

2. Energie im Kontext

2.1 Eine Welt aus Energie?

Der Begriff „Energie“ scheint heute allgegenwärtig und findet in unterschiedlichsten Kontexten Anwendung. Wenn Captain Kirk ihn ausspricht, befiehlt er die Beschleunigung des Raumschiffs Enterprise; Red Bull verspricht, dass uns beim Konsum des „Energydrinks“ Flügel wachsen; selbst Haare erhalten mit dem richtigen Spray die notwendige Energie, während man für die Haut eine entsprechende Creme verwenden sollte. Dass sogenannte Energieträger Energie enthalten, scheint logisch. Aber auch Nahrung besitzt einen physiologischen Brennwert, der als Energiegehalt bezeichnet wird. Schließlich vermitteln Esoterik und alternative Medizin Energie auf sonstigen Ebenen. Irgendwie scheinen wir überall von Energie umgeben zu sein und irgendwie scheint sie auch in uns zu wirken.

Tatsächlich ist das so, wenn man die Versprechungen des modernen Marketings einmal außen außen vorlässt. Energie ist eine grundlegende physikalische Größe im Universum. Alle dort ablaufenden Prozesse werden durch sie bestimmt, sei es in der Chemie, der Biologie oder der Physik und dies bereits auf atomarer bzw. molekularer Ebene. Den Ausgangspunkt auf der Erde bildet vor allem die natürliche Sonnenenergie. Diese entsteht durch die Fusion von Wasserstoff zu Helium. Diese Verschmelzung von zwei Atomkernen zu einem neuen Kern setzt Energie frei und dies ist der Grund, dass die Sonne Energie abstrahlt. Auf der Erdoberfläche kommen in unseren Breiten pro Quadratmeter und Jahr rund 1.000 kWh an. Strahlung ist aber nur eine Form der Energie. Physikalische Systeme können auch Arbeit leisten oder Wärme abgeben. Ich beschränke mich hier auf die für unsere Thematik relevanten Aspekte. Wichtig ist vor allem, dass die in einem System enthaltene Gesamtmenge an Energie unverändert bleibt. Folglich kann Energie weder erzeugt oder verbraucht noch gespart oder verschwendet werden. Diese im umgangssprachlichen Gebrauch üblichen Begriffe haben immer einen wirtschaftlichen Hintergrund, aber niemals einen naturwissenschaftlichen. Es geht hier nur um Wirkungsgrade und damit letztlich um Kosten. Dennoch sollen sie aus Gründen der Einfachheit auch in dieser Studie Verwendung finden.

Energie liegt in unterschiedlichen Formen vor und kann größtenteils zwischen diesen umgewandelt werden. Außerdem kann sie aus einem System heraus oder in dieses hinein transportiert werden. Diese Energieerhaltung gehört zu den wichtigsten naturwissenschaftlichen Prinzipien. Grundlegende Formen von Energie sind neben der thermischen die chemische, die elektrische, die kinetische und die potenzielle Energie. Als kinetische Energie bezeichnet man die von Körpern im Bewegungszustand, etwa eines Kreisels. Potenzielle Energie besitzen Körper innerhalb eines Kraftfeldes. Das beste Beispiel dafür ist die Erdanziehungskraft. Hier interes-

siert jedoch vor allem die thermische Energie bzw. Wärmeenergie als diejenige, die energiewirtschaftlich von Bedeutung ist, denn sie wird vorrangig in Nutzenergie wie Elektrizität umgewandelt. Bei der Verbrennung fossiler Energieträger wird der Kohlenstoffgehalt der Brennstoffe mit Sauerstoff unter Flammenbildung oxidiert, sodass Wärme und Strahlung entstehen. Eine Rückumwandlung in andere Energieformen ist hier natürlich nicht möglich.

In der Technik bezieht sich der Begriff der Energie immer auf die Fähigkeit eines Systems, Arbeit zu leisten. Durch diese Arbeit wird die Energie dann zwischen verschiedenen Energieformen umgewandelt. Das Beispiel des modernen Kraftwerks verdeutlicht dies. Durch die Verbrennung von Kohle im konventionellen Kraftwerk entsteht im Brennraum zunächst Wärme, die dann Wasser in einem Kessel erhitzt. Der dabei entstehende Dampf wird durch die Erhöhung des Drucks im Kessel noch weiter aufgeheizt und dann von hier auf die Turbine geleitet. Diese treibt einen Generator an, der die Elektrizität erzeugt. Ganz ähnlich funktionieren Flugzeugturbinen, deren Brenngasausstoß das Flugzeug nach vorne bewegt. Wir haben es hier also mit einer mehrfachen Umwandlung von Energie zu tun. Das Beispiel verdeutlicht auch, warum es hier zu sogenannten Energieverlusten kommt. Das System ist eben nicht von seiner Umwelt abgeschlossen, sondern gibt an allen Stellen Energie an diese ab. Dies kann etwa in Form von Wärmestrahlung oder von Reibung geschehen. Aus diesem Grund ist es auch nicht möglich, ein Perpetuum Mobile zu bauen, eine Maschine, die nach der Inangasetzung mit einmaliger und ohne weitere Energiezufuhr unendlich weiterläuft.

Der Begriff der „Energie“ im heute verwendeten Sinn ist keine 200 Jahre alt.¹¹ Er ersetzte nach und nach im naturwissenschaftlichen, technischen und wirtschaftlichen Bereich den älteren Begriff der „Kraft“. Dieser ist im allgemeinen Sprachgebrauch jedoch weiterhin als Synonym für „Energie“ gebräuchlich. Zur Beschreibung aller vorindustriellen Zeitalter ist dies auch durchaus richtig, denn das, was wir heute als Energie bezeichnen, hieß seinerzeit immer „Kraft“. Erst die moderne Physik des 19. Jahrhunderts führte zu einer weiteren Ausdifferenzierung. Bis dahin bezeichnete der in der griechischen Antike geprägte und auf die Philosophie beschränkte Begriff die sogenannte lebendige Wirklichkeit und Wirksamkeit, die Tatkraft und das Wirkungsvermögen bzw. auch die Charakterkraft. Nun aber bezeichnete er auf einmal die Fähigkeit, Arbeit zu leisten. Diese Neuinterpretation oder auch neue Nutzung des Begriffs war gerade das Ergebnis der im Mühlenbau¹² des Mittelalters begonnenen Entwicklung, für die man nun zunehmend entsprechende naturwissenschaftliche Erklärungen besaß. Die Kraft wiederum wurde jetzt physikalisch als Ursache von Bewegungsänderungen beweglicher Körper in einem gewissen Zeitraum oder als Ursache von Formveränderungen eines durch andere Kräfte festgehaltenen Körpers definiert.

¹¹ Siehe zur Zeit davor: Reith: Energie.

¹² Siehe hierzu Abschnitt 2.3.1.

2.2 Energie als Grundlage des Technotops

Kaum etwas prägt unser Leben so sehr wie die Technik. Wir leben in einem Technotop, unsere Lebenswelt ist vollständig durch Technik geschaffen und durchdrungen, unsere Kultur und unser Lebensstil wären ohne sie nicht denkbar.¹³ Technik ist längst eine Selbstverständlichkeit und wir benutzen sie, ohne groß über ihre Entstehungszusammenhänge und Wirkungsweisen nachzudenken, sind wir es doch gewohnt, dass sie jederzeit und überall verfügbar ist. Technische Hintergründe scheinen hier uninteressant. Dies gilt sowohl für die klassischen analog arbeitenden technischen Objekte als insbesondere auch für die digitalen und vernetzten, die seit rund drei Jahrzehnten immer weitere Bereiche unseres Lebens erobern. Wichtig ist allein, dass sie funktionieren. Tun sie das einmal nicht, stehen wir vor Problemen.

Möglich wird dieser Lebensstil allein durch Energie. Sie ist der Motor der modernen Welt und ihre räumlich wie zeitlich unbegrenzte Verfügbarkeit kann als ihre wohl wichtigste Grundlage angesehen werden. Ausschlaggebend ist die Fähigkeit, diese Verfügbarkeit in ihren Erscheinungsformen Licht, Kraft und Wärme jederzeit zu gewährleisten. Darin unterscheidet sich das „Energiezeitalter“, als das sich unsere Epoche wohl am besten charakterisieren lässt, von allen vorangegangenen Epochen. Dabei ist dieses Energiezeitalter nur wenig mehr als ein Jahrhundert, vielleicht 150 Jahre alt. Eine eindeutige Abgrenzung ist weder notwendig noch möglich und wie viele Aspekte der Geschichtswissenschaft eine Frage der Interpretation. In ihren Auswirkungen jedoch ist die Möglichkeit zur uneingeschränkten Nutzung von Energie als vielleicht größter Umbruch in der Geschichte der Menschheit anzusehen. Es lassen sich in technikhistorischer Perspektive sicherlich zahlreiche bahnbrechende Entwicklungen nennen, die epochale Umbrüche erzeugten. Zu erwähnen sind in diesem Kontext etwa das Rad im vierten Jahrtausend vor Christus oder der Buchdruck mit beweglichen Lettern Mitte des 15. Jahrhunderts. In ihrer Breiten- und Tiefenwirkung ist jedoch diese Energierevolution kaum hoch genug einzuschätzen, denn Umfang, Intensität und Geschwindigkeit ihrer Wirkungen und Potenziale scheinen unvergleichlich.

Deutlich erkennbar wird dies beispielsweise im Verhältnis von Weltbevölkerung und Weltwirtschaftsleistung. So wuchs die Bevölkerung von rund 1 Mrd. im Jahr 1820 auf 7,6 Mrd. in 2018, während sich zugleich das Produktionsvermögen überproportional vervielfachte. Das Ausmaß dieser Entwicklung kann angesichts unzureichender Daten zur wirtschaftlichen Entwicklung vor allem für das 19. Jahrhundert nur geschätzt werden, doch dürfte ein Faktor von 10 pro Kopf der Bevölkerung nicht zu hoch liegen. Den ausschlaggebenden Impuls dafür lieferte die Energie, denn nur ihr verstärkter Einsatz beschleunigte sämtliche wirtschaftlichen Abläufe, beflügelte technische Innovationen und verbesserte insgesamt den Lebensstandard. So bildete gerade der Übergang von den nachhaltigen, aber knappen natürlichen

¹³ Ropohl: Allgemeine Technologie, S. 15.

Energieträgern wie Holz, Wasserkraft und Windkraft hin zum in großen Mengen und jederzeit nutzbaren fossilen Energieträger Kohle den zentralen Faktor für die Industrielle Revolution.¹⁴ Zwischen 1820 und 1880 verdoppelte sich der weltweite Energieverbrauch von 380 Mrd. toe¹⁵ auf 769 Mrd. toe, während die Bevölkerung nur um etwa ein Viertel zunahm. Da die kohlebasierte Industrialisierung jedoch nur in einigen westeuropäischen Ländern wie England, Deutschland, Belgien und Frankreich sowie in den USA erfolgte, also von einem vergleichsweise geringen Gesamtbevölkerungsanteil getragen wurde, waren die Steigerungsraten des Energieverbrauchs in diesen erheblich höher. So vervielfachte sich hier etwa der Kohleverbrauch im selben Zeitraum. (vgl. Tab. 3, 4)

Die Industrielle Revolution begann im ausgehenden 18. Jahrhundert in England und erfasste nach den napoleonischen Kriegen sukzessive den europäischen Kontinent. Die Anfänge in Deutschland lassen sich in etwa auf die 1830er Jahre datieren. Mit der Industrialisierung war ein Wandlungsprozess verbunden, der innerhalb weniger Jahrzehnte die traditionelle, vorindustrielle Gesellschaft beseitigte. Als äußeres Kennzeichen dieser Entwicklung galt schon früh ein dauerhaftes, sich selbst tragendes Wirtschaftswachstum, das durch tiefgreifende technische, wirtschaftliche, soziale und politische Veränderungen ermöglicht wurde, diese aber zugleich auch animierte. Überall entstanden neue Wirtschaftszentren wie das Ruhrgebiet, das sich in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts aus einer ursprünglich landwirtschaftlich geprägten Region zum größten industriellen Ballungsraum Europas entwickelte. Als elementares Kennzeichen des neuen Zeitalters gilt die Herausbildung der gewerblichen Massenproduktion im Fabrikssystem.¹⁶

Tab. 3: Entwicklung des weltweiten Energieverbrauchs 1820–2018 in Mrd. toe, der Weltbevölkerung in Mrd. und des Pro-Kopf-Verbrauchs inkl. Nahrungsmittel in toe¹⁷

Jahr	Energieverbrauch	Veränderungsrate (%)	Weltbevölkerung	Veränderungsrate (%)	Pro-Kopf-Verbrauch
1820	390	-	1047	-	0,37
1830	422	8,2	1103	5,3	0,38
1840	467	10,7	1159	5,1	0,40
1850	522	11,8	1217	5,0	0,43
1860	591	13,2	1244	2,2	0,48
1870	653	10,5	1275	2,5	0,51

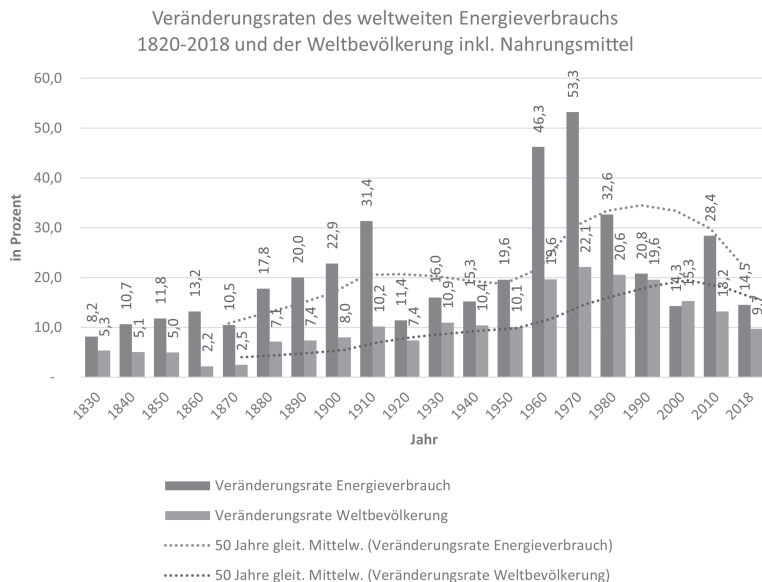
14 Umfassend dazu: Kiesewetter: Industrielle Revolution, 2004; Ziegler: Industrielle Revolution, 2005.

15 Erläuterung bei Tabelle 3.

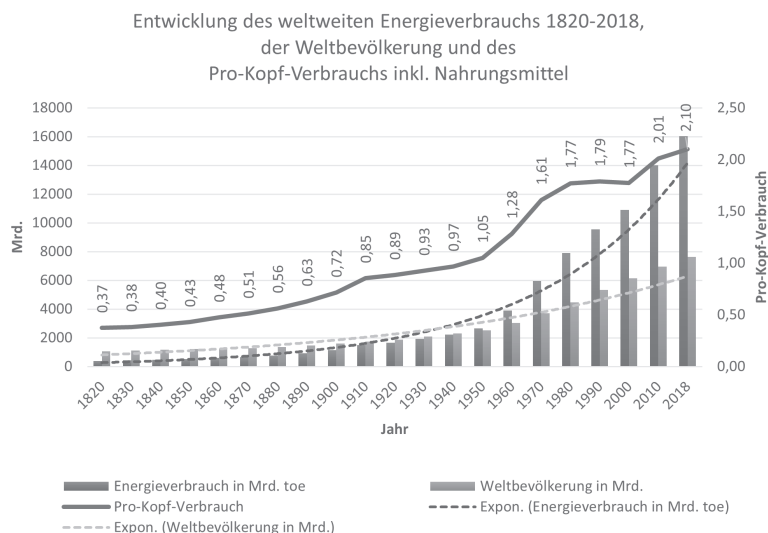
16 König: Massenproduktion und Technikkonsum, 1990, S. 427–441.

17 Fossile und nukleare Energieträger einschließlich Nahrungsmittel für Mensch und Tier. Eigene Zusammenstellung und Berechnung nach: Malanima, Paolo: World Energy Consumption. A Database 1820–2018, Tabellen A1, A2, S. 39 ff (energyhistory.org). Alle Werte gerundet. 1 toe entspricht ca. 42 GJ.

Jahr	Energie- verbrauch	Veränderungs- rate (%)	Welt- bevölkerung	Veränderungs- rate (%)	Pro-Kopf- Verbrauch
1880	769	17,8	1366	7,1	0,56
1890	923	20,0	1467	7,4	0,63
1900	1134	22,9	1585	8,0	0,72
1910	1490	31,4	1746	10,2	0,85
1920	1660	11,4	1875	7,4	0,89
1930	1926	16,0	2080	10,9	0,93
1940	2220	15,3	2297	10,4	0,97
1950	2655	19,6	2530	10,1	1,05
1960	3883	46,3	3027	19,6	1,28
1970	5951	53,3	3696	22,1	1,61
1980	7894	32,6	4456	20,6	1,77
1990	9536	20,8	5329	19,6	1,79
2000	10898	14,3	6145	15,3	1,77
2010	13992	28,4	6959	13,2	2,01
2018	16023	14,5	7633	9,7	2,10



2. Energie im Kontext



Tab. 4: Anteil der Energieträger am weltweiten Energieverbrauch 1820–2018 in %¹⁸

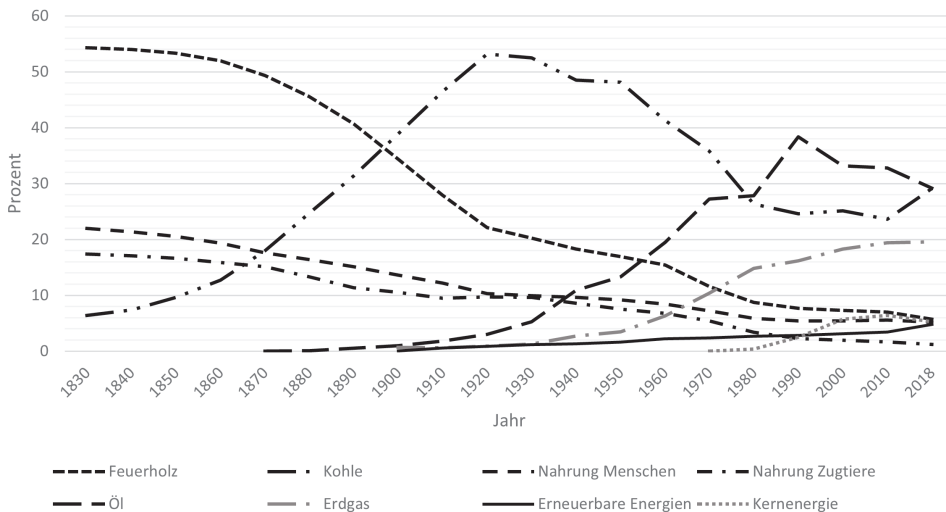
Jahr	Nahrung Menschen	Feuerholz	Nahrung Zugtiere	Kohle	Öl	Erdgas	Erneuerbare Energien ¹⁹	Kern-energie
1820	22,0	54,3	17,4	6,4	-	-	-	-
1830	21,4	54,0	17,1	7,4	-	-	-	-
1840	20,5	53,3	16,6	9,6	-	-	-	-
1850	19,3	52,0	15,9	12,7	-	-	-	-
1860	17,6	49,3	15,1	18,0	0,01	-	-	-
1870	16,4	45,6	13,3	24,7	0,09	-	-	-
1880	15,1	40,7	11,4	31,4	0,5	-	-	-
1890	13,6	34,4	10,5	38,9	1,0	0,7	0,06	-
1900	12,2	27,9	9,5	46,5	1,8	0,6	0,6	-
1910	10,3	22,1	9,7	53,2	3,0	0,9	0,9	-
1920	9,9	20,2	9,6	52,5	5,3	1,3	1,2	-
1930	9,6	18,3	8,6	48,5	10,9	2,7	1,3	-
1940	9,2	16,9	7,5	48,1	13,3	3,5	1,6	-
1950	8,4	15,4	6,8	41,3	19,5	6,3	2,2	-
1960	7,2	11,6	5,4	35,8	27,2	10,4	2,4	0,02
1970	5,9	8,7	3,4	26,3	27,8	14,8	2,7	0,4

18 Fossile und nukleare Energieträger einschließlich Nahrungsmittel für Mensch und Tier. Eigene Zusammenstellung und Berechnung nach: Malanima: World Energy Consumption, Tabelle A5, S. 52 ff. Alle Werte gerundet.

19 Wasserkraft, Windkraft, Solarenergie, Erdwärme und andere, ohne Brennholz.

Jahr	Nahrung Menschen	Feuerholz	Nahrung Zugtiere	Kohle	Öl	Erdgas	Erneuerbare Energien	Kern-energie
1980	5,4	7,7	2,3	24,6	38,4	16,2	2,8	2,5
1990	5,4	7,3	2,0	25,1	33,2	18,3	3,1	5,7
2000	5,6	7,0	1,7	23,6	32,8	19,4	3,4	6,4
2010	5,2	5,7	1,2	29,1	29,2	19,6	4,8	5,3
2018	5,1	5,2	1,1	26,7	28,6	20,6	8,3	4,6

**Anteil der Energieträger am weltweiten Energieverbrauch
1820-2018**



Charakteristische Faktoren des Fabriksystems waren neben dem Maschineneinsatz Arbeitsteiligkeit, Zentralisierung, disziplinierte Lohnarbeit und schließlich die hohe Kapitalintensität. Eine herausragende Bedeutung besaß vor diesem Hintergrund die verstärkte Nutzung von Rohstoffen wie Eisenerzen und eben neuen, fossilen Energieträgern wie Steinkohle, deren Förderung und Verarbeitung bald den Motor der Industrialisierung darstellten. Dazu kam die Eisenbahn, die nicht nur die Erzeugnisse von Bergwerken, Eisenhütten und Stahlwerken transportierte, sondern zugleich zu deren wichtigstem Kunden avancierte. Die Grundlage dieses sogenannten „Magischen Dreiecks“ um des von ihm verursachten langjährigen selbsttragenden Aufschwungs bildete in allen aufkommenden Industriestaaten die Steinkohle, denn mit ihrer zunehmenden Förderung war Energie erstmals in der Geschichte nicht mehr limitiert. Etwa gleichzeitig begannen die Naturwissenschaften, das Phänomen Energie zu durchdringen und aus ihren Erkenntnissen erste allgemeine Leitsätze abzuleiten. Parallel dazu setzte sich die Dampfmaschine als neue Kraftmaschine zum Antrieb von Arbeitsmaschinen durch. Leistungsfähige Anlagen ersetzten in vielen

Bereichen nicht nur die Muskelkraft, sondern eröffneten in Verbindung mit präzisen maschinellen Fertigungsverfahren ungeahnte Dimensionen der Massenproduktion. Weiterhin stieg die Kohle seit den 1860er Jahren zum zentralen Grundstoff der chemischen Industrie auf. Auch hier sind selbstverständlich die zahlreichen gegenseitigen Synergien zu betonen.

Der US-amerikanische Kulturhistoriker Lewis Mumford prägte für das energiebasierte neue Weltsystem schon in den 1960er Jahren den Begriff der „Megamaschine“.²⁰ Er bewertete vor dem Hintergrund der Entwicklungen in seinem Heimatland als erster den durch Energie verursachten Umbruch als Ausgangspunkt für die Entstehung eines neuen Machtkomplexes, den er als „Pentagon of Power“ bezeichnete. Der Begriff eignete sich deswegen so hervorragend, weil im Englischen sämtliche einfließenden Aspekte mit dem Buchstaben „P“ beginnen und „Power“ doppeldeutig gleichermaßen für Energie wie für Macht steht. So bildeten zwar in vorindustriellen Epochen Profit und die daraus folgende Macht mit entsprechendem Prestige wichtige Grundlagen des Gesellschaftssystems. Doch erst die Ergänzung des Faktors Energie im Sinne der Primärenergie erzeugte eine quasi unfassbare Dynamik im Bereich der wirtschaftlichen Produktivität und damit scheinbar unbegrenzter Möglichkeiten.²¹ Aus dem alten Dreieck war das neue Pentagon geworden – und den Ausschlag gab die Energie. Ihre Beschleunigungsimpulse führten zur „Verkürzung von Zeit und Raum“.

Ein herausragendes Beispiel für diese Entwicklung ist das erste Transatlantikkabel zwischen Europa und den USA, das 1866 in Betrieb genommen wurde.²² Seine Verlegung übernahm der Segeldampfer „Great Eastern“, das nach seinem Stapellauf 1858 bis 1901 größte jemals gebaute Schiff. Sowohl das Kabel als auch das Schiff konnten nur mit den neuen fertigungstechnischen Methoden des Industriezeitalters produziert werden. Die mit dem Kabel geschaffene elektrisch-telegrafische Verbindung ermöglichte eine minuten-, bald sekundenschnelle Verbindung zwischen beiden Kontinenten mit entsprechenden Auswirkungen auf die Geschäftsbeziehungen. Das moderne Kommunikationszeitalter hatte endgültig begonnen und mit ihm die erste Phase der Globalisierung.²³ Zur Jahrhundertwende war die Welt schließlich längst von einem Telegrafienetz umspannt. (Abb. 1) Bis heute gilt der rasche Austausch von Informationen als neben dem günstigen Massentransport wohl wichtigste Grundlage der globalisierten Weltwirtschaft, nur dass sich mit dem Internet das Kommunikationssystem gewandelt hat – nicht aber seine energetische Basis.²⁴

20 Mumford: *Mythos der Maschine*, S. 219–225.

21 Ebd., S. 523–528.

22 Hagemeyer: *Information und Kommunikation*, S. 421–423.

23 Osterhammel/Petersson: *Geschichte der Globalisierung*, S. 63 ff.

24 Umfassend dazu: Werber: *Bagatellisierung des Raums*.

Abb. 1: Das weltweite Telegrafienetz Anfang des 20. Jahrhunderts (Ausschnitt)²⁵

Diese im 19. Jahrhundert angestoßene energetische Basistendenz hält bis heute an, wobei sich zwar der Energieträgermix und das wirtschaftliche Produktionsspektrum mit dem in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts ständig anwachsenden Dienstleistungssektor erweiterten und zwischenzeitlich mehrfach veränderten, nicht aber deren fossile Grundlagen. So sind aktuell Braunkohle, Mineralöl und Erdgas als neben Steinkohle immer noch mit Abstand wichtigste Einsatzstoffe bzw. Primärenergieträgern zur „Energieerzeugung“ dieses Ursprungs. Weiterhin hält die Wachstumstendenz beim Energieverbrauch nicht nur unverändert an, sondern zeigt zugleich exponentielle Raten. Zwischen 1880 und 1920 kam es in Weltperspektive zu einer weiteren Verdoppelung auf nun 1.660 Mrd. toe. Für die nächste Verdoppelung wurden nun nicht mehr 40 Jahre benötigt, sondern nur noch rund 25, denn bereits Mitte der 1950er Jahre wurde der entsprechende Wert erreicht. Außerdem markiert dieses Jahrzehnt mit einem Zuwachs von rund 50 % das in dieser Hinsicht bislang mit Abstand stärkste. Diesem Trend entsprechen auch die beiden weiteren Jahrzehnte bis 1980 mit einer erneuten Verdoppelung von rund 3.900 Mrd. toe auf 7.900 Mrd. toe in einer jetzt auf 20 Jahre verkürzten Phase. Danach ist in der Entwicklung eine gewisse Abschwächung erkennbar, denn für die nächste Verdoppelung benötigte die Welt wieder etwa 25 Jahre. 2018 wurde dann erstmals die Grenze von 16.000 Mrd. toe überschritten. Dies entspricht dem etwa 20fachen Wert von 1880, dem zehnfachen Wert von 1920 und dem sechsfachen Wert von 1950. Innerhalb der vergangenen 100 Jahre ist damit der Weltenergieverbrauch um den Faktor 10 gewachsen. Die

²⁵ Quelle: Meyers Konversationslexikon, Bd. 19, S. 386. Die Karte zeigt eindrucksvoll die dichtmaschige Verbindung zwischen Europa und den USA, aber auch zwischen England und Indien.

Weltbevölkerung hat sich im selben Zeitraum jedoch nur von rund 1,9 Mrd. auf 7,6 Mrd. vervierfacht.

Die Kohle verzeichnete als *der* Primärenergieträger der Industriellen Revolution rasante Steigerungsraten. Nach zunächst verhaltenem Auftakt gewann die Entwicklung seit den 1850er Jahren an Schwung. Zwischen 1850 und 1870 verdoppelte sie ihren Anteil an der Weltenergieversorgung auf knapp ein Viertel und erreichte kurz vor dem Ersten Weltkrieg mit einem Anteil von 53 % ihren Bedeutungshöhepunkt. Dieses Niveau konnte sie angesichts des seit den 1920er Jahren mit großer Dynamik aufkommenden Erdöls nicht halten, doch blieb sie noch fast weitere vier Jahrzehnte mit Werten oberhalb von 40 % nicht nur führend, sondern auch dominant. In den 1960er Jahren begann dann der Niedergang, bis 1970 das Mineralöl erstmals die Position des wichtigsten Primärenergieträgers weltweit übernahm und die Kohle mit einem Anteil von rund 28 % knapp überholte. Während seither die Bedeutung der Kohle in etwa gleichgeblieben ist und rund ein Viertel des Bedarfs deckt, verzeichnete das Erdöl weitere Zuwächse bis zum Höhepunkt 1980, als ein Anteil von 38,4 % erreicht wurde. Seither ist ein auf die Reaktionen der westlichen Industrienationen nach den Ölkrisen der 1970er Jahre zurückzuführender Abwärtstrend zu verzeichnen, der jedoch nicht zum Verlust der Rolle als wichtigster Energieträger führte, die sie mit einem Anteil von aktuell rund 28 % nach wie vor innehat. Die Verluste des Erdöls resultierten vor allem aus dem Aufstieg des Erdgases aus dem Nichts zum dritten Standbein der Weltenergieversorgung. Noch in den 1950er Jahren in Europa nur eine Randerscheinung, konzentrierte sich die Förderung bis dahin auf die USA. Mit der Entdeckung großer Vorkommen in den Niederlanden und in Russland änderte sich die Situation, denn Erdgas war nun auch in Europa in großen Mengen verfügbar. Hatte das Erdgas im ersten vollständigen Nachkriegsjahrzehnt noch eine Steigerung seines Anteils von rund 6 % auf 10 % erreicht, kam es seither zu einem weiteren stetigen Anstieg auf heute knapp 21 %. Die seit den 1970er Jahren etablierte Kernenergie hatte ihren Höhepunkt zur Jahrtausendwende mit 6,4 %, während die Erneuerbaren Energien erst in dieser Zeit begannen, eine signifikante Rolle zu spielen.

Bis in die späten 1970er Jahre war auch in der Bundesrepublik Deutschland ein ständig wachsender Primärenergieverbrauch das typische Merkmal der weiteren Entwicklung. (Tab 5, 6) Als Land mit einem auf fossilen Energieträgern basierenden Versorgungssystem war allerdings deren Anteil erheblich höher als der weltweite Durchschnitt. Der Standard entsprach jedoch dem anderer westlicher Industrienationen. Im Mittelpunkt der Energieversorgung stand, wie erwähnt, zunächst die Steinkohle. Hier wurde 1957 am Vorabend der Kohlenkrise mit einem Verbrauch von 137 Mio. t SKE der absolute Höhepunkt erreicht. Bis 1963 blieb der Verbrauch auf einem ähnlich hohen Niveau, um dann bis 1975 auf die Hälfte des Rekordwertes oder rund 66 Mio. t SKE knapp 20 Jahre zuvor stark abzusinken. Bedingt durch die Ölkrisen und entsprechende Fördermaßnahmen der Bundesregierung kam es in der zweiten Hälfte der 1970er Jahre zu einer gewissen Renaissance der Steinkoh-

le und einem erneuten Anstieg auf fast 80 Mio. t SKE bis 1985. Seit den 1990er Jahren reduzierte sich der Verbrauch dann sukzessive auf heute noch etwa 30 Mio. t SKE. Der Bedarf wurde vor dem Hintergrund des geordneten Rückgangs der Inlandsproduktion zunehmend durch Importe gedeckt.²⁶ Der Braunkohleneinsatz blieb zwischen 1950 und 1990 mit rund 30 Mio. t SKE relativ konstant, um sich dann mit der Wiedervereinigung der beiden deutschen Staaten 1990 aufgrund der braunkohlenbasierten Energieversorgung der DDR auf 110 Mio. t SKE fast zu vervierfachen. Durch den raschen Umbau des Systems auf das westliche Konzept pendelte sich der Verbrauch dann über rund zwei Jahrzehnte im Bereich von 50 Mio. t SKE ein und verzeichnete in den vergangenen Jahren einen starken Rückgang auf noch 30 Mio. t SKE.

Tab. 5: *Primärenergieverbrauch in der Bundesrepublik Deutschland 1950–2020 in Mio. t. SKE²⁷*

Jahr	Mineralöl	Erdgas	Steinkohle	Braunkohle	Erneuerbare Energien ²⁸	Kernenergie ²⁹	Gesamt ³⁰
1950	6,3	0,1	98,7	20,6	6,2	-	135,5
1953	9,3	0,1	114,0	23,8	5,5	-	155,5
1957	21,7	0,5	137,1	28,9	5,6	-	196,1
1960	44,4	0,7	128,3	29,2	6,6	-	211,4
1963	80,8	1,5	126,8	32,4	5,3	0,1	248,8
1966	121,9	3,9	102,2	28,2	8,3	0,1	266,6
1969	160,5	12,8	101,7	29,9	6,6	1,7	315,0
1972	196,4	30,1	83,4	31,0	8,1	3,1	354,3
1975	181,0	48,7	66,5	34,4	7,8	7,1	347,7
1978	203,3	59,8	69,2	35,9	6,6	11,8	389,0
1981	167,5	59,3	78,3	39,8	8,6	17,6	374,1
1984	158,5	58,8	79,5	38,4	6,9	30,4	376,5
1987	163,3	65,3	75,6	31,2	7,2	42,1	388,0

26 Siehe hierzu detailliert Abschnitt 3.1.4.

27 1 kg SKE entspricht 7.000 kcal bzw. 8,141 kWh bzw. 29.308 kJ oder 29,3 GJ. Angaben in Primärenergiebilanzen aus Gründen der Vergleichbarkeit in SKE. Zusammenstellung und eigene Berechnung nach: Jahrbuch des deutschen Bergbaus bzw. Jahrbuch für Bergbau, Energie, Mineralöl, Chemie, diverse Jahrgänge, bzw. Jahrbuch der europäischen Energie- und Rohstoffwirtschaft, diverse Jahrgänge; Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e. V. (Hg.): Auswertungstabellen zur Energiebilanz für die Bundesrepublik Deutschland 1990–2012, Berlin 2013. Alle Werte gerundet.

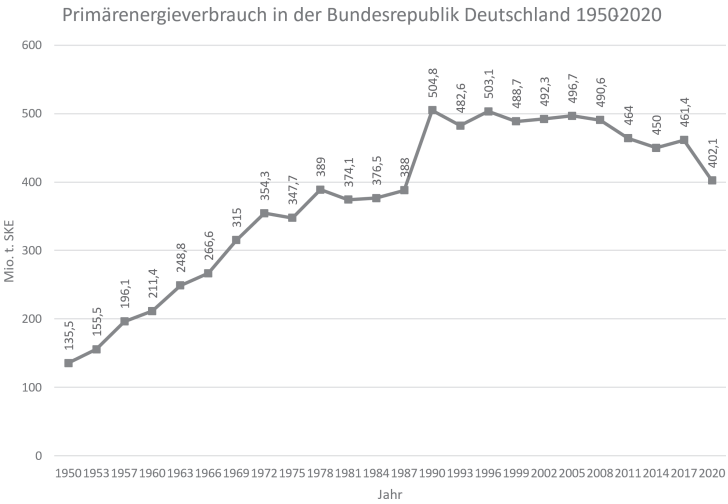
28 Bis 1987 Wasserkraft, danach Wasserkraft, Windenergie, Photovoltaik. Für 1990 und 1993 ist keine exakte Angabe möglich, da erneuerbare Energien statistisch unter „Sonstige“ ausgewiesen wurden.

29 Erste Einspeisung 1961.

30 Inklusive den nicht gesondert ausgewiesenen sonstigen Brennstoffen wie Holz, Torf, Müll, Klärgase usw. sowie des Außenhandelsaldos Kokereigas.

2. Energie im Kontext

Jahr	Mineralöl	Erdgas	Steinkohle	Braunkohle	Erneuerbare Energien	Kern- energie	Gesamt
1990	178,0	78,2	78,7	109,2 ³¹	ca. 7	49,4	504,8
1993	195,1	86,0	72,7	67,4	ca. 7	49,1	482,6
1996	198,2	106,9	71,3	57,6	9,2	60,2	503,1
1999	191,0	102,7	67,1	50,3	13,3	63,3	488,7
2002	183,6	107,3	65,7	56,7	15,5	61,4	492,3
2005	176,3	110,9	61,7	54,4	26,3	60,7	496,7
2008	167,3	109,9	61,4	53,0	39,1	55,4	490,6
2011	154,4	99,3	58,5	53,4	49,9	40,2	464,0
2014	153,3	90,8	60,0	53,7	51,8	36,2	450,0
2017	159,4	107,8	51,3	51,4	62,1	28,4	461,4
2020	135,6	107,0	30,8	32,6	66,9	24,0	402,1



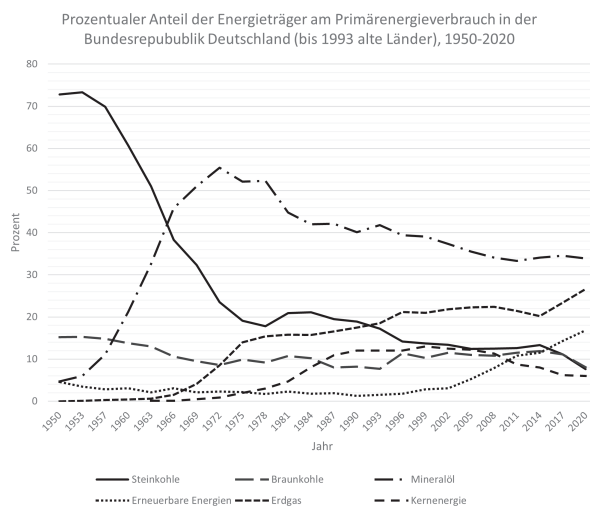
Tab. 6: Prozentualer Anteil der Energieträger am Primärenergieverbrauch in der Bundesrepublik Deutschland (bis 1993 alte Länder), 1950–2020³²

Jahr	Mineralöl	Erdgas	Steinkohle	Braunkohle	Erneuerbare Energien	Kern- energie
1950	4,7	0,0	72,8	15,2	4,6	-
1953	6,0	0,1	73,3	15,3	3,5	-
1957	11,1	0,3	69,9	14,8	2,8	-
1960	21,2	0,4	60,7	13,8	3,1	-

31 Wiedervereinigungseffekt.

32 Eigene Berechnung nach Tabelle 5. Alle Werte gerundet.

Jahr	Mineralöl	Erdgas	Steinkohle	Braunkohle	Erneuerbare Energien	Kernenergie
1963	32,6	0,6	51,0	13,0	2,1	0,1
1966	45,8	1,5	38,3	10,6	3,1	0,1
1969	51,0	4,1	32,3	9,5	2,1	0,5
1972	55,4	8,5	23,5	8,6	2,3	0,9
1975	52,1	14,0	19,1	9,9	2,2	2,0
1978	52,3	15,4	17,8	9,2	1,7	3,0
1981	44,8	15,8	20,9	10,7	2,3	4,7
1984	42,0	15,7	21,1	10,2	1,8	8,1
1987	42,1	16,6	19,5	8,0	1,9	10,9
1990	40,1	17,5	18,9	8,2	1,3	12,0
1993	41,8	18,5	17,2	7,7	1,5	12,0
1996	39,4	21,2	14,2	11,4	1,8	12,0
1999	39,1	21,0	13,7	10,3	2,8	13,0
2002	37,3	21,8	13,4	11,5	3,1	12,5
2005	35,5	22,3	12,4	11,0	5,3	12,2
2008	34,1	22,4	12,5	10,8	7,9	11,3
2011	33,3	21,4	12,6	11,5	10,8	8,7
2014	34,1	20,2	13,3	11,9	11,5	8,0
2017	34,5	23,4	11,1	11,1	14,3	6,2
2020	33,9	26,6	7,6	8,1	16,8	6,0



Demgegenüber stand der schnelle Aufstieg des Erdöls von der Bedeutungslosigkeit der frühen 1950er Jahre zum mit Abstand wichtigsten Primärenergieträger. Bis 1960

kam es zu einer Versiebenfachung auf 44 Mio. t. SKE. Bereits 1963 hatte sich diese Menge dann fast verdoppelt und bis 1966 auf 122 Mio. t SKE annähernd vervierfacht. Mitte der 1960er Jahre wurde die Steinkohle von ihrer Spitzenposition verdrängt. Den Höhepunkt erreichte der Erdölverbrauch 1978 mit 203 Mio. t. SKE, dem der zeittypische Rückgang um rund 20 % auf etwa 160 Mio. t SKE in 1984 und eine anschließende „Normalisierung“ folgten. Nach der Wiedervereinigung sorgte die Umstellung in der DDR dann dafür, dass in 1996 nochmals die Schwelle von 200 Mio. t. SKE nahezu erreicht wurde. Bis in die 2010er Jahre verlor das Erdöl dann nach und nach an Bedeutung, um seit 2005 relativ stabil rund ein Drittel der bundesdeutschen Primärenergieversorgung zu decken. Damit ist es in dieser Hinsicht auf den Stand von 1963 zurückgefallen. Den absoluten Bedeutungshöhepunkt erreichte das Mineralöl 1972 mit einem Anteil von fast 55 %.

Der Rückgang des Steinkohlen- und Ölverbrauchs hängt seit den ausgehenden 1960er Jahren eng mit dem Aufstieg der Konkurrenzenergie Erdgas zusammen. Sein Verbrauch stieg allein zwischen 1969 und 1972 von 13 Mio. t. SKE auf 30 Mio. t SKE, sodass sich der Marktanteil von 4 % auf 8,5 % erhöhte. Die Verdoppelung der abgesetzten Mengen bis 1978 spiegelte sich dann ebenfalls im Marktanteil, der nun bei 15,4 % lag. Das Erdgas profitierte jetzt von der Krise des Mineralöls und verzeichnete auf dessen Kosten weiterhin rasante Verbrauchssteigerungen. Für weitere positive Effekte sorgte die Wiedervereinigung mit den beschriebenen Auswirkungen. 2005 wurde mit 111 Mio. t. SKE ein absoluter Rekordwert verzeichnet und 2021 war der Verbrauch nur wenig geringer. Nachdem der Marktanteil des Erdgases sich seit Mitte der 1990er Jahre auf einem Niveau von rund 21 % eingependelt hatte, kam es in den vergangenen Jahren zu einem weiteren Anstieg und einem Maximum von rund 26 % in 2020. Das Erdgas profitierte hier nicht zuletzt von seiner im Vergleich zu allen anderen fossilen Energieträgern besten Umweltbilanz.

Eine besondere Rolle spielte in der Bundesrepublik Deutschland auch die Kernenergie. Nach ihrem Ausbau in den 1970er Jahren lag ihr Anteil am Gesamtverbrauch Ende des Jahrzehnts bei 4 %, um sich dann bis 1990 auf 12 % zu verdreifachen. Dieser Wert blieb bis zur „Energiewende“ der Bundesregierung in 2010 relativ stabil. Mit der zunehmenden Abschaltung von Kernkraftwerken in den vergangenen zehn Jahren halbierte sich die Bedeutung der Kernenergie. Anfang 2023 fielen mit dem Ende dieses Energieversorgungssektors dann auch die letzten 6 % weg. Angesichts der absoluten Dominanz des fossilen Systems blieben die bis in die 1990er Jahren nur durch die Wasserkraft repräsentierten Erneuerbaren Energien lange Zeit eine Randerscheinung. Mit dem Ausbau der Kapazitäten im Bereich der Wind- und Solarenergie gewannen sie zunächst langsam, im letzten Jahrzehnt jedoch immer schneller an Bedeutung. Nachdem 2010 erstmals ein Anteil von etwa 10 % erreicht worden war, erreichten die Erneuerbaren Energien in 2020 annähernd 17 %.

Der bundesdeutsche Primärenergieverbrauch kannte vor diesem Hintergrund lange Zeit nur eine Richtung. (Tab. 5, 6) Schon Anfang der 1950er Jahre wurden die Rekordzahlen aus der Zeit des Nationalsozialismus übertroffen. Das Wirtschaftswunder

führte bis 1966 in 15 Jahren zu einer Verdoppelung des Verbrauchs auf 267 Mio. t. SKE. Darauf folgte bis Ende der 1970er ein weiterer Anstieg auf 390 Mio. SKE oder um nochmals 30 %. Dieser Wert blieb in den 1980er Jahren weitgehend unverändert. Die Wiedervereinigung sorgte mit dem Anschluss von weiteren 18 Mio. Verbrauchern für einen Sprung auf die Marke von rund 500 Mio. t SKE. Auch diese Menge blieb zunächst relativ konstant, um dann mit der Wirtschafts- und Finanzkrise ab 2008 um etwa 10 % einzubrechen. Auch bedingt durch die Bemühungen zur Energieeinsparung hielt sich diese Tendenz. Der Rückgang auf 400 Mio. t SKE in 2020 war pandemiebedingt und ist daher als Sonderphänomen ohne besondere Nachhaltigkeit einzustufen.

Interessant erscheint in diesem Kontext vor allem die Entwicklung des Pro-Kopf-Verbrauchs in der Bundesrepublik.³³ Dieser lag 1950 mit 90 GJ in etwa auf dem Stand des späten Kaiserreichs und nahm bis Mitte der 1950er Jahre auf rund 120 GJ zu. Es folgte ein auch durch die Ölkrisen der 1970er Jahre nur kurz ausgebremschter systematischer Anstieg auf einen Rekordwert von 200 GJ in 1979. Dieses hohe Niveau blieb zunächst weitgehend erhalten, denn der Durchschnitt der 1980er Jahre lag nur um rund 5 % darunter. Bis 2008 verharrte der Verbrauch schließlich im Bereich zwischen 170 GJ und 180 GJ, um bis 2018 in den Bereich zwischen 160 GJ und 170 GJ zu sinken. 2019 wurde mit 156 GJ erstmals die Marke von 160 GJ unterschritten. 2020 reduzierte sich der Pro-Kopf-Verbrauch analog zum Gesamtverbrauch pandemiebedingt auf 145 GJ. Zwischen 2009 und 2019 war damit ein jährlicher durchschnittlicher Rückgang von gerade 0,4 % zu verzeichnen.

Der Anteil der Bundesrepublik am Weltenergieverbrauch sank vor diesem Hintergrund seit Mitte der 1960er Jahre bis heute systematisch. (Tab. 7) Erreichte die Industrienation hier zu dieser Zeit 6,9 %, waren es zehn Jahre später noch 5,5 %. Nun wirkten sich das wirtschaftliche Wachstum der Schwellenländer und die Zunahme der Weltbevölkerung verstärkt aus. Bis 2000 sank der Wert auf 3,6 %. Aktuell beträgt der Anteil der Bundesrepublik noch etwa 2,1 % mit weiter sinkender Tendenz.

Tab. 7: Entwicklung des Primärenergieverbrauchs weltweit und in der Bundesrepublik Deutschland 1965–2020 in Exajoule³⁴

Jahr	Welt	Veränderungsrate (%)	Bundesrepublik	Veränderungsrate (%)	Anteil der Bundesrepublik am Weltverbrauch (%)
1965	155	-	10,7	-	6,9
1970	204	31,6	13,0	21,5	6,4
1975	240	17,6	13,5	3,8	5,6

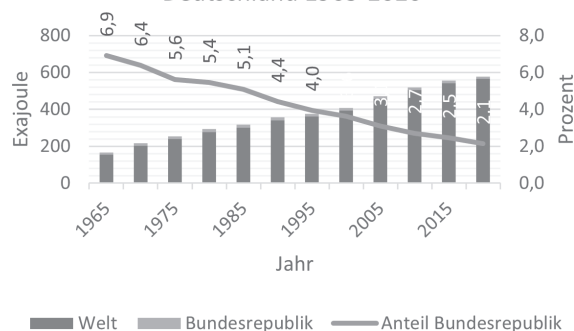
33 BP SRWE 2021. Siehe auch: <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Infografiken/Energie/Energiedaten/Internationaler-Energiemarkt/energiedaten-int-energiemarkt-48.html>, letzter Aufruf 7.8.2021.

34 Eigene Zusammenstellung und Berechnung nach BP SRWE 2021. Alle Werte gerundet.

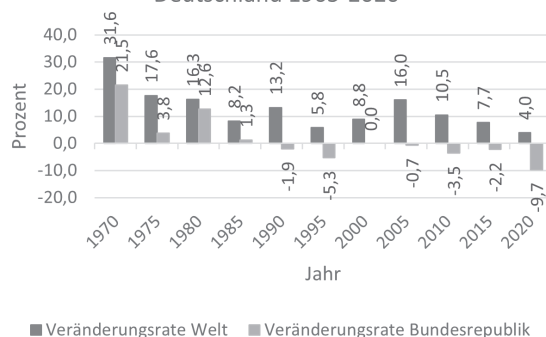
2. Energie im Kontext

Jahr	Welt	Veränderungsrate (%)	Bundesrepublik	Veränderungsrate (%)	Anteil der Bundesrepublik am Weltverbrauch (%)
1980	279	16,3	15,2	12,6	5,4
1985	302	8,2	15,4	1,3	5,1
1990	342	13,2	15,1	-1,9	4,4
1995	362	5,8	14,3	-5,3	4,0
2000	394	8,8	14,3	0,0	3,6
2005	457	16,0	14,2	-0,7	3,1
2010	505	10,5	13,7	-3,5	2,7
2015	544	7,7	13,4	-2,2	2,5
2020	566	4,0	12,1	-9,7	2,1

Entwicklung des Primärenergieverbrauchs weltweit und in der Bundesrepublik Deutschland 1965-2020



Veränderung des Primärenergieverbrauchs weltweit und in der Bundesrepublik Deutschland 1965-2020



In der Gesamtbetrachtung ist damit zwar eine stark rückläufige Bedeutung der Bundesrepublik beim weltweiten Primärenergieverbrauch zu konstatieren. Diese ist jedoch auf dessen insgesamt ungebrochenen Wachstumstrend zurückzuführen und nicht auf eine besondere Einsparleistung im Bundesgebiet. Im Gegenteil ist eine seit rund 30 Jahren andauernde Phase einer Stagnation auf hohem Niveau bzw. eines nur langsamen Rückgangs festzustellen, die anfangs vor allem durch den Umbau der DDR-Energiewirtschaft als Sondereffekt getragen wurde und erst in den letzten zehn Jahren eine feste Tendenz erreichte. Betrachtet man die Energieintensität der bundesdeutschen Volkswirtschaft, also das Verhältnis der Entwicklung von Bruttoinlandsprodukt und Primärenergieverbrauch, sind dagegen enorme Effizienzsteigerungen erkennbar. (Grafik 1) Immerhin stieg das Bruttoinlandsprodukt zwischen 1950 und 1989 von 50 Mrd. Euro auf 1,2 Billionen Euro (umgerechnet) und damit um den Faktor 24, während sich der Energieverbrauch sich noch nicht einmal vervierfachte.³⁵ Zwischen 1992 und 2019 folgte eine Verdoppelung des Bruttoinlandsprodukts von rund 1,7 Billionen Euro auf rund 3,4 Billionen Euro bei einem Energieverbrauchsrückgang von etwa 10 %. Die seit dem 19. Jahrhundert gültige Korrelation von Wirtschaftswachstum und wachsendem Energieverbrauch ist damit endgültig aufgehoben, nach dem in den 1980er Jahren bereits erste Ansätze in diese Richtung erkennbar wurden.

Grafik 4: Entwicklung der Energieintensität der deutschen Wirtschaft, 1850–2010 in Megajoule pro 1.000 Geary-Khamis-Dollar von 1990³⁶



35 Quelle: Statistisches Jahrbuch der Bundesrepublik Deutschland 2020. Angaben in Euro zu jeweiligen Preisen.

In Deutschland kam es Ende der 1940er Jahre durch die Wiederinbetriebnahme alter Produktionsstrukturen zunächst zu einem Anstieg der Energieintensität auf Werte der 1920er Jahre. Schon 1950 setzte dann die bis heute ungebrochene Phase eines kontinuierlichen Rückgangs ein. Ausschlaggebend dafür war zunächst die Modernisierung der Produktionsstrukturen während der Wirtschaftswunderjahre. Dieser Prozess setzte sich bis heute unvermindert fort und wurde seit den 1970er Jahren durch Effizienzverbesserungen im privaten Sektor, also im Bereich der Heizung, der Beleuchtung und der Haushaltsgeräte, gestützt. Dazu kam der Wandel der Wirtschaftsstruktur von der Schwerindustrie hin zum Dienstleistungssektor und dies in Kombination mit dem Aufstieg der neuen Energieträger Mineralöl und Erdgas. Dies gilt für alle westlichen Industrienationen und in abgeschwächter Form wohl auch für die sogenannten Schwellen- und Entwicklungsländer.³⁷ In weltweiter Perspektive ist der Energiehunger allerdings ungestillt, denn das allgemeine Wirtschaftswachstum und die zunehmende Weltbevölkerung überkompensieren den Intensitätsrückgang.

2.3 Energiewenden

Im Jahr 2010 rief die Bundesregierung in Deutschland die sogenannte Energiewende aus. Mit diesem Begriff verbindet sich im allgemeinen Sprachgebrauch eine tiefgreifende Neuorientierung im Bereich der Energieträgernutzung und des Verhältnisses der Energieträger zueinander. Historisch betrachtet ist die Bezeichnung jedoch in gewisser Weise irreführend, impliziert sie einerseits doch eine gewisse Neuartigkeit und andererseits einen radikalen Wandel. Tatsächlich befinden wir uns jedoch nach diesem Ansatz in einer Art Energiewende 4.0, denn in den vergangenen 1.000 Jahren lassen sich mehrere vergleichbare Entwicklungen erkennen. Außerdem sind nicht nur diese, sondern alle vorangegangenen „Energiewenden“ nicht durch einen abrupten Umbruch in der Energieträgernutzung gekennzeichnet, sondern durch einen langsamen Übergang und die parallele Existenz älterer und jüngerer Nutzungsformen. Einmal etablierte Verfahren der Energieversorgung wurden nicht einfach ersetzt, sondern liefen nebeneinander weiter. Dies gilt im Übrigen für alle Bereiche der Technik.³⁸ Inwieweit die aktuelle Energiewende aufgrund ihrer unbedingten Notwendigkeit schneller voranschreiten wird als ihre Vorgänger, wird die Zukunft zeigen. Denn eines unterscheidet sie von allen früheren: Sie ist die erste, die nicht technischen Möglichkeiten bzw. Problemlösungsstrategien und damit verbundenen wirtschaftlichen Motiven folgt, sondern politisch vorangetrieben wird. Wo zuvor die Kräfte des Marktes Veränderungen hervorriefen, sind nun externe Eingriffe erforderlich, die diesen zuwiderlaufen.

36 Quelle: Jopp: Produktivität und Rationalisierung, S. 22. Der Geary-Khamis-Dollar oder Internationale Dollar ist eine von der Weltbank berechnete Vergleichswährung. Die Basis bildet der US-Dollar. Umrechnungsfaktor für alle anderen Währungen sind die Kaufkraftparitäten.

37 Kander/Malanima/Warde: Power to the people, S. 348 ff.

38 Ropohl: Systemtheorie der Technik, S. 43.

Seit Beginn des Kohlenzeitalters befinden sich Energiewirtschaft und Energietechnik in einer Pfadabhängigkeit zu fossilen Energieträgern.³⁹ Unter Pfadabhängigkeit versteht man wirtschafts- und technikhistorisch eine Entwicklung, die sich durch positive Feedback- und Rückkopplungseffekte verstärkt und daher immer eindeutiger in eine Richtung geht. Mögliche Alternativen haben es mit zunehmender Zeit immer schwerer, sich durchzusetzen, und werden durch die Übermacht des Pfades unterdrückt. Ist eine Technologie einmal eingeführt, existiert auch eine umfangreiche industrielle Infrastruktur, die sie einsetzt. Dahinter stehen teilweise umfangreiche Berufszweige mit wissenschaftlichem Hintergrund und eigenen Interessen. Und eingespielte Gewohnheiten von Entwicklern, Produzenten und Nutzern unterstützen sich wechselseitig und blockieren den Wandel, je länger der Technikpfad schon beschritten wurde.⁴⁰ Ein schönes Beispiel dafür ist die sogenannte QWERTY-Tastatur⁴¹, die 1868 als funktionstechnische Notwendigkeit für Schreibmaschinen entwickelt wurde, aber auch im Computer-Zeitalter unverändert genutzt wird. Niemand käme auf die Idee, dieses System zu ändern. Im Bereich der Energie sind alle fossilen Energieträger ebenso herausragende Beispiele für solche Pfadabhängigkeiten. Wie oben dargelegt, sind die Beharrungskräfte der alten energiewirtschaftlichen Pfade bis heute unübersehbar und weitgehend ungebrochen. Sie sind etabliert, funktionieren technisch einwandfrei und sind aus betriebswirtschaftlicher Perspektive kostengünstig – allerdings nur ohne Einrechnung der vermeintlich kostenlosen Ressource Natur bzw. Umwelt, deren „Verbrauch“ zu den Selbstverständlichkeiten des Systems gehört. Folglich setzen politische Eingriffe bevorzugt in diesem Bereich an. Doch dazu später mehr.

Am Anfang und über Jahrtausende absolut dominierend stand die Muskelkraft.⁴² Sie wurde bislang nur am Rande der Statistiken erwähnt, stellt sie doch in gewisser Weise eine Besonderheit dar. Anders als alle anderen genannten Energieformen ist sie das Ergebnis biochemischer Prozesse in lebenden Organismen, die Nahrung in Energie umwandeln. Und gerade hier liegt ihre Endlichkeit, denn Mensch und Tier erschöpfen und sind dann trotz weiterer Energiezufuhr ohne Ruhephasen nicht weiter in der Lage, diese Energie umzusetzen. Dies soll nicht heißen, dass Muskelkraft nicht in der Lage wäre, Höchstleistungen zu vollbringen. Das Gegenteil ist der Fall, wenn zur Erreichung eines Zieles eine entsprechende Anzahl an Lebewesen über einen ausreichend langen Zeitraum gemeinsam tätig wird. Wie sonst hätten die Ägypter bereits 2.500 Jahre vor Christus die Cheops-Pyramiden erbauen können, die Römer vor 2.000 Jahren die Monumente des alten Roms oder die europäischen Reiche des Mittelalters die Kathedralen? Eine Besonderheit ist sicherlich, dass diese Leistungen von Sklaven oder Menschen in anderen Abhängigkeitsformen erbracht wurden. Auch in allen folgenden Energieepochen blieb die Muskelkraft die

39 Umfassend dazu: Wieland: Neue Technik auf alten Pfaden?, S. 22–46.

40 Rammert: Technik – Handeln – Wissen, S. 20.

41 In Deutschland QUERTZ-Tastatur nach der Abfolge der Buchstaben in der oberen Reihe.

42 Siehe hierzu: Bleidick: Muskelkraft.

wichtigste Energieform. In weltweiter Perspektive gilt dies vielleicht selbst für die vergangenen 200 Jahre. Es gibt durchaus Versuche zur Berechnung dieser Leistung, doch sollen diese hier nicht berücksichtigt werden, erscheinen sie doch mehr als fragwürdig. Es bleibt an dieser Stelle der kurze Verweis, dass die Muskelkraft auch im Industriezeitalter noch als Maßstab für die Leistungseinheit Pferdestärke bzw. PS herangezogen wurde und wird.

2.3.1 Energiewende 1.0

Zur Zeit des Mittelalters kam es vor etwa 1.000 Jahren zur Energiewende 1.0. In den europäischen Reichen und in China wurden zunehmend Mühlen eingesetzt, die die natürliche Energie von Wind und Wasser in nutzbare Kraft umsetzten und diese auf Arbeitsmaschinen übertrugen.⁴³ Sie waren nichts anderes als Kraftmaschinen und unterscheiden sich in dieser Hinsicht in nichts von entsprechenden heutigen Anlagen, die wir jedoch seit mehr als 100 Jahren als Motor bezeichnen. Auch die grundlegenden technischen Elemente der Mühle wie Achsen, Wellen, Zahnräder und Pleuelstangen finden sich in den modernen Kraftmaschinen wieder. In Kraftwerken treiben sie Generatoren an, sie bewegen Fahrzeuge und Hebeeinrichtungen. Für das Mittelalter war diese Entwicklung revolutionär, denn die neuen Kraftmaschinen waren nicht nur in der Lage, höhere Leistungen als die Muskelkraft zu erzeugen, sondern sie ermüdeten auch nicht. Allerdings waren sie standortabhängig und somit nicht überall einsetzbar und zweitens von einer ausreichenden Energiezufuhr abhängig. Bei Flaute oder Trockenheit standen sie still. Ihr großer Erfolg resultierte dennoch daraus, dass sie langwierige Tätigkeiten beschleunigten, neue Verarbeitungs- und Produktionstechniken ermöglichten und damit insgesamt die menschliche und tierische Arbeitskraft entlasteten und zugleich potenzierten. In dieser Hinsicht entsprach die Energiewende 1.0 der folgenden Version 2.0, der Unterschied lag allein in der Art der verwendeten Energie. Wasser- und Windenergie spielten bis ins 20. Jahrhundert hinein in günstigen Regionen eine nicht zu unterschätzende Rolle innerhalb der Energiewirtschaft, vor allem wenn sie durch den Anschluss eines Generators zur Elektrizitätserzeugung eingesetzt wurden. Die Kleinanlagen wurden dann jedoch in beiden Bereichen spätestens nach dem Zweiten Weltkrieg zugunsten des Strombezugs von öffentlichen Versorgungsunternehmen größtenteils aufgegeben.⁴⁴ Die Wasserkraft überdauerte durch den Anfang des Jahrhunderts forcierten Bau von Großtalsperren mit angeschlossenen Kraftwerksanlagen. Im Ruhrgebiet wurde Wasserkraft allerdings nur punktuell genutzt, da die Region zu wenig Wasserläufe mit ausreichendem Gefälle besitzt. An Emscher, Lippe und Ruhr gab es folglich nur

43 Bleidick: Wasserkraft; Bleidick: Windenergie; Reynolds: Stronger than a Hundred Men; Heymann: Geschichte der Windenergienutzung; Bayerl: Wind- und Wasserkraft.

44 Zumbärgel: „Viele wenige machen ein Viel“.

vergleichsweise wenig solcher Anlagen.⁴⁵ Die heute an der Ruhr noch vorhandenen sind mit einer Leistung von insgesamt nur 40 MW im Maßstab kaum nennenswert.

2.3.2 Energiewende 2.0

Mit dem Beginn des Industriezeitalters änderte sich die Situation grundlegend. Wie oben angedeutet, besaß diese Energiewende 2.0 eine ganz besondere Qualität, machte sie doch erstmals in der Geschichte Energie quasi unbegrenzt verfügbar. Daher könnte man diese bis heute andauernde Epoche auch als Energiezeitalter bzw. das fossile Zeitalter bezeichnen. In den vergangenen Jahren hat sich in der Wissenschaft dafür der Begriff des „Anthropozäns“ etabliert, als Zeitalter, in dem der Mensch zu einem maßgeblichen und naturverändernden Einflussfaktor auf der Erde aufstieg.⁴⁶ Er berücksichtigt neben dem Klimawandel auch Aspekte wie das Artensterben, die Umweltverschmutzung und den Landschaftsverbrauch. Den Ausgangspunkt bildete die Steinkohle, die zunächst in England, bald aber auch in großen Mengen in Deutschland, Belgien und Frankreich sowie den USA gefördert wurde. Erst sie erlaubte in Verbindung mit der zu ihrer Nutzung entwickelten Maschinentechnik die Umsetzung der in ihr enthaltenen Energie nicht nur in Kraft und Wärme, sondern auch in weitere Formen wie Elektrizität und Steinkohlengas. Damit waren erstmals Sekundärenergieträger verfügbar.

Zunächst zu erwähnen ist in diesem Kontext der Ersatz des Holzes als bis dahin wichtigstem Brennstoff durch Steinkohle. Holz kann als der wohl bedeutendste Rohstoff der vorindustriellen Zeit bezeichnet werden. Es diente als Baustoff für Häuser, Schiffe, Wagen. Waffen und einfache Werkzeuge wurden ebenfalls vielfach aus oder mit Holz hergestellt. Als natürlicher Rohstoff war seine Verfügbarkeit jedoch begrenzt.⁴⁷ Gerade in frühen Bergbau- und Hüttenregionen stellte es durchgängig eine Mangelware dar. Schon die Römer hatten mit ihrem enormen Holzbedarf weite Teile Italiens und Spaniens entwaldet. Mit der Steinkohle verringerte sich der Holzbedarf zu Heiz- und Brennzwecken und es kam langsam zum Ende des „Hölzernen Zeitalters“. Die gesamte moderne Eisen- und Stahlindustrie basiert auf ihrer Verwendung. Hatten ältere Montanregionen wie das Siegerland als wichtigstes westdeutsches Eisenerzgebiet noch ausschließlich auf Holzbasis gearbeitet, wurde Steinkohle für das Ruhrgebiet und andere aufstrebende Industrieregionen zum mit Abstand wichtigsten Standortfaktor.⁴⁸ Ihr Einsatz bildete die Grundlage für die rasanten Produktionssteigerungen der Branche.

Die Ära der Sekundärenergieträger begann mit dem Leuchtgas, mit dem in England seit Ende des 18. Jahrhunderts und in Deutschland seit 1826 erstmals Laternen

⁴⁵ Bleidick: Alte Mühlen, neue Kraftwerke.

⁴⁶ Siehe dazu: Crutzen u. a.: Anthropozän.

⁴⁷ Umfassend dazu: Radkau/Schäfer: Holz, S. 53–218.

⁴⁸ Bleidick: Standortfaktoren.

betrieben wurden.⁴⁹ Steinkohle enthält bis zu 40 % flüchtige Bestandteile, darunter größtenteils Methan. Methangas besitzt die Summenformel CH_4 und ist der meist-vertretene Kohlenwasserstoff in der Erdatmosphäre. Es entsteht in großen Mengen durch biochemische Prozesse bei der Zersetzung von Pflanzen und ist daher auch in allen fossilen Energieträgern enthalten. Im methanhaltigen Kohlengas sind weitere Begleitstoffe und Nebenprodukte gelöst. Die wichtigsten sind Teer, Benzol, Ammoniak und Schwefel. Das Gas wurde in Gasanstalten aus der Kohle herausdestilliert, gereinigt und dann in Versorgungsnetze eingespeist.⁵⁰ Neben der zunächst vor allem in Residenzstädten eingeführten Beleuchtung zentraler Plätze war die Einführung in Industrie und Gewerbe ein echter Quantensprung. Das Gas ermöglichte die sogenannte „Lichtarbeit“ und damit die Entstehung des modernen Fabriksystems, denn es sorgte dafür, dass die Arbeit auch nachts weiterlaufen konnte. Damit veränderte sich die gesamte Produktionsstruktur mit erheblichen gesellschaftlichen und sozialen Auswirkungen. Die Unternehmen wiederum wurden in die Lage versetzt, ihr Anlagekapital besser zu nutzen und den Output ihrer Werke zu vergrößern. Damit beschleunigte das Gaslicht die wirtschaftliche Entwicklung, brachte aber erhebliche Belastungen für Arbeiterinnen und Arbeiter durch verlängerte Arbeitszeiten und die Schichtarbeit.

Eine in ihrer Reichweite erheblich größere Bedeutung besaß die Elektrizität, die nach zaghaften Anfängen in den 1880er Jahren nach der Wende zum 20. Jahrhundert rasch alle Bereiche von Wirtschaft und Gesellschaft eroberte.⁵¹ Sie verdrängte das brandgefährliche und eine große Wärme erzeugende Gaslicht aus den Betrieben und Haushalten und beschränkte dessen Verwendung bald auf die öffentliche und industrielle Beleuchtung. Hatten anfangs Gasmotoren im kleingewerblichen Bereich für eine kostengünstige Antriebskraft gesorgt, war es nun der besser steuerbare und effizientere Elektromotor.⁵² Und wie das Gas war Strom eine leitungsgebundene Energieform, die äußerst einfach verteilt werden konnte. Die Gewinnung der Elektrizität erfolgt in weltweiter Perspektive bis heute vorrangig in Kraftwerken. Ausgehend von kleinen Blockkraftwerken mit geringer Leistung, begann Ende des 19. Jahrhunderts der Bau von größeren Anlagen mit hoher Leistung, mit denen größere Regionen zentral versorgt werden konnten.⁵³ In den Kraftwerken arbeiteten Dampfmaschinen, die Generatoren antrieben.

Die Dampfmaschine selbst wurde von der älteren Technikgeschichte gerne als Ausgangspunkt und Nonplusultra der technischen Entwicklungen des Industriezeitalters beschrieben.⁵⁴ Diese Position ist allerdings nur mit starken Abstrichen vertret-

49 Bleidick: Brenn- und Leuchtstoffe.

50 Zur Gaswerkswirtschaft siehe umfassend: Körting: Geschichte der deutschen Gasindustrie.

51 Zur Frühgeschichte siehe: Bohn/Marschall: Technische Entwicklung; Herzig: Wirtschaftsge-schichtliche Aspekte, S. 124–132.

52 Richter: Technik und Industrialisierung, S. 284–290.

53 Zu den frühen Kraftwerken siehe: Reiss/Buschmann: Geschichte der Kohlekraftwerke, S. 8–15.

54 Zeittypisch: Matschoß: Geschichte Dampfmaschine.

bar. Die Dampfmaschine steht in einer ganzen Reihe von zentralen Erfindungen und Entwicklungen, die sich gegeneinander bedingten und beeinflussten. An dieser Stelle sollen nur ganz allgemein grundlegende Verfahren zur Metallverarbeitung und des Maschinenbaus erwähnt werden, die überhaupt erst die Konstruktion solcher Anlagen erlaubten. 1790 von dem Briten James Watt zur großtechnischen Betriebsreife entwickelt, setzte sich die Dampfmaschine im Verlauf des 19. Jahrhunderts im Bergbau und in allen Industriezweigen als wichtigste Kraftmaschine durch.⁵⁵ Wo die entsprechenden Voraussetzungen bestanden, blieben jedoch auch Wasserkraft und Windkraft noch ein wichtiger Faktor. Ihre Anlagen wurden vielfach nicht ersetzt, sondern weiterbetrieben und gegebenenfalls durch Dampfmaschinen ergänzt, sodass sich alte und neue Technikpfade überlagerten. Der Vorteil der Dampfmaschine lag in ihrer Standortunabhängigkeit, im Dauerbetrieb und in ihrer erheblich höheren Leistungsfähigkeit. Viele der modernen Industrieanlagen konnten nur mit ihrer Hilfe betrieben werden. Dies gilt etwa für die Wasserhebung im Bergbau, der nur durch den Dampfmaschinenantrieb in größere Tiefen vorstoßen konnte. Weitere Beispiele sind die Winderzeugung bei Hochöfen oder der Übergang zum industriellen Großbetrieb, in dem die Antriebskraft zentraler Dampfmaschinen durch Transmissionen an zahlreiche Arbeitsplätze übertragen wurde. Das Ruhrgebiet war Ende des 19. Jahrhunderts die Region in Deutschland mit der höchsten installierten Dampfmaschinenleistung.

Schließlich wurde die Steinkohle zur Basis der chemischen Industrie, in der Deutschland mit Unternehmen wie Bayer und BASF in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts zum Weltmarktführer aufstieg. Die aus dem Gas gewonnenen Nebenprodukte konnten zu zahlreichen Grund- und Fertigprodukten verarbeitet werden. Eine besondere Rolle spielte dabei der Steinkohlenteer.⁵⁶ Der mit Abstand größte Teil des Gases wurde nun nicht mehr in Gaswerken gewonnen, sondern in den Kokereien der Kohlezechen und damit im Ruhrgebiet. Auch hier wurde Kohle destilliert, jedoch nicht mit dem vordergründigen Ziel der Gaserzeugung, sondern dem der Kokserzeugung. Koks ist auf den Kohlenstoffgehalt reduzierte Steinkohle und nur Koks ließ sich im Hochofen verwenden, denn die Rohkohle war dafür viel zu brüchig und auch durch die enthaltenen Nebenprodukte ungeeignet. Wer schon einmal die Reste aus dem Holzkohlensack auf den Grill geschüttet hat, kennt das Phänomen, dass die Feinkohle das Feuer erstickt.

Die weitere Entwicklung der Kokereitechnologie⁵⁷ und eine verbesserte Wärmeökonomie der Montanindustrie, die in den 1920er Jahren verstärkt auf einen Verbundbetrieb setzte, führte zur Freisetzung großer Gasmengen. War das Kokereigas zunächst vor allem zur Beheizung der Koksöfen und anderer Anlagen verwendet

55 Richter/Sonnemann: Technik im Zeitalter der industriellen Revolution, S. 215–224.

56 Osteroth: Soda, Teer und Schwefelsäure, S. 71–106; Nedelmann: Kohlechemie.

57 Umfassend dazu: Farrenkopf: Koks; Ress: Geschichte der Kokertechnik. Siehe auch Abschnitt 3.1.5 und 3.1.6.

worden, sorgten nun der durch technische Entwicklungen verringerte Energiebedarf der Eisen- und Stahlindustrie und der Ersatz des Kokereigases durch andere Gasarten für die Möglichkeit einer großflächigen Gasversorgung nach dem Vorbild der Elektrizitätswirtschaft. 1926 begann die Ruhrgas AG mit dem Aufbau eines Leitungsnetzes zur Erschließung weiter Landesteile.⁵⁸ Bereits in den 1930er Jahren existierten in Deutschland mehrere Ferngasverbundsysteme. Das mit Abstand bedeutendste ging vom Ruhrgebiet aus und deckte eine Fläche zwischen Hannover und Frankfurt ab.

Dass die Steinkohle sich auch sehr schnell beim Hausbrand durchsetzte, also bei der privaten Wärmeerzeugung, war eine zwangsläufige Entwicklung. Bis in die 1950er Jahre blieb Steinkohle das Maß aller Dinge. Ihr Anteil am Gesamtprimärenergieverbrauch erreichte bis zu 80 %. (vgl. Tab. 6 und 7) Die Steinkohle war jedoch mittlerweile nicht mehr der einzige fossile Energieträger von Bedeutung. Sie hatte seit etwa 1910 Konkurrenz durch die Braunkohle erhalten. Deutschland besitzt nach Russland und Australien die weltweit größten Vorkommen und in keinem Land wurde in historischer Perspektive mehr Braunkohle gefördert als hier.⁵⁹ Die Vorkommen liegen im Rheinland⁶⁰ sowie im mitteldeutschen Raum. Hier entstanden bald Großkraftwerke, die weite Teile des Landes mit Elektrizität versorgten. In der DDR bildete die Braunkohle schließlich den mit Abstand wichtigsten Primärenergieträger und auch die Basis des Hausbrandes. Das Land lag bis Ende der 1980er Jahre auch unangefochten an der Spitze der Fördernationen. Die Elektrizitätsversorgung der Bundesrepublik basierte in den 1950er Jahren zu rund 98 % auf diesen beiden Kohlenarten.

Wenn man die durch fossile Energieträger geprägte Energiewende 2.0 weiter unterteilen möchte, könnte das Aufkommen der Braunkohle als Energiewende 2.1 bezeichnet werden. Und die Energiewende 2.2 ließ in dieser Perspektive nicht lange auf sich warten. Nach dem Zweiten Weltkrieg begann weltweit das Zeitalter des Erdöls.⁶¹ Die großen Mineralölvorkommen der Welt liegen in den Ländern des Nahen Ostens, in Russland, Venezuela und in den USA. Vor allem hier entwickelte sich bereits in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts eine prosperierende Ölindustrie, die auch Europa versorgte, wo nur vergleichsweise geringe Vorkommen existieren. Auch die Förderung des Nahen Ostens ging zunächst in weiten Teilen nach Europa. In Relation zur dominierenden Steinkohle war das Erdöl jedoch zunächst kaum mehr als ein ergänzender fossiler Energieträger. Dies änderte sich seit den 1950er Jahren, als das Erdöl zunächst in den westlichen Industrienationen und bald auch weltweit die Bedeutung der Kohle reduzierte. (Vgl. Tab 4, 6) Grundsätzlich lassen sich aus Kohle

58 Bleidick: Ruhrgas, S. 56–90.

59 BP SRWE 2020, S. 44; Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (Hg.): BGR Energiestudie 2019, S. 30.

60 Zu dieser auch für die Entwicklung im Ruhrgebiet bedeutenden Region siehe umfassend: Buschmann/Gilson/Rinn: Braunkohlenbergbau im Rheinland.

61 Zur Entwicklung in Deutschland siehe: Karlsch/Stokes: Faktor Öl, S. 247–378.

und Mineralöl dieselben Produkte erzeugen. Beide besitzen ähnliche Verwendungszwecke. Der Vorteil des Erdöls liegt allerdings in seinem flüssigen Grundzustand.⁶² Es ist aus diesem Grund erheblich einfacher zu fördern, transportieren und verarbeiten. Bis zu den Ölkrisen der 1970er Jahre war es zudem auch aufgrund seiner Herkunft erheblich preisgünstiger als Kohle.⁶³ Es ist daher wenig verwunderlich, dass sich die Förderung und der Verbrauch mit rasanten Steigerungsraten entwickelten und das Erdöl die Kohle aus vielen Anwendungsbereichen verdrängte. Eine besondere Rolle spielte dabei die Massenmotorisierung in Europa, das seit den 1950er Jahren den Rückstand gegenüber den USA in diesem Bereich aufholte. Das Ruhrgebiet spielte auch beim Aufstieg der Mineralölwirtschaft eine wichtige Rolle und war in den 1950er und 1960er Jahren zwischenzeitlich zum wichtigsten Verarbeitungsstandort Deutschlands mit mehreren Raffinerien aufgestiegen. Auch heute noch nimmt Gelsenkirchen hier eine Spitzenposition ein. Ein weiterer Aspekt ist die seit dieser Zeit ebenfalls regelrecht explodierende Produktion von Kunststoffen, die längst allgegenwärtig und aus unserem Umfeld kaum noch wegzudenken sind.

Folglich kennt die Entwicklung des Welterdölverbrauchs nur eine Richtung. In den vergangenen 50 Jahren hat er sich in etwa verdoppelt. Die Verbrauchskurve zeigt seit Ende des Zweiten Weltkriegs durchgängig nach oben, für einen längeren Zeitraum nur unterbrochen durch die kurze Krise der 1980er Jahre. Bereits Anfang der 1970er Jahre erreichte das Erdöl in der Bundesrepublik einen Anteil von mehr als 50 % an der Primärenergieversorgung. (vgl. Tab. 6) Kohlenarme Länder wie Spanien, Italien, Frankreich, Griechenland und Japan erzielten erheblich höhere Werte, während Dänemark zu annähernd 90 % auf Öl setzte.⁶⁴ Dies ging vor allem zulasten der Steinkohle, die zwar ihre absolute Vormachtstellung einbüßte, durch ihre Verwendung in der Elektrizitätswirtschaft und der Eisen- und Stahlindustrie aber weiterhin eine besondere Bedeutung besaß. Der Energiehunger der Welt sorgte schließlich dafür, dass auch die Fördermengen von Kohle in der Gesamtbetrachtung von Jahr zu Jahr weiter anstiegen und 2013 einen neuen Höhepunkt erreichten. Die Gesamtsteigerungsraten überflügelten in den vergangenen 20 Jahren sogar die des Erdöls. Der Niedergang des Steinkohlenbergbaus in Westeuropa ist daher in dieser Hinsicht als absolute Ausnahme zu betrachten.

Erdöl ist jedoch weiterhin und unverändert das Schmiermittel der Weltwirtschaft und wird es vorerst auch bleiben.⁶⁵ Wenn der Beginn des Erdölzeitalters als Energiewende 2.2 bezeichnet wurde, dann ließe sich mit einiger Berechtigung, und dies ist vor allem eine Definitionsfrage, der Aufstieg des Erdöls jedoch auch als Energiewende 3.0 ansehen. Dafür spräche das Auftreten eines weiteren fossilen Energieträ-

62 Zeitgenössisch dazu: Ruf: *Kleine Technologie des Erdöls*.

63 Glässer: *Marktmacht und Politik*, S. 17–41.

64 The British Petroleum Company Ltd. (Hg.): *BP stats 1975*, S. 16.

65 Dies prognostizierte der Mineralöl Zentralverband bereits 1952 auch für Deutschland. „Öl ist das Blut der Wirtschaft“. Zitiert nach: Mineralöl Zentralverband/Verband Süddeutsche Mineralölwirtschaft (Hg.): *Mineralöl-Handbuch*, Vorblatt.

gers, des Erdgases, das den Energiemarkt als zweites Konkurrenzprodukt zur Kohle seit den ausgehenden 1960er Jahren erweiterte und sich ebenfalls in eine solche Rubrik einordnen ließe. Hier soll es weiterhin nach der eingangs des Abschnitts vorgestellten Definition als Teil des fossilen Energiezeitalters bzw. des Anthropozäns angesehen werden. Wie das in der Steinkohle gebundene Gas besteht auch Erdgas größtenteils aus Methan. Der Unterschied besteht darin, dass es in freien Lagerstätten in Verbindung mit dem Erdöl auftritt und ähnlich wie dieses einfach zu fördern ist, da die Lagerstätten unter hohem Druck stehen.⁶⁶ Die Hauptproduzenten sind dieselben wie beim Erdöl, jedoch existieren auch unabhängige Lagerstätten, so etwa in den Niederlanden. Außerdem gibt es bedeutende vergemeinschaftete Vorkommen in der Nordsee. Großbritannien und Norwegen stiegen daher seit dieser Zeit mit der Entwicklung einer entsprechenden Offshore-Fördertechnik zu Großproduzenten in beiden Bereichen auf.

Schon erheblich früher, bereits nach der Wende zum 20. Jahrhundert, entwickelte sich in den USA eine bedeutende Erdgasindustrie. Ende der 1950er Jahre wurden dann in den Niederlanden und in Algerien große Vorkommen entdeckt, mit deren Ausbeutung auch in Europa das Erdgaszeitalter begann. Seit Anfang der 1970er Jahre sorgten schließlich Importe aus der Sowjetunion für einen raschen Verbrauchsanstieg in allen westeuropäischen, aber auch osteuropäischen Ländern. Die Sowjetunion verfügt über die weltweit mit Abstand größten Reserven und avancierte schnell zum bedeutendsten Lieferanten der Bundesrepublik. Diesen Status besaß Russland bis Anfang 2022. Erdgas verfügt nicht nur über dieselben Grundbedingungen wie das Erdöl, sondern kann darüber hinaus noch mit weiteren Vorteilen punkten. Neben der weitgehend identischen Fördertechnik liegen diese insbesondere beim Transport. Erdgas war bislang in Europa in der Regel eine komplett leitungsgebundene Energieform und muss auch nicht weiterverarbeitet, sondern nur gereinigt werden. D. h. zwischen Quelle und Verbraucher existieren keine aufwendigen Kosten und Zwischenschritte. Einmal in das Versorgungsnetz eingespeist, läuft es direkt zum Kunden.

Die Bundesrepublik wurde aufgrund ihrer geographischen Lage im Verlauf der 1970er Jahre zur Drehscheibe des europäischen Erdgas-Verbundsystems. Hier treffen sich bis heute die großen Importleitungen, von denen aus das Gas in regionale und lokale Netze eingespeist wird. Erdgas ist eine typische Heizenergie. Hatte in den 1960er Jahren zunächst die Ölheizung die Kohleheizung verdrängt, war es nun die Gasheizung, die die Bedeutung der Ölheizung verringerte. Gerade im Neubausektor wurde sie schnell zum mit Abstand wichtigsten System. Aber auch im gewerblichen Bereich bzw. im Industriesektor wurden zahlreiche technische Anwendungen auf Erdgas umgestellt, das hier durch seine hohe Reinheit überzeugt. Außerdem ist Erdgas wie das Erdöl ein wichtiger Chemiegrundstoff. Insgesamt besitzt es von allen fossilen Energieträgern die beste Umweltbilanz. Vor diesem Hintergrund gewann das

⁶⁶ Bleidick: Ruhrgas, S. 242–402.

Erdgas bedeutende Marktanteile auf Kosten des Erdöls, aber auch der Kohle, denn es wird in Kraftwerken auch zur Elektrizitätserzeugung eingesetzt. Seit Mitte der 1990er Jahre deckt es mehr als 20 % des bundesdeutschen Primärenergiebedarfs (vgl. Tab. 6). Andere Staaten verzeichneten eine ähnliche Entwicklung, sodass die Förderkurve des weltweiten Erdgasverbrauchs seit den 1960er Jahren noch stärker nach oben zeigt als die von Kohle und Öl.

2.3.3 Energiewende 3.0

In den 1960er Jahren wurde der Primärenergieträgermix nicht nur durch Erdgas, sondern auch noch durch Uran erweitert. Die auch als Atomenergie oder Nuklearenergie bezeichnete Kernenergie war aus zeitgenössischer Sicht ein Quantensprung, versprach sie doch ein weiteres Mal eine quasi unbegrenzte und dazu noch umweltfreundliche, weil emissionslose Energieversorgung. Befürworter sprachen gar von einem „Wunder“, mit dessen Hilfe sich alle Probleme der Welt beseitigen ließen.⁶⁷ Energie in Form von Kernenergie galt als Allheilmittel und besitzt diese Zuschreibung vielfach auch heute noch. Dieser Aspekt ist hier ausdrücklich betonen und rechtfertigt in historischer Perspektive durch die intendierte Abkehr von fossilen Energieträgern die Einstufung als Energiewende 3.0. Das Mittel zum Zweck war die Spaltung von Atomkernen eines Uran- oder Plutoniumisotops. Dabei wird nicht nur Energie in Form von Wärme frei, sondern der einmal angelaufene Spaltprozess ist auch selbst erhaltend. Es kommt zu einer Kettenreaktion, die so lange weiterläuft, wie Brennstoff vorhanden ist.

In Wissenschaft und Politik erzeugte die Kernspaltung gar die Hoffnung auf eine Energieerzeugung nach dem Prinzip des Perpetuum mobiles. Die Vorstellungen reichten hier von Brutreaktoren bis hin zu Fusionsreaktoren.⁶⁸ In Brutreaktoren entsteht während der Energiegewinnung gleichzeitig weiteres spaltbares Material, das nach entsprechender Aufarbeitung erneut als Brennstoff eingesetzt werden kann. Der Clou daran ist, und daher stammt auch der Name, dass Anlagen dieser Art theoretisch mehr Brennstoff erzeugen als sie selbst verbrauchen. Ihre Leistungsfähigkeit erreicht bis zum 60fachen konventioneller Reaktoren.⁶⁹ Aufgrund enormer technischer Schwierigkeiten und extrem hoher Kosten konnten sich Brutreaktoren bislang nicht durchsetzen. In Europa und in den USA wurden alle Versuchsprojekte eingestellt. Es sind jedoch einige wenige Anlagen in Russland und in China in Betrieb.

In Fusionsreaktoren, so der Grundgedanke, verschmelzen Atomkerne, etwa der Wasserstoffisotope Deuterium und Tritium, zu einem neuen Kern. Vorbild sind

⁶⁷ Symptomatisch für diese Perspektive noch in den 1970er Jahren: Winnacker/Wirtz: Das unverstandene Wunder.

⁶⁸ Löwenthal/Hausen: Wir werden durch Atome leben.

⁶⁹ Zur Kerntechnik siehe umfassend: Michaelis/Salander: Handbuch Kernenergie. Zur Branchenentwicklung siehe: Uekötter: Atomare Demokratie.

hier die thermonuklearen Prozesse in Sternen wie unserer Sonne, wo, wie bereits angedeutet, Wasserstoff unter enormer Energiefreisetzung in Helium verwandelt wird. Auch die Wasserstoffbombe arbeitet nach diesem Prinzip. Die größte ihrer Art, die 1961 von der Sowjetunion gezündete Zar-Bombe, besaß eine Sprengkraft von schätzungsweise rund 60 Megatonnen TNT, also von 60 Millionen Tonnen, und hätte noch mehr erreichen können. Dies entsprach etwa 4.000 Hiroshima Bomben und macht das enorme Potenzial der Kernfusion ebenso deutlich wie die erheblichen technischen Probleme bei der Kontrolle des Prozesses. Bislang ist die Kernfusion über den Labormaßstab nicht hinausgekommen, doch hoffen die Befürworter des Konzeptes auf betriebsfähige Anlagen Mitte bis Ende des 21. Jahrhunderts – ein Zeitrahmen der im Übrigen seit Mitte des 20. Jahrhunderts avisiert wird.

Wie bei konventionellen Kraftwerken wird die bei der Kernspaltung freigesetzte Wärme zur Erzeugung von Dampf genutzt, der über Turbinen Generatoren antreibt. Dass die Kernenergie seinerzeit auch ohne solche Zukunftsvisionen auf Grundlage der vorhandenen Technik eine überschäumende Euphorie erzeugte, liegt an der enormen Energiedichte der Einsatzstoffe. Die Spaltung von einem einzigen Gramm Uran setzt 22 Mio. KW frei. Dies entspricht der Verbrennungsenergie von rund 2,7 t Steinkohle, 8 t Braunkohle oder 2.2 t Erdöl. Es existieren diverse Reaktortypen, von denen hier nur die gängigsten, die Leichtwasserreaktoren und die Druckwasserreaktoren, kurz erwähnt werden sollen.

Die Hochzeit des Reaktorbaus waren die späten 1960er bis 1980er Jahre. In dieser Zeit entstanden weltweit mehr als 400 Anlagen. Einen Bruch in dieser Entwicklung erzeugte erst die Reaktorkatastrophe von Tschernobyl im Frühjahr 1986. 2019 waren rund 440 Reaktorblöcke weltweit in Betrieb und weitere 55 in Planung oder im Bau. Vor allem asiatische Länder setzen weiter unvermindert auf diese Technologie.⁷⁰ In der Bundesrepublik waren es einschließlich Forschungsreaktoren ursprünglich 32, die 2021 noch verbliebenen sechs gingen im Rahmen des Atomausstiegs bis Frühjahr 2023 vom Netz. Beschlossen ist der Ausstieg aus der Kernenergie aktuell in weiteren fünf Ländern, in Belgien, der Schweiz, Spanien, Südkorea und Taiwan. Italien, Kasachstan und Litauen haben diesen Prozess mittlerweile beendet. Irland, Kuba, Österreich und die Philippinen haben den Bau von Kernkraftwerken abgebrochen und sind daher erst gar nicht zu Atomstaaten geworden.⁷¹ Zwar ist das lange Wachstum der Branche zwischen den 1960er Jahren und der Jahrtausendwende abgeschlossen, aber die seit dieser Zeit weitgehend immer noch ansteigenden Produktionsziffern sprechen eine eindeutige Sprache. Im Ruhrgebiet kam es auch aufgrund der Konkurrenz der Kohle nur zu einem, schließlich gescheiterten Reaktorprojekt.⁷²

70 Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (Hg.): BGR Energiestudie 2019, Vorwort.

71 IAEA (Hg.). Nuclear Power Reactors in the World 2019.

72 Siehe Abschnitt 3.1.10.

2.3.4 Energiewende 4.0

Mit der Energiewende 3.0 verfügt die Welt seit den 1960er Jahren über eine Energieversorgungsstruktur, die sich bis heute nur wenig geändert hat. Kohle, Öl, Erdgas und Kernenergie sind unvermindert die mit Abstand bedeutendsten Primärenergieträger und Sekundärenergieträger wie Elektrizität sowie Raffinerieprodukte werden aus ihnen erzeugt. Das System ist etabliert und funktioniert technisch reibungslos. Umweltfragen spielten lange Zeit keine Rolle, obwohl die Umweltschädlichkeit der fossilen Energieträger schon seit dem 19. Jahrhundert bekannt ist, aber erst seit den frühen 1960er Jahren auch in zunehmendem Maße beklagt wird.⁷³ Rauch und Staub und die aus ihnen bei entsprechenden Wetterlagen entstehenden Smogsituationen wurden nun nicht mehr hingegenommen. Der rauchende Schornstein vermittelte nicht mehr das Gefühl von Arbeit und Wohlstand, sondern wurde zum Beispiel für die rücksichtslose Ausbeutung der vermeintlich kostenlosen Ressourcen Natur und die damit verbundenen Gesundheitsgefahren. Zunächst war es die lokale und regionale Belastung, die ins Zentrum der Kritik geriet. Als absolutes Negativbeispiel der Bundesrepublik galt das Ruhrgebiet, das der Spiegel 1961 in einer Titelgeschichte gar als „kleines Pompeji“ bezeichnete.⁷⁴ Zuvor hatte der SPD-Kanzlerkandidat Willy Brandt den „Blauen Himmel über dem Ruhrrevier“ zu einem wichtigen Punkt seines Regierungsprogramms erhoben. Seine Rede vor dem Parteitag Ende April 1961 gilt als Ursprung der bundesdeutschen Umweltbewegung.

Gerade in den westlichen Industrienationen haben seither die im Laufe der Zeit verstärkten Bemühungen zur Emissionssenkung und Luftreinhaltung zu einer spürbaren Verbesserung der Situation beigetragen. Dieses Konzept besteht seit den 1960er Jahren und ist über eine entsprechende Gesetzeslage und Rechtsprechung abgesichert. Zu erwähnen sind für die Bundesrepublik etwa die zahlreichen Umweltschutzgesetze und -regelungen wie die Technische Anleitung zur Reinhaltung Luft („TA Luft“) von 1964 oder das erstmals 1974 aufgelegte „Bundes-Immissionsschutzgesetz“, die seither mehrfach novelliert wurden und hier nur als Beispiele genannt werden sollen.⁷⁵ Das Negativbeispiel Ruhrgebiet kann hier durchaus als Impulsgeber betrachtet werden. Durch die immer weitere Verschärfung von Grenzwerten erscheint die Problematik heute mitunter als theoretisch und abstrakt, ist sie doch im Lebensumfeld kaum noch direkt erkennbar. Seit seinen Anfängen in den 1970er Jahren befindet sich der Diskurs um den Umweltschutz im Spannungsfeld von emotionaler Sorge und politisch-wissenschaftlicher Abwägung. Laien treffen auf Experten und lange Zeit bildete das gegenseitige Unverständnis das grundlegende Merkmal des Aushandlungsprozesses.⁷⁶ Die öffentliche Meinung war und ist ähnlich gespalten.

73 Umfassend dazu: Uekötter: Von der Rauchplage zur ökologischen Revolution.

74 „Zu blauen Himmeln“, in: Der Spiegel 33/1961, S. 22–33.

75 Zum zeitgenössischen Hintergrund siehe: Reil: Technische Anleitung, 1974; Alberding/Herbert: Bundes-Immissionsschutzgesetz, 1974.

76 Siehe hierzu die Beiträge in: Kerner (Hg.): Aufstand der Laien.

Warnungen vor dem Untergang stehen Positionen gegenüber, die willkürliche Einschränkungen der persönlichen Freiheit sowie Gefahren für den Lebensstandard und die wirtschaftliche Entwicklung hervorheben. Über allem kreisen als Oberthemen Fragen der Verantwortlichkeit und der Zuständigkeit.⁷⁷

Ähnliches gilt für die Debatte über die durch den Ausstoß klimaschädlicher Gase hervorgerufene Erderwärmung, die seit rund drei Jahrzehnten im Mittelpunkt der Diskussionen steht und mittlerweile eine drastische Zuspitzung erfahren hat. Zu nennen ist hier in erster Linie das bei der Verbrennung fossiler Brennstoffe freigesetzte Kohlendioxid bzw. CO₂. Nun erreichte die Gesamtsystemproblematik eine globale Dimension. Als wichtigstes Ziel wurde vor diesem Hintergrund schon früh die Dekarbonisierung der gesamten Energieversorgung ausgerufen. Gemeint ist mit diesem Begriff der Verzicht auf kohlenstoffhaltige fossile Energieträger, also auf Kohle, Öl und Erdgas. Es gilt, die ökologischen Probleme nachhaltig zu reduzieren und möglichst umfassend zu minimieren. Denn wenn die Menschheit das Biotop, wie eingangs dargestellt, in ein Technotop umgewandelt hat, muss nun sämtliches technisches Handeln der Stabilität des Ökosystems größte Aufmerksamkeit schenken.⁷⁸ Und es ist zu konstatieren, dass das Beispiel des Umweltschutzes eindeutig zeigt, wie wenig wir die von uns geschaffene Technik eigentlich beherrschen. Folgen der Techniknutzung werden durch den verstärkten Einsatz von Technik bekämpft, dabei kuriert man bislang jedoch eher die Symptome, als die Ursachen wirkungsvoll anzugehen. Es scheint daher umso mehr notwendig, Art und Ausmaß der durch Technik hervorgerufenen Umweltveränderungen zu diagnostizieren, ihren Einfluss auf das ökologische Gleichgewicht zu analysieren, ökologischen Störungen entgegenzuwirken und nur noch die Technik zu nutzen, die solche von vornherein vermeidet.⁷⁹

Die Energiewende 4.0 besitzt vor diesem Hintergrund und im Vergleich zu den älteren Versionen eine völlig neue Qualität. Erstmals in der Geschichte der fossilen Energieträger geht es nicht um die Erweiterung des Systems unter Erhaltung der bestehenden Strukturen, sondern um einen Systembruch durch den vollständigen Umbau der Energiewirtschaft. Zweitens ist der Zeitrahmen eng gesteckt. Die Übergangsphase muss so weit wie möglich verkürzt werden. Und drittens scheinen aus diesem Grund marktwirtschaftlich orientierte Lösungen angesichts der Beharrungskräfte des etablierten Systems mit seinen zahlreichen Pfadabhängigkeiten und Wertschöpfungsketten erstmals möglicherweise ungeeignet zur Lösung der Problematik. Umso mehr ist eine politische Steuerung gefragt, die ihre Lenkungswirkung durch ein breites Spektrum von Aufklärung und Anreizen, aber auch Erschwerungen und Verboten erreicht und dies in weltweiter Kooperation. Ansätze dazu sind schon seit längerem erkennbar, doch wurde im Rückblick seit der Konferenz von Rio 1992,

77 Umfassend zum Thema: Lenk: Umweltverträglichkeit und Menschenzuträglichkeit, insb. S. 13–44, 121–124.

78 Ropohl: Allgemeine Technologie, S. 34.

79 Siehe zur Einführung in die Technikfolgenabschätzung: Decker: Zukünftige Technologien umfassend bewerten.

wo sich die Welt erstmals auf gemeinsame Umweltschutzanstrengungen einigte, nur wenig erreicht. Erst das Jahr 2015 brachte auf der bis dahin 21. Klimakonferenz in Paris einen gewissen Umschwung. Nun vereinbarten die beteiligten Staaten eine Begrenzung der globalen Erwärmung auf deutlich unter 2 °C, besser 1,5 °C. Die EU-Mitgliedsstaaten verpflichteten sich zur Verringerung ihrer Treibhausgasemissionen bis 2030 um 40 % im Vergleich zu 1990. Mittlerweile wurde eine Einsparung um mindestens 55 % beschlossen, um bis 2050, besser 2045, zur Klimaneutralität zu kommen. Ob dies ausreicht, ist fraglich.

Auch für Deutschland ist im Hinblick auf dieses ambitionierte Ziel für die vergangenen beiden Jahrzehnte insgesamt nur eine unzureichende Entwicklung erkennbar. 1998 wurde das aus dem Jahr 1935 stammende Energiewirtschaftsgesetz geändert. Zu den beiden ursprünglichen Grundzielen Sicherheit und Preisgünstigkeit der Energieversorgung trat als drittes die Umweltverträglichkeit. Im Jahr 2000 verabschiedete die damalige rot-grüne Bundesregierung das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) und beschloss den Ausstieg aus der Kernenergie bis 2018, doch betrafen beide Maßnahmen zunächst vorrangig den Elektrizitätssektor. 2010 revidierte die schwarz-gelbe Bundesregierung die Entscheidung zum Atomausstieg und verlängerte die Laufzeiten der Kernkraftwerke bis 2030. Nach dem Reaktorunfall von Fukushima im Frühjahr 2011 folgte die Kehrtwende und als Enddatum wurde nun 2022 festgelegt. Die Revision des Atomausstiegs war zuvor von der allgemeinen Zielsetzung flankiert worden, die Treibhausgasemissionen bis 2050 drastisch zu reduzieren. So gewann die Entwicklung erst mit Fukushima an Dynamik und es wurden nun weitere klare Definitionen und konkrete Ziele der Energiewende festgelegt. Diese bestanden unverändert vor allem aus Maßnahmen zum Ausbau der Erneuerbaren Energien, der Stromnetze und zur Energieeffizienz. Vieles blieb offen und ist bis heute nicht durch entsprechende Werte konkretisiert worden. So fehlten etwa Aussagen zum Verkehr und zur Industrie ebenso wie ein Zeitplan für die Zeit nach 2030. Dies wurde dann auch vom Bundesverfassungsgericht im Frühjahr 2021 moniert.⁸⁰ Der im achten, im August 2021 publizierten und bislang letzten Monitoring-Bericht des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) (heute Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz) vorgelegte Fahrplan sieht so aus:

80 <https://www.bundesverfassungsgericht.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/DE/2021/bvg21-031.html>, letzter Aufruf am 16.8.2021.

Tab. 8: Ziele der Energiewende in Deutschland, 2021⁸¹

Ziele (Referenzjahr)	2020	2030	2050 bzw. 2045
Treibhausgasemissionen (1990)	min. -40 %	min. -55 %	Neutralität
Anteil EE am Bruttoendenergieverbrauch	18 %	30 %	60 %
Anteil EE am Bruttostromverbrauch	min. 35 %	65 % ⁸²	k. A. ⁸³
Anteil EE am Wärmeverbrauch	14 %	k. A.	k. A.
Primärenergieverbrauch (2008)	-20 %	-30 %	-50 %
Endenergieproduktivität (2008)	2,1 %/a	2,1 %/a	2,1 %/a
Bruttostromverbrauch (2008)	-10 %	-	-25 %
nicht erneuerbarer Primärenergieverbrauch Gebäude (2008)	k. A.	-55 %	k. A.
Wärmebedarf Gebäude (2008)	-20 %	k. A.	k. A.
Endenergieverbrauch Verkehr (2008)	-10 %	k. A.	-40 %

Der größte Teil der Zielmarken für das Jahr 2020 wurde wohl nicht erreicht, wie das Ministerium im Monitoring-Bericht zur Energiewende einräumte.⁸⁴ Allein der Anteil Erneuerbarer Energien am Bruttostromverbrauch lag über den angestrebten Werten, während sich etwa die Sektoren Verkehr und Gebäude in 2019 negativ entwickelten und mehr Energie als im Vorjahr verbrauchten. Auch bei der Senkung der Treibhausgasemissionen wurden die Vorgaben verfehlt und 2019 nur rund ein Drittel statt der angestrebten 40 % erreicht. Selbst die pandemiebedingte Sonderentwicklung des Jahres 2020 führte nur zu einer Gesamtreduktion von 39 % und wie erwartet liefen die Werte in 2021 wieder in Richtung derjenigen des Jahres 2019. Das eigene Fazit lautet: „Deutschland muss sich insbesondere bei der Reduktion der Treibhausgasemissionen [...] sowie des Primär- und Endenergieverbrauchs anstrengen, um seine Verpflichtungen im Rahmen der 2020-Ziele für die einzelnen EU-Mitgliedstaaten einzuhalten.“ Dies gilt umso mehr mit Blick auf die Tatsache, dass die Verringerung der Emissionen Anfang der 1990er Jahre um rund 10 % durch den ebenfalls als Sondereffekt zu bezeichnenden Umbau der Energiewirtschaft der DDR zurückzuführen ist, mit der Abschaltung der letzten Kernkraftwerke 11 % der CO₂-freien Stromerzeugung kompensiert werden müssen und der Strombedarf gleichzeitig durch die Verkehrswende steigen wird.

81 Quelle: BMWi (Hg.): 8. Monitoring-Bericht zur Energiewende (August 2021), S. 12.

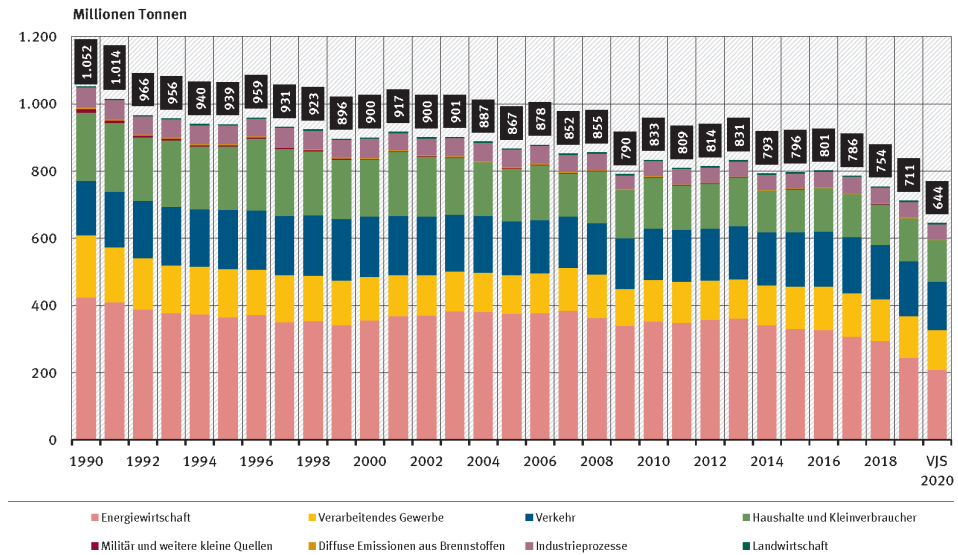
82 Ziel nach Klimaschutzprogramm 2030 und nach EEG 2021. Voraussetzung hierfür ist ein weiterer zielstrebig, effizienter, netzsynchroner und zunehmend marktorientierter Ausbau der erneuerbaren Energien in den kommenden Jahren. Hierfür ist der weitere Ausbau der Stromnetze zentral.

83 Das EEG 2021 sieht nach dem Gesetzentwurf der Bundesregierung von September 2020 vor, dass vor dem Jahr 2050 der gesamte Strom, der im Bundesgebiet erzeugt oder verbraucht wird, treibhausgasneutral erzeugt wird.

84 BMWi (Hg.): 8. Monitoring-Bericht zur Energiewende (2021), S. 4–6.

Grafik 5: Bundesdeutsche Kohlendioxidemissionen 1990–2020⁸⁵

Emissionen von Kohlendioxid nach Kategorien



Kohlendioxid-Emissionen: ohne Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft
 Verkehr: ohne land- und forstwirtschaftlichen Verkehr
 Haushalte und Kleinverbraucher: mit Militär und weiteren kleinen Quellen (u.a. land- und forstwirtschaftlichem Verkehr)

Quelle: Umweltbundesamt, Nationale Treibhausgas-Inventare 1990 bis 2019 (Stand 12/2020) sowie Vorjahresschätzung (VJ5) für das Jahr 2020 (PI 07/2021 vom 15.03.2021)

85 Quelle: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/treibhausgas-emissionen-in-deutschland/kohlendioxid-emissionen#kohlendioxid-emissionen-im-vergleich-zu-anderen-treibhausgasen>, letzter Aufruf 4.9.2021.

