

Energie, Entropie und Wirtschaftswachstum¹

Reiner Kümmel

Institut für Theoretische Physik und Astrophysik der Universität Würzburg.

Zusammenfassung

Energieumwandlung in Verbrennungsanlagen und Maschinen ist ein gewichtiger Faktor des Wirtschaftswachstums der Industrieländer. Naturgesetzlich ist sie über Entropieproduktion mit umweltbelastenden Emissionen von Teilchen und Wärme verbunden. Zudem existieren absolute physikalische Grenzen für Effizienzsteigerungen der Energienutzung bei unveränderter Nachfrage nach Energiedienstleistungen. Der große Unterschied zwischen der Energiedichte fossiler und nuklearer Energiequellen einerseits und der Dichte der von der Sonne gelieferten fluktuierenden Energien andererseits erfordert für die Umstellung des Energiesystems auf erneuerbare Energien langfristig vorausschauend komplexe Energie-, Emissions- und Kosten-Optimierungen und entsprechende Anpassungen der wirtschaftlichen Rahmenbedingungen an identifizierte nachhaltige Entwicklungspfade.

1 Energie, Entropie und Emissionen

Das „Grundgesetz des Universums“, wie die ersten zwei Hauptsätze der Thermodynamik auch genannt werden, zeigt den Januskopf der Energienutzung: Sie schafft materiellen Wohlstand und belastet die Umwelt. Werkeln doch für jeden Deutschen in unseren Maschinen und Verbrennungsanlagen etwa 45 Energiesklaven, von denen jeder rein rechnerisch so viel leistet wie ein Schwerstarbeiter. Deren Energieumwandlung in Arbeit und Wärme geht unvermeidbar einher mit Entropieproduktion. Dabei ist Entropie das physikalische Maß für Unordnung, und ihre Produktion ist mit Emissionen von Teilchen und Wärme verkoppelt. Sind diese Emissionen so stark, dass sie die molekulare Zusammensetzung der Biosphäre und die Energieflüsse durch dieselbe spürbar verändern, und erfolgen die Veränderungen schneller als sich die Lebewesen und ihre Gesellschaften daran anpassen können, wirken sie als Umweltbelastungen. Zudem vermindert die Entropieproduktion den *Exergie* genannten, wertvollen, für jede Energiedienstleistung verwendbaren Anteil einer Energiemenge und erhöht den wertlosen, *Anergie* genannten Anteil, z.B. an die Umgebung abgegebene Wärme. Damit sind Effizienzsteigerungen der Energieumwandlungsprozesse unüberwindbare physikalische Grenzen gesetzt.

Sorgen bereiten die Kohlendioxyd (CO₂)-Emissionen aus der Verbrennung von Kohle, Öl und Gas. Sie bedrohen die Klimastabilität. Die Ursachen und Risiken des anthropogenen Treibhauseffekts, wie auch die Einwände der allmählich verstummenden sog. "Klimaskeptiker", werden andernorts (Kümmel, 2011) ausführlicher dargestellt. Zwar mögen gemäß der „Peak Oil (and Gas)“-Theorie (vergl. Strahan, 2007) die Fördermengen von konventionellem Öl und Erdgas zwischen den Jahren 2010 und 2020 ihr Maximum erreichen und dann unvermeidlich abnehmen, wobei die seit 2007 sich entwickelnde Wirtschaftskrise bei stark gestiegenen Ölpreisen ein Vorbote von „Peak Oil“ sein könnte (Murray und

¹ Festvortrag auf dem Bauphysikertreffen 2013 der Hochschule für Technik Stuttgart am 29.11.2013

King, 2012). Doch angesichts der Verflechtung von Energie und Wirtschaft ist von „Peak Oil“ keine, wenn auch brutale, „Lösung“ der Emissionsproblematik zu erwarten. Vielmehr wird bei hinreichend hohen Öl- und Gaspreisen die Förderung der in Ölsand und Teerschiefer gebundenen großen Vorräte nicht-konventionellen Erdöls und Erdgases wirtschaftlich. Diese Förderung erfolgt inzwischen unter erheblichen unmittelbaren Umweltbeeinträchtigungen in den USA und Kanada. Auch die Kohlereserven reichen noch lange. Energieknappheit wird nicht die Minderung der CO₂-Emissionen erzwingen.

Während im Jahre 1990 der Energiesektor für 50% der globalen CO₂-Emissionen verantwortlich war und im Jahre 2000 etwa 70% aller Treibhausgase ausstieß, gilt für das Jahr 2012 folgende Mitteilung der Max-Planck-Gesellschaft² vom 3. Dezember 2012: "Die globalen Kohlendioxid-Emissionen in die Atmosphäre werden im Jahr 2012 mit 35,6 Milliarden Tonnen wohl erneut einen Rekord aufstellen, gibt das internationale Global Carbon Project-Konsortium bekannt. Hierzu trägt vor allem der Anstieg der Kohlenstoff-Emissionen aus der Verbrennung fossiler Brennstoffe bei. Nach Schätzung der Wissenschaftler sind die Emissionen aus dieser Quelle im Vergleich zum Vorjahr um 2,6 Prozent gestiegen. Damit übersteigt er" (übersteigen sie, Verf.) "das Niveau von 1990, welches dem Kyoto-Protokoll zugrunde liegt, um fast 60 Prozent. Die Kohlendioxidkonzentration in der Atmosphäre erreichte 2011 mit einem Volumenanteil von 391 parts per million einen neuen Höchststand. So trug 2011 mit einem Anteil von 28 Prozent China am stärksten zur globalen Gesamtemission bei, gefolgt von den USA (16 Prozent), der Europäischen Union (11 Prozent) und Indien (7 Prozent). In China und Indien stiegen die Emissionen im Jahr 2011 um 9,9 beziehungsweise 7,5 Prozent. Dagegen verringerten die USA ihren CO₂-Ausstoß um 1,8 Prozent, und die Europäischen Union kam sogar auf eine Reduktion von 2,8 Prozent. Deutschlands Emissionen sind nach dieser Studie seit dem Jahr 2000 durchschnittlich um 1 Prozent pro Jahr gesunken." Die energiebedingten deutschen CO₂-Emissionen betragen im Jahr 2010 etwa 750 Millionen Tonnen. Trotz leichten Rückgangs der CO₂-Emissionen in den reichen Industrieländern kann das Ziel, die Treibhausgas-Konzentration auf 560 parts per million und damit den Temperaturanstieg auf zwei Grad Celsius zu begrenzen, wohl nur unter massivem Umsteuern der Wirtschaft erreicht werden.

2 Energie und Wirtschaftswachstum

Beschränkungen werden der wirtschaftlichen Entwicklung nicht nur durch die Naturgesetze auferlegt sondern auch durch den Zwang, die wachsende Staatsverschuldung einzudämmen. So wird in Deutschland durch die 2009 ins Grundgesetz eingeführte Schuldenbremse der Bund ab 2016 gezwungen sein, seine Nettokreditaufnahme auf weniger als 0,35% des Bruttoinlandsprodukts (BIP) zu begrenzen; für die Bundesländer gilt dieser Zwang ab 2020. Diese Begrenzung ist nötig, denn zwischen 2009 und 2012 stieg die Gesamtschuldenlast der Öffentlichen Hand von 1854 Milliarden Euro, oder 77%

²

<http://www.mpg.de/6655948/>

des BIP, auf über 2000 Milliarden Euro, oder 82% des BIP. Die Stützung des Wirtschaftswachstums durch Konjunkturprogramme wird immer schwieriger.

In der Vergangenheit waren Grenzen des Wachstums kein Thema konventionellen wirtschaftlichen Denkens und Handelns. Vielmehr haben seit der ersten kommerziellen Inbetriebnahme von James Watts Dampfmaschine im Jahre 1776 die Industrieländer in wachsendem Maße die gewaltigen Vorräte der fossilen Energieträger ausgebeutet, die die Sonne während 300 Millionen Jahren auf der Erde angelegt hatte. Das hat diesen Ländern in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhundert einen in der Geschichte der Menschheit noch nie dagewesenen Massenwohlstand beschert. Dessen Abhängigkeit von der Energieumwandlung, um die es im Weiteren geht, zeigt zugleich seine Gefährdung, falls Ressourcen- und Umweltprobleme den Energieeinsatz drosseln.

Zwischen Anfang der 1950er und Ende der 1960er Jahre war der Weltmarktpreis für ein Barrel (159 Liter) Rohöl dank der Erschließung der riesigen Ölfelder Amerikas und des Nahen Ostens ständig gesunken. In inflationsbereinigten US Dollars des Jahres 2009 lag der Ölpreis im Jahr 1970 beim historischen Tief von rund 10 Dollar. Dann jedoch sprang er von 15 Dollar in 1973 auf 50 Dollar in 1975, verharrte auf diesem Niveau etwa vier Jahre lang, um dann bis 1981 auf knapp 100 Dollar, das Allzeithoch des 20. Jahrhunderts, zu schießen. Anschließend stürzte der Ölpreis bis 1985 auf 30 Dollar ab. Unter kleineren Schwankungen sank er weiter und lag Mitte der 1990er Jahre wieder nahe beim Niveau von 1973. Danach begann ein Neuanstieg, der 2009 aufs Neue fast 100 Dollar erreichte. Seitdem oszilliert der Ölpreis je nach Weltkonjunktur um diese Marke.

Die erste und die zweite Ölpreisexplosion gingen auf politisch bedingte Ölverknappungen im Gefolge des Jom-Kippur-Krieges und des Irak-Iran Krieges zurück. Sie hatten schwere Einbrüche der Konjunktur in allen westlichen Industrienationen zur Folge, die nach dem Abklingen der Ölpreisschocks wieder wettgemacht wurden. Diese Erfahrungen veranlassten Naturwissenschaftler, Ingenieure und Ökonomen über den Zusammenhang von Energieumwandlung und Wirtschaftswachstum zu forschen. Einige ihrer Ergebnisse werden, gestützt auf „The Second Law of Economics“ (Kümmel, 2011), im Folgenden berichtet.

2.1 Das KLEC-Modell des Wirtschaftswachstums

Ein modernes ökonomisches System - sei es eine ganze Volkswirtschaft oder einer ihrer Sektoren - besteht aus einem Güter und Dienstleistungen produzierenden Unterbau und dem Überbau des Marktes, auf dem die ökonomischen Akteure die Güter und Dienstleistungen handeln. Preissignale, ausgelöst durch Angebot und Nachfrage, besorgen die Rückkopplung zwischen dem Markt-Überbau und dem produzierenden physischen Unterbau. Letzterer besteht aus den Sektoren Landwirtschaft, Industrie und Dienstleistungen. Er schöpft den Wohlstand durch Energieumwandlung in Verbindung mit Informationsverarbeitung. Drei Produktionsfaktoren wirken im physischen Unterbau der Wirtschaft:

- 1) Energieumwandlungsanlagen und Informationsprozessoren samt aller zu ihrem Schutz und Betrieb benötigten Gebäude und Installationen. Sie bilden den Produktionsfaktor Kapital, K .
 - 2) Menschen, die den Kapitalstock K handhaben und überwachen, stellen den Produktionsfaktor Arbeit, L , dar.
 - 3) Energie, genauer Exergie, aktiviert die Maschinen und temperiert die Gebäude des Kapitalstocks. Sie ist der Produktionsfaktor Energie, E .
- Hinzu tritt die menschliche Kreativität C im Sinne von Erfindungen, Ideen und Wertentscheidungen. Sie liefert den Beitrag zur wirtschaftlichen Entwicklung, der von K , L , E nicht erbracht werden kann und von der Zeit t abhängt.

2.2 Produktionstheorie

Der in einem ökonomischen System erwirtschaftete Mehrwert Y der Güter und Dienstleistungen, wie auch der Kapitalstock K , können physisch aggregiert und gemessen werden, und zwar durch Arbeitsleistung und Informationsverarbeitung. Die resultierenden physischen Einheiten werden mittels Äquivalenzfaktoren auf inflationsbereinigte monetäre Einheiten (Euro, Dollar....) von Wertschöpfung Y und Realkapital K umgerechnet. Die monetären Werte von Y und K sind in den Volkswirtschaftlichen Gesamtrechnungen verzeichnet. Die Routinearbeit L wird in jährlich geleisteten menschlichen Arbeitsstunden und der Energieeinsatz E in Petajoule pro Jahr gemessen. Fossile und nukleare Energieträger sowie die Sonneneinstrahlung bestehen praktisch zu 100% aus Exergie.

Die Abhängigkeit der Wertschöpfung (Output) Y von den Produktionsfaktoren wird gemäß der Lehrbuch-Ökonomie durch eine Produktionsfunktion $Y(K,L,E;t)$ beschrieben. Diese ist eine Zustandsfunktion von K,L,E in demselben Sinne, wie in der Thermodynamik Innere Energie, Entropie, Enthalpie und (Helmholtzsche und Gibbsche) Freie Energie Zustandsfunktionen ihrer Variablen sind. Zustandsfunktionen sind zweimal stetig differenzierbar, ihre infinitesimalen Änderungen sind totale Differentiale, und ihre gemischten zweiten Ableitungen müssen gleich sein. Die Lehrbuch-Ökonomie hat eine Reihe von Produktionsfunktionen mit diesen Eigenschaften konstruiert. Systematischer kann man Produktionsfunktionen aus der Wachstumsgleichung berechnen, die die Wachstumsrate der Wertschöpfung, z.B. des Bruttoinlandsprodukts (BIP), den gewichteten Änderungsraten der Produktionsfaktoren K , L , E und der Zeit gleichsetzt. Die Gewichte heißen *Produktionselastizitäten* und sind definiert als die partiellen logarithmischen Ableitungen der Wertschöpfung nach den Produktionsfaktoren und der Zeit. Sie geben an, wie stark die relativen Änderungen der Faktoren K , L , E und der Zeit t zur relativen Änderung der Wertschöpfung beitragen. *In diesem Sinne messen die Produktionselastizitäten die **Produktionsmächtigkeiten** von Kapital, Arbeit, Energie und Kreativität.*

Die Lehrbuch-Ökonomie setzt die Produktionselastizitäten gleich den Anteilen der Faktorkosten an den Gesamtkosten der Wertschöpfung. Im OECD-Mittel waren bisher diese Kostenanteile in etwa für Kapital 0,25, für Arbeit 0,7 und für Energie 0,05. Damit spielt Energie als Produktionsfaktor in der Standard-Ökonomie nur eine ganz geringe Rolle, sofern sie überhaupt berücksichtigt wird. Produktionsfunktionen

mit dieser Kostenanteilgewichtung der Faktoren können jedoch das beobachtete Wirtschaftswachstum der Industrieländer nicht erklären. Es bleibt ein großer, unverstandener Rest - das berühmte-berüchtigte *Solow-Residuum*, das für viele Länder mehr als 50 Prozent der beobachteten Wirtschaftsleistung ausmacht. Diesen Rest deutet die Standard-Ökonomie als Beitrag des technischen Fortschritts zum Wirtschaftswachstum.

Die Gewichtung der Produktionsfaktoren gemäß ihrem Kostenanteil ist eine Konsequenz der Annahme, dass Marktwirtschaften in einem Gleichgewichtszustand arbeiten, der durch Gewinnoptimierung oder intertemporäre Wohlfahrtsoptimierung *ohne irgendwelche Beschränkungen der Faktorkombinationen* bestimmt ist. Führt man die Optimierungsrechnungen jedoch unter der Berücksichtigung zweier Beschränkungen durch, nämlich dass der Kapitalstock mit keinem höheren Auslastungsgrad als dem der Vollausslastung arbeiten kann und dass dem Automationsgrad des Kapitalstocks die Grenze der Vollautomation gesetzt ist, sind selbst unter den Verhaltensannahmen der Gewinn- oder Wohlfahrtsmaximierung Produktionselastizitäten und Faktorkostenanteile nicht mehr gleich.

Darum haben wir in meiner Arbeitsgruppe, insbesondere Dietmar Lindenberger, Julian Henn, Jörg Schmid und ich, zeitweise in Zusammenarbeit mit Wolfgang Eichhorn, sowie Robert U. Ayres und Benjamin Warr die Produktionselastizitäten aus drei partiellen Differentialgleichungen und Regressionsanalysen berechnet. Die Differentialgleichungen folgen, wie die Maxwell-Relationen der Thermodynamik, aus der Forderung, dass die gemischten zweiten Ableitungen einer Zustandsfunktion - hier Produktionsfunktion - gleich sein müssen. Ferner addieren sich zu einem festen Zeitpunkt t die Produktionselastizitäten von K , L , und E zu Eins. Alle differenzierbaren Funktionen der Quotienten L/K und E/K sind Lösungen der partiellen Differentialgleichungen. Deren einfachste nicht-triviale Lösungen, die plausiblen technisch-ökonomischen Randbedingungen genügen, liefern nach ihrem Einsetzen in die Wachstumsgleichung und deren Integration die LinEx-Produktionsfunktion, die *linear* von der Energie und exponentiell von Quotienten aus Kapital, Arbeit und Energie abhängt

2.3 Wirtschaftswachstum und Produktionsmächtigkeiten: Deutschland, Japan, USA

Die LinEx-Funktion enthält einen Kapitaleffizienzparameter und einen Energiebedarfsparameter. Beide können zeitabhängig werden, wenn Kreativität wirkt. Diese Zeitabhängigkeit wird von Logistikkfunktionen oder Taylorreihen modelliert. Bestimmt werden deren Koeffizienten durch Anpassung der LinEx-Funktion an die empirischen Zeitreihen der Wertschöpfung mittels Kleinst-Quadrat-Minimierung. Bei den Anpassungen sind die Nebenbedingungen zu beachten, dass die Produktionselastizitäten nicht negativ werden dürfen. Die so mit Primärenergiedaten berechneten theoretischen Wertschöpfungen (Outputs) von Deutschland, Japan und den USA während der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts weichen nur wenig von den empirischen Zeitreihen ab, und die statistischen Gütemaße sind gut. Das Solow-Residuum ist verschwunden. Während der Ölpreisexplosionen 1973-1975 und 1979-1981 verlaufen Wertschöpfung und Energieeinsatz parallel. Sogar die plötzliche Vergrößerung des Systems "Bundesrepublik Deutschland" nach der Wiedervereinigung in 1990 wird mit Hilfe zeitlicher

Veränderungen der beiden Technologieparameter der LinEx-Funktion reproduziert. Das zeigt das Wirken politischer und technologischer Kreativitätselemente bei der deutschen Wiedervereinigung.

Die zeitlichen Mittelwerte der Produktionselastizitäten (Produktionsmächtigkeiten) der LinEx-Funktion, die für die untersuchten Länder berechnet wurden, sind für die Energie E viel größer und für die Routinearbeit L viel kleiner als die Kostenanteile dieser Faktoren. Für die Kreativität sind sie vergleichbar mit denen der Arbeit L . Ayres und Warr (2009) erhalten ähnliche Ergebnisse für die USA während des ganzen 20. Jahrhunderts. Dabei verwendeten sie die LinEx-Funktion mit konstanten Technologieparametern und Exergie-Daten, in denen die Energieeffizienz-Änderungen der USA schon eingearbeitet sind.

Wie aus natur- und ingenieurwissenschaftlicher Sicht zu erwarten, ist die Energie ein viel mächtigerer Produktionsfaktor als die Standard-Ökonomie annimmt. In Kombination mit der geringen Produktionsmächtigkeit der menschlichen Arbeit ergeben sich daraus gesellschaftspolitische Konsequenzen, die eine Verlagerung der Steuer- und Abgabenlast von der Arbeit auf die Energie nahelegen. Das wird andernorts, (Kümmel, 2011), ausführlicher dargestellt. Für eine derartige Energiesteuer spricht auch, dass sie Anreize zum Einsatz von Energie-Einspartechnologien und damit zur Emissionsminderung gibt.

3 Energieeffizienz

Angesichts des ökonomischen Gewichts der Energie, der Begrenztheit ihrer bisher genutzten, leicht zugänglichen fossilen Quellen und der mit Energieumwandlung und Entropieproduktion verbundenen Umweltprobleme ist die Steigerung der Energieeffizienz ein unverzichtbarer Teil nachhaltigen Wirtschaftswachstums. Doch wird unter „Effizienzsteigerung“ durchaus Unterschiedliches verstanden. Optimisten meinen damit die Erhöhung des Bruttoinlandsprodukts pro eingesetzte Energiemenge. Realisten hingegen betonen, dass es auf Verbesserungen der technischen Wirkungsgrade für die Umwandlung von Primärenergie in Energiedienstleistungen ankommt.

3.1 Bruttoinlandsprodukt pro eingesetzte Energiemenge

Strukturwandel hat in Deutschland, wie in allen industriell hochentwickelten Ländern, sowohl die Beschäftigung als auch die Wertschöpfung von der Landwirtschaft und der Industrie weg und zu den Dienstleistungen hin verlagert. So waren in der Bundesrepublik Deutschland von allen zivilen Beschäftigten im Jahre 1970 noch 8,6 Prozent in der Landwirtschaft, 49,3 Prozent in der Industrie und 42 Prozent im Dienstleistungssektor tätig, und die Anteile dieser drei Sektoren am BIP betragen 3,4, 51,7 und 44,9 Prozent. Hingegen arbeiteten im Jahr 2009 in Landwirtschaft und Industrie nur noch 2,4 und 29,7 Prozent der Beschäftigten, während in den Dienstleistungen ihr Anteil auf 67,8 Prozent zugenommen hatte; gleichzeitig waren die Anteile von Landwirtschaft und Industrie am BIP auf 0,9 und 27,1 Prozent gesunken und im Dienstleistungssektor auf 72 Prozent gestiegen. Keineswegs bedeutet

das jedoch, dass die von Landwirtschaft und Industrie produzierten Gütermengen abgenommen hätten. Vielmehr wurde auf diesen beiden Produktionsebenen die teure menschliche Arbeitskraft im Zuge der Mechanisierung der Landwirtschaft und der Automatisierung der Industrieproduktion durch billigere Kombinationen von Maschinen und Energie ersetzt. Dadurch verbilligten sich ihre Produkte, so dass ihr Beitrag zum BIP sank. Trotz ihres sinkenden Anteils am BIP sind Landwirtschaft und Industrie für die Produktion von Nahrung und hochwertigen Gütern unverzichtbar. Sie benötigen Materialien, die von der energieintensiven, umweltbelastenden Grundstoffindustrie erzeugt werden. Ein Großteil dieser Industrie ist in den letzten 40 Jahren von den Industrieländern in die Entwicklungs- und Schwellenländer verlagert worden. Dabei macht man sich zugleich die dortigen niedrigeren Arbeitskosten und schwächeren Umweltauflagen zunutze.

Die Verbilligung der Agrar- und Industrieprodukte und die Verlagerung der monetären Wertschöpfung in den Dienstleistungssektor haben in Verbindung mit dem Import energieintensiver Produkte aus Entwicklungs- und Schwellenländern dazu geführt, dass das „Bruttoinlandsprodukt pro eingesetzte Energiemenge“ steigt und man von einer Entkopplung von Energie und Wirtschaftswachstum spricht. So fiel in den Jahren zwischen 1990 und 2011 in der Bundesrepublik Deutschland der Primärenergieverbrauch selbst nur wenig - von rund 14800 auf ca. 13500 Petajoule (PJ). Doch der „Primärenergieverbrauch je Tausend Euro BIP“ sank um 33 Prozent. Damit stieg dessen „Energieeffizienz“ genannter Kehrwert um 49 Prozent (BMWi 2012). Manche Autoren extrapolieren derartige Trends über längere Zeiträume in die Zukunft und sprechen dann von möglichen Erhöhungen der „Energieeffizienz“ um Faktoren 4 bis 10. Doch „Energieeffizienzsteigerungen“ durch internationale Arbeitsteilung in dem Sinne, dass die deutsche Wirtschaft im Wesentlichen nur noch komplexe industrielle Endprodukte, Logistik- und Finanzdienstleistungen sowie Blaupausen für Textilien, Sportschuhe, Spielwaren, integrierte Schaltungen und Infrastrukturprojekte produziert, während die Entwicklungs- und Schwellenländer mit niedrigen Sozial- und Umweltstandards uns die energieintensiven Grundstoffe und Vorprodukte liefern, bedeutet keineswegs eine Schonung der *globalen* Energie-, Material-, und Umweltressourcen. Wir verschleiern damit lediglich unseren ökologischen Fußabdruck.

3.2 Wirkungsgradverbesserungen

Erhöhung der technischen Wirkungsgrade für die Umwandlung von Primärenergie in Energiedienstleistungen ist diejenige Energieeffizienzsteigerung, welche dem Umweltschutz und der Ressourcenschonung tatsächlich dient. Dieser Erhöhung sind jedoch unüberwindbare physikalische Grenzen gesetzt. So kann als Folge des zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik der Wirkungsgrad einer Wärmekraftmaschine für die Umwandlung einer Wärmemenge in physikalische Arbeit niemals den sog. „Carnot-Wirkungsgrad“ übersteigen. Dieser ist „Eins minus das Verhältnis von absoluter Umgebungstemperatur zur absoluten Temperatur des Mediums, das die in Arbeit umzuwandelnde Wärme liefert.“ Dabei sind die absoluten Temperaturen die Celsius-Temperaturen plus 273 Grad. Beträgt beispielsweise die Umgebungstemperatur 17 Grad Celsius und die Temperatur des Heißdampfs einer Dampfturbine 527 Grad Celsius, so ist der Carnot-Wirkungsgrad knapp 64 Prozent.

Die modernen Wärmekraftmaschinen sind Dampfturbinen, Dieselmotoren, Ottomotoren und Gasturbinen³. Sie bilden die technische Grundlage der Wohlstandsproduktion in allen Industrieländern bis zum heutigen Tage. Sie wandeln die von der Sonne während 300 Millionen Jahren angelegten Speicher fossiler Energien und nukleare Energiespeicher in Arbeit um. Sklaverei und Leibeigenschaft wurden dank ihrer entbehrlich. Die Dampfturbine hat die höchste Leistungsfähigkeit und wird besonders in Kraftwerken eingesetzt. Begrenzt wird ihr Wirkungsgrad durch die Korrosion des Stahls der Turbinenschaufeln bei Heißdampftemperaturen im Bereich zwischen 540 und 600 Grad Celsius. Dampfturbinen haben derzeit Wirkungsgrade von maximal 45 Prozent, Gasturbinen sowie Kombinationen von Gas- und Dampfturbinen nutzen die Exergie der Energieträger noch besser aus, die Wirkungsgrade von Dieselmotoren betragen 20 bis 25 Prozent, während die von Ottomotoren etwas schlechter sind. Vom idealen Carnot-Wirkungsgrad sind alle unsere Wärmekraftmaschinen noch weit entfernt.

Die naturgesetzlich und technisch bedingten Grenzen für Wirkungsgradverbesserungen bei Wärmekraftmaschinen ist nur eine, wenn auch wichtige Ursache für die erheblichen Umwandlungsverluste der Primärenergien Kohle, Öl, Gas, Uran, Biomasse und Geothermie in Endenergien wie Koks, Briketts, Heizöl, Heizgas, Treibstoffe und Elektrizität. Verluste entstehen auch bei der Umwandlung von Endenergien in Energiedienstleistungen. Konkret betragen laut „Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen 07/2011“ im Jahre 2010 die deutschen Verluste bei der Umwandlung von Primär- in Endenergie (einschließlich des Eigenverbrauchs im Energiesektor) etwa 4000 Petajoule (PJ). Das sind etwa 30 Prozent des um den nichtenergetischen Verbrauch von knapp 1000 PJ verminderten Primärenergiebedarfs in Höhe von rund 14.000 PJ. Von den rund 9000 PJ Endenergie wurden in den Sektoren Industrie, Verkehr und Haushalte etwa je 2550 PJ und im Sektor Gewerbe, Handel, Dienstleistungen knapp 1400 PJ eingesetzt. Die wesentlichen Anteile des Endenergieverbrauchs entfallen auf mechanische Energie (37 %), Raumwärme (31%), Prozesswärme (21%), Warmwasser (4%), Beleuchtung (3%), Prozesskälte (2%) sowie Information und Telekommunikation (2%) (BMW 2012). Zu den aus Endenergie gewonnenen Energiedienstleistungen gehören das Erhitzen von Materialien, das Verformen und Zerschneiden von Werkstoffen, Transportleistungen als Personen- und Tonnenkilometer im Verkehr, Waschen, Kochen, Kühlen und Staubsaugen im Haushalt, Rechenleistungen in Gewerbe, Handel, und Dienstleistungen sowie das Wärmen und Beleuchten von Räumen. Die Verluste bei der Umwandlung von Endenergie in Energiedienstleistungen (Nutzenergie) betragen im Jahre 2007 etwa 49% der Endenergie von 8590 PJ (Tzscheutschler et al., 2009). Aufschlussreich ist ein Vergleich mit dem Jahr 1990. Damals beliefen sich in den alten Bundesländern die Umwandlungsverluste von Primär- in Endenergie auf ca. 26 Prozent und die von Endenergie in Energiedienstleistungen auf 53 Prozent (Heinloth 1993, S. 74). Eine wesentliche Verringerung der Umwandlungsverluste von Primärenergie in Energiedienstleistungen ist in den vergangenen 20 Jahren nicht festzustellen. Insgesamt kam und kommt nur etwa ein Drittel der Primärenergie bei den Energiedienstleistungen an.

³ Die Dampfmaschine, mit der die Industrielle Revolution vor über 200 Jahren begann, ist inzwischen obsolet geworden.

Selbstverständlich könnte noch mehr Primärenergie bei unveränderten Energiedienstleistungen eingespart werden. Das wird aber nicht getan, weil bei den immer noch relativ niedrigen Energiepreisen⁴ die Investitionskosten für wichtige Energiesparttechnologien wie Wärmetauscher-Netzwerke zur Fernwärmeversorgung, Kraft-Wärme-Kopplung zur gemeinsamen Erzeugung von Strom und Wärme, Wärmepumpen zur Nutzung von Ab- und Umgebungswärme und Wärmedämmung von Gebäuden meist nicht durch die eingesparten Brennstoffkosten amortisiert werden. Thermoökonomische Energie-, Emissions- und Kostenoptimierungen (Groscurth 1991) ergeben unter optimistischsten Annahmen bei vorgegebenen Energiebedarfsprofilen von Industrie und Haushalten der alten Bundesländer Einsparpotentiale von gut 40 Prozent, die mit Kostensteigerungen um ca. 50 Prozent erkauft werden (ebd., S. 127). Errichtete man die Energieversorgung einer süddeutschen Stadt mit den Wetterdaten und dem fluktuierenden Elektrizitäts- und Wärmebedarf von Würzburg auf der grünen Wiese und setzte dafür dynamisch optimierte Technikkombinationen ein, so erhält man im Vergleich zum existierenden Würzburg Einsparpotentiale von rund 30 Prozent. 50-Prozent-Einsparungen sind erreichbar, wenn zusätzlich der Hauswärmebedarf durch Wärmedämmung halbiert wird. Die Kostensteigerung beträgt dann weniger als 20 Prozent. Doch weitere Einsparungen, die die 50-Prozent-Schwelle nur geringfügig überschreiten, treiben die Kosten dann steil in die Höhe - auf über 150 bis 200 Prozent (Bruckner et al., 1997). Der Grund dafür ist, dass beim Einsatz aller in Frage kommenden Einspartechiken die vollen Investitionskosten für diese Techniken zu Buche schlagen, während viele der Techniken nur selten bei der Bedarfsdeckung und Energieeinsparung tatsächlich zum Zuge kommen. Wegen dieser Konkurrenz zwischen den Einspartechiken darf man die individuellen Einsparpotentiale der einzelnen Techniken keineswegs addieren. Das bestätigen auch weitere Studien (Lindenberger et al., 2004).

Die Bundesregierung peilt das Ziel an, den Primärenergiebedarf bis 2050 zu halbieren (EWI et al. 2010, S. 6). Das dürfte das Äußerste sein, was bei unveränderter Nachfrage nach Energiedienstleistungen möglich ist. Da der energetische Umbau Deutschlands nicht auf der grünen Wiese sondern im Bestand erfolgt, werden die Kosten deutlich über denen der Optimierungsrechnungen liegen.

4 Erneuerbare Energien

Die Kanzlerin stellt fest: „Eine wirtschaftliche, umweltschonende und zuverlässige Energieversorgung – das ist eine Aufgabe, die zu den größten Herausforderungen des 21. Jahrhunderts zählt. Für die Bundesregierung steht außer Frage: Wir wollen unser Land bei wettbewerbsfähigen Energiepreisen und hohem Wohlstandsniveau zu einer der effizientesten Volkswirtschaften der Welt entwickeln und das Zeitalter der erneuerbaren Energien schneller als ursprünglich geplant erreichen. Auf dem Weg ins Zeitalter der erneuerbaren Energien sind wir aber während der Übergangsphase weiterhin auf hocheffiziente Kohle- und Gaskraftwerke angewiesen. Im Sinne einer verlässlichen Energieversorgung

⁴ Mit 2,4 kWh elektrischer Energie, die rund 0,5 Euro kosten würden, könnte man einen 100 kg schweren Bergsteiger per Seilbahn vom Meeresniveau auf die Spitze des Mount Everest in 8848 m Höhe hieven.

kommt es daher auch auf eine möglichst rasche Fertigstellung der im Bau befindlichen fossilen Kraftwerke bis 2013 an. Darüber hinaus müssen in den nächsten zehn Jahren Kraftwerkskapazitäten mit einer gesicherten Leistung von zehn Gigawatt zugebaut werden.“ (Merkel 2012, S. 10).

Groß ist der Unterschied zwischen der Energiedichte fossiler und nuklearer Energieträger einerseits und den Dichten der uns von der Sonne - direkt über ihre Strahlung und indirekt über Wasser, Wind und Biomasse - gelieferten Energien andererseits. Gewiss wird in Zukunft die Verschmelzung von Wasserstoff zu Helium in immer stärkerem Maße den Weltenergiebedarf decken, und geschieht diese nukleare Energieerzeugung in dem 150 Millionen km von der Erde entfernten Fusionsreaktor Sonne, verliert sich die damit verbundene Entropieproduktion in den Weiten des Weltalls. Die Sonnenstrahlung, die unsere Erde trifft und belebt, ist Entropie-arm und üppig. Ihre Leistung beträgt etwa das Zehntausendfache des derzeitigen Weltenergiebedarfs. Darin liegen ihre langfristig entscheidenden Vorteile. Doch für das Sammeln und Nutzen der solaren Energien bedarf es wegen ihrer geringen Dichten großer Flächen und großer Materialmengen. Werden zur Produktion der Materialien hauptsächlich fossile Energien eingesetzt, handelt man sich deren klima- und gesundheitsschädlichen Emissionen ein. Landknappheit ist ein weiteres Problem.

4.1 Energiequellen heute (BMW 2012 und AGEB).

Im Jahr 2011 hatten die fossilen, nuklearen und erneuerbaren Energien die folgenden Anteile an der Deckung des deutschen *Primärenergiebedarfs* in Höhe von 13.521 PJ: Mineralöl 33%, Erdgas 21%, Steinkohle 13%, Braunkohle 12%, Kernenergie 9%, erneuerbare Energien 11% sowie Andere. Von den 11 Prozent der erneuerbaren Energien entfallen mehr als zwei Drittel, nämlich 7,4 Prozent, auf feste, gasförmige und flüssige Biomasse; der Rest geht mit 0,8 Prozent an Abfälle und Deponiegas, 1,3 Prozent an Windkraft, 0,5 Prozent je an Wasserkraft und an Photovoltaik, 0,15 Prozent an Solarthermie und 0,2 Prozent an Wärmepumpen. Seit 1990 schwankt der deutsche Primärenergieverbrauch je nach Konjunkturverlauf und Witterung um die 14.000 PJ Marke; dabei hat Braunkohle etwas stärker abgenommen als Steinkohle, der Gaseinsatz hat sich ausgeweitet, und die erneuerbaren Energien sind von einem nahezu vernachlässigbaren Beitrag auf ihren jetzigen 11%-Anteil gestiegen. Der deutsche Bedarf an *elektrischer Energie* (Bruttostromerzeugung) belief sich in 2011 auf 612,1 TWh. Das sind 2203 PJ oder rund 16 Prozent des Primärenergiebedarfs. Erzeugt wurde die elektrische Energie zu 24% aus Braunkohle, 18 % aus Steinkohle, 18% aus Kernenergie, 14% aus Erdgas, 1% aus Mineralöl, und 20% aus Erneuerbaren Energien (Wind 8%, Biomasse 5%, Photovoltaik 3%, Wasser 3%, Hausmüll 1%).

4.2 Photovoltaik, Wind, Gas und Speicher

Solarfarmen, die 19 Prozent der Sahara, also 1,6 Millionen km², bedecken, könnten 10 Milliarden Menschen mit einer primärenergetischen Leistung von 4 kW pro Kopf versorgen. Auf jeden Deutschen entfallen derzeit rund 5,5 kW. Der Primärenergieträger wäre Wasserstoff, der durch die Hydrolyse von Wasser mittels Strom aus Solarzellen gewonnen würde (Erbrich, 1975). Die Creme der deutschen

Wirtschaft hatte 2009 die DESERTEC Industrie Initiative „DII GmbH“ gegründet. Ziel der zugehörigen Stiftung war und ist es, mittels solarthermischer Kraftwerke in den sonnenscheinreichen Gebieten rund um das Mittelmeer einen wesentlichen Teil des Energiebedarfs der Anrainerstaaten und 15 Prozent des europäischen Strombedarfs bis 2050 zu decken⁵. Man rechnete mit Kosten von 400 Milliarden Euros. Auch wenn sich inzwischen einige große Firmen aus DESERTEC zurückgezogen haben, zeigen diese Zahlen und Visionen, was im Prinzip physikalisch möglich ist und in einer kooperativen Welt technisch realisiert werden könnte.

Grobabschätzungen des spezifischen Flächenbedarfs erneuerbarer Energien in unseren Breiten können sich daran orientieren, dass man zur Befriedigung des deutschen Primärenergiebedarfs aus Solarzellen mit einem Wirkungsgrad von 14% rein rechnerisch rund 40.000 km², das sind etwas mehr als 11 Prozent der Fläche Deutschlands, mit Photovoltaik (PV)-Modulen bedecken müsste (Kümmel 2011, S. 70 und S. 276). Die Agrarfläche Deutschlands beträgt rund 170.000 km². Doch Flächen sind nur eines der Probleme. Weitere kommen mit dem beschleunigten Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland hinzu.

Dank der durch das Erneuerbare Energien Gesetz (EEG) garantierten vorrangigen Einspeisung von Sonnen- und Windstrom ins Netz bei immer noch lukrativer Vergütung zeigt die installierte Kapazität der deutschen PV-Anlagen folgendes Wachstum: von 2500 Megawatt (MW) im Jahr 2006 über 9800 MW Ende 2009 auf ca. 32.000 MW in 2012. Die installierte Windkraft-Kapazität wuchs von 20.622 MW in 2006 über 25.800 MW in 2009 auf geschätzte 31.000 MW in 2012⁶. Doch wegen der wetterbedingten Fluktuationen von Sonnenschein und Wind⁷ sind Kapazitäten kein Maß für den Beitrag zur Stromversorgung. Das zeigt der Vergleich von Kapazitäten mit den tatsächlichen Stromproduktionen. Zum Beispiel betrug 2010 die installierte Kapazität der deutschen Kernkraftwerke (KKW) 21.500 MW (BMWi 2012). Mit etwas mehr als dem Doppelten der PV-Kapazität produzierten die KKW in 2010 zwölfmal so viel Strom wie die PV-Anlagen, und mit 83 Prozent der Windkraft-Kapazität erzeugten sie knapp viermal so viel Strom wie die Windräder. Außerdem müssen für die Fälle von zu wenig Sonne und zu schwachem oder zu starkem Wind thermische Kraftwerke vorgehalten werden, die die Stromproduktion übernehmen. Doch in dieser Lückenbüßerfunktion sind die vorgehaltenen Kraftwerke so wenig ausgelastet, dass sie ihre Investitions- und Betriebskosten nicht durch Stromverkäufe decken können. So fahren die für die Pufferung der Sonnen- und Windfluktuationen wichtigen Gaskraftwerke

⁵ www.DESERTEC.org.

⁶ Quellen: Für 2006 und 2009 (Kümmel 2011, S. 68-70); für 2012 Mitteilung der Bundesnetzagentur vom 20. Juli 2012 laut FAZ vom 21.07.2012.

⁷ Die Würzburger Main Post vom 3. April 2013, S. 18, meldete für 2012: „...massenhafte Atomstromimporte aus Frankreich oder Tschechien sind an den meisten Tagen nicht notwendig“ gewesen und dass an anderen Tagen von deutschen Versorgern bis maximal 200 Euro pro Megawattstunde gezahlt werden mussten, damit das Ausland den überschüssigen Strom aus Sonne und Wind abnahm.

immer größere Verluste ein und schrecken Investoren von Neubauten ab⁸. Sollten diese Verluste die Stilllegung von Gaskraftwerken erzwingen, müssten die Stromnetzbetreiber zur Aufrechterhaltung der Netzstabilität noch häufiger als im ersten Jahr nach der Energiewende-bedingten Abschaltung von acht KKW in die Fahrweise der Erzeugungsanlagen eingreifen. Alternativ wären den Betreibern der Gaskraftwerke Bereithaltungsprämien zu zahlen, die auf die Stromkunden umgelegt werden.

Bei weiterem Ausbau der Stromversorgung durch Sonnenschein und Wind sind Entwicklung und Bau großer Energiespeicher unabdingbar. Doch das kostet viel Geld, das hauptsächlich der schuldengeplagte Staat zur Verfügung stellen muss. Zwar sind Pumpspeicherkraftwerke bestens entwickelt. Doch gegen ihren Bau, z.B. an der Donau, regt sich heftiger Widerstand der Bevölkerung. Ebenso protestieren Bürgerinitiativen gegen die großen Stromtrassen, die den Strom aus Windrädern in der Nord- und Ostsee besonders in den Süden schaffen sollen, dessen KKW dem Abwracken entgegensehen. Dabei herrschen Windgeschwindigkeiten ähnlich denen an der See durchaus auch über Oberbayern und der Schwäbischen Alb. Doch Vorschläge, dort Windparks zu errichten, werden selbst von Kernenergiegegnern entrüstet abgelehnt: „Wir lassen uns unsere schöne Landschaft doch nicht von Windrädern verschandeln.“ Wenn die Sonne scheint und der Wind gut weht, stehen Windräder teilweise still, weil das Netz das Überangebot an Strom nicht fasst. Quellnahe Umwandlung des Stroms in Wasserstoff und dessen Methanisierung mit CO₂ könnte das bestehende Gasnetz als Speicher benutzen. Aber auch hierfür ist noch viel kostspielige Forschungs- und Entwicklungsarbeit zu leisten.

Die monetären Kosten der Energiewende liegen weit über dem, was im Jahr 2011 der damalige Bundesumweltminister den Bürgern verheißen hatte, nämlich zusätzlich nur 0,5 Cent pro kWh Elektrizität. Mehr Wettbewerb auf dem Energiemarkt würde merkliche Kostensteigerungen verhindern. Aber schon allein die Kosten der Einspeisevergütung nach dem EEG und ihre Verteilung auf Industrie und Haushalte sorgen für wachsenden Ärger. Die sozialen Kosten der Energiewende sind noch nicht abzusehen.

Die CO₂-Umweltbelastung der von uns genutzten Energiequellen ergibt sich aus den Lebenszyklus-CO₂-Emissionen pro kWh elektrische Energie, die für den Bau und Betrieb der Erzeugungsanlagen anfallen. Sie liegen für Steinkohlekraftwerke zwischen 700 und 1000 g und für Gaskraftwerke zwischen 430 und 700 g. Für Kernkraftwerke (ohne Entsorgung) werden sie auf 6 bis 32 g geschätzt. Am günstigsten erscheinen Windparks mit 10 bis 20 g spezifischer CO₂-Emissionen. Silizium-Solarzellen hingegen haben spezifische CO₂-Emissionen von 90 bis 190 g (Kümmel, 2011, S. 141). Ihre Umweltbelastung dürfte noch höher sein, wenn sie in China mit Strom aus einem Kraftwerkspark gefertigt werden, dessen durchschnittlicher Wirkungsgrad bei 30% gegenüber dem europäischen

⁸ Erstaunlicherweise hat sich das noch nicht bei allen Fachleuten herumgesprochen. So hielt die deutsche Energieökonomin Claudia Kemfert am 31. Mai 2012 auf der „ASPO Conference 2012“ in Wien einen Vortrag, in dem sie die volle Unterstützung der Energiewende durch die deutsche Privatwirtschaft pries. Auf die Frage, warum die Privatwirtschaft dann nicht die für die Energiewende so wichtigen Gaskraftwerke baue, erwiderte sie, das läge nur daran, dass die Banken bei der Kreditvergabe so zögerlich seien. - Bemerkenswert ist auch, dass Banken hier nicht als Teil der Privatwirtschaft gesehen werden.

Durchschnitt von 38% liegt. Organische Solarzellen sollten besser abschneiden. Aber bis zu ihrer Marktreife muss noch viel Geld in Forschung und Entwicklung investiert werden.

Nach der 2011 erfolgten Abschaltung von acht KKW beträgt die deutsche KKW-Kapazität jetzt nur noch 12.100 MW. Gemäß obigem Zitat der Bundeskanzlerin soll die ausgefallene Kapazität von 9400 MW durch „gesicherte Kraftwerksleistung“ mit einer Kapazität von 10 Gigawatt (=10.000MW) ersetzt werden. Sollte die „gesicherte Kraftwerksleistung“ von fossilen Kraftwerken erbracht werden, kann Deutschland angesichts der zusätzlichen CO₂-Emissionen (bei Ausschluss der umstrittenen Endlagerung von CO₂ in deutschen Böden mittels der CCS Technologie) die beanspruchte Vorreiterrolle beim Klimaschutz nicht aufrechterhalten. Biomasse-Kraftwerke wären eine Alternative. Damit kommen wir zur problematischsten Form erneuerbarer Energien.

4.3 Mit Biomasse in die Sackgasse?

„Es gibt ihn doch: Den Masterplan der Energiewende. Es handelt sich um den Schlussbericht eines Forschungsprojekts im Auftrag des Bundesumweltministeriums. Er kommt vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt in Kooperation mit anderen Instituten. [...] Die Studie kommt zu folgenden Ergebnissen: Bei den erneuerbaren Energien wird auch künftig die Biomasse den weitaus überwiegenden Anteil stellen. Im Jahre 2030 hat sie noch einen Anteil von 46 Prozent an den erneuerbaren Energien. [...]“⁹ Und die „Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.“ sieht unter Berufung auf das Energiekonzept der Bundesregierung die Möglichkeit, dass nach Halbierung des jährlichen deutschen Primärenergiebedarfs von derzeit rund 14.000 PJ auf 7000 PJ im Jahr 2050 knapp 2200 PJ aus Biomasse stammen.

Die geplante Steigerung des heute schon die erneuerbaren Energien dominierenden Anteils der Biomasse an der Energieversorgung ist ineffizient und ökologisch bedrohlich. Einen ersten Eindruck von Biomassen-Ineffizienz gibt die Energiebilanz der Biokraftstoffe, die das Öko-Institut Darmstadt ermittelt und die „Energiedepesche 3, 25. Jahrg., September 2011“ auf S. 29 veröffentlicht hat. Danach benötigen für die Herstellung einer kWh Kraftstoffäquivalent an fossiler Energie (fE) und pflanzlicher Energie (pE): Biomethan aus Mais fE= 0,4 kWh plus pE =1,6 kWh, Ethanol aus Weizen fE=0,5 kWh plus pE=1 kWh, Biodiesel fE=0,3 kWh plus pE= 1 kWh. Auch sonst gilt, dass von allen erneuerbaren Energien die Biomasse den geringsten energetischen Überschuss, englisch EROI¹⁰, hat. Dieser ist definiert als das Verhältnis der Energiemenge¹¹, die ein Prozess liefert, zur Energiemenge, die direkt und indirekt in den Prozess eingespeist wird. Den Stand der EROI-Forschung dokumentieren Murphy und Hall (2010). Danach haben in den USA Biodiesel und Ethanol aus Weizen EROI-Werte zwischen 0,8 und 1,3, während Photovoltaik auf 6,8 und Windturbinen auf 18 kommen. Nach Kunz (2011) sind die mittleren EROI-Werte für Elektrizität aus Wind 18, aus Photovoltaik 8, aus Kernenergie 36, aus Gas 17

⁹ Energiedepesche 2, 26. Jahrg., Juni 2012, S. 18 und <http://tinyurl.com/leitstudie2011>

¹⁰ EROI = Energy Return On Investment.

¹¹ Präziser: Exergiemenge

und aus Kohle 28. Noch leben wir dank unserer Nutzung der nichterneuerbaren Energien in Zeiten reicher energetischer Überschüsse. Sollte uns die Energiewende, wie geplant, in ein Biomasse-Zeitalter schieben, ist Energiekargheit angesagt.

Auch die Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina (2012, S. 11-12) weist darauf hin, dass „Photovoltaik, Solarthermie und Windturbinen [...] eine meist zehnmal höhere Flächeneffizienz (W pro m²) als die pflanzliche Photosynthese“ haben und bekräftigt, dass „die Nutzung von Biomasse mit einem EROI von meist kleiner als 3 stark abfällt. Von den alternativen Energietechnologien trägt die aus Biomasse stammende Energie am wenigsten zur Reduktion der THG-Emissionen bei und hat finanziell den höchsten Preis je eingesparter Tonne CO₂.“ (THG= Treibhausgas). Hinsichtlich der „Ökologischen Risiken, Klima- und Umweltkosten“ heißt es (ebd., S. 8): „scheint eine Ausweitung der Flächen für den Anbau von Energiepflanzen ökologisch fragwürdig. Sie dürfte im Widerspruch zu existierenden Vorschriften zum Schutz von Biodiversität und Natur [...] stehen. [...] In Lebenszyklusanalysen von Biobrennstoffproduktion und –verbrauch müssen [...] folgende weitere Umweltkosten Berücksichtigung finden: Veränderungen in der Bodenqualität und in der Biodiversität; Verunreinigung von Grundwasser, von Flüssen und von Seen mit Nitrat und Phosphat; und im Falle von Bewässerung negative Effekte auf den Grundwasserspiegel sowie die Versalzung von Böden.“

Auch in den USA dominiert Biomasse die erneuerbaren Energien. Sie erhält die höchsten Subventionen. Das Wochenmagazin „Time“ vom 28.10.2013 feiert die erneuerbaren und die nicht-konventionellen fossilen Energien als „Power Revolution“. Es nennt für das Jahr 2010 für An) ENERGIEQUELLEN , Bn) deren Anteil am Gesamtenergieverbrauch und Cn) deren Subventionen („financial benefits to producers and consumers, provisions that reduce tax liability, and research-and-development expenditures“) die folgenden Zahlen:

A1) BIOFUEL, B1) 4,5%, C1) 6,644 Milliarden \$; A2) WIND, B2) 1,4%, C2) 4,986 Milliarden \$; A3) SOLAR, B3) 0,3%, C3) 1,134 Milliarden \$. A4) NUCLEAR, B4) 8,5%, C4) 2,499 Milliarden Dollar. A5) PETROLEUM, B5) 36,5%, C5) 2,82 Milliarden \$; A6) NATURAL GAS, B6) 27,3%, C6) 2,82 Milliarden \$; die Zahlen in C5) und C6) gelten für A5) und A6) zusammen.

Falls die gegenwärtig vorgesehene Ausweitung der Brennstoffgewinnung aus Weizen, Mais, Zucker und Pflanzenölen nicht an energetischer Ineffizienz und monetären Kosten scheitert, sondern in einigen Jahren ökologische Schäden und die Konkurrenz zu Nahrungsmitteln spürbar werden, dürften Bürgerinitiativen gegen die Biomassenutzung mit ähnlichem Nachdruck demonstrieren wie einstmals gegen die Kernenergie.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Das Wirtschaftswachstum der Industrieländer stützt sich ganz wesentlich auf Energieumwandlung. Dabei ist Energieumwandlung in allen natürlichen und technischen Prozessen untrennbar mit Entropieproduktion verbunden. Diese führt zur Emission von Teilchen und Wärme und setzt

Steigerungen der technischen Energieeffizienz naturgesetzliche Grenzen. Dank der Nutzung der fossil und nuklear *gespeicherten* Energien haben wir Bürger der Industrieländer uns in komfortablen Lebensumständen eingerichtet. Die Energiespeicherung hatte die Natur während Jahrtausenden und Jahrtausenden geleistet. Auf diese Leistung müssen bzw. wollen wir in Zukunft verzichten und sie ersetzen durch die Nutzbarmachung der *momentanen* solaren Energieflüsse. Damit wären wir zurückgeworfen in die Lage der vorindustriellen, auf Biomassennutzung angewiesenen Agrargesellschaft, besäßen wir nicht die fossil und nuklear angetriebenen industriellen Produktionskapazitäten, mit deren Hilfe die großtechnischen Anlagen zum Einfangen und zur Speicherung der solaren Energieflüsse geschaffen werden können. Wenn wir uns dazu entschließen, und das sollten wir, muss ein wachsender Teil unseres Bruttoinlandsprodukts für den kapital- und personalintensiven Aufbau dieser Anlagen und der dazugehörigen Infrastruktur aufgewendet werden. Entsprechend weniger steht dann für die Konsumgüter und Dienstleistungen zur Verfügung, an deren Fülle wir uns gewöhnt haben. Darauf sollten wir uns einstellen. Die Gesellschaft muss beschließen, wie die Risiken und Lasten der Energieversorgung zwischen den Bevölkerungsgruppen und Generationen verteilt werden sollen und langfristig-vorausschauend komplexe Energie-, Emissions- und Kostenoptimierungen durchführen. Die notwendigen ökologischen, sozialen, wirtschaftlichen und technischen Rahmenbedingungen sind gesetzlich festzulegen. Geschmeidige Anpassungen dieser Rahmenbedingungen an neue Erfahrungen fördern die nachhaltige Entwicklung. Für überstürzte Revisionen und Kehrtwendungen hingegen gilt „Eile mit Weile“.

Anhang: Zum überstürzten deutschen Ausstieg aus der Kernenergie

Mit großer Zustimmung der Bevölkerung beschloss die deutsche Bundesregierung nach dem 13. März 2011 unter dem Eindruck der Fukushima-Katastrophe und unter Rückgängigmachung der 2010 von ihr eingeführten Laufzeitverlängerungen der Kernkraftwerke, acht Atommeiler sofort und die verbleibenden neun deutschen Kernspaltungsreaktoren bis zum Jahre 2022 für immer abzuschalten. Vor diesem Hintergrund ist es angebracht, an die Unfälle bzw. Risiken von Kernkraftwerken zu erinnern.

A1 Tokay Mura

„Wir orientieren uns doch sehr an dem, was die entwickelten Länder machen“, sagte mir Shigeru Yasukawa, der Leiter des "Energy System Assessment Laboratory" im japanischen Kernforschungszentrum Tokay Mura an der Pazifikküste zwischen Tokyo und Fukushima, als wir 1994 im Zusammenhang mit der Erhebung japanischer Wirtschaftsdaten vor dem dortigen Hochtemperaturreaktor standen. Zuvor hatte ich erklärt, wie gut ich es fände, dass dieser in Deutschland mit vier Milliarden DM Steuergeldern bis zur kommerziellen Stromproduktion entwickelte und nach einem Brennelemente-Problem und dem Tschernobyl-Unfall aufgegebene Kernreaktor wenigstens anderswo weiterentwickelt wird; bietet doch dieser Reaktortyp ein Höchstmaß an Sicherheit, weil bei einem Ausfall

der aktiven Kühlsysteme natürliche Kühlung durch Konvektion und Wärmeabstrahlung eine Kernschmelze verhindert. Yasukawa hatte geantwortet: „Ja, beinahe hätten wir in Japan dann auch die Weiterarbeit an diesem Reaktor aufgegeben“, und auf mein erstauntes: „Warum sollte Japan den Fehler Deutschlands wiederholen?“ kam von ihm der eingangs zitierte Satz. Da Japan eines der höchstentwickelten Industrieländer ist, blieb mir diese Aussage ein Rätsel - bis zur Fukushima-Katastrophe.

A2 Fukushima

Eines der schwersten Erdbeben in der Geschichte Japans und der davon verursachte Tsunami mit Wellenhöhen zwischen 13 m und 15 m zerstörten am 11. März 2011 vier Reaktorblöcke des Kernkraftwerks (KKW) Fukushima 1. In den Blöcken 1, 2 und 3 kam es wegen des Ausfalls der Kühlsysteme zum Schmelzen der metallischen Brennelemente im Reaktorkern („Kernschmelze“). Reaktor 4 war wegen Wartungsarbeiten abgeschaltet. Seine sehr viel Nachwärme entwickelnden Brennelemente lagerten im Abklingbecken im Inneren des Reaktorgebäudes. Auch dessen Kühlung fiel aus. Das Wasser im Abklingbecken erhitze sich. Am 15. März 2011 explodierte Block 4, wohl aufgrund von Wasserstofffreisetzung und Zündung des mit Sauerstoff gebildeten Knallgases. Insgesamt verursachte die Zerstörung der Blöcke 1 bis 4 etwa 10 bis 20 Prozent der radioaktiven Emissionen des Tschernobyl-Unfalls.

Nach allgemeinem Bekanntwerden der Konstruktions- und Sicherheitsmerkmale des KKW Fukushima 1 verstehe ich jetzt besser Yasukawas Bemerkung über die japanische Orientierung an den „entwickelten Ländern“. Auf dem Gebiet der Kernenergie trifft sie insofern zu, als man sich bei der Errichtung der japanischen KKW zu sehr auf ausländisches Know How verlassen hatte. Denn die Kraftwerksblöcke von Fukushima 1 wurden zwischen 1970 und 1978 auf dem japanischen Küstenteil des pazifischen Feuerrings nach Konstruktionsplänen für Siedewasserreaktoren errichtet, die die Firma General Electric primär für die KKW entwickelt hatte, die in den 1960er Jahren in den USA in Betrieb gegangen waren. Störfälle in drei japanischen Kernkraftwerken durch Erdbeben zeigten schon in den Jahren 2005 und 2007, dass bei der Auslegung von Reaktoren, insbesondere derer aus den 1970er Jahren, die in Japan möglichen Erdbebenstärken nicht einkalkuliert worden waren. Doch man nahm das in Kauf. Gleiches gilt für die Tsunami-Risiken. Japanische klassische Gemälde sowie Filme aus dem 20. Jahrhundert zeigen Tsunami-Wellen, die sich höher als 20 m aufsteilen. Für den meerseitigen Teil des Fukushima-1-Geländes existierte jedoch nur eine 5,70 m hohe Schutzmauer, und vorgeschrieben waren lediglich 3,12 m. Die 10 m über dem Meeresspiegel gelegenen Reaktorblöcke 1 bis 4 wurden bis zu 5 m tief überschwemmt. Die Notstromgeneratoren im Untergeschoss der Turbinengebäude lagen nur wenige Meter über dem Meeresspiegel und waren unzureichend vor Überflutung geschützt. So zerstörte das Erdbeben die Verbindung der Reaktorblöcke zum Stromnetz, und der Tsunami legte die

Notstromgeneratoren lahm. Trotz Schnellabschaltung der Blöcke 1-3 konnte die Nachwärme der Brennelemente mangels Kühlung nicht mehr abgeführt werden, und es kam zur Katastrophe¹².

A3 Restrisiko

Nach der Unfallserie in Fukushima 1 nannte die deutsche Bundesregierung das unterschätzte „Restrisiko“ der Kernenergie als Begründung für die Rücknahme der zuvor beschlossenen KKW-Laufzeitverlängerungen¹³ und den Beschluss zum vollständigen Ausstieg aus der Kernspaltungsenergie. Vor der Bundestagswahl 2009 hatten Union und FDP keinen Zweifel an ihrer Absicht gelassen, den rot-grünen Atomkonsens aus dem Jahr 2002, der eine Befristung der Regellaufzeiten der KKW auf 32 Jahre seit Inbetriebnahme vorgesehen hatte, durch die Laufzeitverlängerungen zu ersetzen. Die Wähler hatten sie dann auch mit einer komfortablen Mehrheit im Bundestag ausgestattet. Eine vergleichbar große Mehrheit der deutschen Bevölkerung dürfte dann aber auch den abrupten Schwenk in der Kernenergiepolitik nach dem März 2011 mitvollzogen haben. Was immer diese Mehrheit dazu bewegen haben mag – von Fukushima 1 auf bisher unbekannte und weit unterschätzte Restrisiken deutscher KKW zu schließen, ist irrational. Beschreibt doch das Restrisiko Gefahren eines Systems trotz vorhandener Sicherheitssysteme. Es besteht aus einem abschätzbaren und einem unbekanntem Anteil. Abschätzbar ist z.B. der gleichzeitige, zufällige Ausfall von Sicherheitssystemen. Unbekannt ist z.B. die Wahrscheinlichkeit von Terroranschlägen. Doch für die Fukushima-Katastrophe war nicht die Realisierung eines Restrisikos verantwortlich, sondern eine falsche, nicht ausreichende Auslegung der Anlage gegen Erdbeben und Tsunamis, m.a.W.: die bewusste Inkaufnahme eines bekannten Risikos. In Deutschland hingegen wurde das im Rheintal nahe Koblenz errichtete und am 1. März 1986 in Betrieb genommene KKW Mühlheim-Kärlich wegen baurechtlicher Verfahrensfehler im Zusammenhang mit geologischen Risiken am 9. September 1988 vom Netz genommen; im Sommer 2004 begann der Rückbau.

A4 Harrisburg und Tschernobyl: Risiken wasser- und graphitmoderierter Reaktoren

Das unmittelbare Risiko der Kernenergie liegt in der Möglichkeit eines Unfalls, bei dem sämtliche Kühlsysteme versagen und große Mengen radioaktiven Materials ausgeworfen werden. Für die Risikoanalyse spielt der Moderator eine zentrale Rolle. Die in einer Atomkernspaltung freiwerdenden schnellen Neutronen können nämlich keine weiteren Atomkerne spalten. Sie müssen erst durch den Moderator auf thermische Geschwindigkeiten verlangsamt werden, um die Kettenreaktion aufrechterhalten zu können. Die Siede- und Druckwasserreaktoren westlicher Bauart verwenden Wasser als Moderator. Die in der Sowjetunion entwickelten RBMK-Reaktoren verwenden Graphit.

¹² NISA and JNES, 2011: The 2011 off the Pacific coast of Tohoku Pacific Earthquake and the seismic damage to the NPPs. Nuclear and Industrial Safety Agency (NISA), Japan Nuclear Energy Safety Organization (JNES), April 4, 2011, Japan; www.webcitation.org/5xuhLD1j7

¹³ Die Laufzeitverlängerungen betragen 8 Jahre für die sieben vor 1980 gebauten Anlagen und 14 Jahre für die übrigen zehn Atommeiler.

A4.1 Wassermoderierte Kernreaktoren

In wassermoderierten KKW dient das Wasser auch als Kühlmittel, aus dem der Dampf produziert wird, der die elektrizitätserzeugenden Dampfturbinen antreibt. Der Kühlwasserkreislauf wird von Pumpen aufrechterhalten und sorgt für die richtige Betriebstemperatur der Brennelemente im Reaktorkern. Falls durch einen Unfall der Kühlwasserkreislauf zum Erliegen kommt, heizen sich die Brennelemente auf, und Dampfblasen bilden sich in dem als bald kochenden Wasser. Da die Wasserdichte in den Dampfblasen gering ist, wird die Neutronenmoderation empfindlich geschwächt. Man spricht von einem negativen Temperatur- oder Blasenkoeffizient. Anders gesagt: es werden nicht mehr genügend schnelle Neutronen durch Kollisionen mit Wassermolekülen auf thermische Geschwindigkeiten abgebremst, und die Kettenreaktion kommt zum Erliegen. Durch das Einfahren neutronenfressender Regelstäbe wird der Reaktor noch schneller abgeschaltet. Dennoch kann im schlimmsten Fall die Nachwärme, die die Brennelemente durch Beta-Zerfall noch stunden- oder tagelang nach dem Erlöschen der Atomkernspaltung entwickeln, bei mangelnder Kühlung zum Schmelzen der metallischen Brennelemente im Reaktorkern führen. Ein derartiger Unfall ereignete sich am 28.3. 1979 im KKW Three Miles Island südöstlich von Harrisburg im US-Bundestaat Pennsylvania. Nach einem Ausfall der Kühlwasserpumpen funktionierte zwar die Schnellabschaltung des Druckwasserreaktors. Aber durch technische Mängel und Bedienungsfehler kam es zu einer teilweisen Schmelze des Reaktorkerns und Freisetzung von Radioaktivität. Die Anlage wurde schwer beschädigt. Dieser Unfall ließ die Opposition gegen die friedliche Nutzung der Kernenergie in den westlichen Industrienationen stark anwachsen.

Der kurz nach dem Harrisburg-Unfall im Rahmen einer Studie des Öko-Instituts Freiburg geschriebene Klassiker „Energiewende: Wachstum und Wohlstand ohne Erdöl und Uran“ (Krause et al., 1980) schlug eine alternative Energieversorgung im Sinne des im Titel genannten Programms vor. Er sprach von den Bürgern, die „Deutschland nicht zu ‚Harrisburgland‘ werden lassen wollen“ (ebd., S.23) und prägte die Bezeichnung „Dinosauriertechnologie“ für Kerntechnik (ebd., S.47). Diese Bezeichnung wird von der Anti-Atom-Bewegung gerne als Ausdruck ihrer Verachtung verwendet.¹⁴

A4.2 Graphitmoderierte RBMK Reaktoren

In RBMK Reaktoren sind die stabförmigen Brennelemente in moderierendem Graphit eingebettet. Gekühlt werden sie mit Wasser. Im Gegensatz zu wassermoderierten Reaktoren ist hier der Temperaturkoeffizient (Blasenoeffizient) positiv. Grund dafür ist die Tatsache, dass das Kühlwasser auch immer einen gewissen Teil der Neutronen absorbiert und dass dies beim Entwurf des Reaktors für

¹⁴ Dabei bedenkt man offenbar nicht, dass die Dinosaurier die bislang erfolgreichsten Landwirbeltiere waren und 170 Millionen Jahre lang die Erde beherrschten, bevor sie vor rund 65 Millionen Jahren plötzlich verschwanden. Ursache ihres Massensterbens war Solarenergie- und Biomassen-Mangel wegen eines Meteoreinschlags und/oder heftiger vulkanischer Eruptionen. Die großen Staubmassen, die dabei in die Atmosphäre geschleudert wurden, minderten die Sonneneinstrahlung, und die üppige Vegetation, die Nahrungsgrundlage der Dinosaurier, verkümmerte. Wie unsere ca. zwei Millionen Jahre alte Gattung Homo und insbesondere ein ausschließlich auf Solarenergie angewiesener Homo Sapiens eine derartige Katastrophe überstehen würden, wissen wir nicht.

den Normalbetrieb berücksichtigt werden muss. Versagt nun aus irgendeinem Grunde das Reaktor-Kühlsystem, so erhitzen sich Graphit und Wasser. Im kochenden Wasser bilden sich Dampfblasen. In diesem Falle wird wegen der geringen Wasserdichte in den Dampfblasen die Neutronenabsorption erheblich verringert, während die Moderation durch Graphit weitergeht. Das erhöht die Produktion thermischer Neutronen dramatisch. Wenn Regelstäbe nicht neutronenmindernd eingefahren werden, beschleunigen immer mehr thermische Neutronen die Kettenreaktion, und der Reaktor explodiert. Ein derartiger Unfall ereignete sich am 26. April 1986 im Reaktor 4 des KKW Tschernobyl in der Nähe von Kiew, als in einem schlecht organisierten Sicherheitsexperiment von einer unzureichend ausgebildeten Bedienungsmannschaft etliche Sicherheitsvorschriften bewusst missachtet und viele Bedienungsfehler begangen wurden. Das führte in Verbindung mit dem positiven Temperaturkoeffizienten zu „einer Leistungsexkursion der Kernspaltung-Kettenreaktion um etwa einen Faktor 500, dies innerhalb von weniger als 1 Minute für die Dauer von etwa einer Minute. Die dadurch verursachte Explosion beendete die Leistungsexkursion, zerstörte den Reaktor-Druckbehälter, zerstörte das Reaktorgebäude (welches nicht als druckgeschütztes, geschlossenes Gebäude gebaut war), setzte den Graphit-Moderator in Brand, führte zu einer Freisetzung aller flüchtigen radioaktiven Stoffe und etwa 4 Prozent des gesamten Inventars an Radioaktivität im Reaktor [...]“ (Heinloth, 1997, S. 257-258).

A4.3 Risiko eines GAU in deutschen Kernkraftwerken

Ein größter anzunehmender Unfall (GAU) setzt einen großen Teil des radioaktiven Inventars eines KKW frei. Einen Unfallverlauf wie in Tschernobyl kann es in den deutschen wassermodierten Reaktoren wegen ihres negativen Temperaturkoeffizienten nicht geben. Ein Unfallverlauf wie in Fukushima 1 ist so wahrscheinlich wie die Zerstörung der Notstromgeneratoren deutscher KKW durch einen Tsunami. Dennoch kann wegen der Nachwärmeproduktion nach dem Erlöschen der Kettenreaktion ein GAU auch in den bestehenden deutschen Kernkraftwerken nicht 100-prozentig ausgeschlossen werden. Das Restrisiko wird auf „1 GAU pro eine Million Reaktor-Betriebsjahre“ geschätzt; in Deutschland würde es also beim Betrieb der 20 Reaktoren, die Mitte der 1990er Jahre Strom produzierten, rein rechnerisch einmal innerhalb von 50.000 Jahren zu einem GAU kommen (ebd., S. 227). Das erste Problem einer ethischen Bewertung der Kernenergie (ohne Hochtemperaturreaktoren) ist demnach: Kann eine Energietechnologie verantwortet werden, bei der mit sehr geringer Wahrscheinlichkeit ein Unfall mit sehr großen Folgeschäden auftreten kann? Die radioaktiven Emissionen, die Gesundheitsschäden, die Todesfälle und die Landverseuchung als Folge des Tschernobyl-Unfalls sind ein Beispiel für solche Folgeschäden (ebd., S. 255-260), die auch bei dem sehr geringen Restrisiko deutscher KKW nicht mit Sicherheit ausgeschlossen werden können. Ein Abwägen gegenüber den bekannten Gesundheits- und Umweltrisiken der uns seit 200 Jahren vertrauten Nutzung fossiler Energien hilft vielleicht bei der Gewissensentscheidung.

A5 Entsorgung

Schwer wiegt das Problem der dauerhaften, sicheren Lagerung langlebiger radioaktiver Abfälle aus Kernreaktoren. Es wird durch die Energiewende nicht gelöst, sondern allenfalls quantitativ gemildert.

Denn sichere Endlager werden auf jeden Fall für die Abfälle der deutschen Kernenergienutzung benötigt. Bis zum 31.12.2010 sind 13.471 Tonnen bestrahlter Brennelemente angefallen.¹⁵ Das Gesamtvolumen an endzulagernden, wärmeentwickelnden, radioaktiven Abfällen aus Kernenergienutzung wird in der Prognose des Bundesamts für Strahlenschutz nach Inkrafttreten des geänderten Atomgesetzes vom 6. August 2011 auf 29.030 Kubikmeter geschätzt¹⁶. Falls Salzstöcke wie Gorleben nach sorgfältiger Erkundung als Endlager verworfen werden müssen, ist die Endlagerung langlebiger radioaktiver Abfälle in Felsgestein eine Option, die dem nahe kommt, was die Natur tat, als sie Natururan im Granitgestein des Schwarzwalds oder im 2 km langen, 50 bis 100 m breiten und 1 bis 20 m mächtigen Erzkörper unterhalb des Cigar Lake in Saskatchewan, Kanada, ansammelte. Man müsste den radioaktiven Abfall in geeigneten Behältern einschließen, diese in tief in den Fels gebohrten Löchern versenken, und alle verbleibenden Hohlräume mit wasserundurchlässigem Material verfüllen. Kein Kernenergie nutzendes Land hat diese Option bisher verfolgt. Ein Grund dürften die Kosten sein, die auf 2 bis 3 Eurocent pro Kilowattstunde (kWh) Elektrizität aus KKW geschätzt werden (Heinloth, 2009). Zur Zeit sind die deutschen KKW-Betreiber gesetzlich nur zu Rücklagen in Höhe von 0,5 Eurocent pro kWh für die Entsorgung des radioaktiven Mülls und den Abbau abgeschalteter KKW verpflichtet.

Beim ethischen Abwägen zwischen Energieoptionen muss neben der bisher nicht gelösten Frage der Endlagerung von Atommüll das ebenso wenig bewältigte Problem der Endlagerung des bei der Verbrennung von Kohle, Öl und Gas entstehenden, klimaschädlichen Kohlendioxids bedacht werden. Hierzu ist ein Vergleich von Größenordnungen hilfreich: Ein deutscher 1300 MW Siedewasserreaktor produziert während 7000 Stunden jährlicher Betriebszeit rund 56 Tonnen radioaktiven Abfalls, während ein Kohlekraftwerk gleicher Elektrizitätsproduktion pro Jahr etwa acht Millionen Tonnen Kohlendioxid emittiert, also massenmäßig mehr als das Hunderttausendfache des KKW-Abfalls (Kümmel 2011, S. 152). Die Deponierung des CO₂ in der Atmosphäre hat die Menschheit solange unbekümmert betrieben, bis erst wenige, und dann immer mehr Wissenschaftler auf seine Klimaschädlichkeit hingewiesen hatten. Auch wenn nunmehr CO₂-Rückhaltung und Entsorgung (englisch: Carbon Capture and Storage, CCS) in aller Munde ist, findet auch für CO₂ noch keine klimaverträgliche Endlagerung statt¹⁷. Und gegen die Pläne, CO₂ in tiefe Erdschichten zu verpressen, gibt es in den geologisch dafür infrage kommenden Regionen heftigen Widerstand der Bevölkerung.

Endlagerungsstätten gibt es derzeit weder für abgebrannte Brennelemente noch für das Kohlendioxid aus der Verbrennung von Kohle, Öl und Gas. Letztere deckten im Jahre 2010 mehr als 78 Prozent des deutschen Primärenergiebedarfs. Die Lasten der Atommüll-Entsorgung muss Deutschland tragen. Die Lasten unserer Treibhausgasemissionen bürden wir der ganzen Welt auf; darunter leiden werden am meisten die vom Klimawandel besonders betroffenen Entwicklungsländer. Wer die Risiken der zivilen

¹⁵ siehe: Bundesamt für Strahlenschutz, www.bfs.de/de/endlager/abfaelle/abfallbestand.html

¹⁶ siehe: Bundesamt für Strahlenschutz, www.bfs.de/de/endlager/abfaelle/prognose.html, Stand vom 23.09.2011

¹⁷ Endlagerkapazitäten erschöpfter Öl- und Gasfelder und Möglichkeiten des CO₂-Recycling beschreibt Schüßler (1990).

Nutzung der Kernenergie für inakzeptabel hält,¹⁸ muss die Potentiale sowie die Umwelt-, Kosten- und sozialen Risiken der anderen Energietechniken und -quellen illusionslos zur Kenntnis nehmen.

Literaturverzeichnis

Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen (AGEB), Stand 2012, teils vorläufig.

Ayres, R. U, Warr, B. (2009): The Economic Growth Engine. Cheltenham, UK and Northampton MA, US: Edward Elgar Publishing.

Bruckner, T., Groscurth, H.-M., Kümmel, R. (1997): Competition and synergy between energy technologies in municipal energy systems. In: Energy 22: 1005-1014.

Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi 2012): „Energiedaten – ausgewählte Grafiken“, Stand: 25.01.2012;

<http://www.bmwi.de/BMWi/Navigation/Energie/Statistik-und-Prognosen/energiedaten.html>.

Erbrich, P. (1975): Ernährung und Energiegewinnung – Ergebnisse aus dem zweiten Bericht des Club of Rome. In: Orientierung 39: 79.

Energiewirtschaftliches Institut an der Universität zu Köln, Gesellschaft für wirtschaftliche Strukturforschung Osnabrück, Prognos AG Basel (2010) (EWI et al. 2010): Energieszenarien für ein Energiekonzept der Bundesregierung, Projekt Nr. 12/10 des BMWi Berlin.

Groscurth, H.-M. (1991): Rationelle Energieverwendung durch Wärmerückgewinnung. Heidelberg: Physica-Verlag.

Heinloth, K. (1993): Energie und Umwelt. Stuttgart: B.G. Teubner.

Heinloth, K. (1997): Die Energiefrage. Braunschweig: Vieweg.

¹⁸ Im Jahre 2011 erzeugten weltweit 433 Reaktoren mit einer Leistung von 371.422 MW über 2500 TWh elektrischer Energie und deckten damit ca. 14 Prozent des globalen Strombedarfs; 63 Reaktoren mit insgesamt 62.174 MW sind im Bau (www.world-nuclear.org/info/reactors.html). Offenbar unterscheiden sich Risikobewertung und -akzeptanz vieler Länder von denen Deutschlands.

Heinloth, K. (2009): Klimaverträglichkeit von Arten der Energiebereitstellung für Nahrung, Wärme, Strom, Treibstoffe. In: Nordmeier, V., Götzebauch, H. (Hrsg.), Beiträge zur MNU-Tagung Regensburg 2009, MNU/M_09_02/M_09_02.pdf. Berlin: Lehmann Media.

Krause, F, Bossel, H., Müller-Reißmann,, K.-F. (1980): Energiewende - Wachstum und Wohlstand ohne Erdöl und Uran. Frankfurt/M: S. Fischer.

Kümmel, R. (2011): The Second Law of Economics - Energy, Entropy, and the Origins of Wealth. New York, Dordrecht, Heidelberg, London: Springer.

Kunz, H. (2011): private Mitteilung, veröffentlicht in (Kümmel 2011, S. 73).

Lindenberger, D., Bruckner, T., Morrison, R., Groscurth, H.-M., Kümmel, R. (2004): Modernization of local energy systems. In: Energy 29: 245-256.

Merkel, A. (2012): Energie und Rohstoffe für morgen – sicher, bezahlbar, effizient. In: Wirtschaft in Mainfranken 02/2012: 10-11.

Murphy, D., Hall, C. (2010): Year in review – EROI or energy return on (energy) invested. In: Ann. N. Y. Acad. Sci. 1185: 102-118.

Murray, J., King, D. (2012): Oil's tipping point has passed. In: Nature 481: 433-435.

Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina (2012): Bioenergie: Möglichkeiten und Grenzen; Kurzfassung und Empfehlungen. Halle (Saale): Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina.

Schüßler, U. (1990): Deponierung und Aufbereitung von CO₂. In: Physik in Unserer Zeit 21: 155-158.

Strahan, D. (2007): The Last Oil Shock. London: John Murray.

Tzscheutschler, P., Nickel, M., Wernicke, I., Buttermann, H.G. (2009): Energieverbrauch in Deutschland. In: Brennstoff, Wärme, Kraft 61/ 6: 6-14.