

Sven Geitmann und Eva Augsten

WASSERSTOFF UND BRENNSTOFFZELLEN

DIE TECHNIK VON GESTERN,
HEUTE UND MORGEN



Wasserstoff und Brennstoffzellen

Sven Geitmann und Eva Augsten

H₂YDROGEIT
Verlag

Wasserstoff und Brennstoffzellen

*Die Technik von gestern,
heute und morgen*

Sven Geitmann und Eva Augsten

Sachbuch
mit 56 farbigen Abbildungen

H₂YDROGEIT
Verlag

Dieses Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Autors und des Verlages unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Alle in diesem Buch enthaltenen Angaben, Daten, Ergebnisse usw. wurden vom Autorenteam nach bestem Wissen zusammengestellt und vom Verlag mit größtmöglicher Sorgfalt geprüft. Dennoch sind inhaltliche Fehler nicht völlig auszuschließen. Daher erfolgen alle Angaben ohne jegliche Verpflichtung oder Garantie des Autorenteam und des Verlages, die deshalb auch keinerlei Verantwortung und Haftung für etwaig vorhandene inhaltliche Unrichtigkeiten übernehmen.

Bibliografische Information der Deutschen Bibliothek:

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Weitere Produkte im **Hydrogeit Verlag**:

Brennstoffzellen im Unterricht ISBN 978-3-937863-49-8

Unterrichtsmaterial über Batterien und Brennstoffzellen ISBN 978-3-937863-40-5

Hydrogen Society ISBN 978-3-937863-31-3

Alternative Kraftstoffe ISBN 978-3-937863-15-3

Erneuerbare Energien ISBN 978-3-937863-14-6

Wasserstoff-CD ISBN 978-3-937863-10-8

Wasserstoff-Autos ISBN 978-3-937863-07-8

ISBN 978-3-937863-55-9

5. komplett überarbeitete und aktualisierte Auflage

© Copyright 2022 Hydrogeit Verlag, 16727 Oberkrämer, Germany

Gedruckt in Deutschland bei Printec Offset – medienhaus, Kassel

100 % Recycling-Papier, FSC-Standard, alterungsbeständig nach ISO 9706

Gesamtes Design (Cover & Buchblock) von Dipl.-Des. Robert Müller

Alle Rechte vorbehalten!



AUTORENVORWORT ZUR 5. AUFLAGE

Diese Ausgabe ist eine Neuauflage des Buches „Wasserstoff und Brennstoffzellen – Die Technik von morgen!“, das zum ersten Mal im Mai 2002 von Sven Geitmann herausgebracht wurde. Die zweite, überarbeitete und erweiterte Auflage erschien 2004 im Hydrogeit Verlag, die dritte 2012, damals unter dem Titel „Energiewende 3.0 – Mit Wasserstoff und Brennstoffzellen“. Die im April 2021 erschienene vierte Auflage „Wasserstoff und Brennstoffzellen – Die Technik von gestern, heute und morgen“ ist bereits ausverkauft.

Technik, Markt und Politik verändern sich rasant. Bei Erscheinen der ersten Auflagen musste man die Dringlichkeit einer Energiewende noch ausdrücklich betonen. Wasserstoff war noch ein Nischenthema. Heute sind Klimawandel und Energiewende in vollem Gange und praktisch täglich Thema in den Medien. Beim Erscheinen der vierten Auflage war Wasserstoff ganz oben auf der politischen Agenda angekommen und sollte – quasi als neues Wundermittel – das Klima wie auch den Wirtschaftsstandort Deutschland retten.

Als sich dieses Buch schon in der Schlusskorrektur befand, befahl Russlands Präsident Vladimir Putin den Angriff auf die Ukraine. Seither ist nicht nur Fachleuten klar, wie gefährlich die Abhängigkeit von importierten Rohstoffen auch geopolitisch ist. Quasi über Nacht vervielfachte sich der Einsatz bei der Suche nach Alternativen zu importierten fossilen Brennstoffen.

Dieses Buch ist bewusst leicht verständlich gehalten. Es ist nicht primär als Fachlektüre gedacht, sondern richtet sich vielmehr an eine technikinteressierte Leserschaft, an SchülerInnen und StudentInnen, an TechnikerInnen und UnternehmerInnen, an Auszubildende und LehrerInnen sowie EntscheidungsträgerInnen aus Politik und Gesellschaft. Zugunsten der einfacheren Lesbarkeit wurde im Fließtext auf Quellenangaben verzichtet, stattdessen verfügt das Buch über ein umfangreiches Literaturverzeichnis.

Die letzten Auflagen wurden grundlegend überarbeitet: Aktuelle Entwicklungen wurden ergänzt, Überholtes entfernt. Neben den jüngsten Trends vermittelt dieses Buch – wie schon seine Vorgänger – die grundlegenden physikalischen Zusammenhänge, denn diese gelten ja bei allen Umwälzungen nach wie vor.

Viel Spaß bei der Lektüre wünschen
Sven Geitmann und Eva Augsten

VORWORT

Rund 3,5 Grad Celsius betrug der mittlere weltweite Temperaturanstieg zwischen der letzten Eiszeit 20.000 v. Chr. und dem Jahr 1900. Seitdem ist die Temperatur durch den vom Menschen gemachten Klimawandel bereits um mehr als ein Grad angestiegen. Wollen wir dem Pariser Klimaschutzabkommen gerecht werden, katastrophale Folgen des Klimawandels abwenden und dazu die globale Erwärmung möglichst auf 1,5 Grad Celsius begrenzen, muss unsere Energieversorgung spätestens im Jahr 2035 vollständig auf erneuerbaren Energien basieren. Der russische Angriff auf die Ukraine, der auch durch die deutschen Importe von Erdöl, Erdgas und Kohle finanziert wurde, zeigt, welche fatalen Folgen unsere Abhängigkeit von fossilen Energieträgern hat. Diese müssen wir nun im Expressstempo durch heimische erneuerbare Energien ersetzen.

In Deutschland werden das im Wesentlichen Photovoltaik und Windkraft sein, deren Erzeugung starken Fluktuationen unterworfen ist. Die Bedeutung von Speichern wird darum schon sehr bald wachsen: Eine Erhöhung des Speicherbedarfs in Deutschland um den Faktor 1.000, bedingt durch die Energiewende, ist durchaus realistisch. Herkömmliche Speicheroptionen wie Pumpspeicher stoßen hier schnell an ihre Kapazitätsgrenzen. Wollen wir diesen enormen Speicherbedarf in Deutschland decken, werden wir an einer Technologie nicht vorbeikommen: Power-to-Gas. Untertage-Gasspeicher sind problemlos in der Lage, die nötigen Speicherkapazitäten für Gase wie Wasserstoff oder Methan bereitzustellen, die aus Überschussstrom aus erneuerbaren Energien erzeugt werden. Die heute vorhandenen Gasspeicher sind bereits so groß, dass man damit viele Wochen die deutsche Stromversorgung sicherstellen könnte. So wichtig die Power-to-Gas-Technologie auch sein wird, ein Allheilmittel ist sie allerdings nicht. Bei der Gaserzeugung und der Rückverstromung entstehen große Verluste. Darum muss anderen effizienteren Technologien wie Batteriespeichern für die Kurzzeitspeicherung oder die Elektromobilität, Oberleitungen für den Güterverkehr und Wärmepumpen für die Heizung der Vorzug gegeben werden. Kleinere Verluste bedeuten nämlich auch einen geringen Bedarf an Solaranlagen und Windrädern.

Die Energiewende wird sicher nicht an technologischen oder ökonomischen Fragen scheitern. Aber die nötige Akzeptanz für die Aufstellung neuer Windräder ist heute schon ein Problem. Es gibt aber auch viele Anwendungen,

bei denen effizientere Systeme an ihre Grenzen stoßen: Für die saisonale Speicherung von Strom, die Dekarbonisierung des Flug- und Schiffsverkehrs, die Bereitstellung des Treibstoffbedarfs für Fern- und Vielfahrer oder Heizungssysteme im Gebäudebestand mit sehr hohem Temperaturniveau ist der Power-to-Gas-Pfad die Alternative für die Energiewende. Obwohl die Lösungen für die Energiewende im Wesentlichen bekannt sind und eigentlich nur noch umgesetzt werden müssen, findet die Energiewende heute nicht einmal ansatzweise in dem für den Klimaschutz benötigten Tempo statt. Für viele Menschen haben diese Themen nicht die größte Priorität, und die Politik hat offensichtlich die Herausforderungen der Energiewende und des Klimaschutzes noch nicht richtig verstanden. Darum hat die Aufklärung über den Themenkomplex und die Vermittlung von Hintergrundwissen eine sehr große Bedeutung. Die bisherigen Auflagen dieses Buches und die Arbeit des Hydrogeit-Verlags zu den Themen Wasserstoff und Brennstoffzellen haben dazu in den vergangenen Jahren einen wichtigen Beitrag geleistet. Der Neuauflage des Buchs und den Autoren wünsche ich auch weiterhin viel Erfolg.



Prof. Dr. Volker Quaschning
Hochschule für Technik und Wirtschaft HTW Berlin

Berlin, 2022

INHALT

1	Einleitung: Rettet Wasserstoff das Klima?	14
2	Energieversorgung von der Steinzeit bis heute	18
2.1	Der Energiebedarf wächst	19
2.2	Heutige Energiequellen	21
2.2.1	Primärenergie: Bedarf und Quellen	21
2.2.2	Strom: Musterkind der Energiewende	23
2.2.3	Wärme: Seit Jahrzehnten kaum Bewegung	25
2.2.4	Mobilität: Verkehrswende kommt in Sicht	26
2.2.5	Sektorenkopplung: Alle zusammen statt jeder für sich	28
2.3	Grenzen der heutigen Energieversorgung	29
2.3.1	Treibhausgase und Klimawandel	29
2.3.2	Die Endlichkeit fossiler Brennstoffe	35
2.3.3	Schadstoffe und andere Umweltbelastungen	37
2.4	Ausweg Atomenergie?	42
2.5	Das richtige Timing: Speicher und Lastmanagement	44
2.6	Zukunftsszenarien für die Energiewende	48
2.7	Der Beginn der solaren Wasserstoffwirtschaft	51
2.8	Politische Wasserstoffstrategien	54
3	Wasserstoff und seine Eigenschaften	60
3.1	Eigenschaften	60
3.1.1	H ₂ -Konfiguration	62
3.1.2	Wasserstoff im Vergleich zu konventionellen Kraftstoffen	63
3.2	Wasserstoff und Sicherheit	64
3.2.1	Knallgasreaktion	65
3.2.2	Materialwechselwirkungen	66
4	Gewinnung von Wasserstoff	70
4.1	Zukünftiger Wasserstoffbedarf	70
4.2	Herstellungsprozesse im Überblick	71
4.2.1	Die Elektrolyse: Hoffnungsträger für grünen Wasserstoff	71
4.2.2	Reformierung von Kohlenwasserstoffen	77
4.2.3	Pyrolytische Prozesse auf Basis fester Kohlenwasserstoffe	81
4.2.4	Methanpyrolyse: Ein Traum in türkis	82

4.2.5	Kværner-Verfahren	83
4.2.6	Biologische Herstellung: Von Natur aus grün	84
4.2.7	Dissoziation: Wasserstoff aus dem Solarturm	86
4.2.8	Methanhydrat: Wasserstoff aus der Tiefsee?	88
4.3	Reinigung	88
4.3.1	Anforderungen an die Reinheit	89
4.3.2	Wichtige Reinigungsverfahren im Überblick	90
4.4	Herstellungskosten	93
5	Speicherung und Transport von Wasserstoff	98
5.1	Gasförmiger Wasserstoff	99
5.1.1	Gasdruckbehälter	100
5.1.2	Transport mit Pipelines	102
5.1.3	Speicherung in Kavernen und porösem Gestein	104
5.1.4	Transport und Speicherung durch H ₂ -Beimischung ins Gasnetz	107
5.1.5	Gasnetzeinspeisung per Methanisierung	108
5.2	Tiefkalter Wasserstoff (flüssig)	109
5.2.1	Kryogenbehälter	110
5.2.2	Transport von flüssigem Wasserstoff per Lkw oder Bahn	112
5.2.3	Transport von flüssigem Wasserstoff per Schiff	113
5.2.4	Pipelines für Flüssigwasserstoff	113
5.3	Wasserstoffspeicherung und -transport in Flüssigkeiten	114
5.3.1	Liquid Organic Hydrogen Carriers (LOHC)	114
5.3.2	Flüssige Treib- und Kraftstoffe auf Basis von Wasserstoff (E-Fuels)	116
5.4	Speicherung von Wasserstoff in Festkörpern	118
5.4.1	Metallhydrid	118
5.4.2	Nanoröhrchen	122
6	Tankstellen-Infrastruktur	124
6.1	Aufbau eines Tankstellennetzes	124
6.2	Belieferung der Tankstellen	126
6.3	Fahrzeugbetankung	127
6.3.1	Betankung mit gasförmigem Wasserstoff	127
6.3.2	Betankung mit flüssigem Wasserstoff	128

7	Sicherheit	132
7.1	Vorsichtsmaßnahmen	132
7.1.1	Brand- und Explosionsverhalten	133
7.1.2	Maßnahmen im Brandfall	134
7.1.3	Atemwege und Hautkontakt	135
7.2	Unfallszenarien und Lerneffekte	135
7.2.1	Lkw-Unfälle	136
7.2.2	Pkw-Brandversuche	136
7.2.3	Lachenbildung und Verdampfung	137
8	Brennstoffzelle	140
8.1	Grundsätzliche Funktionsweise	142
8.2	Effizienz von Brennstoffzellen	146
8.3	Typen von Brennstoffzellen	148
8.3.1	PEM-Brennstoffzelle	148
8.3.2	Alkalische Brennstoffzelle (AFC)	151
8.3.3	Direkt-Methanol-Brennstoffzelle (DMFC)	152
8.3.4	Phosphorsäure-Brennstoffzelle (PAFC)	153
8.3.5	Schmelzkarbonat-Brennstoffzelle (MCFC)	154
8.3.6	Festoxid-Brennstoffzelle (SOFC)	155
8.3.7	Festsäure-Brennstoffzelle (SAFC)	156
8.3.8	Mikrobielle Brennstoffzelle	156
8.4	Alternative Energieträger für die Brennstoffzelle	158
8.4.1	Methan (Erdgas, Biomethan, E-Methan)	158
8.4.2	Flüssiggas	158
8.4.3	Biogas, Klärgas & Co.	159
8.4.4	Methanol	160
8.5	Kosten von Brennstoffzellen	161
8.6	Chancen und Herausforderungen	162
9	Einsatzgebiete von Brennstoffzellen	166
9.1	Mikro und Mini	166
9.2	Portable Einheiten	167
9.3	Back-up-Systeme und Offgrid-Anwendungen	168
9.4	Hausenergieversorgung	169
9.5	Kraftwerksbetrieb	171

9.6	Fahrzeuge	173
9.6.1	Pkw	175
9.6.2	Lkw	178
9.6.3	Busse	180
9.7	Luftfahrt	183
9.8	Raumfahrt	188
9.9	Schifffahrt	188
10	Wasserstoffmotor	194
10.1	Funktion des Wasserstoffmotors	194
10.2	Eigenschaften des Wasserstoffmotors	195
10.3	Herausforderungen bei H ₂ -Motoren	196
10.4	Umweltbilanz	198
10.5	Fahrzeuge mit H ₂ -Motor	198
11	Wasserstoff für die Industrie	202
12	Katalytischer Brenner	206
13	Kosten der Wasserstofftechnologien	208
14	Fazit und Ausblick	212
15	Anhang	218
15.1	Abkürzungen	218
15.2	Einheiten/Formelzeichen	219
15.3	Elemente	219
15.4	Geschichte	220
15.5	Umrechnungstabelle Wasserstoff	226
15.6	Kennwerttabelle	227
15.7	LH ₂ -Sicherheitsmaßnahmen	228
15.8	Literatur	230
15.9	Index	234
15.10	Autoren	238

1 EINLEITUNG

1 EINLEITUNG: RETTET WASSERSTOFF DAS KLIMA?

Die Sonne scheint und scheint. Die Vision, diese schier endlos anmutende Energiequelle zu nutzen und mithilfe des Energieträgers Wasserstoff zu speichern, ist schon viele Jahrzehnte alt. Dennoch wurde sie meist als utopisch angesehen. Sowohl die Solar- als auch die Wasserstofftechnologie waren zu teuer, fossile Brennstoffe dagegen billig und scheinbar unbegrenzt verfügbar.

Inzwischen aber hat sich der Wind gedreht: Solarenergie ist an vielen Orten der Welt die preiswerteste Art, Strom zu erzeugen. Die Wasserstofftechnik steht an der Schwelle zum Markt. Und der Klimawandel ist mittlerweile so unübersehbar, dass selbst zahlreiche Vertreter der fossilen Energiewirtschaft einräumen: So wie bisher kann es nicht weitergehen.

Wasserstoff, schon oft als Hoffnungsträger gehandelt, erlebt einen neuen Frühling, getrieben von klimawissenschaftlicher Notwendigkeit, technischem Fortschritt, wirtschaftlichem Wettbewerb und politischem Willen. Im Sommer 2020 präsentierte die deutsche Bundesregierung eine Nationale Wasserstoffstrategie – ebenso wie viele andere Länder auch. Verbände wie der weltweit agierende Hydrogen Council finden auf hoher Ebene Gehör. Und wer heute als Unternehmen, Kommune oder Forschungsinstitut Fördermittel erhalten will, tut gut daran, das Wort „Wasserstoff“ an prominenter Stelle zu platzieren.

Wasserstoff ist das am meisten vorkommende Element im Universum. Das Gas verfügt in Bezug auf sein Gewicht über einen hohen Heizwert und verbrennt mit Sauerstoff zu nichts anderem als Wasser. Es ist extrem leicht und wird bereits seit mehr als 100 Jahren als Industriegas verwendet. Aber genügen diese Eigenschaften, um Wasserstoff zur Schlüsseltechnologie der Energiewende und zum Kraftstoff der Zukunft zu machen?

Die Anforderungen an unser künftiges Energiesystem sind mittlerweile klar. Die konventionelle Energieerzeugung sowie Fahrzeugtechnologien einfach nur zu optimieren und effizienter zu machen, reicht nicht mehr. Die Verbrennung von fossilen Kohlenwasserstoffen muss möglichst schnell ein Ende finden, um die Ziele des Pariser Klimaabkommens einhalten zu können. Vor allem Sonne und Wind sollen die Säulen einer künftigen Energiewirtschaft sein.

Das hat verschiedene Konsequenzen. Da Sonne und Wind sich nicht steuern lassen, werden Energiespeicher aller Art wichtiger als je zuvor. Die sich rasant entwickelnde Batterietechnik kann in Zukunft dafür sorgen, dass

selbst bei einer nächtlichen Flaute das Licht nicht ausgeht. Doch wir werden auch Technologien brauchen, die es ermöglichen, Sonnen- und Windenergie auch über Wochen und Monate hinweg zu speichern und dann bei Bedarf für verschiedene Zwecke nutzbar zu machen. Als Speicher und als Kraftstoff spielt Wasserstoff daher in praktisch allen wissenschaftlichen Energiewendeszenarien eine zentrale Rolle.

Mit der Nationalen Wasserstoffstrategie (NWS) will die Bundesregierung nicht nur beim Klimaschutz vorankommen, sondern vor allem die wirtschaftliche Chance nutzen, die der Wasserstoff bietet. In den letzten Jahrzehnten hat Deutschland mehrere Milliarden Euro in die Entwicklung der Wasserstofftechnik investiert und sich eine gute Ausgangsposition im Rennen um die besten Technologien erarbeitet. Die soll nun genutzt werden.

Eine Aufgabe ist es dabei, die Brennstoffzelle so schnell wie möglich massentauglich zu machen. Ihre Funktionsweise basiert auf einem Prinzip, das bereits 1839 entdeckt, dann aber nicht mit sonderlich viel Vehemenz weiterentwickelt wurde. Das lässt sich durch die dominante Stellung des Verbrennungsmotors erklären, der bis Anfang des neuen Jahrtausends nie ernsthaft infrage gestellt wurde. Kohle und Öl waren einfach zu praktisch.

Die Brennstoffzelle ist im direkten Vergleich dazu jedoch effizienter, sauberer und leichter. Dies hat sie bereits in den sechziger Jahren des vergangenen Jahrhunderts bei zahlreichen Einsätzen in der Raumfahrt bewiesen. Aber obwohl an dieser Technologie schon seit zig Jahren mehr oder minder intensiv geforscht wird (s. Kap. 15.4: Geschichte), wurde erst in den 1980er Jahren erstmals ernsthaft darüber nachgedacht, Wasserstoff als Kraftstoff zu verwenden. Entscheidend war damals – in Zeiten des aufkeimenden Umweltschutzes – der ökologische Aspekt.

Nach den ersten Anläufen entwickelte sich Ende der 1990er Jahre ein regelrechter Hype um diese Technologie. Da die technische Umsetzung jedoch nicht so zügig erfolgte wie zunächst erwartet, nahm das Interesse schnell wieder ab. Mitte des ersten Jahrzehnts des 21. Jahrhunderts folgte dann die nächste Welle der Euphorie. Diese verebbte jedoch, als 2009 das Thema Elektromobilität mit den rein batteriebetriebenen Fahrzeugen in den Fokus rückte.

Heute, da Strom aus Wind- und Solarenergie immer billiger wird und der Klimaschutz immer dringlicher, erleben Wasserstoff und Brennstoffzellen einen neuen Frühling. Die Preise für die entsprechenden Technologien sind deutlich gesunken, und Szenarien zeigen, dass noch in diesem Jahrzehnt grü-

ner Wasserstoff und effiziente Brennstoffzellen in mehreren Bereichen konkurrenzfähig werden könnten (s. Kap. 13: Kosten der Wasserstofftechnologien).

Der Einstieg in die Erneuerbare-Energien-Technik war Ende des zwanzigsten Jahrhunderts sozusagen die Energiewende 1.0. In den nächsten Stufen ging es darum, wie man Wind- und Solarstrom ins bestehende System integrieren könnte. Dann kamen Energiespeicher hinzu. Als Nächstes steht die „Energiewende 4.0“ an. Das Energiesystem muss völlig neu gedacht werden. Die Sektoren Strom, Wärme und Mobilität stehen nicht mehr einfach nebeneinander, sondern verschmelzen zukünftig miteinander. Klassische, zentrale Grundlastkraftwerke wird es immer weniger geben. An ihre Stelle treten dezentrale und vernetzte Technologien. Präzise Prognosen für Wind- und Solarstrom, effiziente Speicher, die Kopplung der Sektoren und flexible Verbraucher werden dafür sorgen, dass auch das neue System zuverlässig arbeiten wird. Forschungs- und Schaulensterprojekte in sogenannten Wasserstoff-Regionen, wie die „Norddeutsche Energiewende 4.0“, zeigen, wie das gehen kann.

Ökostrom, der gerade nicht direkt genutzt oder in Batterien kurzzeitig gespeichert wird, kann in Wasserstoff umgewandelt werden, der anschließend vielseitig nutzbar ist – als Kraftstoff, für die dezentrale Strom- und Wärmeerzeugung mit Brennstoffzellenheizungen oder als Rohstoff für die Industrie.

Die technische Entwicklung der Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnik ist in den vergangenen Jahren weit vorangekommen. Wo vor Kurzem noch geforscht wurde, wird jetzt die praktische Umsetzung vorangetrieben.

Dieses Buch erklärt die Grundlagen und zeichnet dabei auch die Ursprünge der Technologie nach: Welche Vor- und Nachteile hat Wasserstoff? Wie wurde er bisher gewonnen und genutzt – und wie wird er in Zukunft hergestellt und eingesetzt? Wie lässt sich Wasserstoff sicher handhaben, speichern und transportieren? Wie kann er vom Grundstoff für die Chemieindustrie zur Schlüsseltechnologie für die Energiewende werden?

Viele Fragen. Freuen Sie sich auf die Antworten!

2 ENERGIEVERSORGUNG VON DER STEINZEIT BIS HEUTE

2 ENERGIEVERSORGUNG VON DER STEINZEIT BIS HEUTE

Im Laufe der Jahrhunderte und Jahrtausende haben sich die Energiequellen der Menschheit stetig gewandelt: Zunächst wurde über Jahrtausende hinweg Holz verwendet. Dann wurde in der Altsteinzeit aus Baumstämmen und Ästen Holzkohle hergestellt. Diese verfügte bereits über deutlich verbesserte Brenneigenschaften. Im Altertum wurden dann Braun- und Steinkohle entdeckt.

Der Vorteil der Kohle lag in ihrem höheren Brennwert. Kohle ist ein aus tierischen und pflanzlichen Substanzen entstandenes Gemisch aus verschiedenen Kohlenwasserstoffverbindungen, das aufgrund seiner Entstehungsgeschichte über eine vergleichsweise hohe Energiedichte verfügt. Ähnlich ist es beim Erdöl sowie beim Erdgas. Im Vergleich zur Kohle enthalten sie in Bezug auf ihr Gewicht sogar noch mehr Energie.

Diese sogenannten fossilen Primärenergieträger entstammen längst vergangenen Zeiten und haben Jahrmillionen gebraucht, bis sie ihre derzeitige Konfiguration erhalten haben. Sie benötigten besondere Voraussetzungen für ihre Entstehung, sowohl was die Temperatur und den Druck als auch die chemischen Rahmenbedingungen angeht. Erdgas zum Beispiel entstand vor ungefähr 600 Mio. Jahren aus abgestorbenen Kleinorganismen, Plankton und Algen, die sich auf dem Grund der Ozeane ablagerten und im Laufe der Zeit von Gestein- und Erdschichten überdeckt wurden. Unter Luftabschluss und bei hohem Druck bildeten sich aus diesen organischen Substanzen durch einen chemischen Prozess Kohlenwasserstoffe.

Der ursprünglich in der Atmosphäre vorhandene Kohlenstoff wurde auf diese Weise zunächst in Pflanzen und Tieren gebunden und dann im Laufe der Zeit in tiefer gelegenen Erdschichten eingeschlossen. Ursprünglich war der atmosphärische Kohlenstoffanteil um einiges höher als heute. In der Kreidezeit stapften die Dinosaurier über eine tropische Erde, die um etwa zehn Grad wärmer als heute war. Dann aber wurden mehr und mehr Kohlenstoffverbindungen unter Tage eingelagert. Der Kohlenstoff wurde zunehmend dem oberirdischen Kreislauf entzogen, so dass sich der Kohlendioxidanteil in der Atmosphäre verringerte. Da dieser Prozess nur sehr langsam ablief, hatte die Natur damals Zeit genug, um sich auf diese Veränderung einzustellen.

Seit der industriellen Revolution Ende des 18. Jahrhunderts werden diese Kohlenwasserstoffverbindungen nun wieder aus ihren unterirdischen

Verstecken hervorgeholt und durch ihre Verbrennung zurück in die Atmosphäre entlassen. Im ursprünglichen Sinne ist dieser Vorgang also durchaus natürlich – er ist nur einfach um ein Zsigfaches zu schnell. Ein maßgeblicher Anteil des Kohlenstoffs, der über Jahrmillionen unterirdisch gespeichert war, wird nun in kaum mehr als 100 Jahren wieder freigesetzt. Die Nutzung fossiler Ressourcen begann in den Jahren 1858/59 fast zeitgleich in Celle, Deutschland, und in Pennsylvania, USA. Einen Ölboom, wie er in Nordamerika in den Folgejahren ausbrach, konnte Deutschland allerdings nicht verzeichnen. Damals wie heute fördern die Deutschen nur etwa drei Prozent ihres Ölbedarfs selbst. Die verstärkte Nutzbarmachung von Erdgas folgte erst in den 1970er Jahren. Bis dahin wurde das Gas als störend empfunden und einfach am Ort der Förderung abgefackelt.

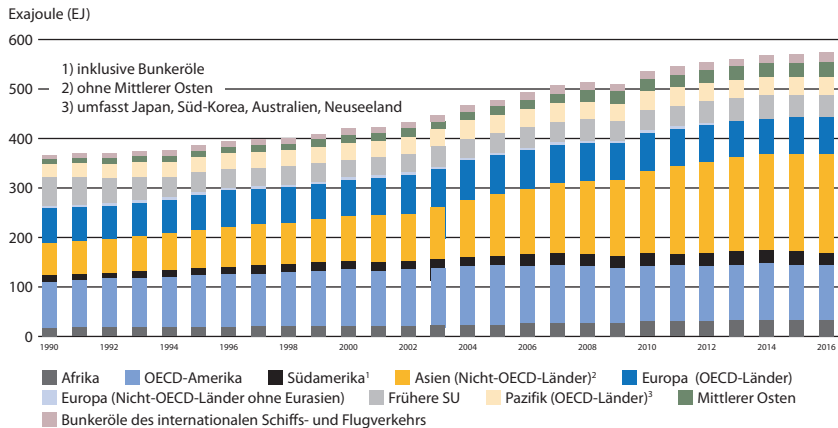
Bis heute wird der größte Teil der fossilen Energien in den Industrieländern verbraucht. Die Emissionen, die in diesen Ländern verursacht werden, verursachen aber auch in anderen Regionen erhebliche Schäden. Abgasschadstoffe verunreinigen über Ländergrenzen hinweg die Luft, undichte Öl- und Gaspipelines verseuchen Grundwasser und Böden, gekenterte Tankschiffe verdrecken Meere und Meeresbewohner. In vielen Fällen bezahlen somit unbeteiligte Lebewesen – Menschen, Tiere und Pflanzen – mit ihrer Gesundheit für die Annehmlichkeiten der Industrienationen.

Der unbändige Energiehunger der Menschheit ist indessen noch längst nicht gestillt. Als zusätzliche Option wurde deswegen die Kernenergie ins Spiel gebracht, die Anfang des 20. Jahrhunderts entdeckt worden war. Mit dieser Technik können zwar beeindruckend große Energiemengen aus relativ kleinen Mengen Kernbrennstoff gewonnen werden. Dafür treten bei der Nutzung aber schwerwiegende Entsorgungs- und Gesundheitsprobleme auf, die nicht nur uns, sondern auch noch zahlreiche künftige Generationen in erheblichem Maße belasten werden. Dieser Ausflug in die Kerntechnik entpuppte sich folglich als Holzweg (s. Kap. 2.4: Ausweg Atomenergie).

2.1 DER ENERGIEBEDARF WÄCHST

Der weltweite Energiebedarf ist beträchtlich und nimmt stetig weiter zu. Das Bevölkerungswachstum ist dabei nur ein Faktor. 2020 wurde die 7,8-Mrd.-Grenze überschritten. Doch während man früher von einem niemals endenden

ABB. 1: Der globale Primärenergiebedarf ist in den letzten Jahrzehnten stetig gewachsen



Quelle: IEA/BMWI

Wachstum ausging, scheint es heute, also ob in den 2060ern mit rund 10 Milliarden Menschen ein Maximum erreicht werden könnte.

Der zweite maßgebliche Faktor ist der Energiebedarf pro Person. Auch er nimmt bisher zu, denn der Lebensstandard steigt global. Das Ausgangsniveau ist allerdings so unterschiedlich, dass es keinen Anlass gibt, sich in den westlichen Ländern für die hohe Energieeffizienz zu feiern.

Nordamerika und Europa sind für mehr als ein Drittel des Weltenergiebedarfs verantwortlich, machen aber nur ein knappes Viertel der Erdbevölkerung aus. Rund 15 Prozent aller Menschen lebten 2019 in Afrika und verbrauchten zusammen 3,4 Prozent der weltweit erzeugten Energie. Eine Studie der Hilfsorganisation Oxfam hat 2021 den Zusammenhang zwischen Pro-Kopf- CO_2 -Emissionen und Reichtum untersucht. Das Ergebnis: Das reichste Prozent überschreitet die für die Begrenzung des Klimawandels zulässigen Emissionen um das 30-Fache. Die ärmere Hälfte liegt dagegen deutlich unterhalb dieses Schwellenwertes.

Im Milliardenstaat China nähert sich der Energieverbrauch pro Kopf zügig dem des Westens. In Indien steigt der Pro-Kopf-Verbrauch auf deutlich niedrigerem Niveau, aber wegen der Bevölkerungsgröße mit starker Auswirkung. Das stärkste Wachstum des Energiebedarfs erwartet die Internationale Energieagentur IEA für die nächsten Jahrzehnte jedoch in Afrika – getrieben

sowohl vom Bevölkerungszuwachs als auch von der steigenden Nachfrage nach Klimaanlage in den immer größer und heißer werdenden Metropolen.

In Summe prognostiziert der BP Energy Outlook von 2020 daher für 2040 einen Anstieg des weltweiten Primärenergiebedarfs um 10 bis 25 Prozent gegenüber 2018.

Dass dieser Anstieg nicht noch stärker ausfällt, verdanken wir der technischen Weiterentwicklung. Indem die Wirkungsgrade entlang der gesamten Kette verbessert werden, können beträchtliche Energiemengen eingespart werden. Kraftwerke, Fahrzeuge und Haushaltsgeräte sind heute deutlich effizienter als in früheren Jahrzehnten.

Dennoch sinkt der Energiebedarf nicht, denn gleichzeitig mit der Effizienz wachsen die Ansprüche: Moderne Autos sind effizienter als alte, aber wo früher ein VW Käfer reichte, muss heute ein SUV mit viel Bordelektronik her. Der neue Flatscreen-Fernseher ist effizienter als der alte Röhrenfernseher, aber um ein Vielfaches größer. Das neue Kühl-Gefrier-Kombigerät hat die Effizienzklasse A+, reicht dafür aber bis zur Decke, damit kaltes Bier und Tiefkühlpizza nie ausgehen. Durch diesen sogenannten Rebound-Effekt stagniert der Energieverbrauch in Europa trotz aller technischen Anstrengungen. 2019 lag der Endenergiebedarf in Deutschland bei rund 2.500 Terawattstunden (TWh). Das Fraunhofer-Institut für Energiewirtschaft und Energiesystemtechnik IEE versucht in seinem „Barometer der Energiewende“ abzuleiten, wie viel Energie Deutschland 2050 brauchen wird. Anhand der Daten von 2019 wird für 2050 von einem Endenergiebedarf von rund 2.081 TWh ausgegangen.

2.2 HEUTIGE ENERGIEQUELLEN

Bei der Betrachtung des heutigen Energiebedarfes steht traditionell der Primärenergieverbrauch im Vordergrund (s. Kastentext Seite 22). Auch wenn Energie physikalisch gesehen nicht verbraucht werden kann, ist der Begriff Energieverbrauch in seiner landläufigen Verwendung nicht allzu falsch gewählt, stehen die Energieträger nach dem Verbrennen schließlich kein zweites Mal zur Verfügung.

2.2.1 PRIMÄRENERGIE: BEDARF UND QUELLEN

In der Öffentlichkeit steht meist die Stromerzeugung mit einem zügig steigenden Anteil erneuerbarer Energien im Mittelpunkt des Interesses. Auch wenn

der Strombedarf nicht wirklich sinkt, geht doch der Einsatz von fossilen Primärenergieträgern zurück. Betrachtet man jedoch alle Sektoren (Strom, Wärme, Mobilität), spielen die fossilen Primärenergieträger noch immer die größte Rolle bei der Deckung des Energiebedarfes.

Mehr als ein Drittel des Primärenergiebedarfs in Deutschland wird in Form von Mineralöl bereitgestellt. Erdgas hat in den vergangenen Jahrzehnten deutlich zugelegt und 2017 die Kohle (Braun- und Steinkohle zusammen) knapp überholt. Ein wesentlicher Schub in der Substitution der Kohle durch Erdgas ist auf den fortschreitenden Umbau der Industrie und modernere Heiztechnik in den neuen Bundesländern nach der Wende zurückzuführen. Zuletzt machten sich auch steigende CO₂-Preise im Emissionshandel bemerkbar.

In der Anfangszeit der Energiewende stieg der Anteil erneuerbarer Energien schneller an als angenommen, was aber auch an den geringen Erwartungen lag. Ursprünglich hatte sich die Bundesregierung zum Ziel gesetzt, den Anteil der erneuerbaren Energien am Primärenergieverbrauch von 2,1 Prozent im Jahr 2000 auf 4,2 Prozent im Jahr 2010 zu verdoppeln. Diese Marke wurde bereits 2004 (4,5 Prozent) überschritten. 2010 lag dann der Anteil der erneuerbaren Energien über alle Sparten hinweg bereits bei 9,9 Prozent, im Jahr 2019 bei 14,8 Prozent (AG Energiebilanzen 2020).

Die **Endenergie** unterscheidet sich von der Primärenergie dadurch, dass die **Primärenergie** in Form von Erdöl, Erdgas, Kohle oder Uran zunächst noch aufbereitet werden muss, um dem Verbraucher in Form von Heizöl, Benzin, Gas oder Strom zur Verfügung gestellt werden zu können. Bei dieser chemischen Umwandlung (Veredelung) treten Verluste auf, so dass die für den Verbraucher bereitstehende Endenergie bisher stets geringer ist als die eingesetzte Primärenergie. In Zukunftsszenarien gerät diese Logik allerdings ins Wanken: Wärmepumpen stellen z. B. mehr Wärme als Endenergie bereit, als man an fossiler Primärenergie zuführt. Die Umweltwärme taucht in der Rechnung nicht auf. Außerdem wird auch der Ökostrom selbst manchmal als Primärenergie bezeichnet.

Gemessen an den heutigen Klimazielen reicht dieser Fortschritt jedoch längst nicht aus.

Auch global wird der größte Beitrag zur Primärenergieversorgung nach wie vor vom Erdöl geleistet, das jedoch nur noch ganz knapp vor der Kohle liegt. Deren weltweiter Anteil ist durch das Wirtschaftswachstum in Asien stark gestiegen und lag laut dem BP Energy Outlook 2020 im Jahr 2018 bei mehr als 27 Prozent des Weltenergiebedarfs, gefolgt vom Gas mit gut 24 Prozent. Kernenergie machte weniger als fünf Prozent aus.

Unter den erneuerbaren Energien sticht seit jeher die Bioenergie