdgasleitungen zu vermeiden.



Abbildung 1.3 Links: Bau einer Erdgaspipeline in Ostdeutschland, rechts: Erdgasspeicher Rehden, 60 Kilometer südlich von Bremen für 4,2 Milliarden Kubikmeter Erdgas (Fotos: WINGAS GmbH)

Noch in den 1950er-Jahren war Erdgas als Energieträger praktisch bedeutungslos. Erst Anfang der 1960er-Jahre wurde es im größeren Maßstab gefördert und gehandelt. Gründe für die im Vergleich zu Kohle und Erdöl späte Nutzung sind die hohen Bohrtiefen von mehreren Tausend Metern und der aufwändigere Transport. Während Erdöl anfangs noch in Holzfässern transportiert wurde, sind für den Transport von Gasen Druckspeicher oder Pipelines notwendig. Heute gibt es Pipelines mit einer Länge von Tausenden von Kilometern, von den weit abgelegenen Fördergebieten direkt zur Gasheizung im Einfamilienhaus. Auch Deutschland fördert Erdgas, doch werden mittlerweile über 80 Prozent des Bedarfs aus Importen vor allem aus den Niederlanden, Norwegen und Russland gedeckt.

Die Nachfrage nach Erdgas ist jedoch nicht über das Jahr konstant. In Deutschland ist sie im Winter doppelt so groß wie im Sommer. Da es nicht wirtschaftlich ist, die Förderung im Sommer auf die Hälfte zu drosseln, gibt es riesige Speicher, welche die ungleiche Nachfrage zwischen Sommer und Winter ausgleichen. Hierzu dienen sogenannte Kavernenspeicher und Porenspeicher. Kavernen sind künstlich ausgespülte Hohlräume in Salzstöcken, aus denen das gespeicherte Gas schnell wieder entnommen werden kann, zum Beispiel zur Deckung kurzzeitiger Engpässe. Große Gasmengen lassen sich in Porenspeichern lagern. Hier wird das Gestein wieder mit dem gefüllt, was es über 300 Millionen Jahre gespeichert und in wenigen Jahrzehnten hergegeben hat. Insgesamt sind in Deutsch-

land Speicher mit einem Volumen von über 30 Milliarden Kubikmetern in Betrieb, in Planung oder im Bau. Dies entspricht einem Quader mit einer Grundfläche von 20 mal 20 Kilometern und einer Höhe von 75 Metern. In absehbarer Zeit wird Methan oder Wasserstoff aus erneuerbaren Energien das fossile Erdgas ersetzen. Bereits die heute existierenden Erdgasspeicher sind ausreichend, um saisonale Schwankungen einer vollständig erneuerbaren Energieversorgung auszugleichen. Erdgasspeicher und -netze werden daher schon sehr bald eine zentrale Rolle bei der Sicherstellung einer künftigen nachhaltigen Energieversorgung spielen.

1.1.4 Atomkraft – gesplattene Energie

Im Dezember 1938 spalteten Otto Hahn und Fritz Straßmann in Berlin-Dahlem, im Kaiser-Wilhelm-Institut für Chemie, auf einem einfachen Experimentiertisch einen Urankern und legten damit den Grundstein für die weitere Erforschung und künftige Nutzung der Kernenergie. Der Experimentiertisch kann übrigens heute im Deutschen Museum in München bewundert werden.

Bei dem Experiment wurde ein Uran-235-Kern durch langsame Neutronen beschossen. Hierbei spaltete sich der Kern und es entstanden zwei atomare Trümmer Krypton und Barium sowie zwei bis drei weitere Neutronen. Wenn noch mehr Uran-235 vorhanden ist, können diese neuen Neutronen ebenfalls Urankerne spalten, die wiederum Neutronen freisetzen und somit entsteht eine Kettenreaktion. Ist die Uranmenge ausreichend groß, entsteht durch eine unkontrollierte Kettenreaktion eine Atombombe. Gelingt es, die Geschwindigkeit der Kettenreaktion zu kontrollieren, lässt sich Uran-235 auch als Brennstoff für Kraftwerke nutzen.



Kernenergienutzung in Deutschland

Die Pariser Verträge vom 5. Mai 1955 gestatteten Deutschland die zivile Nutzung der Kernenergie. Die Erwartungen waren hoch. Es wurde eigens ein Atomministerium geschaffen. Der erste Atomminister hieß Franz Josef Strauß. Am 31. Oktober 1957 nahm Deutschland an der TU München den ersten Forschungsreaktor, das sogenannte Atomei in Betrieb. Im Juni 1961 speiste das Kernkraftwerk Kahl erstmals Strom in das öffentliche Stromnetz ein. Im Jahr 1972 begannen die kommerziellen Kernkraftwerke Stade und Würgassen mit der Stromlieferung, und im Jahr 1974 wurde mit Biblis der weltweit erste Block mit 1200 Megawatt in Betrieb genommen. Im Jahr 1989 ging das letzte neu errichtete Kraftwerk Neckarwestheim ans Netz. Der Bund hatte bis dahin über 19 Milliarden Euro in die Forschung und Entwicklung der Kernenergie investiert. Die Sorgen der Bevölkerung wegen der Risiken der Kernenergie nahmen jedoch stetig zu und verhinderten den Bau weiterer Kraftwerke. Im Jahr 2000 beschloss Deutschland schließlich den Atomausstieg. Nachdem eine andere Bundesregierung im Jahr 2011 erst einmal die Laufzeiten wieder deutlich verlängerte, wurde bereits im gleichen Jahr nach den Unfällen im Atomkraftwerk Fukushima erneut der Ausstieg beschlossen. Nach heutigem Stand wird danach das letzte Atomkraftwerk in Deutschland Ende 2022 vom Netz gehen. Trotz einer über 50-jährigen Geschichte der Kernenergienutzung in Deutschland ist die Problematik der Endlagerung hochradioaktiver Stoffe bis heute nicht endgültig geklärt.

Bei der Kernspaltung gibt es einen sogenannten Massendefekt. Die Masse aller Teilchen nach der Spaltung ist geringer als die des ursprünglichen Urankerns. Bei der vollständigen Spaltung von einem Kilogramm Uran-235 kommt es zu einem Masseverlust von einem einzigen Gramm. Diese verlorene Masse wird dabei vollständig in Energie umgewandelt. Dabei wird eine Energiemenge von 24 Millionen Kilowattstunden frei. Um die gleiche Energiemenge freizusetzen, müsste man rund 3000 Tonnen Kohle verbrennen.

Nach Hahns Entdeckung wurde die Nutzung der Kernenergie vor allem durch die Militärs vorangetrieben. Albert Einstein, der im Jahr 1933 vor der nationalsozialistischen Verfolgung in die USA emigriert war, verfasste am 2. August 1939 einen Brief an den damaligen US-Präsidenten Roosevelt, in dem er darauf hinwies, dass Hitler-Deutschland große Anstrengungen unternahm, reines Uran-235 herzustellen, das für den Bau einer Atombombe verwendet werden kann. Nachdem am 1. September 1939 der zweite Weltkrieg ausbrach, wurde von der amerikanischen Regierung das Manhattan-Projekt ins Leben gerufen. Ziel war die Entwicklung und der Bau einer einsatzfähigen Atombombe.

Als größtes Problem erwies sich hierbei die Gewinnung von signifikanten Mengen an Uran-235, das zum Aufrechterhalten der Kettenreaktion unbedingt notwendig ist. Wird nämlich metallisches Uran aus Uranerz raffiniert, besteht dies zu 99,3 Prozent aus dem schwereren Uran-238, das für die Herstellung der Bombe praktisch nutzlos ist. Es hat sogar die Eigenschaft, Neutronen abzubremesen und zu absorbieren und somit die Kettenreaktion zum Erliegen zu bringen. Nur 0,7 Prozent des Urans bestehen aus Uran-235, das für eine Kettenreaktion auf höhere Anteile angereichert werden muss. Mit Hilfe der Chemie ließ sich keine Trennung von Uran-235 und Uran-238 erreichen, denn chemisch sind beide Isotope völlig identisch. Somit musste nach anderen Wegen gesucht werden. Letztendlich gelang die Trennung durch eine Zentrifuge, da die beiden Isotope unterschiedliche Massen haben.

Im Laufe der Jahre 1939 bis 1945 verschlang das Manhattan-Projekt mehr als zwei Milliarden US-Dollar. Unter der Leitung des Physikers Oppenheimer wurde schließlich das gewünschte Ziel erreicht: Am 16. Juli 1945, gut zwei Monate nach der Kapitulation Deutschlands, erfolgte im US-amerikanischen New Mexico der erste Atombombentest. Nachdem ein Einsatz in Deutschland nicht mehr zur Diskussion stand, wurden die Atombomben kurz vor Ende des zweiten Weltkriegs mit den bekannten Folgen im japanischen Hiroshima und Nagasaki eingesetzt.

Die zivile Nutzung der Kernenergie erfolgte erst einige Jahre später. Zwar wurden seit 1941 von Wissenschaftlern wie Eisenberg oder Fermi Versuche in Reaktoren betrieben, doch gelang es erst am 20. Dezember 1951 im US-Bundesstaat Idaho, mit dem Versuchsreaktor EBR 1 elektrischen Strom durch Kernenergie zu erzeugen.



■ www.kernD.de
■ www.bund.net/atomkraft
■ www.atomindustrie.de

Informationen von Kerntechnik Deutschland e. V.
Informationen des BUND zur Kernenergie
Professionelle Satireseite zur Kernenergienutzung

Im Gegensatz zur unkontrollierten Kettenreaktion bei der Explosion einer Atombombe sollte die Kernspaltung in einem Atomkraftwerk kontrolliert erfolgen. Ist die Kettenreaktion erst einmal in Gang gesetzt, muss die Zahl der bei der Kernspaltung neu entstehenden Neutronen begrenzt werden. Jede Spaltung eines Urankerns setzt zwei bis drei Neutronen frei, von denen aber nur ein einziges Neutron einen weiteren Kern spalten darf. Regelstäbe, die Neutronen einfangen, reduzieren die Zahl der freiwerdenden Neutronen. Wird diese Zahl nämlich zu groß, gerät der Prozess außer Kontrolle. Dann verhält sich ein Atomkraftwerk ähnlich wie eine Atombombe und es kommt zu einer unkontrollierten Kettenreaktion. Technisch, so war die führende Auffassung der damaligen Zeit, lässt sich die Kernspaltung kontrollieren und eine unerwünschte Reaktion vollständig ausschließen.

Die anfängliche Euphorie bei der Nutzung der Kernenergie legte sich, als es am 28. März 1979 in Harrisburg, der Hauptstadt des US-Bundesstaats Pennsylvania, zu einem Reaktorunfall kam. Hierbei entwichen große Mengen an Radioaktivität. Viele Tiere und Pflanzen wurden geschädigt und die Zahl der menschlichen Totgeburten in der Umgebung nahm nach dem Unglück stark zu.

Am 26. April 1986 kam es in der 30 000 Einwohner zählenden Stadt Tschernobyl in der Ukraine zu einem weiteren schweren Kernreaktorunfall. Das offiziell Unwahrscheinliche geschah: Die Kettenreaktion geriet außer Kontrolle und es kam zu einer Kernschmelze. Die dabei freigesetzte Radioaktivität führte auch in Deutschland zu hohen Strahlenbelastungen. Eine Vielzahl von Helfern, die den Schaden vor Ort einzudämmen versuchten, bezahlten diesen Einsatz mit dem Leben und Tausende von Menschen starben in der Folgezeit an Krebserkrankungen.

Am 11. März 2011 wurde das japanische Atomkraftwerk Fukushima Daiichi von einem starken Erdbeben und einem schweren Tsunami getroffen. Die Anlage war für ein derartiges Ereignis nicht ausgelegt und die Reaktorkühlung versagte. Als Folge kam es zu Kernschmelzen und mehreren Explosionen, die vier der sechs Reaktoren zerstörten und erhebliche Mengen an Radioaktivität freisetzten. Rund 150 000 Einwohner der Umgebung wurden evakuiert und hunderttausende zurückgelassene Tiere verhungerten.

Ein weiteres Problem der zivilen Nutzung von Kernenergie stellen die radioaktiven Reststoffe dar. Beim Einsatz von Uran-Brennelementen in Kernkraftwerken entstehen große Mengen an radioaktiven Abfällen, die noch über Jahrtausende eine tödliche Bedrohung sein werden. Die gefahrlose Lagerung dieser Reststoffe ist weltweit bisher nicht gelöst.

Technisch ist die Nutzung der Kernenergie faszinierend, die Elektrizitätserzeugung mit relativ geringen Brennstoffmengen sehr verlockend. Doch dem Nutzen stehen große Risiken gegenüber. Daher wurde in Deutschland vereinbart, die Kernenergienutzung auslaufen zu lassen. Nach dem Abschalten des letzten Kernkraftwerks in Deutschlands wird das Abenteuer Kernenergie die Bundesregierung allein insgesamt weit mehr als 40 Milliarden für Forschung und Entwicklung gekostet haben. Ein bizarres Paradeprojekt für die enormen Fehlinvestitionen ist Deutschlands teuerster Freizeitpark. Im nordrhein-westfälischen Kalkar wurde für rund 4 Milliarden Euro der Prototyp eines sogenannten schnellen Brutreaktors errichtet. Aufgrund von Sicherheitsbedenken, unter anderem wegen des stark

reaktiven Kühlmittels Natrium, ging das Kraftwerk niemals in Betrieb. Heute befindet sich in der Industrieruine des Kraftwerks der Freizeitpark Kernwasser Wunderland Kalkar.



Abbildung 1.4 Auf dem Gelände des niemals in Betrieb gegangenen schnellen Brutreaktors in Kalkar befindet sich heute der Freizeitpark Kernwasser Wunderland (Fotos: www.wunderlandkalkar.eu).

Von der konservativen Politik und einigen Unternehmen wurde die Kernenergie immer wieder als vermeintliche Zukunftstechnologie ins Feld geführt. Von der Vielzahl angekündigter Projekte der letzten Jahre wurde allerdings nur ein geringer Teil realisiert. Vor allem die enormen Kosten neuer Kernkraftwerke beenden meist recht schnell die nuklearen Träume. Um neue Kernkraftwerke in Europa überhaupt noch wirtschaftlich betreiben zu können, sind hohe Subventionen erforderlich. Für das umstrittene Neubauprojekt Hinkley Point C in Großbritannien sind für den Atomstrom Vergütungen vorgesehen, die deutlich über denen von Solar- und Windkraftanlagen liegen. Wenn die Kernenergie als höchst umstrittene Technologie aber nicht einmal mehr wirtschaftliche Vorteile aufweisen kann, sind die Tage der Kernenergie ganz sicher gezählt.

Weltweit waren Ende des Jahres 2020 insgesamt noch 443 Kernkraftwerke in Betrieb. Für die Weltenergieversorgung ist die Kernenergie jedoch relativ unwichtig. Ihr Anteil ist kleiner als der der Wasserkraft und deutlich geringer als der von Brennholz. Wollte man durch die Kernenergie einen Großteil der fossilen Kraftwerke ersetzen, wären Uranvorräte in wenigen Jahren erschöpft. Somit sind Kernkraftwerke keine wirkliche Alternative für den Klimaschutz, obwohl einige Politiker und vor allem die profitierenden Unternehmen dies in der Öffentlichkeit oft gerne so darstellen.

Langfristig werden in eine ganz neue Variante der Atomkraftnutzung große Hoffnungen gesetzt und Geldsummen investiert: in die Kernfusion. Als Vorbild hierfür dient die Sonne, die ihre Energie durch Verschmelzung von Wasserstoffkernen freisetzt. Dieser Vorgang soll auf der Erde nachvollzogen werden, ganz ohne Risiko einer unerwünschten Kettenreaktion à la Tschernobyl oder Fukushima. Doch die Sache hat einen Haken: Damit die Kernfusion in Gang kommt, müssen die Teilchen auf Temperaturen von mehreren Millio-

nen Grad Celsius erhitzt werden. Kein bekanntes Material kann diesen Temperaturen dauerhaft standhalten. Darum werden andere Technologien, wie zum Beispiel der Einschluss der Reaktionsmaterialien durch starke Magnetfelder, erprobt. Auch wenn dies bereits gelungen ist, zeigen bisherige Versuchsreaktoren das Verhalten von nassem Holz. Trotz enormer Energiemengen zum Anfeuern gingen sie stets von selbst wieder aus.

Ob diese Technologie überhaupt jemals funktionieren wird, kann derzeit keiner ernsthaft voraussagen. Spötter meinen, das Einzige, was sich seit Jahren bei der Kernfusion mit Sicherheit voraussagen lässt, ist die stets gleich bleibende Zeitspanne von 50 Jahren, in der ein funktionierender Reaktor einmal ans Netz gehen soll.

Doch selbst wenn diese Technologie einmal ausgereift sein sollte, gibt es verschiedene Gründe, die gegen den Ausbau der Kernfusion sprechen. Diese Technologie ist deutlich aufwändiger und damit auch teurer als die heutige Kernspaltung. Wie bereits erwähnt, ist heute die Finanzierung von herkömmlichen Kernkraftwerken schwierig. Schon aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten werden Alternativen wie regenerative Energien zu bevorzugen sein. Werden trotzdem enorme Geldsummen in Fusionsversuche gesetzt, fehlen diese beim Aufbau von Energiealternativen. Heute wäre man froh, wenn man einen Fusionsreaktor überhaupt zum Laufen bekäme. Ein Einsatz dieser Technologie für Regelzwecke ist daher aus heutiger Sicht wenig vorstellbar. Genau diese Eigenschaften wären aber nötig, wenn Fusionskraftwerke einmal gemeinsam mit regenerativen Kraftwerken wie Solar- und Windkraftanlagen einen Beitrag zur Energieversorgung leisten sollen. Für das regenerative Zeitalter ist die Fusionstechnologie also ungeeignet. Außerdem entstehen auch beim Betrieb einer Kernfusionsanlage radioaktive Stoffe und Abfälle, von denen eine Gefährdung ausgeht. Es gibt also sehr wenige Gründe, die für die weitere Verwendung staatlicher Gelder in diese Technologie sprechen.

1.1.5 Das Jahrhundert der fossilen Energieträger

Während bis Ende des 19. Jahrhunderts klassische erneuerbare Energien einen Großteil des Energiehungers der Menschheit deckten, kann das 20. Jahrhundert als Jahrhundert der fossilen Energieträger gelten. Bis zur ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts lösten fossile Energieträger in Verbrennungskraftmaschinen klassische Anlagen zur Nutzung erneuerbarer Energien wie Windmühlen, Wasserräder oder durch Muskelkraft angetriebene Fahrzeuge und Maschinen fast vollständig ab. Unter den regenerativen Energien konnten sich nur die moderne Wasserkraft zur Stromerzeugung und die Biomasse hauptsächlich als Brennstoff behaupten.

Nach dem zweiten Weltkrieg stieg die Energienachfrage nahezu explosionsartig an. Die fossilen Energieträger konnten ihren Anteil weiter deutlich ausbauen. Im Jahr 2019 deckten fossile Energieträger noch rund 77 Prozent des weltweiten Primärenergiebedarfs (vgl. *Kasten S. 30 und Abbildung 1.5*). Wasserkraft und Atomkraft hatten einen Anteil von rund 6 und 4 Prozent und die Biomasse von etwa 9 Prozent. Alle anderen erneuerbaren Energien kamen auf fast 4 Prozent. Inzwischen zeichnen sich zaghafte Umbrüche ab. Solar- und Windkraft haben kontinuierlich hohe Steigerungsraten beim Zubau, sodass sich

deren Anteil am Weltenergiebedarf in den nächsten Jahren signifikant erhöhen wird. Die Nutzung von Kohle stagnierte seit 2011 auf sehr hohem Niveau, während der Bedarf an Erdöl und Erdgas bis 2019 weiter stieg. Durch die Coronakrise kam es temporär ab 2020 zu starken Einbrüchen bei den fossilen Energieträgern. Es bleibt zu hoffen, dass erneuerbare Energien deren Anteile übernehmen und damit eine Trendwende zu wirksamen Klimaschutzmaßnahmen einleiten können.

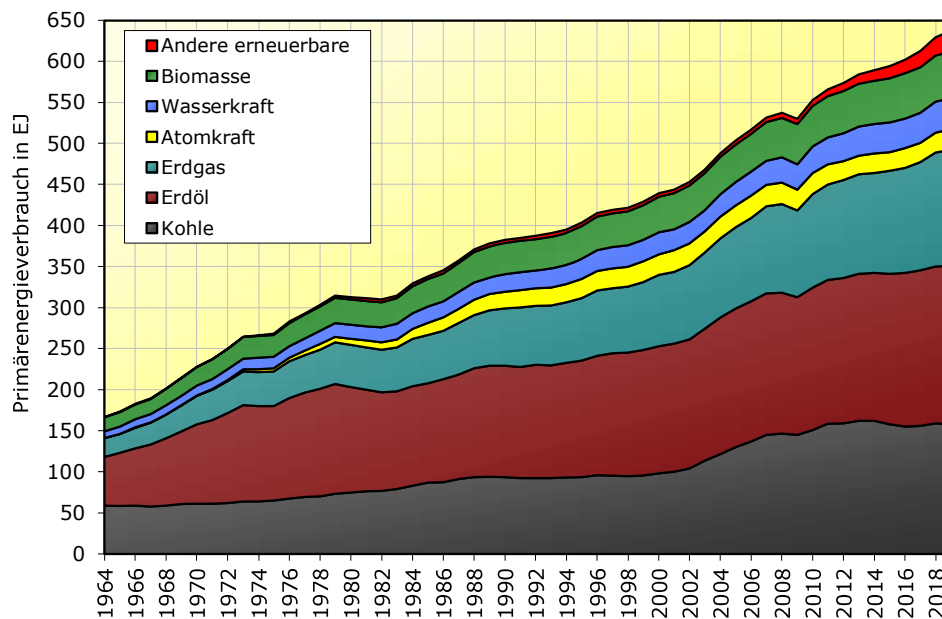


Abbildung 1.5 Entwicklung des weltweiten Primärenergiebedarfs (Daten: [BP20])

1.1.6 Das erneuerbare Jahrhundert

Obwohl derzeit der Anteil erneuerbarer Energien noch vergleichsweise gering ist und der Verbrauch fossiler Energieträger trotz aller Klimaschutzbekenntnisse weiter steigt, ist das 21. Jahrhundert bereits auf dem Weg, das Jahrhundert der erneuerbaren Energien zu werden. Viele können sich einen schnellen Wandel noch nicht vorstellen. Dieses Schicksal haben erneuerbare Energien mit der Einführung einer Vielzahl neuer Technologien gemeinsam. So soll beispielsweise Kaiser Friedrich Wilhelm der II. anfangs den Wandel im Verkehrsbereich bezweifelt haben: „Ich glaube an das Pferd. Das Automobil ist eine vorübergehende Erscheinung.“

Internet und Handy haben uns vorgemacht, wie schnell sich neue Technologien durchsetzen können. Vor allem der Ausbau der Windkraft und der Photovoltaik erfolgen derzeit rasant, mit Wachstumsraten, die an die Einführung des Internets und des Mobilfunks erinnern. Deutschland war lange Zeit Vorreiter bei der Nutzung erneuerbarer Energien. Bereits 2011 wurde hier die millionste Solaranlage eröffnet (*Abbildung 1.6*). Andere

1 Unser Hunger nach Energie

Länder wie China haben aber inzwischen Deutschland die Führungsrolle beim Ausbau erneuerbarer Energien abgenommen, nachdem die deutsche Regierung den Zubau ab dem Jahr 2013 signifikant eingeschränkt hat. Dennoch besteht kein Zweifel: Das Zeitalter der erneuerbaren Energien hat bereits weltweit begonnen. Schon bald werden sie die Dominanz der fossilen Energien brechen. Es bleibt nur die Frage, ob die Ablösung schnell genug gelingt, um den ebenfalls immer schneller voranschreitenden Klimawandel noch rechtzeitig stoppen zu können. Die Chancen dafür stehen aber möglicherweise besser als viele derzeit zu hoffen wagen.



Abbildung 1.6 Links: Trotz der intensiven Nutzung fossiler Energieträger boomt der Windenergieausbau in den USA, rechts: die millionste Solarstromanlage in Deutschland
Fotos: Dennis Schwartz/REpower Systems SE und BSW-Solar

1.2 Energiebedarf – wer was wo wie viel verbraucht

Der Energiebedarf auf der Erde ist höchst unterschiedlich verteilt. Sechs Staaten der Erde, nämlich China, USA, Russland, Indien, Japan und Deutschland verbrauchen mehr als die Hälfte der Energie.

Die USA benötigen alleine etwa ein knappes Sechstel der Energie weltweit, obwohl in den USA weniger als ein Zwanzigstel der Erdbevölkerung lebt. Würde jeder Inder genauso viel Energie beanspruchen wie ein US-Amerikaner, fiele der Weltenergiebedarf bereits um 60 Prozent höher aus. Wenn alle Menschen auf der Erde den gleichen Energiehunger wie ein US-Amerikaner entwickeln, dann klettert der Bedarf sogar auf über das Dreifache.



Energie kann gar nicht verbraucht werden

Wer gegenüber seinem Physiklehrer schon einmal geäußert hat, dass der Energieverbrauch viel zu hoch sei, wird mit Sicherheit auf Unverständnis gestoßen sein – nicht, weil der Physiklehrer ein mangelndes Verständnis für die Energieproblematik der Erde hat, sondern weil Naturwissenschaftler den Energieerhaltungssatz verinnerlicht haben. Danach kann Energie weder verbraucht noch erzeugt, sondern nur von einer Form in eine andere umgewandelt werden.

Betrachten wir einmal das Beispiel Auto. Dass das Auto viel verbraucht, spüren wir bei jedem Volltanken. Das vom Auto benötigte und von uns teuer bezahlte Benzin ist eine Art von gespeicherter chemischer Energie. Durch Verbrennung entsteht thermische Energie. Diese wird vom Motor in Bewegungsenergie umgewandelt und an das Auto weitergegeben. Ist das Benzin verbraucht, steht das Auto wieder. Die Energie ist dann jedoch nicht verschwunden, sondern durch Abwärme des Motors sowie über die Reibung an den Reifen und mit der Luft als Wärme an die Umgebung abgegeben. Diese Umgebungswärme kann aber in der Regel von uns Menschen nicht weiter genutzt werden. Aus Umgebungswärme werden wir nie wieder Benzin herstellen können. Durch die Autofahrt wird der nutzbare Energiegehalt des Benzins in nicht mehr nutzbare Umgebungswärme überführt. Für uns ist diese Energie also verloren und damit verbraucht, auch wenn dies im physikalischen Sinne nicht korrekt ist.

Anders sieht es beispielsweise bei einer Photovoltaikanlage aus. Sie wandelt die Sonnenbestrahlung direkt in elektrische Energie um. Es wird gerne davon gesprochen, dass eine Solaranlage Energie erzeugt. Physikalisch ist auch dies nicht korrekt. Die Solaranlage wandelt lediglich schlecht nutzbare Solarstrahlung in hochwertige Elektrizität um.

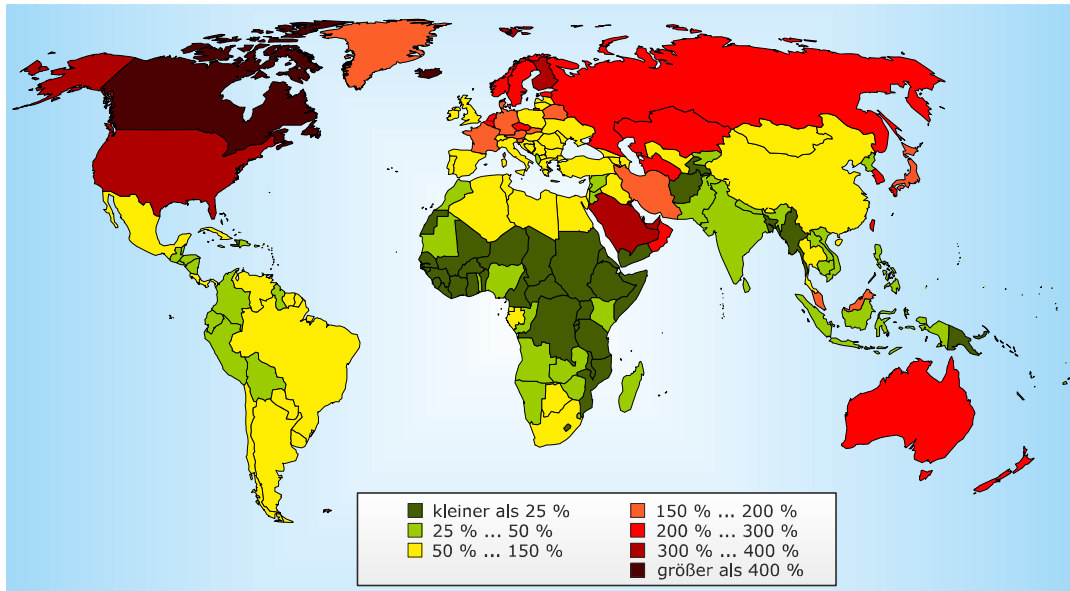


Abbildung 1.7 Pro-Kopf-Primärenergiebedarf bezogen auf den Weltdurchschnitt

Möchte man eine Aussage treffen, welche Länder der Erde besonders viel Energie verbrauchen, darf natürlich nicht nur auf den Gesamtverbrauch geschaut werden. Die Be-

völkerungszahl spielt dabei beim Vergleich auch eine entscheidende Rolle. Zwar verbraucht Indien mehr Energie als Deutschland. Bei über einer Milliarde Einwohnern ist dies aber auch zu erwarten. Der Pro-Kopf-Verbrauch in Indien beträgt rund als ein Sechstel des Verbrauchs in Deutschland. Obwohl Indien also das Land mit dem vierthöchsten Primärenergieverbrauch der Erde ist, liegt der Pro-Kopf-Verbrauch unter der Hälfte des Welt-durchschnitts.

Abbildung 1.7 zeigt, in welchen Ländern der Pro-Kopf-Primärenergiebedarf im Vergleich zum Welt-durchschnitt besonders hoch beziehungsweise besonders niedrig ist. Dabei fällt auf, dass die westlichen Industriestaaten und Länder mit großem Erdölvorkommen einen besonders hohen Verbrauch haben. Wohlstand und günstige Energiepreise kurbeln demnach den Verbrauch an. Trennt man die Erde in Nord- und Südhalbkugel, zeigt sich, dass die Länder mit sehr hohem Verbrauch – mit Ausnahme von Australien, Neuseeland und Süd-Afrika – sich alle auf der Nordhalbkugel befinden. Deutschland, Frankreich, Großbritannien und Italien zusammen verbrauchen mehr als der gesamte afrikanische Kontinent mit seinen über eine Milliarde Einwohnern.



Primärenergie, Apfelenergie und Birnenenergie

Beim Vergleich des eigenen Stromverbrauchs mit dem Gasverbrauch wird von der Energiemenge her fast immer der Gasverbrauch höher ausfallen, wenn wir unsere Wohnung mit Gas beheizen. Beim Vergleich der Gas- und Stromrechnung sind die Unterschiede schon nicht mehr so groß. Elektrizität und Erdgas sind zwei Arten von Energie oder Energieträgern, die wie Äpfel und Birnen nicht direkt vergleichbar sind. Um eine Kilowattstunde Elektrizität aus Gas herzustellen, müssen in einem Kraftwerk zwei bis drei Kilowattstunden Gas verfeuert werden. Der Rest verpufft meist ungenutzt als Abwärme in die Umgebung. Um verschiedene Energieformen vergleichbar zu machen, unterscheidet man deshalb zwischen Primärenergie, Endenergie und Nutzenergie.

Primärenergie ist Energie in ursprünglicher, technisch noch nicht aufbereiteter Form wie zum Beispiel Kohle, Rohöl, Naturgas, Uran, Solarstrahlung, Wind, Holz oder Kuhmist (Biomasse).

Endenergie oder Sekundärenergie ist Energie in der Form wie sie der Verbraucherin oder dem Verbraucher zugeführt wird, wie zum Beispiel Erdgas, Benzin, Heizöl, Elektrizität oder Fernwärme.

Nutzenergie ist Energie in letztendlich genutzter Form, wie zum Beispiel Licht zur Beleuchtung, Wärme zur Heizung oder Antriebsenergie für Maschinen und Fahrzeuge.

Am häufigsten werden verschiedene Energieformen auf der Primärenergiebasis verglichen. Nicht selten gehen bei der Umwandlung von Primärenergie zu Nutzenergie mehr als 90 Prozent des ursprünglichen Energiegehalts verloren. Die Zuordnung erneuerbarer Energien ist dabei nicht immer ganz einheitlich. Strom aus Solar- oder Windkraftwerken wäre nach der Definition eigentlich eine Endenergie. Viele Statistiken bezeichnen diesen aber als Primärelektrizität und werten ihn als Primärenergie. Über die Ursachen lässt sich nur spekulieren. Einerseits ist die statistische Erfassung der zu erneuerbarem Strom zugehörigen „echten“ Primärenergie schwierig, andererseits ist das regenerative Angebot so groß, dass Wirkungsgrade bei der Umwandlung von Primär- zu Endenergie an Bedeutung verlieren. Analog zu Strom aus regenerativen Kraftwerken wird auch regenerativ erzeugter Wasserstoff in vielen Statistiken als Primärenergie gewertet, obwohl dieser im engeren Sinn ebenfalls eine Art von Endenergie ist.

Länder mit besonders hohem Energieverbrauch decken ihren Energiebedarf meist zu großen Teilen aus fossilen Energieträgern. Dabei gibt es durchaus Ausnahmen wie Island, wo Geothermie und Wasserkraft dominieren. Länder mit besonders niedrigem Energiebedarf greifen hingegen oft in hohem Maße auf sogenannte traditionelle Biomasse zurück. Hierunter versteht man Feuerholz oder andere herkömmliche tierische oder pflanzliche Produkte wie getrockneter Tierdung. Über 2 Milliarden Menschen weltweit nutzen Brennholz und Holzkohle zum Kochen und Heizen. In Afrika südlich der Sahara sind sogar rund 90 Prozent der Bevölkerung vollkommen auf Brennstoffe aus traditioneller Biomasse angewiesen.

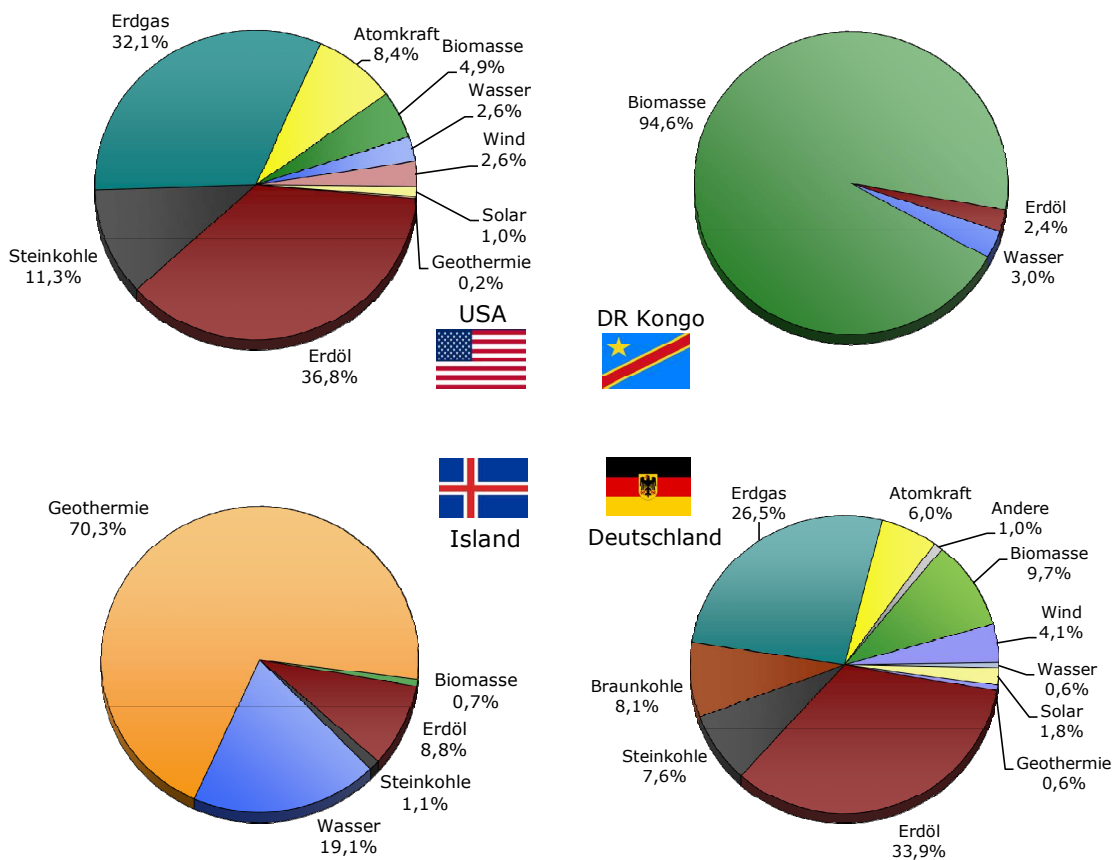


Abbildung 1.8 Anteile verschiedener Energieträger an der Deckung des Primärenergiebedarfs in der DR Kongo (im Jahr 2018), Deutschland (2020), Island (2019) und den USA (2019)

Bei den Industrieländern hingegen gibt es ebenfalls große Unterschiede. Während viele Industrieländer wie Deutschland oder die USA noch bis zu mehr als 80 Prozent ihres Primärenergiebedarfs aus fossilen Energieträgern oder der Atomkraft decken, ist der Anteil erneuerbarer Energien in einzelnen Industrieländern bereits heute wesentlich höher. Die Alpenländer sowie Norwegen und Schweden haben einen deutlich höheren Anteil an

Wasserkraft. Auch die Biomasse spielt in einigen Ländern wie Schweden oder Finnland eine größere Rolle. In Island ist die Erdwärme die Energieform mit dem größten Anteil. Wasserkraft und Geothermie decken in Island zusammen weit über 80 Prozent des Energiebedarfs.

Die Demokratische Republik Kongo ist hingegen ein typisches Beispiel für die Energieversorgung der ärmsten Länder der Erde. Sie basiert noch zu mehr als 90 Prozent auf traditioneller Biomasse. *Abbildung 1.8* zeigt die unterschiedliche Nutzung einzelner Energieformen bei der Deckung des Energiebedarfs in verschiedenen Ländern.

1.3 Die SoDa-Energie

Nur rund 1,8 Prozent des deutschen Primärenergieverbrauchs im Jahr 2020 wurden laut Statistik durch Solarenergie gedeckt. Auch der Anteil anderer erneuerbarer Energien ist noch sehr gering. Für viele ist deshalb kaum vorstellbar, dass regenerative Energien in wenigen Jahren das Klima retten sollen. In Wahrheit haben aber regenerative Energien heute bereits einen Anteil von über 99 Prozent am deutschen Energieaufkommen, wenn man in den offiziellen Statistiken nur einmal richtig rechnen würde.

„Traue keiner Statistik, die du nicht selbst gefälscht hast“, soll bereits Winston Churchill gesagt haben, wobei dieser Ausspruch in keiner offiziellen Quelle belegt ist. Ebenso verbreitet wie die Zuordnung des gängigen Zitats an Churchill ist die Aussage, dass ein wesentlicher Teil unseres Energiebedarfs derzeit durch fossile Energieträger gedeckt wird. Dies besagen zumindest alle üblichen Energiestatistiken. Hier stellt sich die Frage, wie wir Energiebedarf definieren.

Heizwärme eines Heizkörpers, Licht einer gewöhnlichen Glühbirne oder die Antriebsenergie eines Schiffsdiesels sind allgemein anerkannter Bestandteil unseres Energiebedarfs. Erwärmt durch Fenster einfallende Sonnenstrahlung die Räume, ermöglicht Sonnenlicht in taghell beleuchteten Häusern und auf Straßen das Ausschalten der künstlichen Beleuchtung oder treibt Wind unser Segelboot quer über den Atlantik, so erfasst dies keine Energiestatistik. Das beheizte Gewächshaus, bei dem unter künstlichem Licht Nutzpflanzen heranwachsen, schafft es ebenfalls in die Energiestatistiken – das überdachte Frühbeet, in dem Pflanzen alleine durch Sonnenlicht gedeihen, hingegen nicht. Die Flutlichtbeleuchtung eines Stadions während eines abendlichen Fußballspiels ist Teil unseres Energiebedarfs. Findet das Fußballspiel bei strahlendem Sonnenschein statt, wird laut Energiestatistik in der durch die Sonne hell ausgeleuchteten Fußballarena eigentlich kein Licht benötigt. Werfen wir Kunstschneemaschinen an, um das immer spärlicher werdende Schneeaufkommen in den Skigebieten zu kompensieren, ist dies ein Fall für die Energiestatistik – der natürliche Schnee hingegen nicht. Füllen wir unsere Trinkwasserspeicher durch elektrische Pumpen, zählen wir die Energie. Füllt Regen die Speicher, ist dies nicht weiter zu beachten. Auch der hohe Strombedarf von elektrischen Wäschetrocknern erhöht den Energiebedarf. Trocknen hingegen Wind und Sonne die Wäsche auf einer herkömmlichen Wäscheleine, decken sie im Sinne der Statistik keinerlei Bedarf.

Alle natürlichen, nicht technisch umgewandelten Energieformen sind nicht Bestandteil des Energiebedarfs im herkömmlichen Sinne, obwohl es eigentlich egal sein müsste, woher die Energie kommt, die unser Badewasser erwärmt, die Pflanzen zum Wachsen bringt oder für Beleuchtung sorgt. Die Verfügbarkeit von natürlichen Energieformen wie Sonnenenergie ist für uns aber so selbstverständlich, weil sie sowieso da ist und deshalb so wertlos erscheint, dass sie es nicht einmal in die Statistiken schafft. Dies verzerrt aber unseren Eindruck über den Energiebedarf und setzt die Möglichkeiten der erneuerbaren Energien in ein falsches Licht.

Deutschland hat eine Fläche von 357 093 Quadratkilometern. Die jährliche solare Bestrahlung beträgt im Mittel 1064 Kilowattstunden pro Quadratmeter. Somit erreicht Deutschland in jedem Jahr eine solare Energiemenge von 380 Billionen Kilowattstunden. Dies ist knapp hundertmal so viel wie der in der Statistik ausgewiesene Primärenergieverbrauch von Deutschland und sogar mehr als der gesamte Primärenergiebedarf der Erde. Ein Teil dieser Strahlung erwärmt unsere Erde und Luft, ein anderer Teil wird in Pflanzenwachstum, also Biomasseproduktion umgewandelt.

Rund 800 Millimeter oder 0,8 Kubikmeter Niederschlag gehen in Deutschland pro Quadratmeter nieder. Über ganz Deutschland summiert sich der jährliche Niederschlag auf 286 Milliarden Kubikmeter. Die Sonne verdunstet dieses Wasser, bevor es als Regen zur Erde gelangt. Für die Verdunstung von einem Kubikmeter Wasser werden 627 Kilowattstunden benötigt. Somit steckt im jährlichen Niederschlag eine Energiemenge von rund 179 Billionen Kilowattstunden.

Etwa 2 Prozent der Sonnenenergie werden in Bewegung des Windes umgewandelt. Hier kommen für Deutschland rund 8 Billionen Kilowattstunden zusammen. Sonne, Wind und Wasser zusammen haben in Deutschland alleine ein Energieaufkommen von rund 567 Billionen Kilowattstunden pro Jahr. Die Geothermie oder Meeresenergie ist in dieser Summe noch nicht einmal enthalten. Würde diese Energiemenge nur wenige Prozentpunkte sinken, wären Dürren oder arktische Winter die Folge.

Der Primärenergiebedarf von Deutschland wird in der Statistik im Jahr 2020 hingegen mit 11 691 Petajoule ausgewiesen. Das sind umgerechnet etwas mehr als 3 Billionen Kilowattstunden. Natürlich kommen in dieser Statistik auch Solar-, Wasser- und Windkraft vor. Rund 0,5 Billionen Kilowattstunden pro Jahr soll der Anteil aller regenerativen Energien zusammen am Primärenergiebedarf in Deutschland betragen. Das ist der Anteil, den technische Anlagen zur regenerativen Energienutzung umsetzen. Die natürlichen Formen der regenerativen Energien, die sowieso da sind, fehlen in dieser Statistik völlig. So kommt es zu der kleinen offensichtlichen statistischen Diskrepanz zum zuvor berechneten regenerativen Energieaufkommen von 567 Billionen Kilowattstunden. Um den Unterschied zu herkömmlichen Statistiken zu verdeutlichen, werden im Folgenden bislang statistisch nicht erfasste natürliche regenerative Energieformen als SoDa-Energie bezeichnet, weil sie einfach „so da“ sind.

Wer nun meint, dass all diese Überlegungen statistische Haarspalterei sind, irrt. Da der Klimaschock in der Öffentlichkeit angekommen ist, besteht das allgemeine Interesse, fossile Energieträger möglichst schnell durch regenerative Energien zu ersetzen. Doch viele

haben den Eindruck, das ist schwer und in überschaubaren Zeiträumen fast unmöglich. Gebetsmühlenartig wird wiederholt, dass die Solarenergie in Deutschland einen verschwindend geringen Anteil des Energieaufkommens deckt. Wäre das wahr, wäre diese Skepsis sicher auch berechtigt. Tatsächlich sind es aber die fossilen und nuklearen Energieträger, die gerade einmal 0,6 Prozent am Energieaufkommen in Deutschland haben. Dass 0,6 Prozent in absehbarer Zeit zu ersetzen sind, dürfte eigentlich niemand ernsthaft bezweifeln.

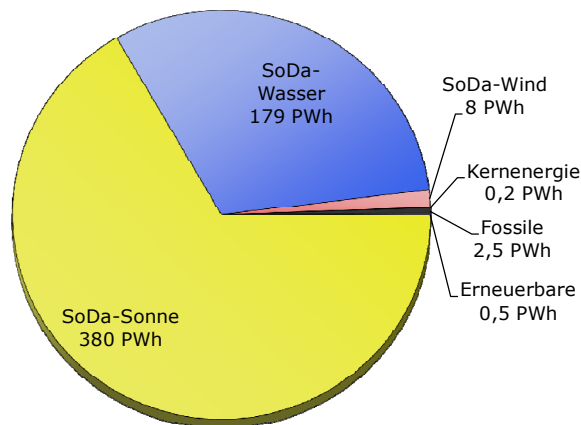


Abbildung 1.9

Gesamtenergieaufkommen in Deutschland unter Berücksichtigung der SoDa-Energie, also natürlicher regenerativer Energieformen

Die Explosion des indonesischen Vulkans Tambora im Jahr 1815 führt uns vor Augen, was der Ausfall auch nur eines Bruchteils der SoDa-Energie an Folgen hat. Gigantische Mengen an vulkanischen Gasen und Staub in der Atmosphäre reduzierten in den folgenden Jahren die Solarstrahlung. In den Jahren 1816 und 1817 kam es zu massiven Erntenausfällen in Europa. Zehntausende von Menschen verhungerten. Würde ein solches Ereignis heute passieren, wären ähnliche Folgen zu erwarten. Ein Großteil der Energie zur Sicherstellung unserer Nahrungsversorgung ist nämlich SoDa-Energie, direkt von der Sonne. Das verschwindend geringe Aufkommen an fossilen und nuklearen Energieträgern wäre aber nicht einmal ansatzweise in der Lage, auch nur relativ kleine Schwankungen der SoDa-Energie zu kompensieren.

Bleibt die Frage, was die SoDa-Energie wert ist. Erdöl frei Grenze kostete im Jahr 2020 knapp 3 Cent pro Kilowattstunde, Erdgas etwa 1,2 Cent pro Kilowattstunde, Tendenz steigend. Da solare Strahlungsenergie und Windenergie nicht so einfach speicherbar sind wie Erdöl oder Erdgas, soll im Folgenden ihr Wert unter der von Erdgas, also mit 1 Cent pro Kilowattstunde angesetzt werden, der Wert der SoDa-Wasserkraft wegen der besseren Speicherbarkeit mit 1,5 Cent pro Kilowattstunde. Damit berechnet sich ein Gesamtwert der SoDa-Energie von rund 6,5 Billionen Euro pro Jahr. Alleine die SoDa-Sonnenenergie ist nach dieser Berechnung rund 3,8 Billionen Euro wert.

Natürliche regenerative Energieformen in der Größenordnung von 567 Billionen Kilowattstunden werden also alleine in Deutschland statistisch nicht erfasst. Dadurch verzerrt sich die öffentliche Wahrnehmung über die heutige Energieversorgung. Wir unterliegen dem falschen Eindruck, dass fossile und nukleare Energieträger den wesentlichen Anteil

am Energieaufkommen haben. In Wahrheit ist ihr Anteil kleiner als ein Prozent und regenerative Energien sollten sie für einen wirksamen Klimaschutz möglichst schnell ersetzen. Hierfür stehen uns natürliche regenerative Energieformen im Wert von rund 6,5 Billionen Euro jährlich kostenlos zur Verfügung. Eigentlich können wir es uns nicht leisten, darauf zu verzichten.

1.4 Energievorräte – Reichtum auf Zeit

Nutzen wir heute fossile Energieträger, greifen wir auf vor Millionen von Jahren eingelagerte Sonnenenergie zurück, ohne dass diese Energieträger sich in für uns absehbarer Zeit erneuern könnten. Dabei ist unser heutiger Energiehunger derart emporgeschnellt, dass ein Großteil der Vorkommen an fossilen Lagerstätten noch im Laufe unseres 21. Jahrhunderts ausgebeutet sein wird. Auch die Lagerstätten, an denen sich kostengünstig der Brennstoff Uran für herkömmliche Atomkraftwerke gewinnen lässt, werden weniger.



Konventionell oder nicht-konventionell, das ist hier die Frage

Kein Erdölvorkommen auf der Erde gleicht dem anderen. Einige Quellen lagern in flüssiger Form nur hundert Meter unter dem Erdboden. Andere liegen in 10 000 Metern Tiefe oder sind mit Sand vermischt und lassen sich, wenn überhaupt nur mit sehr hohen Kosten fördern. Um einen besseren Überblick über mögliche Reichweiten zu erhalten, unterscheidet man bei der Angabe von noch vorhandenen Vorräten an Erdöl, Erdgas, Kohle und Uran daher zwischen Reserven und Ressourcen sowie konventionellen und nicht-konventionellen Vorkommen.

Reserven sind nachgewiesene und zu heutigen Preisen mit heutiger Technik wirtschaftlich gewinnbare Energierohstoffe.

Ressourcen sind nachgewiesene, aber derzeit technisch und/oder wirtschaftlich nicht gewinnbare sowie nicht nachgewiesene aber vermutete, also rein spekulative Energierohstoffmengen. Nur ein Teil der Ressourcen wird sich daher erschließen lassen. Entwickelt sich die Technik weiter oder steigen die Rohstoffpreise, werden einige Ressourcen nach und nach den Reserven zugeschlagen. Die Reserven steigen dann an und die Ressourcen nehmen ab.

Gesamtpotenzial bezeichnet man die Summe aus Reserven und Ressourcen. Dieses Potenzial wird sich nach heutigem Stand nicht in vollem Umfang erschließen lassen. Möglich ist aber, dass auch noch neue, unvermutete Vorkommen gefunden werden und damit die Reserven oder Ressourcen und das Potenzial wieder vergrößern.

Konventionelle Vorkommen sind Reserven oder Ressourcen, die mit herkömmlichen Förderverfahren erschlossen werden können. Dies ist Erdöl oder Erdgas in unterirdischen Hohlräumen, die sich über eine einfache Bohrung fördern lassen.

Nicht-konventionelle Vorkommen sind Reserven oder Ressourcen, die mit aufwändigen und neuartigen Förderverfahren erschließbar sind. Dies sind zum Beispiel Ölsande, Ölschiefer, Bitumen oder Erdöl und Erdgas in kleineren Hohlräumen in undurchlässigen Schichten, die erst mit einem sogenannten Frackingverfahren aufgebrochen werden müssen. Oft ist die Förderung von nicht-konventionellen Vorkommen deutlich teuer als von konventionellen.

Schon seit Jahrzehnten haben Pessimisten das nahe Ende der fossilen Energiereserven beschworen. Da man bereits vor 30 Jahren in der Schule gelernt hat, dass in 30 Jahren das Erdöl alle sein wird, ernteten Mahner in den vergangenen Jahren oft nur ein gleichgültiges Schulterzucken. Erst der starke Anstieg der Ölpreise seit dem Jahr 2000 hat erneut eine Sensibilität für die Endlichkeit des schwarzen Goldes geschaffen.

Speziell beim Erdöl hat die Zahl der neuen Funde in den letzten Jahren stark abgenommen. Der Energiehunger steigt schneller als neue Vorkommen erschlossen werden können. Die Ölpreise werden deshalb langfristig gesehen weiterhin ansteigen, auch wenn kurze Preiserückgänge immer wieder trügerische Entspannung signalisieren. Denn einerseits steigt die Nachfrage, während das Angebot eher rückläufig ist, andererseits steigen der Aufwand für das Erschließen neuer Vorkommen und damit die Kosten stetig an.

Während bei den ersten kommerziellen Bohrungen in Amerika im Jahr 1859 noch Erdöl in einer Tiefe von 20 Metern gefunden wurde, sind heutzutage Bohrtiefen von bis zu 10 000 Metern durchaus üblich. Auch hat man große technische Fortschritte beim Aufspüren von Vorkommen gemacht, sodass man heute erheblich besser über mögliche Funde Bescheid weiß, als noch vor einigen Jahrzehnten. Dies macht es aber auch unwahrscheinlicher, dass zahlreiche neue große, völlig unvermutete Vorkommen noch entdeckt werden.

1.4.1 Nicht-konventionelle Vorräte – Verlängerung des Ölzeitalters

Durch die seit den 1990er-Jahren extrem gestiegenen Öl- und Gaspreise ist die Erschließung ganz neuer Vorkommen interessant geworden, die mit nicht-konventionellen Methoden gefördert werden. In Nordamerika ist ein regelrechtes neues Öl- und Gasfieber ausgebrochen. Bereits in wenigen Jahren könnte der Kontinent jenseits des Atlantiks kurzzeitig sogar den Nahen Osten bei der Förderung von Erdöl und Erdgas überholen.

In der kanadischen Provinz Alberta und Venezuela schlummern enorme Mengen an Ölsanden. Diese werden im Tagebau gefördert. Das kanadische Abbaugelände erstreckt sich dabei auf eine gigantische Fläche von 149 000 Quadratkilometern. Das entspricht in etwa der Fläche Englands. Bereits durch die Rodung der Wälder werden enorme Volumina an Kohlendioxid freigesetzt. Mit großen Mengen an Wasser und Energie wird dann das Öl vom Sand getrennt. Zurück bleiben stark belastete Abwässer und eine verwüstete Landschaft. Durch den hohen Energieverbrauch bei der Ölsandförderung nimmt der Kohlendioxidausstoß weiter zu. Berücksichtigt man die Freisetzung von Treibhausgasen durch die Waldrodung, sind zwischen 1990 und 2010 die Treibhausgasemissionen von Kanada um stolze 46 Prozent gestiegen. Das Ende des Ölzeitalters beginnt bereits jetzt, seine dreckigsten Spuren zu hinterlassen.

In den USA war das Zeitalter der Erdölförderung eigentlich schon weitgehend beendet. Die meisten erschließbaren konventionellen Vorkommen sind ausgebeutet. Neue Vorkommen in Alaska oder der Tiefsee konnten wegen der enormen Risiken für die lokale Umwelt nur sehr eingeschränkt erschlossen werden. Nicht unwesentliche Ursachen für das starke militärische Engagement der USA im Nahen Osten in den letzten Jahren war die Sicherung des Zugangs zu den dortigen Energierohstoffen.

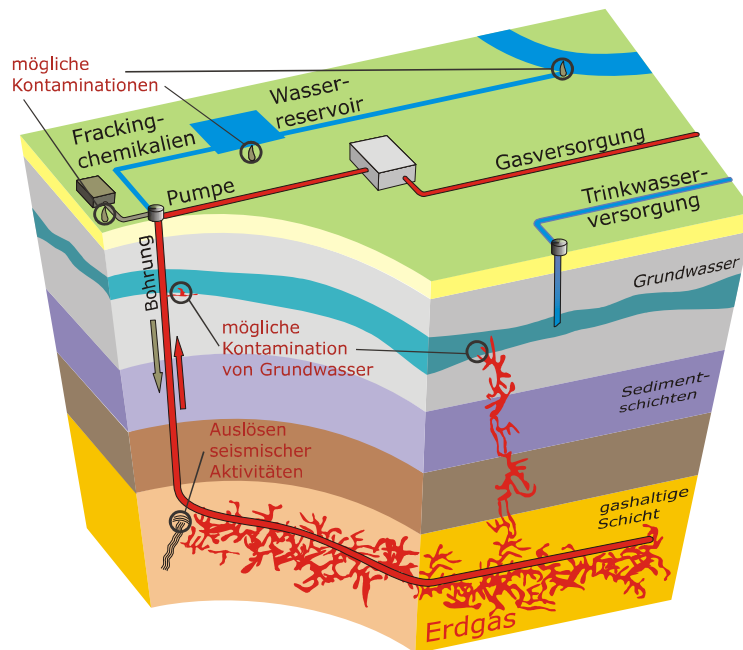


Abbildung 1.10
Funktionsweise und
Risiken beim
Fracking von Erdgas

Doch nun hat in den USA eine neue Technik den Abbau von Erdöl- und Erdgas revolutioniert: Das sogenannte Fracking. Hierbei erschließt zuerst eine tiefe Bohrung den Untergrund. Dann wird eine Flüssigkeit mit hohem Druck in die Bohrung gepresst, die in der Tiefe Risse ins Gestein sprengt. Durch diese Risse soll im Gestein eingeschlossenes Gas oder Öl entweichen und über die Bohrung an die Oberfläche gelangen. Würde man für das Verfahren reines Wasser verwenden, würden sich die Risse beim Rückpumpen des Wassers sofort wieder schließen. Darum wird das Wasser mit Sand und zahlreichen zum Teil sehr giftigen Chemikalien versetzt. Das soll die Risse offenhalten, das Abfließen des Öls oder Gases erleichtern und das Bakterienwachstum unterbinden.

Umweltschützer kritisieren beim Fracking zahlreiche unkalkulierbare Risiken (*Abbildung 1.10*). Das Sprengen der Risse im Untergrund kann kleine Erdbeben auslösen. Fracking-chemikalien können bei unsachgemäßem Umgang in die Umwelt gelangen. Die Entsorgung der großen Mengen von wieder zurückgepumptem belastetem Abwasser ist problematisch und über Risse und Spalten können Chemikalien oder Erdgas das Grundwasser und damit letztendlich das Trinkwasser kontaminieren. In den USA wurde bereits an verschiedenen Orten das Trinkwasser so verunreinigt, dass sich nicht brennbares Wasser durch das darin gelöste Methan entzünden ließ. Entweicht Erdgas ungenutzt in die Atmosphäre verstärkt es dort zudem den Treibhauseffekt. Bleibt die Frage, ob eine recht kurze Verlängerung des Öl- und Gaszeitalters derartige Umweltfolgen rechtfertigen.

1.4.2 Ende in Sicht

Stetige technologische Fortschritte bei der Erschließung von Vorkommen an Erdöl und Erdgas haben in der Vergangenheit die Vorhersagen immer wieder revidiert. Vor allem wegen der noch sehr großen weltweiten Kohlevorräte könnten wir unseren Energiehunger durchaus noch über Jahrzehnte oder im Extremfall sogar noch über ein Jahrhundert mit fossilen Energieträgern befriedigen.

Die bekannten konventionellen Vorräte in den USA, Europa und Asien werden recht schnell zur Neige gehen. Dies erhöht wiederum die Abhängigkeit vor allem der Industrienationen von einigen wenigen Förderländern. Die USA versuchen, diese Abhängigkeit durch die Erschließung von nicht-konventionellen Vorkommen zu reduzieren. China sichert sich mehr und mehr Zugriff auf Vorkommen in anderen Regionen wie in Afrika. Über 60 Prozent der konventionellen Erdölreserven befinden sich im Nahen Osten (*Abbildung 1.11*), den wir plakativ mit Ölscheichs verbinden. Die erdölreichsten Länder der Region sind Irak, Iran, Kuwait, Saudi-Arabien und die Vereinigten Arabischen Emirate.

Gerade diese Region war in jüngster Vergangenheit immer wieder Schauplatz militärischer Auseinandersetzungen. Die großen Erdölvorkommen und der steigende Einfluss auf die künftige Energieversorgung der Welt werden die Spannungen in Zukunft noch weiter erhöhen. Auch die Abhängigkeit der Industrienationen von den OPEC-Ländern wird steigen, denn diese verfügen über fast drei Viertel der sicher gewinnbaren Reserven.

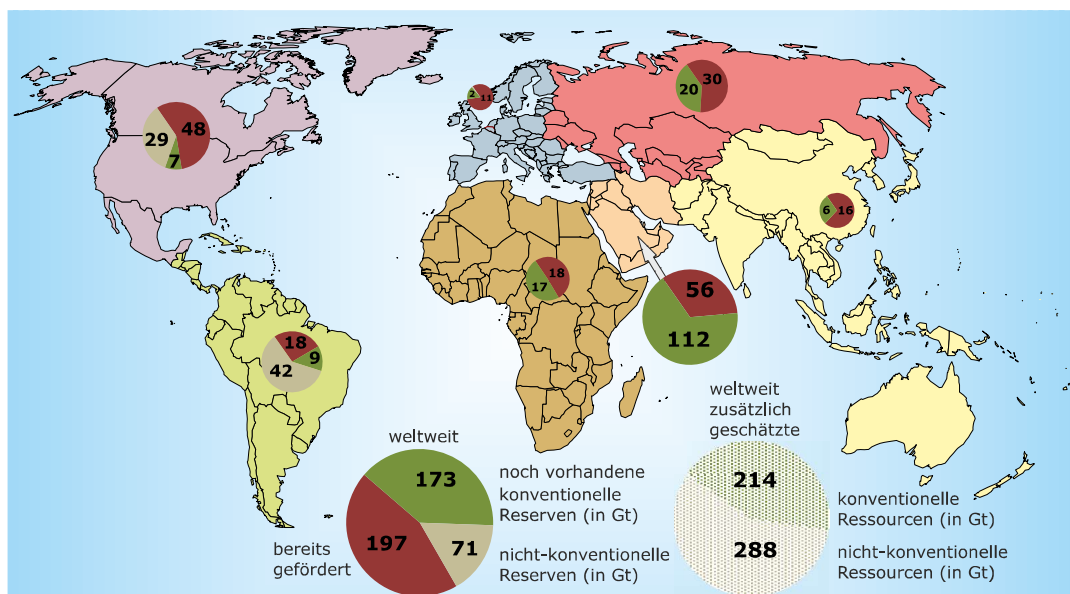


Abbildung 1.11 Verteilung der Erdölreserven der Erde nach Region (2018, Daten: BGR [BGR20])

Teilt man die bekannten, also sicher gewinnbaren Reserven durch die gegenwärtige Förderung, ergibt sich die momentane Reichweite. Diese beträgt bei Erdöl gerade einmal 39 Jahre (*vgl. Abbildung 1.12*). Die nicht-konventionellen Reserven können die Reichweite

gerade einmal um 16 Jahre erweitern. Durch ein Ansteigen der jährlichen Förderung wird diese Reichweite höchstwahrscheinlich sogar noch sinken. Zusätzlich zu den bekannten Reserven werden auch neue Lagerstätten erschlossen, die momentan noch als Ressource geführt sind. Man schätzt, dass durch diese zusätzlichen Vorkommen die Reserven auf das Eineinhalb- bis Zweifache ansteigen werden. Bleiben die Fördermengen in den nächsten Jahrzehnten konstant, würden die Erdölreserven dann noch 87 Jahre reichen. Allein in den letzten 50 Jahren hat sich der Erdölbedarf allerdings weltweit nahezu verdreifacht. Ende unseres Jahrhunderts wird man daher ziemlich sicher Erdöl nicht mehr als Energieträger verwenden.

Etwas entspannter ist die Lage bei Erdgas- oder Kohlevorkommen. Die bekannten Gasreserven werden bei gegenwärtiger Förderung in 48 Jahren erschöpft sein. Im Gegensatz zum Erdöl sind die geschätzten zusätzlichen Ressourcen deutlich größer als die bisher bekannten Reserven. Das liegt unter anderem an der größeren Tiefe der Lagerstätten, aber auch daran, dass die industrielle Förderung und damit die Suche nach entsprechenden Vorkommen erheblich später als beim Erdöl begonnen haben. In den letzten 50 Jahren hat sich der Bedarf an Erdgas allerdings mehr als verfünffacht. Bei anhaltend starken Verbrauchssteigerungen wird auch das Erdgas dieses Jahrhundert zur Neige gehen. Nur Kohle könnte noch bis ins nächste Jahrhundert verfügbar sein.

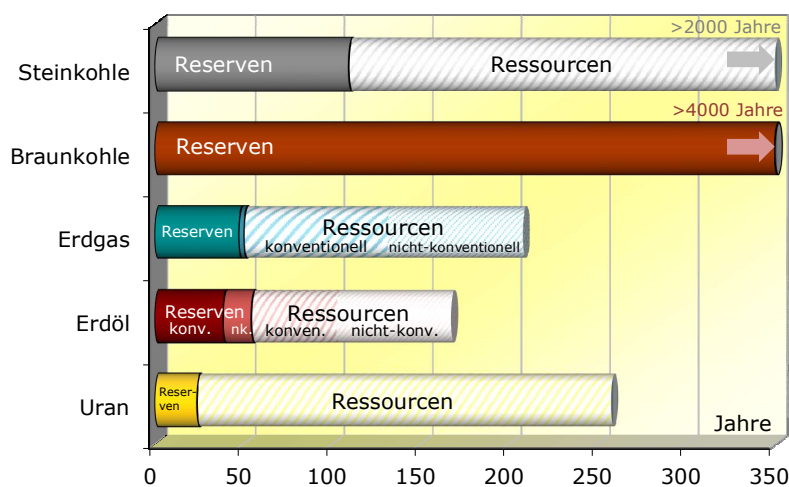


Abbildung 1.12 Reichweite der bekannten Energiereserven und -ressourcen bei gegenwärtiger Förderung (2018, Daten: BGR [BGR20])

1.4.3 Das Ende der Spaltung

Was in der Öffentlichkeit wenig bekannt ist: Auch die Vorkommen an Uran sind stark begrenzt. Zwar ist der Anteil von Uran in der Erdkruste höher als der von Gold oder Silber, doch lässt sich auch von reinstem Natururan nur ein Anteil von unter einem Prozent ener-

getisch nutzen. Durch eine Anreicherung des nutzbaren Anteils an Uran U-238 wird Natururan überhaupt erst für den Einsatz in Kraftwerken verwendbar.

Um Natururan wirtschaftlich gewinnen zu können, muss der Erzanteil überdurchschnittlich hoch sein. Lediglich in Kanada existieren Vorkommen mit einem Uranerzgehalt von über einem Prozent. Sinkt der Uranerzgehalt, müssen erheblich größere Massen für den Abbau bewegt werden, wodurch der Energiebedarf für die Erzgewinnung und die Kosten deutlich ansteigen.

Der Anteil der Kernenergie an der weltweiten Primärenergieversorgung ist mit etwa 4 Prozent trotz intensiver Ausbaubemühungen einzelner Länder heute immer noch relativ gering. Wenige Länder wie Frankreich decken zwar bis zu 80 Prozent ihres Strombedarfs durch Kernkraftwerke. Doch Autos fahren auch in Frankreich mit wenigen Ausnahmen nicht mit Atomkraft und Häuser werden auch dort nur teilweise mit Kernenergie beheizt. Am gesamten Primärenergieaufkommen liegt deswegen der Anteil der Kernenergie selbst in Frankreich nur bei etwa 40 Prozent.

Wollte man alle fossilen Energieträger durch die Kernenergie ersetzen, wären die Uranvorkommen in wenigen Jahren aufgebraucht. Durch andere Kraftwerkstechniken, wie die des riskanten Schnellen Brüters, lässt sich die Energieausbeute zwar etwas erhöhen, dennoch ändert dies nichts an der Begrenztheit der Vorkommen. Auch die wirtschaftlich gewinnbaren Uranvorkommen werden spätestens in wenigen Jahrzehnten zur Neige gehen – nicht gerade ein überzeugendes Argument, neue Atomkraftwerke mit Lebensdauern von 30 oder 40 Jahren zu bauen. Eine Alternative zu fossilen Energieträgern ist die Kernenergie allein aus diesen Gründen nicht.

1.5 Hohe Energiepreise – Schlüssel für den Klimaschutz

Bis in die 1970er-Jahre waren niedrige Energiepreise Grundlage nicht nur für das deutsche Wirtschaftswunder. Mit steigendem Wohlstand kletterte auch der Energieverbrauch in immer neue Höhen. Erst mit der Gründung der OPEC und der politisch motivierten Verknappung der Fördermengen im Jahr 1973 stiegen die Erdölpreise in wenigen Monaten dramatisch an. Die geschockten Industrieländer reagierten relativ hilflos. Im Jahr 1973 gründeten sie die Internationale Energieagentur IEA, um die Energiepolitik zu koordinieren und eine sichere und bezahlbare Energieversorgung zu gewährleisten.

Strategische Ölreserven sollen bei Stocken des Erdölnachschubs die Versorgung sichern und die Preise stabil halten. Deutschland bevorratet zum Beispiel 25 Millionen Tonnen an Rohöl oder Rohölprodukten, die rund 90 Tage den kompletten Erdölbedarf des Landes decken könnten.

In den 1970er-Jahren begann auch ein verstärktes staatliches Engagement für die Weiterentwicklung der Nutzung erneuerbarer Energien. Viele fehlgeschlagene Mammutprojekte zeigten aber, dass sich eine kostengünstige und nachhaltige Energieversorgung nicht erzwingen lässt, sondern nur das Ende einer lang anhaltenden Entwicklung sein kann. Den-

noch wurde der Grundstein für den heutigen Boom der erneuerbaren Energien mit den Ölkrisen in den 1970er-Jahren gelegt.

Die 1990er-Jahre zeichneten sich durch extrem niedrige Erdölpreise aus. Als Folge stagnierten die Energiesparbemühungen und der Ausbau der erneuerbaren Energien. Durch die boomende Weltkonjunktur und die extreme Nachfrage vor allem aus China erreichten die Erdölpreise ab dem Jahr 2000 erneut neue Rekordwerte. Nun rächte sich das fehlende Engagement, den Erdölverbrauch zu reduzieren. Nominal gesehen waren die Erdölpreise im Jahr 2012 rund dreimal so hoch wie zu Zeiten der Ölpreiskrisen Ende der 1970er-Jahre (vgl. *Abbildung 1.13*). Bislang hat dies die Weltwirtschaft jedoch nur begrenzt getroffen. Dies lässt sich erklären, wenn die inflationsbereinigten Erdölpreise betrachtet werden. Mit einem Dollar konnte man 1980 etwa das Dreifache kaufen wie im Jahr 2018. Insofern war auch der inflationsbereinigte Ölpreis seinerzeit rund dreimal so hoch. Ein weiterer Grund ist, dass die Wirtschaft heute deutlich weniger von Energiepreisen abhängig ist als zu Zeiten der Ölkrisen. Ein weiter steigender Ölpreis wird dennoch auch seine Spuren in der Weltwirtschaft hinterlassen.

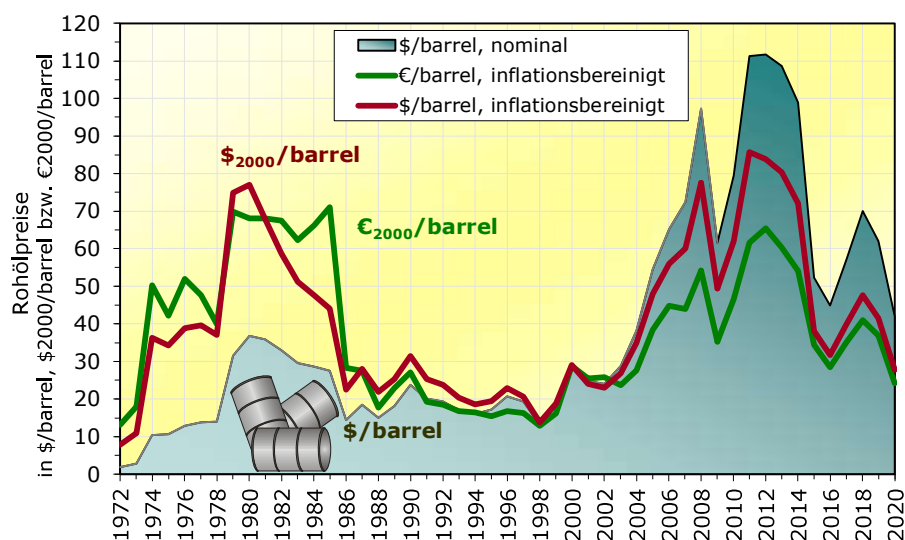


Abbildung 1.13 Entwicklung der Erdölpreise in aktuellen Preisen und inflationsbereinigt

Mit den zur Neige gehenden Vorräten an fossilen Energieträgern werden die Erdöl-, Erdgas- und Kohlepreise weiter nach oben klettern. Infolge internationaler Preiskämpfe und der Corona-Pandemie im Jahr 2020 sind die Preise temporär deutlich gesunken. Diese niedrigen Preise bieten bestenfalls eine kleine Verschnaufpause. Eine weitere Preistrunde nach oben wird mit Sicherheit kommen. Politische Risiken und die zunehmende Abhängigkeit von einzelnen rohstoffreichen Ländern bergen auch erhebliche Gefahren für einen weiteren plötzlichen Preisanstieg. Allein schon aus wirtschaftlichen Gründen ist es dringend erforderlich, möglichst schnell eine alternative Energieversorgung jenseits von fossilen oder nuklearen Energieträgern aufzubauen.

Angebot und Nachfrage werden in der Übergangszeit aber auch die Preise für erneuerbare Energien schwanken lassen, wie der Preisanstieg für Holzbrennstoffe im Jahr 2006 gezeigt hat. Langfristig gesehen werden aber die Preise für erneuerbare Energien durch stetige technische Weiterentwicklungen und rationellere Fertigungsprozesse kontinuierlich sinken, während die Preise für fossile Energieträger und die Kernenergie weiter ansteigen.

Schon heute sind erneuerbare Energien in vielen Bereichen zu den fossilen Alternativen voll konkurrenzfähig. Im Jahr 2020 konnten Solaranlagen bei Ausschreibungen in den sonnigen Regionen der Erde bereits Preise von rund einem Eurocent pro Kilowattstunde erzielen und liegen damit deutlich unter denen neuer fossiler Kraftwerke. Auch im sonnenärmeren Deutschland ist praktisch kaum mehr ein Preisunterschied von Strom aus neuen Solar- und Windkraftanlagen zum aktuellen Börsenstrompreis vorhanden. Neue fossile Kraftwerke können sie inzwischen auch in Deutschland unterbieten. Im Jahr 2020 wurde nördlich von Werneuchen bei Berlin erstmals eine große Freiflächen-Photovoltaikanlage ganz ohne Förderung fertiggestellt, die über einen Stromabnahmevertrag (PPA, power purchase agreement) für Solarstrom finanziert wird.

Das fossile Zeitalter wird aber massiv durch Subventionen gestützt. Weltweit floss noch im Jahr 2015 die unvorstellbare Summe von 5,3 Billionen US-Dollar an Subventionen für Öl, Gas und Kohle. Ohne diese Stützung wäre das fossile Zeitalter allein aus ökonomischen Gründen schon bald beendet. Weiter steigende Energiepreise werden diesen Subventionsirrsinn früher oder später aber unbezahlbar machen und damit einen schnellen Wandel hin zu einer nachhaltigen Energieversorgung einleiten. Die Länder, die frühzeitig mit dem Transformationsprozess begonnen haben, werden am einfachsten die Herausforderungen des Wandels meistern.

2 Klima vor dem Kollaps

Dass sich das Klima ändert, wissen wir eigentlich schon lange. Unzählige Eis- und Warmzeiten haben gezeigt, dass die Klimabedingungen auf der Erde ständigen Wechseln unterworfen sind. Für menschliche Zeithorizonte dauert ein Wechsel jedoch relativ lange. Etwa alle 100 000 Jahre kam es in der jüngeren Erdgeschichte zu Eiszeiten, die jeweils durch deutlich kürzere Warmzeiten unterbrochen waren. Unsere jetzige Warmzeit, das sogenannte Holozän, begann vor etwa 11 700 Jahren. Da die letzten Warmzeiten im Schnitt nur rund 15 000 Jahren andauerten, müssten wir eigentlich unweigerlich auf die nächste Eiszeit zusteuern.

Die genauen Ursachen für den Wechsel zwischen Warm- und Eiszeiten lassen sich nur bedingt rekonstruieren. Natürliche Effekte wie Veränderungen der Sonnenaktivität, Änderungen der Erdbahngeometrie, Vulkanismus, Änderungen von Meeresströmungen sowie Verschiebung der Kontinentalplatten gelten als Hauptursachen von Klimaänderungen. Kommen mehrere Ursachen zusammen, sind auch recht abrupte Änderungen möglich. Das belegt die Klimageschichte der Erde. Insofern ist die in jüngster Zeit beobachtete Erderwärmung nichts Ungewöhnliches. Außergewöhnlich ist nur, dass vermutlich erstmals Lebewesen der Erde einen abrupten Klimawandel verursachen – nämlich wir Menschen.

2.1 Es ist warm geworden – Klimaveränderungen heute

2.1.1 Immer schneller schmilzt das Eis

Nach der letzten Eiszeit haben sich die weltweiten Temperaturen um rund 3,5 Grad Celsius erhöht. Durch die Erwärmung und die abtauenden Eismassen sind die Meeresspiegel um über 120 Meter angestiegen. Heute dicht besiedelte Gebiete waren während der letzten Eiszeit durch meterhohe Eispanzer bedeckt und ehemals fruchtbare Landschaften sind seitdem im Meer versunken. Über die letzten 7000 Jahre waren die Klimabedingungen auf der Erde allerdings außerordentlich konstant. Die Meeresspiegel haben sich so gut wie gar nicht und die Temperaturen nur um wenige Zehntel Grad Celsius verändert. Diese Klimastabilität

war eine der wesentlichen Voraussetzungen dafür, dass sich die Menschheit weiterentwickeln konnte. Unsere Zivilisation mit ihren Siedlungsgebieten und landwirtschaftlichen Flächen hat sich auf die stabilen Bedingungen eingestellt. Zerstören wir diese Stabilität, wird das enorme Auswirkungen auf das Leben haben, wie wir es heute kennen.

Ein Blick auf die Entwicklung seit der letzten Eiszeit ist auch hilfreich, wenn es um die Einschätzung künftiger Temperaturveränderungen geht. *Abbildung 2.1* zeigt, dass bereits relativ kleine Temperaturänderungen große Auswirkungen haben können. Eine Erwärmung von 1 Grad Celsius klingt für Viele erst einmal nicht sehr dramatisch. Setzt man das in Relation zu dem Temperaturanstieg seit der letzten Eiszeit, ist bereits dieser Wert mehr als bedenklich.

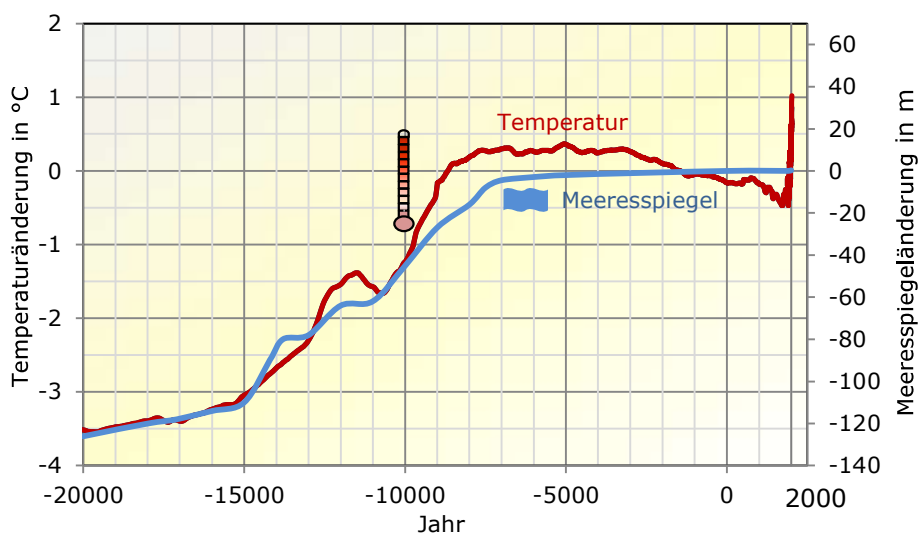


Abbildung 2.1 Temperatur- und Meeresspiegeländerung seit 20 000 v. Chr. bis 2020

Daten: [NASA21, Mar13, Sha12, Fle98], Zeitraum 1951 bis 1980 entspricht null

Durch den Einfluss der Menschen ist die Temperatur in den letzten 100 Jahren bereits um gut 1 Grad Celsius angestiegen und der Anstieg beschleunigt sich immer mehr. Man braucht kein Klimaexperte zu sein, um zu erkennen, dass der jüngste Anstieg keine normale Entwicklung sein kann. Vor allem das vergleichsweise hohe Tempo des Temperaturanstiegs bereitet Klimaexperten Sorgen. Eine natürliche Erklärung gibt es für diesen extremen Anstieg nicht.

Kommt es zu weiteren starken Änderungen der Klimabedingungen, werden sie zweifellos das Gesicht der Erde und unsere heutigen Lebensbedingungen stärker verändern als dies selbst das dramatischste geschichtliche Ereignis der letzten Jahrtausende vermocht hat. Experten halten darum eine Erwärmung oberhalb von 1,5 bis 2 Grad Celsius für nicht vertretbar. Die Bekämpfung des vom Menschen gemachten Treibhauseffekts und der damit verbundenen Erwärmung ist damit vermutlich heute die mit Abstand wichtigste Aufgabe zum Erhalt der Lebensgrundlagen künftiger Generationen.



Beobachtete Klimaveränderungen [IPC07, EEA10, NOAA13, NASA21]

- Die globale Oberflächentemperatur lag im Jahr 2020 bereits 1,02 Grad Celsius über dem Mittel von 1951 bis 1980.
- Die 2000er-Jahre waren die wärmste Dekade seit Beginn der Temperaturmessungen.
- Die Temperaturzunahme der letzten 50 Jahre ist doppelt so hoch wie die der letzten 100 Jahre. Die Erwärmung der Arktis erfolgte mehr als doppelt so schnell.
- Die Temperaturen der letzten 50 Jahre waren höher als jemals zuvor in den vergangenen 1300 Jahren.
- Weltweit schrumpfen die Gletscher sowie die Eisschilde auf Grönland und der Antarktis. Die Alpengletscher haben zwischen 1850 und 2010 bereits zwei Drittel ihres Volumens verloren.
- Die sommerliche arktische Meereisbedeckung ist von 7,5 Millionen Quadratkilometern im Jahr 1982 auf 3,5 Millionen Quadratkilometer im Jahr 2012 zurückgegangen.
- Der Meeresspiegel ist seit 1993 durchschnittlich um 3,1 Millimeter pro Jahr gestiegen, im 20. Jahrhundert insgesamt um 17 Zentimeter. Mehr als die Hälfte geht auf die thermische Ausdehnung der Meere zurück, etwa 25 Prozent auf Abschmelzen der Gebirgsgletscher und etwa 15 Prozent auf das Abschmelzen der arktischen Eisschilde.
- Die Häufigkeit von heftigen Niederschlägen hat zugenommen.
- Häufigkeit und Intensität von Dürren sind seit den 1970er-Jahren gestiegen.
- Die Häufigkeit von Temperaturextremen hat zugenommen.
- Die Intensität tropischer Wirbelstürme ist seit den 1970er-Jahren stärker geworden.

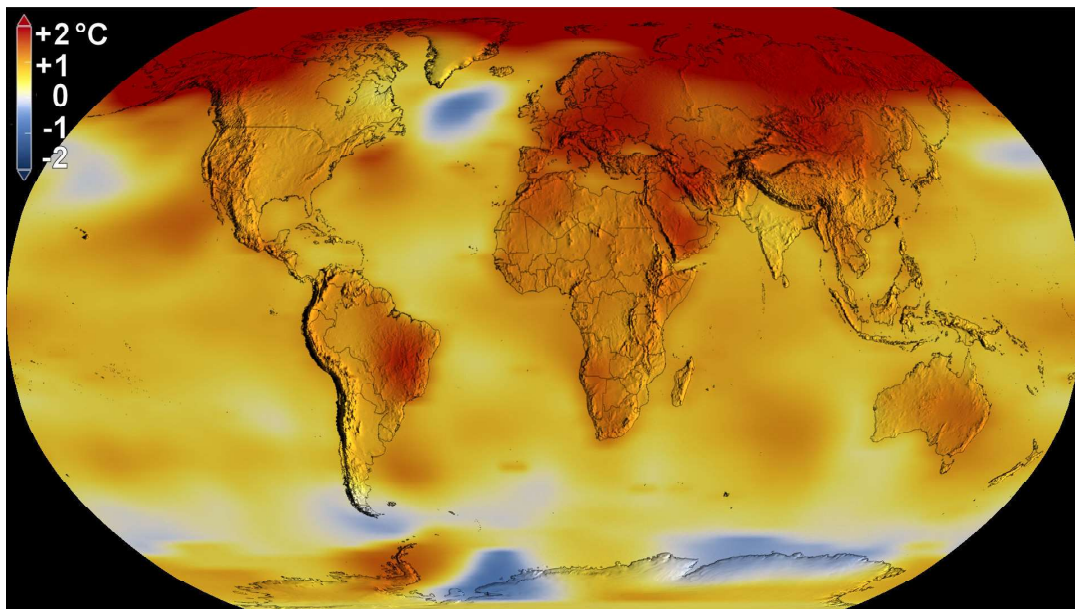


Abbildung 2.2 Temperaturänderung der Periode 2015-19 im Vergleich zum Mittelwert der Jahre 1951 bis 1980 (Quelle: NASA/Goddard Space Flight Center Scientific Visualization Studio, <http://svs.gsfc.nasa.gov>)

Die globale Erwärmung erfolgt nicht auf allen Teilen der Erde gleichmäßig. Vor allem im Bereich der Arktis hat die Temperaturänderung stellenweise schon 2 Grad Celsius überschritten (*Abbildung 2.2*). Generell erwärmt auch das Land schneller als die Ozeane. Bei einer durchschnittlichen Erwärmung von mehr als 4 Grad Celsius könnten sich einige Gebiete auf dem Festland zu regelrechten Todeszonen entwickeln, in denen der Mensch wegen der enormen Hitze ohne technische Hilfsmittel nicht für längere Zeit überleben könnte.

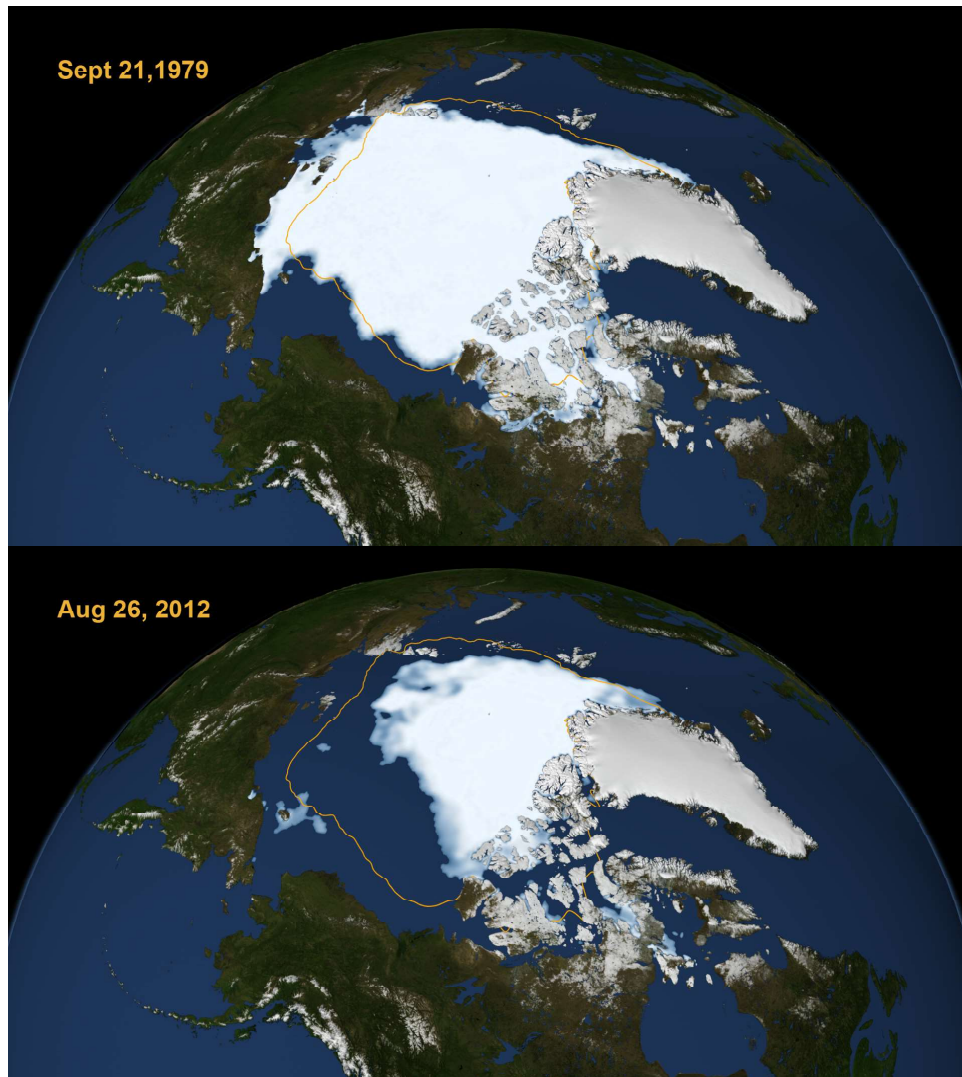


Abbildung 2.3 Sommerliche arktische Eisbedeckung für das Jahr 1979 (oben) und das Jahr 2012 (unten), Quelle: NASA, <http://svs.gsfc.nasa.gov>

Als Folge der Erwärmung dehnt sich das Wasser der Meere aus. Durch die Zunahme der Temperaturen schmelzen auch mehr und mehr arktisches Eis und das ewige Eis der Gletscher ab. Die Eisbedeckung des Meers in der Arktis ist innerhalb von 30 Jahren um über 50 Prozent zurückgegangen (*Abbildung 2.3*). Neben den Eismassen der Arktis schmelzen

auch viele Gletscher rasend schnell ab. Der größte Gletscher der Welt, der Bering-Gletscher in der Arktis Kanadas, ist während des letzten Jahrhunderts um mehr als 10 Kilometer geschrumpft. Von den Gebirgsgletschern in den Ostalpen ist bereits heute nur noch weniger als die Hälfte der Masse aus dem Jahr 1850 übrig.

Bislang sind die Meeresspiegel in den letzten 100 Jahren lediglich um rund 20 Zentimeter angestiegen. Sollte künftig das Festlandeis auf Grönland oder der Antarktis spürbar abschmelzen dürfte sich der Anstieg der Meeresspiegel aber spürbar beschleunigen.

2.1.2 Naturkatastrophen kommen häufiger

Mit den globalen Temperaturen nehmen auch die Wetterextreme zu. Größere Temperaturunterschiede verursachen heftigere Stürme, stärkere Regenfälle sowie häufigere Hochwasser und Überschwemmungen.

Bereits heute sind klima- und wetterbedingte Ereignisse die Hauptursache für Vertreibungen (*Abbildung 2.4*). Im Jahr 2019 mussten 23,9 Millionen Menschen weltweit vor Stürmen, Überschwemmungen, Dürren, Extremtemperaturen und Waldbränden fliehen. Zwischen 2008 und 2019 waren es sogar insgesamt 254 Millionen [iDMC20]. Ein Großteil der Menschen wird derzeit in Asien, Lateinamerika und der Karibik vertrieben. Darum werden diese Fluchtbewegungen in Europa momentan bestenfalls über die Nachrichten registriert. Bei steigenden Klimawandelfolgen dürfte aber auch Europa kaum vor diesen Bewegungen verschont bleiben. Steigen die Meeresspiegel durch die globale Erwärmung mittelfristig lediglich um einen Meter an, verlieren bereits rund 100 Millionen Menschen dauerhaft ihre Heimat.

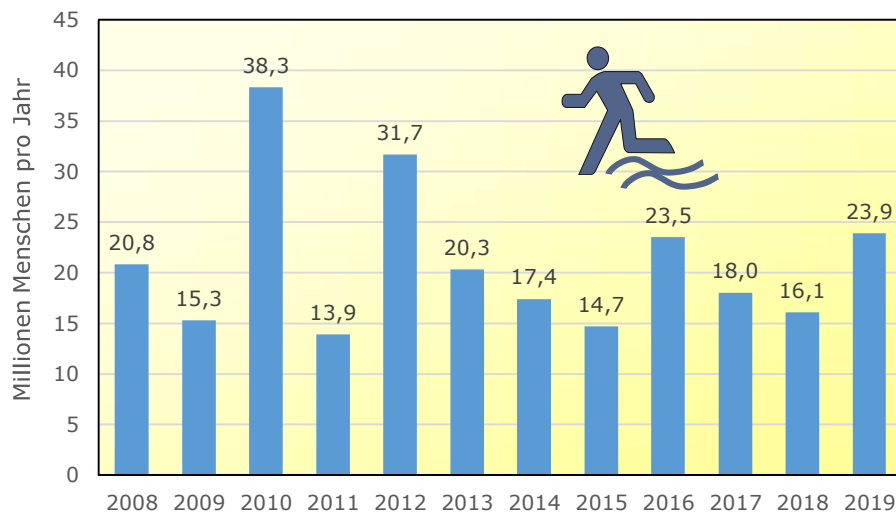


Abbildung 2.4 Anzahl der weltweit Vertriebenen durch klima- und wetterbedingte Naturkatastrophen wie Stürme und Überschwemmungen (Daten: iDMC [iDMC20])



Beispiele großer Naturkatastrophen

- Winter 1990: Die Orkane Daria, Herta, Vivian und Wiebke töteten 272 Menschen in Europa und richteten Schäden von 12,8 Milliarden Euro an.
- 29.04.1991: Eine Sturmflut als Folge des tropischen Zyklons Gorky erfasst Bangladesch. 138 000 Menschen sterben. Die materiellen Schäden sind mit 3 Milliarden Euro in dem armen Land vergleichsweise gering.
- August 2002: Ungewöhnlich starke Regenfälle mit bis zu 400 Litern pro Quadratmeter sorgen für heftige Überschwemmungen in Deutschland und einigen Nachbarländern. In Europa verlieren 230 Menschen ihr Leben und es gibt Schäden von 18,5 Milliarden Euro.
- August 2003: Die größte Hitzewelle in Europa seit Beginn der Klimaaufzeichnungen fordert 70 000 Menschenleben und verursacht Schäden in der Höhe von 13 Milliarden Euro.
- August 2005: Hurrikan Katrina wütet in den USA und zerstört die Stadt New Orleans. 1322 Menschen sterben. Der bislang teuerste Sturm aller Zeiten verursacht Schäden von 125 Milliarden US-Dollar (rund 95 Milliarden Euro).
- 18. Januar 2007: Der Orkan Kyrill fegt über Europa hinweg. Die Deutsche Bahn stellte erstmals in der Geschichte den kompletten Zugverkehr in Deutschland ein.
- Oktober 2010: Eine ungewöhnliche Dürre in Ostafrika verursacht dramatische Ernteausfälle. Rund 260 000 Menschen verhungern.
- Oktober 2012: Hurrikan Sandy verwüstet Teile der Karibik sowie der US-Ostküste und trifft auch ungewöhnlich weit nördlich New York hart. Insgesamt sterben 253 Menschen. Die Schäden betragen 66 Milliarden US-Dollar (rund 50 Milliarden Euro).
- Juni 2013: Elf Jahre nach der Jahrhundertflut von 2002 sorgen schon wieder extreme Niederschläge für massive Überschwemmungen und Rekordwasserstände in Deutschland, Österreich und Tschechien. Es gibt erneut Todesopfer und Milliardenbeschäden.
- Juli 2016: Extreme Niederschläge und Überschwemmungen verursachen in China Schäden in der Höhe von 20 Milliarden US-Dollar. 60 Millionen Menschen waren insgesamt betroffen, 237 sterben.
- September 2017: Die Hurrikans Harvey, Irma und Maria zerstören Teile der Karibik und die US-Metropole Houston. Die Schäden werden mit 215 Milliarden US-Dollar beziffert. 324 Menschen starben.
- Sommer 2018: Eine Hitzewelle und eine Rekorddürre treffen Deutschland. Über 1200 Menschen sterben durch die Hitze. Die Schäden in der Land- und Forstwirtschaft betragen viele Milliarden Euro.
- Winter 2019/2020: Monatelange Dürre und große Hitze begünstigten Buschbrände in Australien. Die Feuer erfassten insgesamt eine Fläche von 126 000 km². Über eine Milliarde Tiere und 33 Menschen fielen den Flammen zum Opfer.

Auch die Zahl der Sachschäden nehmen nach Beobachtungen der Münchener Rückversicherungs-Gesellschaft kontinuierlich zu. In Rekordjahren überstieg die weltweite Schadenssumme bereits 200 Milliarden Euro.

Alleine der Hurrikan Katrina, der im Jahr 2005 die US-amerikanische Stadt New Orleans verwüstete, richtete Schäden in einer Höhe von rund 125 Milliarden US-Dollar an und kostete 1300 Menschen das Leben (*s. auch Abbildung 2.5*). Im Jahr 2017 zerstörte der

Hurrikan Harvey weiter Teile von Houston. Innerhalb weniger Tage fielen dort stellenweise mehr als 1500 Liter Regen pro Quadratmeter. 200 000 Häuser wurden dabei beschädigt oder zerstört. Insgesamt wird mit Kosten von 85 Milliarden US-Dollar gerechnet.



Abbildung 2.5 Schäden durch Hurrikans in den USA (Fotos: US Department of Defense | Pixabay)

Auch in Deutschland haben die Extremereignisse zugenommen. Beispiele in den letzten Jahren waren Starkregen und Überschwemmungen (*Abbildung 2.6*). Bei Vielen ist der Rekordhitzesommer im Jahr 2003 in Erinnerung geblieben. Durch große Hitzewellen sinken die Ernteerträge. Wegen der enormen Belastungen für den Körper und den Kreislauf steigt auch die Sterberate an. Im Sommer 2003 sind in Europa infolge der großen Hitze rund 70 000 Menschen mehr gestorben als in einem normalen Jahr. Schätzungsweise 7000 Hitzetote waren es allein in Deutschland.



Abbildung 2.6 Schäden durch Hochwasser und Unwetter in Deutschland

Fotos: Wikimedia Commons - Stefan Penninger | Pixabay

Während momentan die finanziellen Schäden durch Naturkatastrophen zumindest in Deutschland noch überschaubar sind, rechnet man mit einem deutlichen Anstieg bis zum Ende des Jahrhunderts. Bei einer ungebremsten globalen Erwärmung um 4,5 Grad Celsius errechnete das Deutsche Institut für Wirtschaftsforschung DIW Gesamtkosten des Klimawandels nur für Deutschland von rund 3000 Milliarden Euro bis zum Jahr 2100 [Kem07].

2.2 Schuldiger gesucht – Gründe für den Klimawandel

2.2.1 Der Treibhauseffekt

Ohne den schützenden Einfluss der Atmosphäre würden auf der Erde Temperaturen von etwa -18 Grad Celsius herrschen. Wir säßen dann auf einem Eisplaneten.

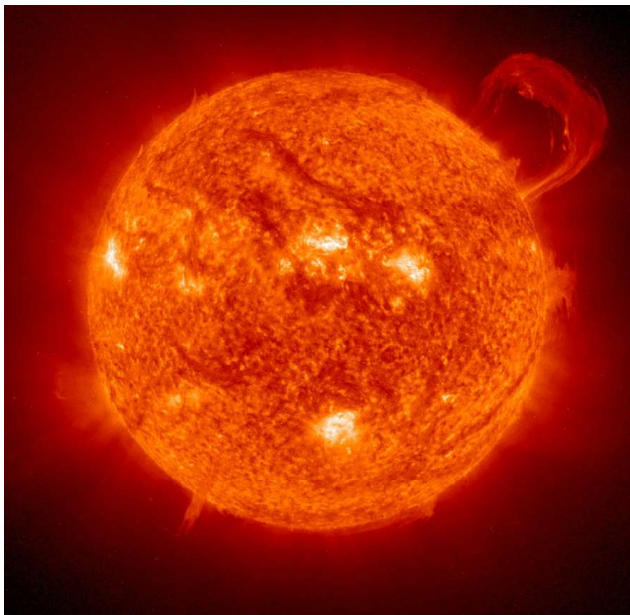


Abbildung 2.7 Veränderungen der Sonnenaktivität sind nur für einen kleinen Bruchteil der globalen Erwärmung verantwortlich (Bild: NASA).

Verschiedene natürliche Spurengase in der Atmosphäre, wie Wasserdampf, Kohlendioxid oder Ozon verhindern, dass die Erde sämtliche eintreffende Sonnenenergie wieder ins Weltall abgibt. Diese Gase absorbieren Teile der Wärmeabstrahlung der Erdoberfläche und strahlen davon wieder einen Teil zur Erde zurück. Dieser natürliche Treibhauseffekt ist die Grundlage für das Leben auf unserer Erde. Dadurch hat sich heute eine mittlere Temperatur von etwa $+15$ Grad Celsius eingestellt.

Bei den Spurengasen in der Atmosphäre hat sich in den letzten Jahrtausenden ein Gleichgewicht gebildet, welches das Leben in der Form, wie wir es heute kennen, erst ermöglichte. Gründe für den beobachteten Klimawandel wurden bereits viele diskutiert. Lange Zeit haben Skeptiker den Klimawandel an sich in Frage gestellt. Nachdem heute niemand mehr

wirklich ernsthaft behaupten kann, dass es nicht wärmer geworden ist, versuchen einige nun die Schuld auf natürliche Effekte zu schieben: Beispielsweise auf die Sonnenaktivität. Sie war in den vergangenen Jahrzehnten vermutlich größer als in allen 8000 Jahren zuvor. Nachweislich hat sich tatsächlich die Strahlungsmenge, die die Erde erreicht, leicht erhöht. Wissenschaftler schließen aber aus, dass dies eine so starke Erwärmung verursachen kann. Bestenfalls ein Zehntel der beobachteten Temperaturzunahme geht auf die gestiegene Sonnenaktivität zurück.

Die plausibelste Ursache für die Erwärmung ist, dass sich durch menschliche Einflüsse die Anteile von Spurengasen signifikant verändert haben. Die Konzentration an Gasen, die nachweislich eine globale Erwärmung bewirken, hat in den letzten Jahrzehnten stark zugenommen. Der Mensch verursacht also eine Verstärkung des natürlichen Treibhauseffekts. Dieser vom Menschen hervorgerufene Treibhauseffekt heißt auch anthropogener Treibhauseffekt (*Abbildung 2.10*). Sehr neu ist diese Theorie allerdings nicht.



Atmen wir das Klima kaputt?

Beim Ausatmen enthält die Atemluft rund 4 Prozent an Kohlendioxid – etwa hundertmal mehr als beim Einatmen. Pro Jahr pustet jeder damit rund 350 Kilogramm an Kohlendioxid in die Atmosphäre. Wenn wir ein Lagerfeuer entzünden und dabei Holz verbrennen, setzen wir damit ebenfalls Kohlendioxid frei. Pflanzen, Tiere und Menschen sind jedoch in einem biogeochemischen Kreislauf eingebunden. Der Mensch nimmt Kohlenhydrate zu sich und atmet Sauerstoff ein. Beide Stoffe setzt er in Kohlendioxid um, das er wieder ausatmet.

Pflanzen binden wiederum dieses Kohlendioxid und liefern unsere Kohlenhydrate. Kohlenhydrate sind organische Verbindungen aus Kohlenstoff, Wasserstoff und Sauerstoff und werden in Pflanzen durch Photosynthese aufgebaut. Getreide und Nudeln bestehen zum Beispiel zu 75 Prozent aus Kohlenhydraten. Der Weizen in der italienischen Spaghettinudel hat vielleicht sogar das Kohlendioxid in Kohlenhydrate umgewandelt, das wir im letzten Urlaub ausgeatmet haben.

Wenn eine Pflanze verbrennt, verrottet oder eben als Kohlenhydratlieferant endet, entsteht dabei genauso viel Kohlendioxid wie diese zuvor aus der Luft entnommen hat. Die natürlichen Kreisläufe sind also CO₂-neutral und verursachen keinen Anstieg der Konzentration. Das gilt aber nicht für die Urlaubsfahrt nach Italien und den Transport der Spaghettinudel nach Deutschland.

2.2.2 Hauptverdächtiger Kohlendioxid

Bereits im Jahr 1896 rechnete der schwedische Wissenschaftler und Nobelpreisträger Svante Arrhenius erstmals vor, dass eine Verdoppelung des Kohlendioxidgehalts (CO₂) der Atmosphäre zu einer Temperaturerhöhung um 4 bis 6 Grad Celsius führen würde [Arr96]. Ein Zusammenhang der beobachteten Klimaerwärmung mit dem Kohlendioxidanstieg in Folge der Industrialisierung wurde in den 1930er-Jahren bereits diskutiert. Er war aber seinerzeit noch nicht eindeutig zu belegen.

Erst gegen Ende der 1950er-Jahre gelang der Nachweis, dass die Kohlendioxidkonzentration in der Atmosphäre ansteigt [Rah04]. Heute gilt als bewiesen, dass die Zunahme der Kohlendioxidkonzentration die Hauptursache für die beobachtete Erwärmung ist.

Der Anstieg der Kohlendioxidkonzentration resultiert hauptsächlich aus der Nutzung fossiler Energien. Verbrennen wir fossile Energieträger, ist dies chemisch gesehen eine Oxidation. Bei dieser Reaktion wird Wärme frei. Wir nutzen also den Effekt, dass bei der Verbindung des Kohlenstoffs von Erdöl, Erdgas oder Kohle mit dem Sauerstoff aus der Luft Wärme entsteht. Als Abfallprodukt erhalten wir dabei Kohlendioxid, und das in enorm großen Mengen: derzeit jährlich weit über 30 Milliarden Tonnen. Jeder einzelne Einwohner der Erde erzeugt pro Jahr im Durchschnitt rund 4500 Kilogramm. Das entsprechende Kohlendioxid füllt einen Würfel mit einer Seitenlänge von 13 Metern oder rund 2,3 Millionen Einliterflaschen.

Die Emissionen in den einzelnen Ländern sind dabei genau wie der Energieverbrauch höchst unterschiedlich (*Tabelle 2.1*). Während beispielsweise ein Einwohner der Demokratischen Republik Kongo gerade einmal 30 Kilogramm, also 0,03 Tonnen CO₂ pro Jahr auf die Waage bringt, fallen in China bereits fast 7 Tonnen pro Kopf an. In Deutschland sind es gut 8 Tonnen, in den USA etwa 15 Tonnen. Würde man das Kohlendioxid, das die Deutschen pro Jahr erzeugen, über den Boden der gesamten Landesfläche verteilen, würde jeder Deutsche einen Meter tief im CO₂ versinken. Das Kohlendioxid der Demokratischen Republik Kongo über die Landesfläche verteilt würde den Boden hingegen nicht einmal einen Millimeter hoch bedecken.

Tabelle 2.1 Die zehn Länder der Erde mit den höchsten energiebedingten Kohlendioxidemissionen, Stand: Jahr 2018, Daten: IEA [IEA20]

Land	Mio. t CO ₂	Mio. Einw.	t CO ₂ / Einw.	Land	Mio. t CO ₂	Mio. Einw.	t CO ₂ / Einw.
1. China	9 571	1 400	6,84	6. Deutschland	696	83	8,40
2. USA	4 921	327	15,03	7. Südkorea	606	52	11,74
3. Indien	2 308	1 351	1,71	8. Iran	580	82	7,09
4. Russland	1 587	145	10,98	9. Kanada	548	37	15,25
5. Japan	1 081	126	8,55	10. Indonesien	543	268	2,03
Welt	33 513	7 588	4,42	170. DR Kongo	2	84	0,03

Dabei können wir noch gar nicht so lange mit absoluter Sicherheit sagen, dass sich der Anteil von Kohlendioxid in der Atmosphäre jährlich vergrößert. Erst seit dem Jahr 1958 misst das Observatorium Mauna Loa auf der Pazifikinsel Hawaii kontinuierlich die Kohlendioxidkonzentrationen. Damals betrug die Konzentration 315,2 ppm, im Jahr darauf 315,8 ppm. Die Einheit ppm bedeutet dabei „parts per million“. Auf eine Million Teile Luft kamen also gerade einmal 315 Teile Kohlendioxid. Der kleine Anstieg im ersten Jahr hätte auch durch Messfehler oder natürliche Schwankungen verursacht werden können. Erst als in den Folgejahren die Werte stetig stiegen, war klar, dass der Anteil an Kohlendioxid zunimmt – und das mit wachsender Geschwindigkeit. Im Dezember 2020 stieg die CO₂-Konzentration bereits auf 415 ppm.

Doch selbst die enormen Kohlendioxidemissionen bei der Verbrennung fossiler Energieträger sind im Vergleich zur riesigen Atmosphäre verschwindend gering. Außerdem wird ein Teil des Kohlendioxids von den Meeren und Pflanzen wieder absorbiert. Es stellt sich also die Frage, inwieweit unsere Emissionen überhaupt die Zusammensetzung der Atmosphäre verändern können.

Wenn wir bei der Nutzung fossiler Energieträger Stickstoff anstelle von Kohlendioxid erzeugen würden, wäre dies mit Sicherheit kein großes Problem. Denn unsere Luft besteht zu rund 78 Prozent aus Stickstoff, 21 Prozent aus Sauerstoff, aber nur zu einem Prozent aus anderen Gasen, von denen Kohlendioxid wiederum nur einen kleinen Teil ausmacht. Die Zusammensetzung der Luft war im Verlauf der Erdgeschichte keineswegs konstant. Aber über die letzten Jahrtausende hatte sich ein Gleichgewicht von weniger als 300 ppm eingestellt. Der Anteil von Kohlendioxid an der Atmosphäre war also geringer als 0,03 Prozent. Das ist aber auch der Grund, warum wir überhaupt relevante Veränderungen verursachen können. Kleine Mengen lassen sich nämlich vergleichsweise einfach erhöhen.

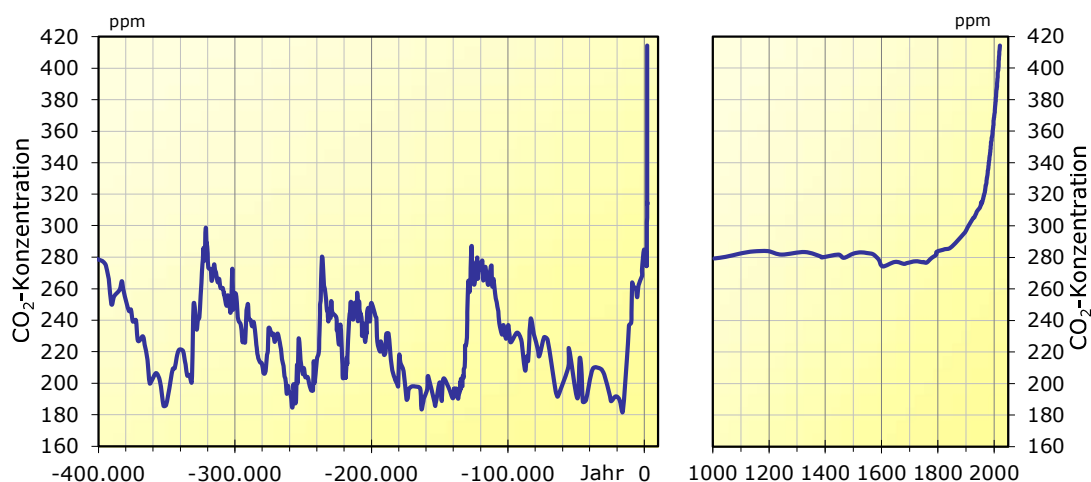


Abbildung 2.8 Entwicklung der Kohlendioxidkonzentration in der Atmosphäre über die letzten 400 000 Jahre und in jüngerer Vergangenheit (Daten: CDIAC und NOAA, <https://climate.nasa.gov/vital-signs>)

Um die Klimageschichte der letzten Jahrtausende untersuchen zu können, musste man sich einer anderen Idee bedienen. Die polaren und alpinen Eisschilde der Erde haben die Klimageschichte der Erde gespeichert. In den Regionen mit ewigem Eis gibt es jedes Jahr Neuschnee auf die Eisflächen. Zwischen den Schneekristallen befindet sich dabei auch jede Menge Luft. Die jährlich hinzukommenden Schneemassen erhöhen den Druck auf den Altschnee und pressen ihn schließlich zu reinem Eis. Die Luft entweicht dabei jedoch nicht völlig, sondern bleibt in kleinen Bläschen im Eis eingeschlossen. Diese lassen sich heute mit moderner Analysetechnik untersuchen. Die Ablagerung von Schnee und das Entstehen von Eis wiederholen sich jährlich mit einer für die Wissenschaft erfreulichen Regelmäßigkeit. Man muss also nur ein Loch in das Eis bohren und Eis aus der Tiefe holen. Somit hat



Register

A

Ablasshandel 92
Absorber 173, 210
 Beschichtung 178
 Schwimmbad 176
 selektiv 178
Absorptionswärmepumpe 294
Adsorptionswärmepumpe 294
alkalische Elektrolyse 340
aquaTurm-Hotel 364
Arbeitsplätze 133
Archimedes 205
arktische Eisbedeckung 46
Atombombe 23
Atomkraft 22, 106
Atomkraftwerk 24
Auftriebsprinzip 232
Aufwindkraftwerk 213
Auslegung
 Holzpelletslagererraum 326
 Photovoltaik 154
 Scheitholzkessel 324
 solare Heizungsunterstützung 194
 solare Trinkwassererwärmung 192
 Solarkraftwerke 216
 Solarthermieranlagen 191
 Wärmepumpe 295
 Wasserkraftwerke 268
 Windkraft 245
Ausrichtung Solaranlage 158
Autarkie 151, 161
Autobahn 121

B

BAFA 198, 328
Bahn 84

Barrel 19
Batterie 146, 152, 234
Batteriekapazität 156
Be- und Entlüftung 82
Beaufort-Windskala 230
Berechnung
 Batteriekapazität 156
 Größe des Erdwärmekollektors 295
 Holzpelletslagererraumgröße 326
 Kollektorgroße 193
 Kollektorwirkungsgrad 175
 Leistung des Windes 229
 Leistungszahl der Wärmepumpe 291
 Photovoltaikanlagenenertrag 159
 Photovoltaikleistung 157
 PV-Leistung für Inselnetzsysteme 155
 Scheitholzkesselleistung 324
 Solarkraftwerksertrag 217
 Speichergröße 193
 Wasserkraftwerksleistung 269
 Windkraftjahresertrag 245
Betz'scher Leistungsbeiwert 231
BHKW 108
Biodiesel 319
Bioethanol 320
Biogas 323
Biogasanlage 323
Biomasse 117, 304
 Entstehung 305
 Heizungen 308
 Heizwerke 316
 Kraftwerke 316
 Märkte 332
 Nutzung in Deutschland 333
 Ökologie 329
 Ökonomie 327
 Potenziale 307
 Treibstoffe 318, 331
Bioöl 319

Biotreibstoffe 318, 331
Blockheizkraftwerke 108
Bohrturm 279
Bohrung
 Tiefengeothermie 278
 Wärmepumpe 297
Braunkohlekraftwerk Jänschwalde 99
Braunkohletagebau 100
Brennstoffzelle 345
Brennstoffzellenstacks 348
Bruttoinlandsprodukt 109
BtL-Kraftstoffe 322
Bypassdioden 143

C

C4-Pflanzen 307
Clean Development Mechanism 93
COP 291

D

Dämmung 81
Dampfpreformierung 339, 350
direkt-normale Bestrahlungsstärke 217
Dish-Stirling-Kraftwerk 212
DNI 217
Dreiliterhaus 80, 355
Dünnschicht-Photovoltaikmodul 143

E

EEG 94
EE-Gas 336
EEG-Umlage 128
Eigentümer erneuerbarer Energien 132
Eigenverbrauch 151, 161
Eisbedeckung 46
Eiszeit 43
Elektrizitätsversorgung 113, 122
Elektroauto 121
Elektroherd 73
Elektrolyse 340
Emissionshandel 93
Endenergie 30, 72
Endenergieverbrauch 74, 116
 Verkehr 84
Energie 14, 29, 72
Energiekonzerne 97, 130
Energiepolitik 130
Energiereserven 39
Energiesparen 71
Energiesparlampen 76, 92
Energiespartipps 78, 85
Energiewende 96
EnEV 80
Erdgas 20, 102, 117, 328

Erdgasspeicher 21, 344
Erdkern 276
Erdöl 17, 36, 117, 328
Erdölbarrel 19
Erdölpreise 41
Erdölreserven 38
Erdwärmekollektor 295
Erneuerbare-Energien-Gesetz 94
 Biomassekraftwerke 329
 geothermische Kraftwerke 285
 Wasserkraft 271

F

FCKW 56, 57, 300
Fenster 81
Festmeter 310
Fischterre 271
FKW 56, 58, 70, 300
Flachkollektor 177
Flatcon-Technologie 215
Flüssigwasserstoff 342
fossile Energieträger 16
fossile Stromerzeugung 130
Fotovoltaik *siehe* Photovoltaik
Fracking 37, 102
Francis-Turbine 260
Fresnelkollektor 205
Fridays for Future 381
Fukushima 24

G

Gasherd 73
Geothermie 275
 HDR-Kraftwerk 283
 Heizwerk 280
 Kraftwerk 281
 Märkte 287
 Ökologie 286
 Ökonomie 285
 Wärmepumpe 289
geothermischer Tiefengradient 277
Gezeitenkraftwerke 266
globale Zirkulation 227
Goldisthal 265
Golfstrom 59, 63
Greta Thunberg 381
Grönlandeis 59, 61
grüner Strom 73
GuD-Kraftwerke 107, 209

H

Hadley-Zelle 227
Halbleiter 136
Harrisburg 24

Häufigkeitsverteilung 246
Haushaltsstrompreise 128
HDR 279
Heizkosteneinsparungen 79
Heizwert von Holz 312
Helios 371
Herstellung
 Biodiesel 320
 Bioethanol 320
 BtL-Kraftstoffe 322
 RME 320
 Solarzellen 140
HFKW 300
Hohlspiegel 205
Holz 308
Holzbriketts 309
Holzfeuchte 311
Holzpellets 309
 Heizung 314, 325
 Norm 310
 Preise 328
Holzständerbauweise 81
Hot Dry Rock 279, 283
Hurrikan Katrina 48
Hybridkraftwerk 376

I

IPCC 59

J

Jahresarbeitszahl 118, 291
Jahresdauerlinie 269
Joint Implementation 92

K

Kalina-Prozess 282
Kalkar 24
Kältemaschine 293
Kältemittel 292, 300
Kamin, Kaminofen 313
Kammersysteme 266
Kaplan-Turbine 259
Karbonatschmelzen-Brennstoffzelle 347
Kavernenspeicher 344
Kernenergie 22, 106
Kernenergieausstieg 107
Kernfusion 26
KfW-40-Haus 80
KfW-60-Haus 80
Kleinwindkraftanlagen 238
Klimaschutz 63, 69
Klimaveränderungen 43
Klimawandel 59
Knallgasreaktion 335

Kohlendioxid 51, 56, 105, 339
 Abtrennung 105
 Bilanz 87
 Konzentration 52, 53
 Sequestrierung 103
Kohlendioxidemissionen
 Deutschland 67
 Heizung 88
 Kraftwerk Jänschwalde 100
 Länder der Erde 52
 Nahrungsmittel 89
 Papierverbrauch 90
 Spritverbrauch 85
 Verkehr 84
 Wasserstoffherstellung 350
kohlendioxidfreie Kraftwerke 105
Kollektor 173, 176, 205
Kollektorgroße 193
Kollektorstufigenwinkel 175
Kombikraftwerk 124
Kompressionswärmepumpe 292
kontrollierte Be- und Entlüftung 82
konventionelle Vorkommen 35
Konzentration von Solarstrahlung 204
Konzentrator 205
Konzentratorzellen 215
konzentrierende Photovoltaik 214
Kraftstofftrag je Hektar 331
Kraft-Wärme-Kopplung 107
Kraftwerk
 Atom 24, 106
 Aufwind 213
 Biomasse 316
 Blockheiz 108
 Braunkohle 99
 Dish-Stirling 212
 Geothermie 281
 Gezeiten 266
 HDR 283
 Jänschwalde 99
 kohlendioxidfreies 105
 Kombi 124
 konzentrierende Photovoltaik 214
 Laufwasser 261
 Meeresströmung 267
 ORC 281
 Parabolrinnen 206
 Photovoltaik 144
 Pumpspeicher 264
 SEGS 208
 Solarturm 210
 Speicherwasser 263
 Wellen 266
 Wind 225
Kurzschlussstrom 139
Kværner-Verfahren 339

KWK 107
Kyoto-Protokoll 68

L

Lachgas 56
Ladepark Kreuz Hilden 368
Laufwasserkraftwerke 261
Leerlaufspannung 139
Leistung 14
Leistungsbeiwert 231
Leistungszahl 291
Leitungen 126
LH2 342
Linienkonzentrator 205
Lithosphäre 277
Luftkollektor 178
Luftreceiver 210

M

Manhattan-Projekt 23
Märkte
 Biomasse 332
 Geothermie 287
 Photovoltaik 168
 Solarkraftwerke 221
 Solarthermieranlagen 199
 Wärmepumpe 302
 Wasserkraft 272
 Wasserstoff 351
 Windkraft 251
Maximum Power Point 139
Meeresspiegelanstieg 45, 59, 60
Meeresströmungskraftwerke 267
Mehrwertsteuer 166
Methan 56, 102, 118, 336
 Konzentration 103
 Leckagen 102
 Speicherung 343
Methanisierung 341
Modulpreisentwicklung 170
monokristallines Silizium 141
Moon-Speech 382
MPP 139

N

Naturkatastrophen 48
Neigungsgewinne 158
Netze 126
Netzparität 165
nicht-konventionelle Vorkommen 35, 36
Niedrigenergiehaus 80
Nullemissionsfabrik 361
Nullheizkostenhaus 359
Nutzenergie 30, 72

O

offener Kamin 312
Offshore-Windkraft 241
Ökologie
 Biomasse 329
 Geothermie 286
 Photovoltaik 167
 Solarkraftwerke 220
 Solarthermieranlagen 198
 Wärmepumpe 300
 Wasserkraft 271
 Wasserstoffherstellung 350
 Windkraft 250
Ökonomie
 Biomasse 327
 geothermische Anlagen 285
 Photovoltaik 162
 Solarkraftwerke 219
 Solarthermieranlagen 197
 Wärmepumpe 298
 Wasserkraft 270
 Wasserstoff 348
 Windkraft 247
Ölkrise 18
Ölparität 165
Ölpreise 41, 328
Ölsande 36
OPEC 18, 40
ORC-Kraftwerk 281
Orkan Kyrill 48
Oxidation, partielle 339
oxidkeramische Brennstoffzelle 347
oxygene Photosynthese 305
Ozon 57
 Ozonloch 57, 58
 Ozonschicht 57

P

Parabolrinnenkraftwerk 206
partielle Oxidation 339
Passatwind 227
Passivhaus 80
Pelton-Turbine 260
PEM-Brennstoffzelle 347
Performance Ratio 159
petrothermale Geothermie 283
Photosynthese 305
Photovoltaik 134
 Arbeitsplätze 133
 Autarkiegrad 151, 161
 Dünnschichtmodul 143
 Eigenverbrauchsanteil 151, 161
 Energiewende 122
 Funktionsweise 135
 Heizungsunterstützung 154

Inselnetzanlagen 144
 Konzentratorzellen 215
 Märkte 168
 Modul 142
 Modulpreisentwicklung 170
 Netzanschluss 150
 netzgekoppelte Anlagen 147
 netzgekoppeltes Batteriesystem 152
 Ökologie 167
 Ökonomie 162
 optimale Ausrichtung 158
 Wirkungsgrad 138
 Planung
 Biomasseheizung 327
 geothermische Anlagen 284
 Photovoltaik 154
 Photovoltaikanlage 162, 167
 Scheitholzkessel 324
 solare Heizungsunterstützung 194
 solare Trinkwassererwärmung 192
 Solarkraftwerke 216
 Solarthermieranlagen 191
 Wärmepumpe 295, 298
 Wasserkraftwerke 268
 Windkraft 245
 Plusenergiehaus-Siedlung 357
 Plusenergie-Solarhaus 356
 polykristalline Solarzellen 141
 Porenspeicher 343
 Power-to-Gas-Technologie 118, 125, 336
 PR 159
 Primärenergie 30, 72
 Primärenergiebedarf
 Biomasseanteil 332
 Energieträger 31
 Entwicklung weltweit 26
 Pro-Kopf 29, 109
 Pro-Kopf-Primärenergiebedarf 29, 109
 Pumpspeicherkraftwerke 264
 Punktkonzentrator 206
 PV *siehe* Photovoltaik
 PVC 176

R

Rapsöl-Methylester 320
 Raummeter 310
 Receiver 210
 Reduktionsziele 63
 regenerative Stromversorgung 123, 124
 regenerative Wärmeversorgung 117
 regenerativer Stromimport 224
 regeneratives Energieangebot 111
 Reserven 35
 Ressourcen 35
 Rinnenkraftwerk 206

RME 320
 Rohöleinheit 385
 Rohr-Turbine 259
 Rotorblatt 232
 Rundholz 309

S

Scheitholz 309
 Scheitholzkessel 313, 324
 schneller Brutreaktor 25
 Schüttraummeter 310
 Schwerkraftsystem 182
 Schwimmbadabsorber 176
 Schwimmbaderwärmung 190
 Schwimmersysteme 266
 Scientists for Future 381
 Segelschiffahrt 369
 SEGS-Kraftwerke 208
 Sektorkopplung 114, 125
 selektive Beschichtung 178
 selektiver Absorber 178
 Silizium 140
 SoDa-Energie 32
 solar beheiztes Mehrfamilienhaus 358
 Solar Impulse 372
 Solarabsorber 173
 Solarauto 366
 solare Chemie 215
 solare Deckungsrate 192, 195
 solare Direktverdampfung 209
 solare Heizungsunterstützung 185, 194
 solare Nahwärmeversorgung 188
 solare Schwimmbaderwärmung 190
 solare Strahlungsenergie
 Deutschland 157
 Welt 216
 solare Trinkwassererwärmung 184, 192
 solares Kühlen 188
 Solarfähre 370
 Solarflugzeug 371
 Solargas 336
 Solarkocher 191
 Solarkollektor 173, 176
 Solarkraftwerke 203
 Aufwindkraftwerke 213
 Dish-Stirling-Kraftwerk 212
 konzentrierende Photovoltaik 214
 Märkte 221
 Ökologie 220
 Ökonomie 219
 Parabolrinnenkraftwerk 206
 Photovoltaik 147
 Planung 216
 Solarturmkraftwerk 210
 Solarküche 373

Solarmobil 365
 Solarstrahlungsarten 217
 Solarstromimport 224
 Solarthermieranlagen 172, 206
 Auslegung 191
 Heizungsunterstützung 185
 Kraftwerke 203
 Märkte 199
 Ökologie 198
 Ökonomie 197
 Planung 191
 Trinkwassererwärmung 184
 Solarturmkraftwerk 210
 Solarzelle
 Aufbau 137
 Funktionsweise 135
 Herstellung 140
 Wirkungsgrad 138
 Sonnenaktivität 50
 Sonnenenergie 111
 Sonnenofen 204, 215
 Sonnenschiff 360
 Speicher
 Batterie 146, 152, 234
 Erdgas 125, 344
 Heizwasser 154, 185
 Holzpellets 325
 Kavernen 344
 Methan 343
 Parabolrinnenkraftwerk 207
 Poren 343
 Pufferspeicher 324
 Pumpspeicher 264
 Speicherwasser 263
 Trinkwasser 154, 184, 185, 193
 Wasserstoff 342
 zentraler Wärmespeicher 188
 Speichergroße 193
 Speicherwasserkraftwerke 263
 Stadtgas 336
 Standardtestbedingungen 139
 Standby-Verluste 75
 STC 139
 Steinkohleeinheit 385
 Stirling-Motor 212
 Stratosphäre 57
 Stromerzeugung 130
 Stromerzeugungskosten
 Photovoltaik 164
 Windkraft 249
 Stromexport 131
 Stromimport 224
 Strompreise 128
 Strömungsverlauf, Windkraftanlage 231
 Stromverbrauch 77, 113
 Stromversorgung 113, 123, 125

T

tektonische Platten 277
 Temperaturänderung 45, 54, 59
 Tesla 365
 Thermosiphonanlage 183
 Tiefenbohrung 278
 Tiefengeothermie *siehe* Geothermie
 Tiefengradient 277
 Tiefentemperaturen 278
 Transport 83
 Treibhauseffekt 50
 Treibhausgase 58
 Treibhausgasemissionen 115
 Treibhauspotenziale
 Kältemittel 300
 Treibhausgase 56
 Trinkwassererwärmung 184, 192
 Tschernobyl 24
 Turbine
 Bulb 259
 Francis 260
 Kaplan 259
 Ossberger 261
 Pelton 260
 Rohr 259
 Turmkraftwerk 210

U

Übertragungsnetz 126
 Umsatzsteuer 166
 Untertagespeicher 344
 Uranvorkommen 39
 U-Wert 82

V

Vakuumdämmstoffe 81
 Vakuum-Flachkollektor 180
 Vakuum-Röhrenkollektor 179
 Vakuumverglasungen 81
 Verkehr 119
 Verkehrssektor 83, 119
 Verteilnetz 126
 volumetrischer Receiver 210

W

Wafer 141
 Wärmepumpe 118, 289
 Absorption 294
 Adsorption 294
 Funktionsprinzip 292
 Kältemittel 292
 Kompression 292
 Leistungszahl 291
 Märkte 302

- Ökologie 300
- Ökonomie 298
- Wärmequellen 290
- Wärmequellen für Wärmepumpen 290
- Wärmerohr 180
- Wärmestrahlung 178
- Wärmetauscher 180
- Wärmeverluste 81
- Wärmeversorgung 116, 117
- Warmzeit 43
- Wasserkochen 73
- Wasserkraft 255
 - Gezeitenkraftwerke 266
 - Laufwasserkraftwerke 261
 - Märkte 272
 - Meeresströmungskraftwerke 267
 - Ökologie 271
 - Ökonomie 270
 - Pumpspeicherkraftwerke 264
 - Speicherwasserkraftwerke 263
 - Turbinen 258
 - Wellenkraftwerke 266
- Wasserkreislauf der Erde 256
- Wasserstoff 120, 337
 - blauer 339
 - grauer 339
 - grüner 339, 349
 - Ökologie 350
 - Ökonomie 348
 - Speicherung 342
 - türkiser 339
- Wasserturbinen 258
- Wellenkraftwerke 266
- Weltbevölkerung 110
- Widerstandsprinzip 231
- Wind 227

- Windgas 336
- Windgeschwindigkeit 228, 246
- Windgeschwindigkeitsrekorde 230
- Wind-Inselsystem 234
- Windkraft 225
 - Anlagenaufbau 236
 - Auftriebsprinzip 232
 - Auslegung 245
 - Energiewende 122
 - Märkte 251
 - netzgekoppelte Anlagen 235
 - Offshore 241
 - Ökologie 250
 - Ökonomie 247
 - Planung 245
 - Windlader 233
- Windlader 233
- Windpark 240
- Wirkungsgrad
 - Biomassekraftwerk 317
 - Biomassewachstum 306
 - Brennstoffzelle 348
 - Dampfturbinenprozess 209
 - Kamine und Kaminöfen 312
 - Kollektor 175
 - Methanisierung 341
 - offener Kamin 312
 - ORC-Kraftwerk 282
 - Photovoltaik 138
 - Scheitholzkessel 313
- World Solar Challenge 366

Z

- Zugdrachen 369