

# 1. Einleitung

## 1.1 Energie: Grundlagen und Geschichte

„Energie“ (die „wirkende Kraft“, der Bedeutung des griechischen Wortes *energeia* zufolge), ist naturwissenschaftlich betrachtet in erster Linie ein physikalisches Phänomen<sup>1</sup>, definiert als die „Fähigkeit stofflicher oder nicht-stofflicher Systeme an ihrer Umgebung Arbeit zu verrichten, sowie Wärme oder Strahlung an sie zu übertragen.“ (Winter 1993 zit. in Brauch 1997)

Wie alle Lebewesen auf der Erde war auch der Mensch in seiner ca. 1 Million Jahre langen Geschichte immer auf den Gebrauch von Energie angewiesen. Während Pflanzen und Tiere jedoch nur soviel Energie umsetzen, per Ernährung oder Photosynthese, wie zur Aufrechterhaltung ihrer physiologischen Funktionen notwendig ist, begannen die Menschen bereits vor etwa 400.000 Jahren mit dem Gebrauch des Feuers (CMA 1997:2), d.h. mit der exosomatischen Verbrennung organischen Materials zur Freisetzung der darin gebundenen Energie, um sich so vor Kälte zu schützen, Nahrung zuzubereiten oder Feinde und gefährliche Tiere fernzuhalten.

Spätestens mit der agrarischen Revolution wurde die energetische Basis der Menschheit durch die Nutzung tierischer Arbeitskraft dann ein zweites Mal entscheidend erweitert, mit den sich immer weiter entwickelnden technischen Fähigkeiten, steigenden kulturellen Ansprüchen und der stetig wachsenden Bevölkerungszahl stieg jedoch auch der Bedarf der Menschen an Wärme, Nahrung, mechanischer Arbeit, Transporten, usw. und da sich die Energie des Feuers und die Kraft der Tiere nur für recht wenige Zwecke nutzen ließ, und die regionalen Kapazitätsgrenzen der Biomasseproduktion meist schnell erreicht und des öfteren, mit z.T. irreversiblen Folgeschäden, dann auch überschritten wurden (und ein Ausweichen auf die Energieangebote anderer Regionen wegen des hohen, nicht zuletzt auch energetischen, Aufwands für Transporte nur sehr begrenzt möglich war), begann man bald nach weiteren Energiequellen zu suchen und fand diese v.a. in Wasser und Wind. So nutzen die Menschen z.B. seit über 6000 Jahren den Wind als Schiffsantrieb und auch Wasser- und Windräder zum Antreiben von Mühlen oder Pumpen waren schon bei den antiken Zivilisationen weit verbreitet und überdauerten bis in die Neuzeit, am Ende des 19. Jahrhunderts gab es in Europa z.B. über 100.000 Windmühlen und in den USA zigtausende der sogenannten „Westernräder“. (Lehmann/Reetz 1995:57f)

---

<sup>1</sup> Früher gemessen in Kalorien (cal) oder auch in Steinkohleeinheiten (SKE), heute allgemein in Joule (J) = Kraft (N) \* Weg (m). Für Strom wird auch die Einheit Kilowattstunde (kWh) verwendet, wobei 1 Watt als die Leistung von 1 Joule pro Sekunde definiert ist.

Wie vielleicht bereits deutlich wurde, kann das Phänomen „Energie“ in vielen unterschiedlichen Formen auftreten, so z.B. als thermische, mechanische, elektrische oder elektromagnetische Energie, als atomare oder (bio)chemische Bindungsenergie oder auch in Form von Strahlung (z.B. Licht oder Radioaktivität). Alle diese Energien rühren jedoch letztlich von den thermodynamischen und radioaktiven Prozessen in Sternen, den Bewegungen und Gravitationskräften der Himmelskörper sowie den natürlichen (bzw. den menschlich ausgelösten) nuklearen Zerfallsprozessen her, weshalb streng genommen auch nur diese drei als „Energiequellen“ bezeichnet werden dürften<sup>2</sup>. Die Medien hingegen, die die dem System Erde zugeführte Energie aufnehmen und über eine kürzere oder längere Dauer speichern, also Boden, Gestein, Wasser, Wind und Biomasse (sowie deren natürlich erzeugte Folgeprodukte Torf, Öl, Erdgas und Kohle), sollten, zusammen mit den Kernbrennstoffen Uran und Thorium (sowie evtl. Deuterium), als Energieträger, genauer: als *Primärenergieträger*, bezeichnet werden. Die technisch aus diesen Primärenergien hergestellten Energieträger, wie Heizöl, Kraftstoffe, Strom oder Fernwärme, werden entsprechend auch als *Sekundärenergieträger* bezeichnet, meist aber spricht man von *Endenergieträgern* (bzw. der *Endenergie*), da die Energie nun in der Form vorliegt, in der sie zum Ort ihrer letztendlichen Verwendung gelangt (wobei auch die unverändert vom Verbraucher bezogenen Primärenergieträger wie Erdgas und Kohle dann als Endenergieträger gelten), und schließlich gibt es auch noch den etwas weniger gebräuchlichen Begriff der *Nutzenergie*, womit die Energieform bzw. -menge gemeint ist, die letztlich, nach allen beim Verbraucher noch nötigen Umwandlungen (z.B. zu Wärme oder Antriebskraft) zur Verfügung steht, um die jeweils gewünschte „Energiedienstleistung“ zu erfüllen.<sup>3</sup> (Kaltschmitt/Wiese 1997:8f)

Wenn auch die Energiemenge auf der Erde insgesamt immer annähernd gleich bleibt, so nimmt sie doch bei jeder der natürlichen und anthropogenen Umwandlungen in ihrer Arbeitsfähigkeit ab, man spricht dabei, gemäß dem 2. Hauptsatz der Thermodynamik, von zunehmender Entropie, d.h. einem sinkenden Anteil arbeitsfähiger „Exergie“ (z.B. Wasser in einem 1000 m hoch gelegenen See) zugunsten zunehmenden Anteilen kaum arbeitsfähiger „Anergie“ (z.B. großräumig verteilte Wärme). Allein die permanente Zufuhr sog. „Negentropie“ aus den drei o.g. Energiequellen, v.a. die hochkonzentrierte Sonnenenergieeinstrahlung, verhindert den am Ende dieser Prozesse stehenden „Entropietod“ der terrestrischen Energieflüsse. (Winter 1997)

---

<sup>2</sup> Aus sprachlichen Gründen wird diese begriffliche Abgrenzung im folgenden aber nicht immer beibehalten. Im übrigen wird physikalisch gesehen, Energie eigentlich nirgends erzeugt, und auch nicht verbraucht, sondern nur umgewandelt, wie der sog. erste thermodynamische Hauptsatz besagt, und als die eigentliche Quelle sämtlicher Energie ist wahrscheinlich eher der Urknall anzusehen.

<sup>3</sup> Aufgrund unzureichender statistischer Erfassbarkeit wird aber selten auf der Ebene der Nutzenergie gerechnet und wenn, dann geht man meist von der Endenergie aus und berücksichtigt zusätzlich den technischen Wirkungsgrad (der angibt, wieviel der eingesetzten Endenergie in Nutzenergie überführt wird und wieviel nicht-nutzbringend verlorengeht) des jeweils verwendeten letzten Umwandlungsprozesses (z.B. der Heizung, des Motors, etc.)

Aufgrund der dadurch gegebenen absoluten Begrenztheit der Nutzung von Energieflüssen und Energieträgern durch den Menschen wird im Hinblick auf die hier zu behandelnde Problematik eine weitere Unterscheidung notwendig, und zwar in (in menschlichen Maßstäben gemessen) erneuerbare und erschöpfliche Energie“quellen“. Unter ersteren werden dabei die Energieflüsse (z.B. in Form des Wasserkreislaufes, des Windes oder der Bioproduktion) verstanden, die laufend aus der Sonnenstrahlung, den Gezeitenströmen und der Erdwärme gespeist werden (vgl. Kap.4.1) und daher eigentlich niemals „aufgebraucht“ werden können, sofern man ihre Produktions- bzw. Funktionsvoraussetzungen bei der Nutzung beachtet. Die sog. „fossilen“ (also vor Millionen von Jahren gebildeten) Energieträger Kohle, Öl und Gas müssen hingegen aufgrund der für ihre Entstehung benötigten Zeiträume (und nicht immer gegebenen Bedingungen) ebenso wie die einmalig entstandenen (und nicht besonders großen) Uran- und Thoriumreserven der Erde als nicht erneuerbar und, bzgl. der von ihnen auf der Erde vorhandenen Mengen (vgl. Kap.3.3), als erschöpflich angesehen werden.<sup>4</sup> (Kaltschmitt/Wiese 1997: 9f)

Über Jahrtausende hinweg waren die Menschen nun, wenn auch auf einem sehr begrenzten Verbrauchsniveau, allein mit den nicht-erschöpflichen Energieangeboten in Form von Biomasse, Wind und Wasser ausgekommen (wenn man von der gelegentlichen Nutzung zufällig entdeckter und einfach zugänglicher Kohle- und Gaslagerstätten einmal absieht) aber mit der Erfindung der Dampfmaschine im Jahre 1765 und der wirtschaftlichen und technischen Dynamik der darauffolgenden 150 Jahre waren die Leistungsgrenzen der vorindustriellen solaren Energietechniken plötzlich erreicht. (Sieferle 1997) Zwar wurde bereits 1878 eine solarthermisch angetriebene Dampfmaschine vorgestellt und im Jahr 1880, zeitgleich mit der beginnenden Elektrifizierung auch das erste kleine Wasserkraftwerk gebaut<sup>5</sup>, das bis 1930 in Deutschland bereits 3600 und in den USA sogar 6 Millionen Nachfolger hatte (Scheer 1998:56), die immer besseren Explorations- und Abbauverfahren und die enorm gestiegene Nachfrage nach transportabler, konzentrierter Energie führten dennoch bereits 1885 dazu, daß die Biomasse von der Kohle als dominierender Energieträger abgelöst wurde (Brauch 1997) und die folgende, v.a. durch die wirtschaftliche Entwicklung der Industrieländer und das beständige Bevölkerungswachstum bedingte, enorme Steigerung des weltweiten Energieverbrauchs von ca. 32,5 EJ im Jahr 1890 auf ca. 100 EJ im Jahr 1950 und ca. 400 EJ heute (Nentwig 1995, IEA 2001) beruhte dann fast ausschließlich auf der Ausbeutung der fossilen Energievorräte, dabei wurde die Kohle wiederum schon 1965 vom Erdöl als wichtigster Energieträger abgelöst. (Brauch 1997).

---

<sup>4</sup> Torf und Deuterium sind Grenzfälle, sollen hier aber zu den nicht-erneuerbaren Energieträgern gezählt werden.

<sup>5</sup> Und sogar solch modern anmutende Technologie wie die Photovoltaik wurde schon 1839 entdeckt, bis zum Bau der ersten Solarzelle sollten allerdings noch 115 Jahre vergehen. (Scheer 1998:55ff)

Abb. 1.1: Primärenergieverbrauch (nach Energieträgern) weltweit von 1890-1990 (aus: Nentwig 1995)

## **1.2 Fragestellung und Aufbau der Arbeit**

Aufgrund der zentralen Bedeutung des Energiesystems für die gesamte soziale, wirtschaftliche und technologische Struktur menschlicher Gesellschaften bietet sich die Untersuchung der Energieproblematik als Ausgangsbasis für die dringend notwendige Entwicklung nachhaltiger Wirtschafts- und Gesellschaftsmodelle an. Die sich im Hinblick auf die absehbare Erschöpfung der fossilen Energievorräte und die ökologischen sowie gesellschaftlichen „Nebenwirkungen“ jeglicher Energienutzung in Verbindung mit den (in Kap.3 diskutierten) Anforderungen des Nachhaltigkeitsprinzips aufdrängende Frage ist dabei, wie die momentane Energieversorgung auf Basis fossiler und nuklearer Energieressourcen durch ein dauerhaft funktionierendes, ökologisch und sozial verträgliches Energiesystem ersetzt werden kann. Die dieser Arbeit zugrundeliegende Fragestellung ist daher, wie das Potential der dafür m.E. einzig in Frage kommenden regenerativen Energien quantitativ und qualitativ zu beurteilen ist und welche optionalen Wege verschiedener Energiegewinnungs-, -verteilungs und -nutzungskonzepte (incl. der Verbrauchsvermeidung) sich dabei einschlagen lassen bzw. eingeschlagen werden sollten. Ausgehend von den in Deutschland verfügbaren regenerativen Energie“quellen“ und deren nationalen Angebotspotentialen (Kap.4) soll dies hier (in Kap. 5 und 6) am Beispiel der Energieversorgung Deutschlands, deren ökonomischer, politischer und statistischer Rahmen zunächst skizziert werden wird (Kap. 2), untersucht werden, nicht nur weil Industrieländer wie Deutschland (noch) den größeren Anteil des weltweiten Energieverbrauchs verursachen, sondern auch weil aufgrund der globalen ökonomischen, politischen und auch kulturell-psychologischen Verflechtungen m.E. erst eine deutliche Abkehr der industrialisierten Länder von den fossilen Energien auch einen globalen Wechsel der menschlichen Energiebasis ermöglichen wird.

## 2. Energie in Deutschland: Geschichte, Daten, Trends

### 2.1 Entwicklung der Energiewirtschaft und -politik in Deutschland

**Wie in allen Industrieländern, so fand auch in Deutschland in den letzten 150 Jahren eine rasche Ausweitung der Energienutzung statt. Lag der Primärenergieverbrauch (PEV) im Jahr 1860 noch bei rund 500 PJ, waren es 1938 bereits 5000 PJ. Trotz der Kriegsschäden war schon 1975 eine weitere Verdopplung auf 10.000 PJ erreicht und im Jahr 2000 verbrauchte das Land schließlich 14.354 PJ jährlich. (CMA 1997, Brauch 1997, AG Energiebilanzen 2002)**

**Abb. 2.1: Energieverbrauch in (der Bundesrepublik) Deutschland 1950-1990 (aus: Kristof 1992)**

**Im Verlaufe dieser Entwicklung hat sich die Energieversorgung Deutschlands sowohl in bezug auf die verwendeten Energieträger als auch strukturell grundlegend verändert. Aus der bis zur Mitte des 19. Jahrhunderts noch überwiegend dezentral betriebenen Gewinnung und Nutzung regionaler Energievorkommen, v.a. in Form von Holz, entwickelte sich mit dem „Switch“ zu fossilen Energieträgern (zunächst Kohle, später Öl, Uran und Erdgas) und dem rasanten technischen Fortschritt, der immer neue und weiträumigere Transportmöglichkeiten (z.B. per Eisenbahn oder in Form des neuen Energieträgers Strom) mit sich brachte, nach und nach ein großindustriell und überregional bis international organisierter Wirtschaftszweig. Der damit einhergehende ökonomische und räumliche Zentralisierungsprozeß wird besonders am Beispiel der Entwicklungen in der Elektrizitätswirtschaft deutlich. War die Stromversorgung in den Städten zu Beginn des 20. Jhts. noch durch unabhängige, kommunale Stadtwerke aufgebaut und betrieben worden, unterlagen diese bereits in**

den 20er/30er Jahren der Konkurrenz der aus den sog. Überlandzentralen hervorgegangenen großen Energieversorgungsunternehmen (EVU), die seitens des Staates nicht nur mit regionalen Versorgungsmonopolen versehen worden waren, sondern auch stark von den zentralisierungsfördernden Regelungen im 1935 erlassenen "Gesetz zur Förderung der Energiewirtschaft" (EnWG)<sup>6</sup> profitierten. (Hänel 1998: 28f)

Die so bereits vor dem 2. Weltkrieg verfestigte Vormachtstellung der großen EVU wurde auch durch das ab 1949 für Energiepolitik<sup>7</sup> zuständige Bundeswirtschaftsministerium (BMW) nicht in Frage gestellt (ebd.), stattdessen setzte man, u.a. begründet mit weit überhöhten Energiebedarfsprognosen<sup>8</sup> (Seifried 1991a:18), die großtechnisch und oligopolistisch orientierte Strategie fort, so z.B. mit dem Einstieg in die Atomenergie oder dem Verbot des Baus von Kraftwerken unter 300 MW Leistung. Seitens der z.T. stark von den Einnahmen aus Wegerechts- und Konzessionsvergabe abhängigen Kommunen gab es ebenfalls kaum gegenläufige Bestrebungen, und wenn, dann wurde dies von den überregionalen Großversorgern durch Maßnahmen wie dem Auskaufen der Eigenerzeuger mit Dumpingpreisen, dem Einkaufen in die betreffenden Stadtwerke oder der Blockade von Netzzurückkäufen wirkungsvoll bekämpft. (Paul 1998:17ff, 44ff) Bis zum Ende der 90er Jahre lag die von öffentlichen Unternehmen geleistete Stromversorgung (etwa 85 %<sup>9</sup>) daher im wesentlichen in den Händen von neun regionalen Versorgermonopolen, wobei diese nicht nur die Kraftwerke und Netze, sondern auch den internationalen Energiehandel und den Endverkauf betrieben. (Hänel 1998:30) Erst die in den 90er Jahren durch die Marktliberalisierungsbestrebungen der Europäischen Union erzwungene Novellierung des deutschen EnWG sorgte für ein ansatzweises Aufbrechen dieser Strukturen. Das entsprechende „Gesetz zur Neuregelung des Energiewirtschaftsrechtes“ (NeuEnWR) trat 1998 in Kraft, dabei wurde u.a. die staatliche Investitionsaufsicht abgeschafft, die freie Stromlieferantenwahl ermöglicht und das Konzessionsvertragsmonopol eingeschränkt. Zu einer Ausgliederung des Netzbetriebes aus den EVU kam es allerdings nicht und auch die Durchleitungspflicht blieb stark eingeschränkt, so daß weitere Konzentrationsprozesse

---

<sup>6</sup> Mit diesem bis 1998 fast unverändert gültigen „Grundgesetz“ der Strom- u. Gaswirtschaft, das Anlagenbetrieb, Preispolitik, Investitionsvorhaben und sogar die Unternehmensstruktur der Energieversorger unter staatliche Oberaufsicht stellte, wurde (nicht zuletzt wg. der Kriegsvorbereitungen) v.a. der Zweck verfolgt, durch die Konzentration der energiewirtschaftlichen Strukturen größere Versorgungssicherheit und niedrige, stabile Preise zu erreichen.

<sup>7</sup> Nach Schmidt (1995) ist Energiepolitik „im engeren Sinne die Staatstätigkeit, die auf verbindliche Regelungen des Systems der Erzeugung, Verteilung und Verwendung von Energie zielt. Im weiteren Sinne (ist es) die Gesamtheit der institutionellen Bedingungen, Kräfte und Bestrebungen, die darauf gerichtet sind, gesellschaftlich verbindliche Entscheidungen über die Struktur und Entwicklung der Bereitstellung, Verteilung und Verwendung von Energie zu treffen.“ (zit. in Brauch 1997)

<sup>8</sup> So prognostizierte z.B. das Energieprogramm 1973 einen Anstieg um 70 % in den folgenden 13 Jahren, tatsächlich waren es fast 0 %.

<sup>9</sup> Die restlichen 15 % resultieren aus industrieller Eigenherzeugung und den Kraftwerken der Deutschen Bahn.

**absehbar waren.<sup>10</sup> (Paul 1998: 22ff,64f) Zwar standen die alten Monopolisten nun zunächst einigen neuen Konkurrenten und vereinzelt Wiederbelebungsversuchen kommunaler Energieversorgung gegenüber, in dem nur unvollständig liberalisierten Markt konnten sie ihre Machtstellung aber schon bald, wenn auch z.T. fusioniert oder unter neuem Namen, weiter ausbauen.**

---

<sup>10</sup> Kritiker äußerten den Verdacht, daß genau dies auch beabsichtigt war und daß das BMWi große, kapitalstarke EVU wolle, die die deutsche Großindustrie mit billigem Strom beliefern und dabei gegen ausländische Konkurrenten bestehen können.“ (Paul 1998:77)

**Ein wesentlicher Grund für die durchgängige politische Tendenz zur Zentralisierung war, die Wirtschaftlichkeit und Versorgungssicherheit der Energieversorgung zu verbessern. Neben diesen Zielen war und ist es aber auch Aufgabe der deutschen Energiepolitik, die Sozial- und Umweltverträglichkeit energiewirtschaftlicher Strukturen sicherzustellen, schon ab 1958 wurde z.B. die Kohlebranche aus sozialen Gründen gegen die Konkurrenz durch Importkohle und Mineralöl geschützt und bis heute wird die Förderung und Nutzung deutscher Steinkohle stark subventioniert und per Abnahme- und Verstromungsverpflichtungen gestützt. (Brauch 1997)**

**Die ersten bedeutenderen umweltrelevanten Maßnahmen erfolgten allerdings erst aufgrund der zwei Ölkrisen 1973 und 1979, die weitreichende Energiesparanstrengungen auslösten und damit nicht nur einen erstmaligen (z.T. allerdings auch rezessionsbedingten und daher vorübergehenden) Rückgang des bis dahin permanent ansteigenden Energieverbrauchs (vgl. Abb. 2.1) bewirkten und einen bis heute anhaltenden Abwärtstrend beim spezifischen Energieverbrauch<sup>11</sup> einleiteten, sondern auch eine erste Renaissance der Nutzung und Erforschung regenerativer Energiequellen zur Folge hatten. Spätestens mit der Ende der 70er Jahre aufkommenden Umweltschutzbewegung und deren Kritik an Atomenergie und Waldsterben wurden ökologische Aspekte dann aber zu einer zentralen energiepolitischen Zielkomponente (was sich auch bald in ersten Erfolgen wie z.B. einer deutlichen Reduktion der von Industrie- und Kraftwerksfeuerungen ausgehenden Schadstoffbelastungen zeigte) und unter dem in den 90er Jahren auch in die Energiepolitik eingegangenen Leitbild der Nachhaltigkeit (vgl. Kap.3) ist die ökologische und soziale Verträglichkeit der Energieversorgung den wirtschaftlichen Zielen dann schließlich (zumindest rhetorisch) vollends gleichgestellt worden.**

**Unter dem Aspekt der Nachhaltigkeit energiepolitisch besonders bedeutsam wurde in neuerer Zeit auch die Klimaschutzpolitik, die neben der internationalen Handlungsebene (der Unterstützung und Ratifizierung der Klimakonvention und die Beteiligung an den von 1995 bis 2001 u.a. in Berlin, Kyoto, Den Haag, Bonn und Marrakesch durchgeführten Klimakonferenzen) ja auch nationale Maßnahmen erforderlich machte, um die eingegangenen Verpflichtungen (Reduktion des CO<sup>2</sup>-Ausstoßes um 25% bis 2005 bzw. der wichtigen 6 Treibhausgase um 21 % bis 2012, jeweils gegenüber 1990)**

---

<sup>11</sup> Primärenergieverbrauch / Mrd. Euro Bruttoinlandsprodukt



einlösen zu können.<sup>12</sup> Vor allem die rot-grüne Bundesregierung hat dies zu einem Schwerpunkt ihrer ersten Legislaturperiode gemacht und dafür u.a. eine „ökologische Steuerreform“<sup>13</sup> durchgeführt. (BMU 2000a:1) Diese sog. „Ökosteuer“ wird seit 1999 auf Kraftstoffe (Anfangssatz 6 Pf/l, bis 2003 jährliche Erhöhung um 6 Pf/l), Heizöl (4 Pf/l), Erdgas (0,32 Pf/kWh) und Strom (2 Pf/kWh, bis 2003 jährliche Erhöhung um 0,5 Pf/kWh) erhoben, für das produzierende Gewerbe sowie die Forst-, Land- und Fischereiwirtschaft wurden allerdings, mit dem Argument der gefährdeten internationalen Wettbewerbsfähigkeit, weitreichende Ausnahmeregelungen (auf 20% ermäßigter Steuersatz ab 1000 DM Sockelbelastung, Möglichkeit eines Nettobelastungsausgleichs) beschlossen. (Staiß 2001:I-176)

Neben diversen weiteren auf Energieeinsparung abzielenden Maßnahmen, wie z.B. der Erneuerung von Selbstverpflichtungsabkommen mit der Wirtschaft, der Zusammenführung der veralteten Wärmeschutz- und Heizanlagenverordnungen in Form einer restriktiveren Energieeinsparverordnung (EnEV) und dem „Gesetz zu Erhalt, Modernisierung und Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung“ (BMU 2000a:23), sollte das zweite wesentliche Standbein der rot-grünen Klimaschutzpolitik aber der ernsthafte Einstieg in die regenerative Energieversorgung bilden. Die diesbezüglich schon vor 1998 recht erfolgreichen Maßnahmen wie z.B. die Investitionskostenzuschüsse durch das 250 MW-Wind- oder das 1000-Dächer-Photovoltaikprogramm, zinsgünstige Darlehen durch die Kreditanstalt für Wiederaufbau (KfW) und die diversen Förderungen, z.B. per Eigenheimzulage, wurden daher z.T. erheblich ausgeweitet, z.B. hat man ein mit 1 Mrd. DM dotiertes 100.000-Dächerprogramm für Photovoltaik-Strom begonnen und auch das Marktanzreizprogramm der KfW wurde mit einer zehnfach höheren Fördersumme neu aufgelegt.<sup>14</sup> Die hinsichtlich Fördervolumen und Auswirkungen bedeutsamste Maßnahme bestand allerdings in der Verabschiedung des Erneuerbare Energien-Gesetzes (EEG), das mit dem Ziel „im Interesse des Klima- und Umweltschutzes eine nachhaltige Entwicklung der Energieversorgung zu ermöglichen und ... den Anteil erneuerbarer Energien am gesamten Energieverbrauch bis zum Jahre 2010

---

<sup>12</sup> Von den bis 2001 erreichten 15,4 % bzgl. CO<sub>2</sub> und ca. 18 % bei den Treibhausgasen insgesamt ist allerdings weniger als die Hälfte den umwelt- und energiepolitischen Maßnahmen anzurechnen, der Rest geht auf den wiedervereinigungsbedingten Verbrauchsrückgang in den neuen Bundesländern sowie die damit einhergehende Einschränkung der Braunkohleverwendung zurück. (Enquete 2002:259) Das Erreichen der o.g. Zielsetzungen ist mit der gegenwärtigen Energie-, Wirtschafts- und Umweltpolitik daher sehr unwahrscheinlich.

<sup>13</sup> Dieses sogenannte „Querschnittsinstrument“ soll über langfristig und dauerhaft ansteigende Energiepreise zumindest teilweise die fehlende Internalisierung der externen Kosten der Nutzung fossiler Energieträger und deren mangelhafte Knappheitspreisbildung ersetzen und so zu einem energieverbrauchsmindernden Nachfragewandel durch Substitution, Innovation und Verzicht führen. (Priewe 1998) Ob dies in der Praxis auch wirklich so gut funktioniert, muß allerdings angezweifelt werden, (vgl. u.a. Huber 2001, Massarrat 1998)

**mindestens zu verdoppeln“ (§1 EEG) eine deutliche Ausweitung des seit 1990 bestehenden Stromeinspeisegesetzes vornahm, wobei v.a. die Erhöhung der Vergütungssätze (für Windstrom z.B. auf durchschnittlich<sup>15</sup> 17,8 Pf/kWh, für Biomasse auf 17-20 Pf/kWh und für Photovoltaik-Strom sogar auf 99 Pf/kWh) dafür sorgte, daß das gesamte finanzielle Förderungsvolumen für erneuerbare Energien im Jahr 2000 auf ca. 2,3 Mrd. DM anwuchs. (Staiß 2001:I-99,108,170ff)**

---

<sup>14</sup> Die Zuschüsse der KfW wurden allerdings 2001 quasi „über Nacht“ drastisch gekürzt, z.B. erhält man für solarthermische Heizungsunterstützung nur noch 170 DM/m<sup>2</sup> Kollektorfläche statt wie bisher 320 DM/m<sup>2</sup> und der Teilschulderlaß für Biomasse-KWK-Anlagen wurde von max.1,5 Mio.DM auf 10.000 DM reduziert, der für Wasserkraft- und Biogasanlagen ganz gestrichen (Staiß 2001:I-114f)

<sup>15</sup> Bei Windenergie gilt das etwas komplizierte Referenzstandortmodell, wonach weniger ertragreiche Standorte stärker gefördert werden.

## 2.2 Energieerzeugung und -verbrauch in Deutschland im Jahr 2000

**Der Primärenergieverbrauch (PEV) in Deutschland lag im Jahr 2000 bei 14.354 PJ<sup>16</sup>. Davon entfielen 2008 PJ auf den Energieträger Steinkohle, 1547 PJ auf Braunkohle, 5500 PJ auf Mineralöl, 2995 PJ auf Erdgas, 1849 PJ auf die Kernergie, ca. 314 PJ<sup>17 18</sup> auf Erneuerbare Energien<sup>19</sup>, 132 PJ auf sonstige Energieträger (u.a. Müllverbrennung) sowie 9 PJ auf das Außenhandelsaldo. (AG Energiebilanzen 2002 / Staiß 2001:II-15)**

**Abb. 2.2: Primärenergieverbrauch 2000 nach Energieträgern (Quelle: AG Energiebilanzen 2002 / Staiß 2001)**

**Abzüglich des nicht-energetischen Verbrauchs von ca. 7,6 % (z.B. für Kunststoff, Schmierstoffe, Asphalt) sowie der Verluste im Umwandlungssektor (Stromerzeugung- und verteilung, Raffinerien) von ca. 28 % ergibt sich für das Jahr 2000 ein Endenergieverbrauch von 9241 PJ in Form von 1730 PJ Strom, 334 PJ Fernwärme, 2807 PJ Kraftstoff, 4363,5 PJ Brennstoffen und 6,5 PJ Erd- und Solarwärme (AG Energiebilanzen 2002). Davon dienten 36 % der Bereitstellung von Raumwärme und Warmwasser und 21 % der Erzeugung von Prozeßwärme (incl. der Kochwärme in Haushalten). Weitere 30,7 %<sup>20</sup> entfielen auf mechanische Energie für Fahrzeuge und Bahn, ca. 3,4 % ent-**

<sup>16</sup> Dies entspricht 489,8 Mio. t Steinkohleeinheiten (SKE). Diese Maßeinheit soll im folgenden aber nicht weiter verwendet werden.

<sup>17</sup> Schätzung, da die genaue Erfassung (v.a. der privaten Wärmeerzeugung aus Holz) praktisch unmöglich ist. (Staiß 2001:I-25)

<sup>18</sup> Bei der Berechnung des PEV wird seit 1995 gemäß internationaler Konvention die Wirkungsgradmethode angewandt. Dabei wird der Wasserkraft, Windenergie und Photovoltaik ein Wirkungsgrad von 100 % unterstellt, bei Strom aus Biomasse wird aber weiterhin der mittlere Wirkungsgrad der konventionellen Kraftwerke (ca. 38 %) angesetzt, bei Wärmeerzeugung und Kraftstoffen aus Biomasse gilt entsprechend der Verluste bei der konventionellen Energiebereitstellung ein Wirkungsgrad von 92 %. (Staiß 2001:II-15)

<sup>19</sup> Wasserkraft, Windenergie, Photovoltaik, Solarthermie, Geothermie und Biomasse (siehe Abbildung 2.5)

<sup>20</sup> ergibt sich aus Mineralöl- und Stromverbrauch im Sektor Verkehr und dem Mineralölverbrauch bei Gewerbe, Handel, Dienstleistungen

fielen auf Beleuchtung, Information und Kommunikation und ca. 8,9 % auf sonstige mechanische Energieanwendungen<sup>21</sup>. (VDEW 2001 / eigene Berechnungen).

Kraftstoffe <b>2807 PJ</b>	Strom <b>1730 PJ</b>	Brennstoffe (Kohle, Öl, Gas, Müll, Biomasse) <b>4363,5 PJ</b>	S <sup>22</sup> 340 PJ
-------------------------------	-------------------------	--	------------------------------

Fahrzeuge/Bahn <b>2839 PJ</b>	Mech. Energie <b>823 PJ</b>	L <sup>23</sup> 310 PJ	Prozeßwärme <b>1940 PJ</b>	Raumwärme/Warmwasser <b>3331 PJ</b>
----------------------------------	--------------------------------	------------------------------	-------------------------------	--

**Abb. 2.3: Endenergieverbrauch 2000 nach Anwendungszwecken**  
(Quelle: AG Energiebilanzen 2002 / VDEW 2001 / eigene Berechnungen)

Von den 14.354 PJ Primärenergieverbrauch wurden im Jahr 2000 5273 PJ zur Erzeugung von Strom eingesetzt (AG Energiebilanzen 2002), daraus resultierte eine Inlandserzeugung von 564 TWh<sup>24</sup>. Diese beruhte zu 30 % auf Kernenergie, zu 25,3 % auf Steinkohle, zu 26 % auf Braunkohle, zu 8,5 % auf Erdgas, zu 0,5 % auf Heizöl, zu ca. 5,8 % auf Erneuerbaren Energien<sup>25</sup> und zu ca. 3,8 % auf sonstigen Energieträgern (u.a. Müll). (Staiß 2001: II-9 u. II-15)

**Abb. 2.4: Bruttostromerzeugung und Nettostromverbrauch 2000** (Quelle: Staiß 2001 / VDEW 2001)

**Zuzüglich des Stromimportsaldos von 2,5 TWh und abzüglich des Kraftwerkseigenverbrauchs und der Netzverluste von 86 TWh ergibt sich somit ein Nettostromverbrauch**

<sup>21</sup> Dazu zählen v.a. Antriebe von Maschinen, aber auch z.B. das Kühlen und Gefrieren, sowie die Antriebsenergie für (die in der VDEW-Statistik zur Warmwassererzeugung gerechneten) Wasch- und Spülmaschinen.

<sup>22</sup> Sonstige (Fernwärme, Solar- und Geothermie)

<sup>23</sup> Stromverbrauch für Licht und IuK-Anwendungen

<sup>24</sup> incl. der Erzeugung in bahn- und industrieeigenen Anlagen

<sup>25</sup> Wasserkraft, Windenergie, Photovoltaik und Biomasse

**von 480,5 TWh (1730 PJ), das entspricht einem Anteil am Endenergieverbrauch von 18,7 %. (AG Energiebilanzen 2002) Fast 50 % davon entfielen auf mechanische Energie, 19 % auf Prozeßwärme, knapp 14 % auf Raumwärme und Warmwasser und 17 % auf Beleuchtung sowie Information und Kommunikation. (VDEW 2001 / eigene Berechnungen)**

**Der Beitrag der erneuerbaren Energien zur Endenergiebereitstellung belief sich im Jahre 2000 auf 290 PJ<sup>26</sup>. Den größten Anteil daran hatte die Wärmeerzeugung aus biogenen Brennstoffen<sup>27</sup> mit 52,6 %. Substantielle Beiträge lieferten auch die Stromerzeugung aus Wasserkraft (27,2 %), Windenergie<sup>28</sup> (11,4 %) und Biodiesel (4,6 %). Der Rest verteilt sich auf die Stromerzeugung aus Biomasse, Biogas und Deponiegas (2 %) Photovoltaik (0,1 %) sowie die Wärmeerzeugung durch solar- (1,5 %) und geothermische Anlagen (0,5 %).**

**Abb. 2.5: Endenergiebereitstellung aus erneuerbaren Energien 2000 (Quelle: Staiß 2001)**

**Die erneuerbaren Energien trugen so mit 158,5 PJ (3,0 %) zur gesamten Endenergiebereitstellung im Anwendungsbereich Wärme (ca. 5271 PJ) bei, davon entfallen 94,5 % auf die Wärmeerzeugung aus festen Brennstoffen. Der Beitrag der EE an der Stromerzeugung von 32.850 GWh (5,8 %) beruht zum größten Teil auf der Wasserkraft (21.935 GWh = 3,9 %) und Windkraft (9.200 GWh = 1,6 %). Die Stromerzeugung aus Biomasse (1626 GWh) ist hingegen gering und stammt zudem fast zur Hälfte aus der Verstromung von Klär- und Deponiegas. Der Beitrag der EE von 13,4 PJ (knapp 0,5 %) zum kraftstoffbedingten Endenergieverbrauch (2807 PJ) wird fast ausschließlich durch**

---

<sup>26</sup> Die Wärme- und Stromerzeugung aus Müll-/Klärschlammverbrennung ist hier nicht mitberücksichtigt. (vgl. Staiß 2001:1-25)

<sup>27</sup> Schätzung, vgl. Anmerkung 11

<sup>28</sup> Der Beitrag der Windenergie ist inzwischen deutlich gestiegen, das soll zugunsten einer einheitlichen Datenbasis an dieser Stelle vernachlässigt werden, siehe hierfür Kap.4.3.5.

**Biodiesel erbracht, die Anzahl der mit Biogas, Pflanzenöl oder solarem Wasserstoff betriebenen Fahrzeuge ist bisher statistisch nicht relevant.**

**Sektoral betrachtet wurde die im Jahr 2000 bereitgestellte Endenergie von 9.241 PJ zu 28,1 % von den privaten Haushalten, zu 16 % von den sogenannten Kleinverbrauchern des Sektors Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD)<sup>29</sup>, zu 26,1 % von Bergbau<sup>30</sup> und Industrie und zu 29,7 % vom Verkehr verbraucht. (AG Energiebilanzen 2002)**

**Abb. 2.6: Endenergieverbrauch 2000 nach Sektoren (Quelle: AG Energiebilanzen 2002)**

**Die privaten Haushalte benötigten den überwiegenden Teil der Energie für die Raumwärme- (75,5 %) und Warmwasserbereitstellung (11,4 %). Weitere 4 % wurden für Prozeßwärme (v.a. zum Kochen) gebraucht, 5,5 % für mechanische Energie und 3,5 % für Beleuchtung, Information und Kommunikation (IuK). Prozeßwärme, mech. Anwendungen, Licht und IuK waren dabei für ca. 67 % des Stromverbrauches von 131 TWh verantwortlich (VDEW 2001), z.B. entfielen (im Jahr 1998) 7,1 % auf Beleuchtung, 17,8 % auf das Kühlen bzw. Gefrieren, 7,6 % auf Elektroherde, 8,7 % auf Waschen, Spülen und Trocknen und 5,9 % auf Radio und TV. (VDEW 1998 zit. in Enquete 2002:313f)**

**Auch bei den Kleinverbrauchern entfiel ein Großteil des Endenergiebedarfs auf Raumwärme (46 %) und Warmwasser (10,3 %). Mit 14,9 % ist der Bedarf an Prozeßwärme hier aber sehr viel größer, ebenso wie der Bedarf an mechanischer Energie mit 11,7 %. Hinzu kommen ca. 123 PJ (8,3 %), die dem Kraftstoffverbrauch (v.a. in Bau- und Landwirtschaft und Militär) zuzurechnen sind. Die verbleibenden 8,7 % entfielen auf Beleuchtung und IuK. (VDEW 2001)**

---

<sup>29</sup> Land- und Forstwirtschaft, Bau, Kleinbetriebe des verarbeitenden Gewerbes, Handel, Dienstleistungen, Militär

<sup>30</sup> ohne energiewirtschaftlichen Bergbau

**In beiden Sektoren zusammen ergibt sich so ein Endenergiebedarf von ca. 3075 PJ für Raumwärme und Warmwasser, ca. 188 PJ für Prozeßwärme (ohne Strom), ca. 123 PJ für Kraftstoffe und 188 TWh Strom für Prozeßwärme, mechanische Anwendungen, Beleuchtung und IuK.**

**Im Sektor Bergbau und Industrie stellt sich die Anwendungs- und Bedarfsstruktur anders dar. Der größte Energiebedarf besteht hier bei der Prozeßwärme (1612 PJ, das sind 66,3 %), wovon über die Hälfte durch Gase und über ein Drittel durch Mineralöl und Kohle abgedeckt wurden. Auf mechanische Energieanwendungen entfielen ca. 501 PJ (= 20,6 %), die zu 97 % als Stromverbrauch anfallen. Der Strombedarf für mechanische Anwendungen, Beleuchtung/IuK und Prozeßwärmeerzeugung belief sich damit auf 208,5 TWh. Lediglich 10,1 % des gesamten Energiebedarfs (= 244,1 PJ) entfielen hier auf Raumwärme und Warmwasser.**

**Wiederum völlig anders ist der Energiebedarf im Sektor Verkehr strukturiert, da dessen Endenergieverbrauch von 2745 PJ zu fast 99 % (in Form von 2663 PJ Mineralölkraftstoff und 14,7 TWh Strom) auf der mech. Anwendung Transport<sup>31</sup> beruht. Darüberhinaus wurden lediglich noch 11,7 PJ für Raumwärme sowie 0,8 TWh Strom (für Licht/IuK) benötigt. (VDEW 2001)**

### **2.3 Entwicklungstendenzen des Energieverbrauchs in Deutschland**

**In den letzten Jahren haben sich beim Energieverbrauch einige Tendenzen abgezeichnet, die für eine Abschätzung des zukünftigen Bedarfs von Bedeutung sind. So hat der Primärenergieverbrauch zwischen 1990 und 2000 zwar um 562 PJ bzw. 3,7 % abgenommen, davon ist jedoch ein Großteil auf die nach der „Wende“ erfolgte Modernisierung bzw. den (nicht selten ersatzlosen) Abbau der ineffizienten Kraftwerke und Industrieanlagen in den neuen Bundesländern zurückzuführen.<sup>32</sup> Seit einem Minimum von 14.184 PJ im Jahre 1994 nimmt der Primärenergieverbrauch (trotz der seitdem weiterhin um 1,4 % p.a. gestiegenen Energieproduktivität<sup>33</sup>, vgl. Enquete 2002:259f) denn auch wieder deutlich zu, so daß er im Jahr 2001 schon wieder bei 14.565 PJ lag. Noch deutlicher wird dieser Trend beim Endenergieverbrauch, der nach einem**

<sup>31</sup> Ca. 0,5 % davon entfielen auf die Schifffahrt, 1,5 % auf Busse, 10 % auf Luft- und 3 % auf den Schienenverkehr, die restlichen 85 % verursachten der motorisierte Individual- und der Straßengüterverkehr. (Enquete 2002:270, Werte beziehen sich auf 1999)

<sup>32</sup> Allein 1991 ging der Primärenergieverbrauch in den neuen Bundesländern um 25 % zurück (Enquete 2002:259f)



**Absinken von 9487 PJ (1990) auf 9110 PJ (1994) bis zum Jahr 2001 bereits wieder auf 9456 PJ gestiegen ist. Sektoral betrachtet ergeben sich dabei allerdings deutliche Unterschiede: Während der Energieverbrauch in den Bereichen Industrie/Bergbau und GHD im Zeitraum 1991-2001 um ca. 11 % zurückging, ist der Verbrauch der Haushalte um rund 8 %<sup>34</sup> und der des Verkehrs um 10 % gestiegen. (AG Energiebilanzen 2002).**

---

<sup>33</sup> Primärenergieverbrauch / Mrd. Euro Bruttoinlandsprodukt

<sup>34</sup> Im Sektor private Haushalte haben kalte und warme Winter einen relativ großen Einfluß auf den Energieverbrauch, deshalb ist hier der Mittelwert 1999-2001 in Relation zum Mittelwert 1990-1992 berechnet.

**Die voraussichtliche Entwicklung des Energieverbrauchs in Deutschland in den nächsten 50 Jahren soll hier nun anhand des von der Enquete-Kommission „Nachhaltige Energieversorgung unter den Bedingungen der Globalisierung und Liberalisierung“ erarbeiteten Referenzszenarios skizziert werden. Ausgehend von einem deutlichen Bevölkerungsrückgang auf 67,8 Mio. Einwohner und einem mäßigen, aber kontinuierlichen Wirtschaftswachstum beschreibt das Szenario eine „Entwicklung, die im Grunde gekennzeichnet ist durch eine Fortschreibung der bisherigen Verhaltensweisen von Wirtschaft, Politik und Verbrauchern. Es bedeutet keine politische Abstinenz, aber auch keine explizit auf die Verwirklichung einer nachhaltigen Energieversorgung gerichtete Strategie.“ Dabei wird z.B. angenommen, daß der spezifische Energieverbrauch in den Sektoren Bergbau/Industrie und GHD aufgrund des fortschreitenden Strukturwandels hin zu weniger energieintensiven Branchen und durch technische Effizienzsteigerungen um 1,6 bzw. 1,7 % p.a. zurückgeht. Bei den Haushalten wird u.a. eine zunehmend verschärfte Energieeinsparverordnung (EnEV) sowie eine weitere Reduzierung des durchschnittlichen Energieverbrauchs von Haushaltsgeräten um bis zu 50 % unterstellt und im Sektor Verkehr geht man von einer Reduktion des Durchschnittsverbrauchs um fast 27 % bei PKWs und über 30 % bei LKWs aus, bei einer Steigerung der Güterverkehrsleistung um fast 100 % und der Personenverkehrsleistung um 17,6 % (2030) bzw. 6 % (2050). Der Atomausstieg wird i.ü. wie vorgesehen vollzogen und der Beitrag der erneuerbaren Energien und der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) stetig ausgebaut. (Enquete 2002: 261ff)**

**Abb. 2.7: Annahmen und Vorgaben für das Referenzszenario** (aus: Enquete 2002)

**Insgesamt führen die Effizienzsteigerungen zu einer Steigerung der volkswirtschaftlichen Energieproduktivität von 250 % in 50 Jahren. Der Primärenergieverbrauch pro Kopf bleibt mit 167 GJ/Einwohner<sup>35</sup> allerdings fast unverändert. Bis 2020 wird der PEV daher nur wenig zurückgehen, bei einem sogar leicht ansteigenden Endenergieverbrauch (9641 PJ). Erst durch den starken Bevölkerungsrückgang nach 2030 ergibt sich dann eine deutliche Absenkung des PEV auf 11.372 PJ (die i.ü. dann immer noch zu 89,5 % aus fossilen Quellen stammen werden), der entsprechende Rückgang des Endenergieverbrauchs auf 8.208 PJ entfällt dabei hauptsächlich auf Raumwärme und Kraftstoffe, der Nettostromverbrauch wird hingegen mit 504,5 TWh immer noch höher liegen als heute. (Enquete 2002:272ff) Diese Prognosen sind angesichts der recht optimistisch eingeschätzten Bevölkerungs- und Effizienzentwicklungen eher nach oben und bezüglich des erwarteten Wachstums wohl eher nach unten zu korrigieren<sup>36</sup>, insgesamt erscheint aber der für 2050 angenommene Endenergiebedarf von 8000 bis 9.000 PJ bei einem solchen Szenario durchaus realistisch.**

**Abb. 2.8: Primärenergieverbrauch im Referenzszenario** (aus: Enquete 2002)

---

<sup>35</sup> Nach dem Substitutionsansatz berechnet wären das sogar 175 GJ/Einwohner, also genausoviel wie heute

<sup>36</sup> Zudem ergibt sich die Energieproduktivitätssteigerung im verarbeitenden Gewerbe und der Landwirtschaft z.T. aus der Verlagerung energieintensiver Produktionen in das Ausland, wobei die scheinbar eingesparte Energie dann als sog. „graue Energie“ in Form der nach Deutschland importierten Produkte verbraucht wird. Die diesbezügliche Energieaußenhandelsbilanz Deutschlands ist wahrscheinlich seit einigen Jahren zunehmend negativ. (BUND/Misereor 1996:106f)

**Abb. 2.9: Endenergieverbrauch im Referenzszenario (aus: Enquete 2002)**

### 3. Energieversorgung unter dem Leitbild der Nachhaltigkeit

#### 3.1 Geschichte und Bedeutung des Konzepts „Nachhaltigkeit“

Der heute fast schon alltäglich und in den verschiedensten Zusammenhängen anzutreffende Begriff der Nachhaltigkeit stammt eigentlich aus der Forstwirtschaft, wo er bereits im 18. Jht. als betriebswirtschaftliches Konzept für die langfristige Sicherung der Holzerträge durch den Erhalt der natürlichen Produktionsgrundlagen entwickelt wurde. Erst im Verlaufe der vor etwa 30 Jahren aufgekommenen Debatte über Umweltzerstörungen und Ressourcenausbeutung begann man den Nachhaltigkeitsgedanken dann auf die gesamte wirtschaftliche Aktivität menschlicher Gesellschaften zu beziehen, wobei sich die ökologische Diskussion angesichts der Tatsache, daß erst ein kleiner Teil der Menschheit überhaupt das ressourcenintensive Wohlstandsniveau der Industriestaaten erreicht hatte, allmählich auch mit der Debatte über Entwicklung und globale Gerechtigkeit vermengte. Dabei kristallisierte sich als Synonym für eine umweltschonende globale Entwicklungsstrategie schließlich der Begriff der „Nachhaltigen Entwicklung“<sup>37</sup> heraus, der dann mit dem 1987 erschienenen Brundtland-Bericht und v.a. durch die UN-Konferenz über Umwelt und Entwicklung 1992 als weltweit anerkannte Konsensformel für umweltverträgliches und intra- sowie intergenerativ gerechtes Wirtschaften etabliert wurde.

Schon die ersten Versuche das neue Leitbild zu definieren, wie z.B. die vielzitierte Passage aus dem Brundtland-Bericht: *„Unter dauerhafter Entwicklung verstehen wir eine Entwicklung, die den Bedürfnissen der heutigen Generationen entspricht, ohne die Möglichkeit künftiger Generationen zu gefährden, ihre eigenen Bedürfnisse zu befriedigen und ihren Lebensstil zu wählen.“* (Hauff 1987: XV), machten allerdings deutlich, wo die große Schwäche des Nachhaltigkeitsbegriffes liegt: zwar würde sich kaum ein politisches Gremium auf globaler, nationaler oder regionaler Ebene nicht dazu bekennen, aber die genaue Bedeutung dieser von nicht wenigen als „Zauberformel für ökologisch unbedenkliches Wachstum“ (Busch-Lüty 1992) mißbrauchten Worte bleibt vage und je nach Wissenschaftsdisziplin und Interessenlage vielfältig interpretierbar. So verstehen die einen darunter z.B. nur die dauerhafte Erhaltung des volkswirtschaftlichen Kapitals, während andere einen primär nach ökologischen Kriterien ausgerichteten Umbau des Industriesystems meinen und wieder andere die Auffassung vertreten, daß es eigentlich eher um eine teilweise oder völlige Neugestaltung sozio-ökonomischer Strukturen gehe. (TU Berlin 1997:2,32)

---

<sup>37</sup> Die gebräuchlichste und m.E. zutreffendste Übersetzung des englischen „Sustainable Development“. Es wird aber auch oft mit „tragfähige Entwicklung“, „dauerhafte Entwicklung“ oder „zukunftsfähige Entwicklung“ übersetzt.

Neben dieser unterschiedlichen Betonung ökologischer, ökonomischer und sozialer Aspekte (die durch das neue Paradigma ja eigentlich stärker integriert werden sollten<sup>38</sup>) sind es v.a. aber die vielfältigen und z.T. weit auseinandergehenden Auslegungen und Konkretisierungen des „Nachhaltigkeits“prinzips an sich, die zur Unschärfe des Begriffes geführt haben. Während Ökonomen z.B. bis heute über den Gegensatz zwischen schwacher und starker Nachhaltigkeit<sup>39</sup> streiten, entwickelten sich dabei besonders in der Diskussion über das ökologisch notwendige Ausmaß des durchzuführenden Strukturwandels äußerst konträre Ansichten. Zwar ist vielen inzwischen bewußt, daß sich der unaufhörlich wachsende und immer komplexer werdende Energie- und Stoffumsatz der Menschheit mit seinen Emissions- und Ressourcenproblemen durch die sog. „End of Pipe“-Umweltpolitik der 80er Jahre, die v.a. auf eine technische Schadstoffkontrolle per Filter, Katalysator, Grenzwerten und geordneter Entsorgung gesetzt hatte, nicht in den Griff bekommen lassen wird, inwieweit dies aber nun in wirklich umfassend anderen Produktions- und Konsummustern in den Industrieländern bzw. in völlig neuen Zielmodellen für die noch nicht industrialisierten Länder münden soll, und ob es gar bedeutet, grundlegende Institutionen wie z.B. das Wirtschaftswachstum in Frage zu stellen oder zumindest einzuschränken, ist nach wie vor umstritten und wird von den verschiedenen politischen und wirtschaftlichen Akteuren denn auch sehr unterschiedlich ausgelegt. Zumindest in der wissenschaftlichen Debatte scheint aber inzwischen ein Minimalkonsens erreicht, der vielleicht am besten in den folgenden, vielzitierten Regeln, die bereits 1989/90 von Barbier, Daly, Pierce und Turner veröffentlicht wurden, zum Ausdruck kommt:

1. Die Nutzung erneuerbarer Güter darf auf Dauer nicht größer sein als deren Regenerationsrate.
2. Die Nutzung nicht-erneuerbarer Güter darf nur in dem Maße erfolgen, wie ein physisch und funktional gleichwertiger Ersatz des Gutes durch erneuerbare Güter geschaffen wird.
3. Die Freisetzung von Stoffen darf auf Dauer nicht größer sein als es die natürliche Aufnahme- oder Anpassungsfähigkeit des Naturhaushaltes erlaubt.
4. Das Zeitmaß der menschlichen Eingriffe muß in einem ausgewogenen Verhältnis zu natürlichen Prozeßgeschwindigkeiten stehen.

---

<sup>38</sup> Auch in dieser Arbeit mit ihrem Themenbereich „Energie“ spielen alle drei Dimensionen eine wichtige Rolle, auf eine exakte methodische Ausrichtung diesbezüglich soll hier aufgrund der zu großen Komplexität aber verzichtet und stattdessen die ökologische Dimension als zentraler Bezugspunkt gewählt werden, mit ergänzenden Ausführungen zu wichtigen sozialen oder ökonomischen Aspekten.

<sup>39</sup> Während bei schwacher Nachhaltigkeit die materielle Basis für die Bedürfnisbefriedigung der nächsten Generationen nur durch eine nicht näher spezifizierte Erhaltung der volkswirtschaftlichen Produktivkraft gesichert werden soll, wird für strikte Nachhaltigkeit argumentiert, daß Natur in ihren wesentlichen Eigenschaften nicht durch künstliche Leistungen ersetzbar ist und deshalb der gesamte Bestand an natürlichen Ressourcen zu erhalten ist. (Nutzinger 1995:26ff) Beide Ansätze sind m.E. nur bedingt richtig, denn einerseits ist die Quelle des „angemessenen Lebensstandards“ der nächsten Generationen (solange dieser eben gesichert ist) nicht unbedingt wichtig, andererseits sind aber definitiv nicht alle produktiven Kapazitäten (und erst recht nicht die immateriellen Leistungen) der natürlichen Umwelt vollständig und sicher durch Humankapital ersetzbar

(aus: BUND/Misereor 1996:30, als Erweiterung der 4.Regel wird hier außerdem „Stoff- und Energieumsätze müssen auf ein risikoarmes Niveau abgesenkt werden“ genannt)

Abgesehen von der etwas unklar formulierten 2. Regel, eignen sich diese Prinzipien m.E. sehr gut als Kriterien für ökologische Nachhaltigkeit, weil die Überschreitung der damit in den Mittelpunkt gestellten Trag- und Regenerationsfähigkeit von lokalen, regionalen oder globalen Ökosystemen und Ressourcen mittels diverser Indikatoren erfasst und auch recht genau quantifiziert werden kann. In vielen Fällen läßt sich darauf basierend dann sogar eine (allerdings hypothetische) Verfügbarkeit einer jeden Ressource pro Kopf (sog. „Umweltraum“-Konzept) ermitteln und mit deren Überschreitung durch die tatsächlichen Verbrauchs- bzw. Emissionsniveaus eines Landes verdeutlichen, wie weit dieses von nachhaltigen Wirtschaftsstrukturen entfernt ist. So liegt z.B. die Aufnahmekapazität der Ozeane und Vegetationsbestände für CO<sup>2</sup> bei ca. 13-14 Mrd. t pro Jahr, woraus sich eine zulässige jährliche Emission von 2,3 t CO<sup>2</sup> pro Kopf ergibt, während gegenwärtig von einem Deutschen 10,5 t/a und von einem US-Amerikaner sogar über 20 t/a emittiert werden. (UBA 2002)

Abb. 3.1: Umweltbeanspruchung in Deutschland i. Vgl. zu Entwicklungsländern (aus: BUND/Misereor 1996)

Sofern man vom Ideal einer annähernden globalen Gerechtigkeit ausgeht, lassen sich aus solchen Berechnungen dann auch ungefähre umweltpolitische Zielvorgaben ableiten, die z.B. für Deutschland lauten könnten: Reduktion des Energieverbrauchs um 50 %, Reduktion der CO<sup>2</sup>-Emission um 80 %, Reduktion von Schadstoffemissionen wie z.B. Schwefeldioxid oder Stickoxid um 80-90 %, Reduktion des Kunstdünger- und Biozidverbrauchs um 100 %, Reduktion des Verbrauchs nicht-erneuerbarer Rohstoffe um 80-90 %, usw. (BUND/Misereor 1996:15, 37ff,56ff) Das Umweltraum-Konzept ist allerdings regional und sachinhaltlich differenziert

anzuwenden, es hilft z.B. keinem Menschen in ariden Regionen, wenn Nordeuropäer ihren Wasserverbrauch auf globale Durchschnittswerte absenken.

Um die anspruchsvollen Ziele zu erreichen, die v.a. in Industrieländern mit „Nachhaltiger Entwicklung“ verbunden sind, wurden in Politik und Wissenschaft verschiedene Strategieansätze entwickelt. Die auf den ersten Blick am vielversprechendsten erscheinende, weil mit kapitalistischem Wettbewerb und technischem Fortschritt einhergehend, ist die sog. „Effizienzstrategie“, die auf die Verminderung des Ressourcenverbrauchs durch die Steigerung der Ressourcenproduktivität setzt, und schon lange bevor der Begriff Nachhaltigkeit bekannt wurde, ist auf diesem Wege ja z.B. bereits eine beachtliche Reduktion des Energieverbrauchs gelungen. Seine Grenzen findet dieser Ansatz allerdings im nach wie vor unangefochtenen Prinzip wirtschaftlichen Wachstums, denn Effizienzsteigerungen können Wachstumsgrenzen nur hinausschieben, nicht aber umgehen.<sup>40</sup> <sup>41</sup> Schon früh ist die Effizienzstrategie daher durch das „Suffizienz“-Konzept ergänzt worden, welches Ressourcenverbrauch und Umweltbelastung mittels eines allgemeinen Kultur- und Wertewandels, durch niedrigere Konsumniveaus bzw. andere Bedürfnisse und u.U. auch durch eine grundlegende Veränderung gesellschaftlicher Strukturen vermindern will. Entsprechende Leitbilder, wie „Gut leben statt viel haben“ oder „Entschleunigung, Entflechtung, Entkommerzialisierung und Entrümpelung“ (Sachs 1993), haben allerdings bis jetzt kaum mehr bewirken können, als ein paar alternative Ansätze aufzuzeigen (wie z.B. Bioläden, Carsharing, Ökodörfer), da Initiativen einzelner durch die bestehenden sozio-ökonomischen Strukturen oft enge Grenzen gesetzt sind und Veränderungen dieser Art seitens des politischen Systems meist nicht nur ein eindeutiger, moralisch-naturwissenschaftlich legitimer Handlungsimperativ fehlt („Wieviel ist zuviel?“), sondern den beteiligten Akteuren auch meist keinen „Gewinn“ versprechen.

Teilweise infolge der verhärteten Debatte zwischen Effizienz- und Suffizienzvertretern kam schließlich mit der „Konsistenz“-Strategie ein dritter, dem Prinzip der Nachhaltigkeit vielleicht am besten entsprechende Strategieansatz hinzu. Konsistenz bedeutet im engeren Sinne „Vereinbarkeit“ oder „Verträglichkeit“ und meint bezogen auf die ökologische Problematik, daß die anthropogenen Stoffwechselprozesse so zu gestalten sind, daß die natürlichen Prozesse davon nicht beeinträchtigt werden. Der anzustrebende Strukturwandel sollte daher v.a. auf grundlegende Technik- und Produktinnovationen und -substitutionen abzielen, um (z.B. im Agro-Bio-

---

<sup>40</sup> Bei einem Wachstum von z.B. 3 % p.a. über 50 Jahre hinweg, müßte im selben Zeitraum der Rohstoff- und Materialdurchsatz um 80 % reduziert werden, nur um das Verbrauchsniveau konstant zu halten. (Bode 1997) Auch kann die Einsparung erst recht ein zusätzliches Wachstum bewirken, da die freigewordene Produktivkapazität nun anderweitig genutzt werden kann. (Huber 2001)

<sup>41</sup> Im übrigen kann ein Beharren auf immer weiteren Effizienzsteigerungen bei einzelnen Geräten oder Verfahren auch strukturkonservativ wirken und damit verhindern, daß evtl. grundsätzlich andere und möglicherweise nachhaltigere Wege eingeschlagen werden, um das eigentliche Bedürfnis zu erfüllen. (Huber 2001)



Chemie-Komplex) die industriellen Stoffströme in die natürlichen Kreislaufprozesse einzupassen bzw. (z.B. im Energiesektor) die natürlichen Prozesse selbst zu nutzen. (Huber 1995,2001)

### 3.2 Nachhaltigkeit in der Energieversorgung

Der mit dem Leitbild der Nachhaltigkeit angestrebte Aufbau zukunftsfähiger Wirtschaftsmodelle ist aufgrund der zentralen Bedeutung des Faktors Energie für die heutigen Industriegesellschaften in besonderem Maße von der Schaffung einer nachhaltigen Energieversorgung abhängig. Die hierfür auf ökologische, ökonomische und soziale Nachhaltigkeit auszurichtenden politischen und wirtschaftlichen Strukturen betreffen dabei einerseits die Energie(träger)gewinnung sowie deren Transport und Verteilung und andererseits die vielfältigen Umwandlungsprozesse bzw. Nutzbarmachungen der verschiedenen Energieträger. (Hänel 1998:34)

Als ein ökonomisches Nachhaltigkeitsziel für die Energieversorgung wird z.B. genannt, daß die Energiebereitstellung, wenn möglich, mit zunehmend höherer Effizienz und größerer Versorgungssicherheit zu erfolgen hat, während sich aus den Anforderungen sozialer Nachhaltigkeitsprinzipien u.a. ergibt, daß das Energiesystem demokratischer Kontrolle unterliegen sollte und entsprechende Teilhabemöglichkeiten der Bevölkerung sowie die Kompetenzen der zuständigen Behörden zu stärken sind. Auch müsse künftigen Generationen die Entscheidungsfreiheit bezüglich ihrer Energieversorgung erhalten bleiben, was die Durchführung irreversibler bzw. sich sehr langfristig auswirkender Maßnahmen verbiete. (Enquete 2002:133ff)

Schon aus diesen recht allgemeinen Zielvorgaben lassen sich konkrete Aussagen bezüglich der technisch-materiellen Ausgestaltung eines nachhaltigen Energieversorgungssystems ableiten, wie z.B. die Notwendigkeit eines vollständigen Ausstiegs aus der Atomenergie (aufgrund der Langfristigkeit der Endlagerproblematik), eine Ausweitung der Nutzung effizienter Techniken (wie z.B. der Kraft-Wärme-Kopplung) oder die Verringerung der energetischen Importabhängigkeit Deutschlands sowie eine Diversifizierung des Energiemixes. (ebd.) Noch entscheidender für die materielle Struktur eines zukunftsfähigen Energieversorgungssystems ist aber dessen Ausrichtung auf ökologische Nachhaltigkeit. Dabei folgt z.B. aus der o.g. Regel 1 (Die Nutzung erneuerbarer Güter darf auf Dauer nicht größer sein als deren Regenerationsrate), daß auch die Nutzung regenerativer Energien nicht unbegrenzt erfolgen kann. Dies betrifft v.a. die Gewinnung von Biomasse, die nicht nur die Produktionskapazität der Böden erhalten, sondern auch die ökologischen Funktionszusammenhänge der Landschaft (z.B. den Wasserhaushalt oder die Artenvielfalt) insgesamt respektieren muß. Die zweite Regel (Die Nutzung nicht-erneuerbarer Güter darf nur in dem Maße erfolgen, wie ein physisch und funktional gleichwertiger Ersatz des Gutes durch erneuerbare Güter geschaffen wird) betrifft hingegen primär die

fossilen Energiereserven, die in menschlichen Maßstäben als nicht-erneuerbar zu bezeichnen sind.<sup>42</sup> (Zwar kann meist nicht genau beurteilt werden, wann und in welchem Maße nun evtl. eine Schaffung gleichwertigen Ersatzes vorliegt, m.E. ist diese Regel aber so auszulegen, daß allmählich, aber vollständig auf die Nutzung der nicht-erneuerbaren Energien verzichtet werden soll, während gleichzeitig eine ausreichende regenerative Energiebasis erschlossen wird.)

Ebenso bedeutsam für ein zukunftsfähiges Energiesystem wie die dauerhafte Verfügbarkeit der Energiequellen ist aber auch eine ökologisch unbedenkliche Umwandlung, Nutzung und Entsorgung der Energieträger, wie es die dritte Nachhaltigkeitsregel fordert. Das betrifft in erster Linie die Menge der aus Verbrennungsprozessen resultierenden Emissionen von Stoffen wie Kohlendioxid (CO<sup>2</sup>), Schwefeldioxid (SO<sup>2</sup>), Stickoxid (NO<sup>x</sup>), Ammoniak (NH<sup>3</sup>), Kohlenmonoxid (CO), Distickstoffoxid (N<sup>2</sup>H), Methan (CH<sup>4</sup>) sowie Schwermetalle und die sog. „flüchtigen organischen Verbindungen“ (VOCs), ebenso trifft die Regel aber auch auf die aus Rohstoffgewinnung und Materialdurchsatz beim Bau und Betrieb von Energiegewinnungs- und umwandlungsanlagen (und damit auch auf solare und geothermische Anlagen sowie Wind- und Wasserkraft) bzw. auf die aus dem Nährstoff-, Pflege- und Wasserbedarf von Energiepflanzen resultierenden Stoffmobilisationen zu. Auch die Anforderungen des vierten Nachhaltigkeitsprinzips sind eng mit der Emissionsproblematik verknüpft, wobei hier aber auch die Freisetzung der Energie selbst (z.B. in Form von Abwärme) sowie das humantoxische Potential der Emissionen bzw. evtl. freiwerdender Strahlung in die Betrachtung miteinbezogen werden muß.

Zwar sind einige der hier aufgeführten Kriterien energiewirtschaftlicher Nachhaltigkeit schon lange Bestandteil der deutschen Umweltpolitik (z.B. die Emissionsminderung) oder finden sich zumindest in der Politik der jetzigen Bundesregierung wieder, wie der begonnene Atomausstieg und die in ihrer „Nachhaltigkeitsstrategie“ formulierten Ziele „Verdopplung der Energieproduktivität bis 2020“ und „Erhöhung des Anteils erneuerbarer Energien am Energiemix auf 50 % bis 2050“ (Bundesregierung 2002:78ff), ein den o.g. Anforderungen gänzlich entsprechendes, nicht-fossiles Energiekonzept wird aber selbst von der Enquete-Kommission „Nachhaltige Energieversorgung“, die schon sehr weitgehende Ziele (z.B. eine 80%-ige Reduktion des CO<sup>2</sup>-Ausstoßes bis 2050) formuliert, nicht eindeutig gefordert. (Enquete 2002:131f)

---

<sup>42</sup> Die Neubildung des z.Z. jährlich weltweit verbrauchten Öls würde ca. 1 Million Jahre benötigen (Sieferle 1982 zit. in Büttner 1990:14) und auch die Uranvorkommen, die auf der Erde überhaupt nicht neu gebildet werden, dürften beim derzeitigem Verbrauch in etwa 50 Jahren erschöpft sein. (BMU 2000b) Da zudem auch Fläche eine nicht-erneuerbare Ressource ist und ein vollständiger Umstieg der globalen Energieversorgung auf Atomenergie bedeuten würde, daß alle 6 Tage ein ausgedienter Reaktor ersetzt werden müßte (Scheer 1998: 93), kann die Atomenergie also auch aus ressourcenökonomischer Sicht nicht als nachhaltig bezeichnet werden. (Dies gilt nicht für die Kernfusion, die auf quasi unendliche Deuteriumvorräte zurückgreifen könnte, aber auch diese würde, aufgrund der ihr ebenfalls eigenen Betriebsrisiken und Entsorgungsprobleme den Kriterien nachhaltiger Energieversorgung nicht entsprechen.)

### 3.3. Bewertung der Nachhaltigkeit des gegenwärtigen Energiesystems

Eine Analyse der heutigen Energieversorgung nach den Kriterien ökologischer Nachhaltigkeit zeigt sowohl global wie auch bezüglich Deutschlands zuvorderst eine deutliche Mißachtung der ressourcenbezogenen Prinzipien. Nicht nur kann die momentane energetische Biomasse-nutzung in vielen Teilen der Welt nicht als nachhaltig bezeichnet werden, wie die weitverbreitete Erschöpfung von Holzressourcen (mit oft irreversiblen Folgeschäden wie Erosion und Desertifikation) zeigt, es ist v.a. die Tatsache, daß sowohl der heutige Weltenergieverbrauch von ca. 400 EJ (IEA 2001) wie auch der Primärenergieverbrauch Deutschlands zu über 90 % auf fossilen Energieträgern beruhen, die mit Nachhaltigkeit unvereinbar ist, denn die Reichweite der fossilen Energieressourcen von 179.023 EJ Kohle, 6710 EJ Erdöl (incl. Schweröl, Ölsanden und Ölschiefern), 7820 EJ Erdgas und 2432-7500 EJ Uran (BMWi 1999:8) liegt, bezogen auf den gegenwärtigen Verbrauch, bei insgesamt maximal 500 Jahren und alle nicht explizit auf globaler Energiesparpolitik basierenden Prognosen deuten auf einen weiteren, rapiden Anstieg des Weltenergieverbrauchs bis auf 700-1500 EJ/a im Jahr 2050 hin.<sup>43</sup> (Enquete 2002:192ff)

Neben den u.U. gravierenden lokalen Belastungen des Naturraumes, die bei der gegenwärtigen Energienutzung und -gewinnung auftreten (wie z.B. Massenverlagerungen und Grundwasserabsenkungen im Bergbau, oder auch die landschafts- und gewässerökologischen Schäden durch falsch geplante bzw. überdimensionierte Wasserkraftwerke) ist als zweiter wesentlicher Verstoß gegen die Prinzipien der Nachhaltigkeit v.a. das Ausmaß der bei Gewinnung, Umwandlung und Verteilung der Energieträger freiwerdenden Emissionen ökologisch relevanter und toxischer Stoffe<sup>44</sup> zu nennen. Neben förderungstechnisch und transportbedingten Einträgen von Öl und Gas sowie Salzen, Schwefelsäure, Schwermetallen, Methan und Radon in den Naturhaushalt ist hierbei v.a. die Umwandlung der Energieträger zu Strom oder Wärme per Verbrennung problematisch, da deren Haupt- und Nebenprodukte u.a. für die Versauerung und Eutrophierung von Böden und Gewässern (v.a. SO<sub>2</sub>, NO<sup>x</sup>, NH<sub>3</sub>), die Schädigung der Ozonschicht (v.a. N<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub>), gesundheitliche Schäden bei Menschen und Tieren (v.a. Staub, Schwermetalle, VOCs) und wahrscheinlich auch für den sog. Treibhauseffekt<sup>45</sup> (v.a. CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub>) mitverantwortlich sind. (Sachverständigenrat 2000:88ff)

---

<sup>43</sup> Unabhängig davon, wie lange die Ressourcen letztendlich reichen, wird „schon wenn die Kurven der abnehmenden Verfügbarkeit fossiler Energieressourcen und jene des Verbrauchs sich dem Kreuzungspunkt nähern, ein wirtschaftliches Chaos unausweichlich“ sein. (Scheer 1999:105)

<sup>44</sup> Diese Emissionen konnten in den letzten 20 Jahren zwar, zumindest in Deutschland und einigen anderen Industrieländern, durch technische Maßnahmen wie Filter, Katalysatoren und Prozeßoptimierungen z.T. erheblich reduziert werden, belaufen sich aber z.B. in Deutschland jährlich immer noch auf 858 Mio. t. CO<sub>2</sub>, 795.000 t SO<sub>2</sub> und 1,6 Mio. t NO<sup>x</sup> sowie, zu jeweils ungefähr 20-30 % energiebedingt, auf 2,8 Mio. t CH<sub>4</sub>, 194.000 t N<sub>2</sub>O, 624.000 t NH<sub>3</sub> und 1,6 Mio. t VOCs (Umweltbundesamt 2002)

<sup>45</sup> Es wird vermutet, daß anthropogene Emissionen (zu ca. 50 % infolge von Energienutzung, des weiteren aufgrund von Waldvernicht-

Es sind aber nicht nur die ökologischen Anforderungen der Nachhaltigkeit, die das heutige Energiesystem bei weitem verfehlt, auch eine Betrachtung seiner ökonomischen und sozialen Aus- und Nebenwirkungen macht deutlich, daß radikale Veränderungen notwendig sind. Zwar hat die Nutzung fossiler Energiereserven zur Schaffung eines früher ungeahnten Wohlstands und damit zur Ermöglichung individueller Freiheiten und zur Etablierung vieler freiheitlicher Demokratien mitbeigetragen, sie hat aber auch eine extreme politisch-ökonomische Machtkonzentration in Energiekonzernen und dem damit verknüpften Industrie-, Finanz- und Administrations-Komplex bewirkt, die die wirtschaftlichen und politischen Strukturen und Entscheidungen auf globaler und nationaler Ebene nach wie vor dominierend beeinflußt und durch die „systematische Entkopplung wirtschaftlicher Prozesse von ihrer geographischen, sozialen, kulturellen und ökologischen Basis“ die Fremdbestimmung und Abhängigkeit und damit auch die Anfälligkeit der ökonomisch-sozialen Strukturen einzelner Länder oder Regionen beständig erhöht. (Scheer 1999:15ff,52ff) Deutlich wird dies z.B. am Importabhängigkeitsgrad der Energieversorgung Deutschlands von 60,5 % (Bundesregierung 2002:138) und den damit verbundenen Auswirkungen jeglicher Ölpreisveränderungen am Weltmarkt auf die deutsche Wirtschaft, aber auch an dem in Kap.2 dargestellten Schicksal der kommunalen Energieversorgung.

---

ung, Landwirtschaft und Industrie) von Kohlendioxid, Methan, Distickstoffoxid, halogenierten Kohlenwasserstoffe u.a. Gasen mittels einer Verstärkung des natürlichen, atmosphärisch bedingten Treibhauseffektes zu 60-90 % für die in den letzten 150 Jahren beobachtete globale Erwärmung mitverantwortlich sind. So ist die globale Durchschnittstemperatur in diesem Zeitraum um ca. 0,6°C gestiegen, was in Verbindung mit zahlreichen Indizien wie z.B. der Häufung sehr warmer Jahre in den letzten 10 Jahren, einer Verlängerung der Vegetationsperioden in mittleren Breiten, einer Zunahme von Wetterextremen und einer deutlichen Abnahme der Gebirgsgletscher die Gefahr eines Klimawandels mit einem weiteren Temperaturanstieg um 1,4 (bei sofortiger globaler Nachhaltigkeitspolitik) bis 5,8 °C (im Falle eines weiter vorwiegend auf fossilen Energieträgern basierenden Wachstums- und Fortschrittsszenarios), und damit verbundenen möglicherweise drastischen Folgen wie Verschiebungen der landwirtschaftlichen Gunsträume, einem deutlichen Meeresspiegelanstieg, einer Abnahme der Artenvielfalt etc., andeutet. (IPCC 2001/Enquete 1995: 23ff,112) Es ist allerdings nach wie vor sehr umstritten, ob anthropogene Emissionen wirklich einen so großen Einfluß auf das Klima haben (Maxeiner/Miersch 2000:131ff) und ob nicht andere Faktoren wie z.B. lang- und kurzzyklische Sonnenaktivitätsveränderungen oder Erdbahn- und Neigungsschwankungen die eigentlichen Ursachen darstellen und evtl. sogar erst die Erwärmung selbst zu dem beobachteten Anstieg der atmosphärischen CO<sup>2</sup>-Konzentration geführt habe (vgl. z.B. Calder 1997), und auch eine langfristige Betrachtung der Erdklimaveränderungen läßt z.B. eher auf eine demnächst anbrechende Eiszeit schließen. Unabhängig davon sollte man Klimaschutz aber auch ohne exakten Nachweis einer Gefährdung angehen, denn die meisten der in diesem Zusammenhang vorgeschlagenen Maßnahmen sind mit ihren diversen positiven Nebeneffekten (wie z.B. ökonomischer Effizienz oder Luftreinheit) ohnehin sogenannte „No-Regret-Optionen“. (Enquete 2002:766)

Selbst wenn man diese kritische Perspektive der gegenwärtigen (i.ü. nicht nur auf die Energiewirtschaft beschränkten) Globalisierungsprozesse nicht teilt, so steht doch außer Frage, daß die mit fossiler und atomarer Energieversorgung verbundenen politischen und militärischen Konflikte nicht nur des öfteren Freiheit und Menschenleben (wenn auch meist nicht bei „uns“) kosten, sondern auch enorme Summen an Geld ver“pulvern“. Wenn man dazu dann noch die sog. „externen Kosten“, die bei der Behebung oder Linderung der durch die fossile und atomare Energiegewinnung und -nutzung verursachten ökologischen, ästhetischen und gesundheitlichen Schäden anfallen, addiert, kann man wohl kaum noch von Nachhaltigkeit (und wohl auch nicht mehr von ökonomischer Effizienz) des bestehenden Energiesystems sprechen.

## 4. Regenerative Energiequellen: Techniken und Potentiale

### 4.1 Grundlagen des regenerativen Energieangebotes

Die als „erneuerbar“ bezeichneten, d.h. in menschlichen Maßstäben unerschöpflichen Energien entstammen auf der Erde drei grundsätzlich unterschiedlichen Quellen. Die quantitativ unbedeutendste davon ist die Gezeitenenergie, die aus dem Zusammenwirken von Bewegung und gegenseitiger Massenanziehung der Himmelskörper Erde, Mond und Sonne resultiert. Die dadurch hervorgerufene Deformation der ozeanischen Wassermassen, das 24-stündige Kreisen der beiden „Flutberge“ um die Erde, entspricht einem Energiezufluß zur Erde von 94 EJ pro Jahr. Mit 996 EJ/a um ein vielfaches größer ist dagegen der zur Erdoberfläche gelangene Wärmestrom aus der im Erdinneren gespeicherten Wärme, die zum einen aus der während der Erdentstehung freigewordenen Gravitationsenergie, zum anderen aus dem seither permanent stattfindenden Zerfall radioaktiver Isotope in der Erdkruste stammt. Der bedeutendste Energiezufluß besteht allerdings in der durch die thermonuklearen Prozesse in der Sonne erzeugten Strahlung, mit der jährlich 5.600.000 EJ die Erde erreichen. Davon werden zwar ca. 31 % direkt am oberen Atmosphärenrand und weitere 4 % ohne weitere Umwandlung vom Erdboden reflektiert, die übrige Energie von  $3,64 \cdot 10^6$  EJ aber steht für atmosphärische, hydrosphärische und biosphärische Prozesse zur Verfügung, wonach sie, geringfügig variiert durch die Speicherung und Freisetzung organisch gebundener Energie, als langwellige Wärmestrahlung wieder an den Weltraum abgegeben wird. (Kleemann/Meliß 1993:1f u. Kaltschmitt/Wiese 1997:43ff)

Abb. 4.1: Energieflußbild der Erde (aus: Kleemann/Meliß 1993)

## 4.2 Das Potential regenerativer Energien

Von der jährlich solar, gravitativ und geothermisch bereitgestellten Energie, dem sog. „theoretischen Potential“ der erneuerbaren Energien, das global fast dem 10.000-fachen des derzeitigen jährlichen Weltenergieverbrauches von ca. 400 EJ entspricht, können die Menschen aber nur einen kleinen Teil nutzen. Dieses sog. technische Potential „beschreibt den Anteil des theoretischen Potentials, der unter Berücksichtigung gegebener technischer Restriktionen nutzbar ist, zusätzlich werden i.allg. strukturelle und ökologische Restriktionen, gesetzliche Vorgaben und weitere nicht-technische Restriktionen berücksichtigt“ (Kaltschmitt/Wiese 1997:25). Während die technischen Restriktionen aber relativ eindeutig bestimmbar sind (z.B. bezüglich Wirkungsgraden oder Anlagenleistung) sind ökologische Restriktionen z.B. aufgrund von Gewässerbeeinträchtigungen oder Schadstoffbelastungen und mehr noch strukturelle Restriktionen wie z.B. Ortsgebundenheit, Flächenverfügbarkeit, fluktuierende oder unzuverlässige Darbietung und der quantitativ-qualitative Charakter der Nachfrage von zahlreichen Annahmen abhängig und führen dazu, daß die Ergebnisse von Potentialstudien sehr verschieden ausfallen. (Staiß 2001: I-190) Das globale technische Potential erneuerbarer Energien wird beispielsweise u.a. auf 180 EJ (Heinloth 1997), 157-630 EJ (Conrad 1995) und 1622 EJ (Nitsch 2000) geschätzt, trotz der großen Bandbreite dieser Ergebnisse läßt sich daraus immerhin die Vermutung ableiten, daß eine vollständig auf erneuerbaren Energien beruhende globale Energieversorgung wahrscheinlich selbst bei noch ansteigendem Weltenergieverbrauch möglich ist.<sup>46</sup>

Abb. 4.2: Möglichkeiten zur Nutzung des regenerativen Energieangebotes (aus: Kaltschmitt/Wiese 1997)

---

<sup>46</sup> Die höheren der o.g. Werte beruhen allerdings zu rund 50 % auf einer großtechnischen, überregionalen Nutzung des (immensen) Solarenergiepotentials der Wüstengebiete (siehe dazu auch Kap. 6.2).



Für den Raum Deutschland wurden schon mehrere, sehr detaillierte Abschätzungen des regenerativen Energiepotentials vorgenommen, die hier kurz vorgestellt werden sollen. Eine frühe, noch auf die alten Bundesländer beschränkte, Studie aus dem Jahre 1990 ergab z.B. bei einem bis 2020 um 25-40 % reduzierten Endenergiebedarf von 4565-5645 PJ/a ein dezentral verfügbares, regeneratives Energieangebot von 1242 PJ/a, das mit nicht-gebäudegebundener Photovoltaik (286 km<sup>2</sup>) und Solarwärmegewinnung (1000 km<sup>2</sup>) auf 1980 PJ/a und durch zusätzlichen Import von solar erzeugtem Wasserstoff auf 2783 PJ/a erweiterbar wäre. (Nitsch 1990:54,82) Für das wiedervereinigte Deutschland zeigten dann erste Untersuchungen mit 2200 PJ/a ähnlich große Inlands-Potentiale auf, wobei diese in einem Fall vorrangig auf Biomasse (zu 35%) und Solarthermie (zu 40%) beruhen sollten (TU München 1995), während die andere Studie eher auf Biomasse (zu 43 %) und Erdwärme (zu 40 %) setzte. (Heinloth 1997: 338)

Insgesamt wesentlich optimistischer sind aber die Ergebnisse der neueren Studien, so z.B. die des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) aus dem Jahre 2000, die ein regeneratives Endenergiepotenzial von 5504 PJ/a im Inland bei einem auf 6100 PJ/a reduzierbarem Endenergiebedarf errechnen. Dafür wären allerdings neben Dach- und Fassadenflächen weitere 1350 km<sup>2</sup> Frei- und Siedlungsflächen für Photovoltaik und Solarwärmegewinnung sowie 237 TWh/a Strom aus Offshore-Windenergieanlagen und 1260 PJ/a geothermische Wärmegewinnung notwendig. (Nitsch/Trieb 2000:6ff) Auch die im Jahrbuch Erneuerbare Energien (2001) zusammengestellten Daten ergeben mit ähnlichen Beiträgen der einzelnen Technologien ein technisches Endenergie-Inlandspotential von 4622 PJ/a. (Staiß 2001:II-21) Mit etwa 2434 PJ/a (zzgl. einem möglichen Solarstromimport von 450 PJ) sehr viel geringer wird allerdings der unter Berücksichtigung der ökonomischen und strukturellen Restriktionen einer Energiewende bis zum Jahr 2050 realisierbare Beitrag der erneuerbaren Energien eingeschätzt. (Nitsch 2001)

Im folgenden sollen nun die für die Energieversorgung in Deutschland relevanten Technologien zur Bereitstellung regenerativer Energien und der derzeitige Stand ihrer Nutzung vorgestellt sowie eine Abschätzung ihres jeweiligen Potentials<sup>47</sup> gegeben werden. Die Ausführungen beziehen sich dabei, wenn nicht anders angegeben, für Windenergie, Wasserkraft, Solarthermie und Photovoltaik auf Kaltschmitt/Wiese, „Erneuerbare Energien“ (1997) und für Biomasse auf Kaltschmitt/Hartmann, „Energie aus Biomasse“ (2001).

---

<sup>47</sup> Dabei werden zunächst nur angebotsseitige Konkurrenzen (z.B. bzgl. der verfügbaren Fläche) unterstellt, die bei nachfrageseitig begrenzten Potentialen zusätzlich auftretenden Versorgungskonkurrenzen werden aber in den Szenarien in Kap. 5 mitberücksichtigt.

## 4.3 Techniken und Potentiale regenerativer Energien

### 4.3.1. Energiegewinnung aus Biomasse

#### 4.3.1.1 Bereitstellung biogener Energieträger

Die älteste Form solare Energieeinstrahlung zu nutzen, besteht darin, durch die Verbrennung von organischer Substanz die bei der pflanzlichen Photosynthese in den gebildeten Zuckermolekülen (bzw. den daraus später produzierten Stärken, Fetten, Proteinen, Ligninen oder Cellulosen) gebundene Lichtenergie freizusetzen. Zur Biomasse werden dabei alle Stoffe organischer Herkunft gezählt, also neben Phytomasse auch die durch höhere Organismen zu deren Zoомasse bzw. deren Ausscheidungen ab- oder umgebaute organische Substanz. (2ff) Primär unterscheidet man Biomasse aus angebauten Energiepflanzen und Biomasse aus Rückständen und Abfallstoffen. Erstere lassen sich noch in Lignocellulosepflanzen (Bäume, Gräser, Getreide), Ölpflanzen (u.a. Raps, Sonnenblume, Hanf) und Zucker- und Stärkepflanzen (u.a. Zuckerrübe, Kartoffel, Getreide, Mais) unterteilen, zu letzteren gehört u.a. Waldwirtschafts-, Landschaftspflege- und Industrierestholz, Altholz, Stroh und andere Erntereste, Grasschnitt, Gülle, organischer Haushalts- und Gewerbeabfall und Abwasser (bzw. Klärschlamm). (3)

Bevor die verschiedenen Bioenergieträger beim Endverbraucher bzw. im Heiz-(kraft)werk per Verbrennung in Öfen, Motoren oder Turbinen mechanische, thermische und/oder elektrische Energie erzeugen, müssen sie jedoch z.T. aufwendig aufbereitet werden<sup>48</sup>, so z.B. durch Zerkleinern, Sortieren, Pressen, Extrahieren, Trocknen oder Pelletieren, sowie, bei der Bereitstellung flüssiger und gasförmiger Energieträger, durch eine zusätzliche chemische Umwandlung: Bei Pflanzenölen ist z.B. eine Raffination und u.U. ein Umesterungsprozeß<sup>49</sup> erforderlich, Zucker- und Stärkepflanzen werden meist zu Ethanol vergärt<sup>50</sup> und flüssige bzw. feuchte Abfälle bedingen eine Vergärung zu Biogas<sup>51</sup>. Des weiteren existieren i.ü. diverse optionale Konversionsverfahren für Festbrennstoffe, so z.B. die Pyrolyse, die Verkohlung oder die thermische Vergasung zu Synthesegas (Gemisch aus u.a. H<sup>2</sup>,CH<sup>4</sup>,N), aus welchem wiederum z.B. Meth-

---

<sup>48</sup> Wobei auch Energie dafür aufgewendet werden muß, bzw. zum Teil verlorengeht (z.B. durch Abwärme): die Wirkungsgrade betragen (nach Kleemann/ Meliß 1993) z.B. 30-60% (alkoholische Gärung), 50% (Biogaserzeugung) und 60-80% (Synthesegaserzeugung)

<sup>49</sup> Dabei wird der dreiwertige Alkohol des Triglycerids unter Einsatz eines Katalysators durch drei einwertige Alkohole (aus zugesetztem Methanol) verdrängt, wobei als Kuppelprodukte Glycerin und als Dünger verwertbarer Preßkuchen entstehen. (557ff)

<sup>50</sup> Dabei wandeln Enzyme die im Biomassematerial enthaltenen Zucker- und Stärkemoleküle zu Alkohol um, der anschließend aus dem (ebenfalls energetisch nutzbaren) Gärsubstrat herausdestilliert wird. (597ff)

<sup>51</sup> Dabei wandeln Bakterien bis auf Lignin sämtliche organische Bestandteile zu Methan (50-75%), CO<sup>2</sup> (25-45%), Wasser (2-7%) sowie Schwefelwasserstoff, Stickstoff, Sauerstoff und Wasserstoff (jeweils unter 2%) um. (641ff)

anol, synthetisches Benzin oder auch reines Wasserstoffgas herstellbar sind. (Schindler 1997:122ff)

Abb. 4.3: Energiebereitstellungsketten der Biomasse (aus: Kaltschmitt/Hartmann 2001)

Das Leistungsspektrum der verschiedenen Biomassen ist nicht nur qualitativ vielfältig, sondern auch quantitativ weit gestreut, da der Energiegehalt und die Verwertbarkeit der verschiedenen Rückstände und Abfälle bzw. das Ertragspotential einzelner Pflanzen je nach Form und Struktur (dichter/lockerer Bestand, hartes/weiches Material, teilweise/ganz verwertbar) sehr unterschiedlich ausfallen kann. Außerdem ist zu berücksichtigen, daß verschiedene Pflanzen ganz unterschiedliche Standortansprüche haben und ihre Produktivität daher je nach Bodengüte, Temperaturverlauf und Niederschlagshöhe sowie deren zeitlicher Verteilung differiert (53ff), und daß es grundsätzlich zwei verschiedene pflanzliche Stoffwechselmechanismen gibt. Bei der für europäische Kulturpflanzen typischen  $C^3$ -Photosynthese, bei der nach der  $CO_2$ -Absorption zunächst Phosphoglycerinsäure gebildet wird, liegt der Wirkungsgrad der Energiebindung nämlich nur bei 5 bis maximal 15 %, während beim  $C^4$ -Typ, bei dem zuerst  $C^4$ -Dicarbonsäure entsteht, bis zu 24 % erreicht werden, weshalb in Verbindung mit geringeren Atmungsverlusten die Nettphotosyntheserate bei den  $C^4$ -Pflanzen deutlich höher liegt. (Kaltschmitt/Wiese 2000: 92ff) Der durchschnittliche energetische Gesamtwirkungsgrad eines Pflanzenbestandes (d.h. wieviel von der auf die Fläche eingestrahlt Energie chemisch gespeichert wird) beträgt bei agrarischen  $C^4$ -Pflanzen (z.B. Mais, Hirse, Zuckerrohr) 3 bis 6 %, bei  $C^3$ -Pflanzen (z.B. Bohnen, Getreide, Rüben) hingegen nur 1,5 bis 4 %. Nicht-agrarische Pflanzengesellschaften, wie die meisten Wälder, liegen mit 1 bis maximal 2 % allerdings noch weit darunter. (45)

Entscheidend für das Ertragspotential einer Pflanze sind neben den jeweiligen Standortbedingungen und ihrer energetischen Umwandlungseffizienz aber auch ihre Ansprüche an Düngung, Bewässerung und Pflege. So haben z.B. die  $C^4$ -Pflanzen auch einen weitaus günstigeren Wasserbedarf, sie benötigen für die Produktion von 1 kg Trockenmasse nur 220-350 l Wasser, während für Getreide z.B. 500-650 l/kg und bei Weiden sogar ca. 800 l/kg optimal wären. (49)

In Mitteleuropa eignen sich für den Energiepflanzenbau<sup>52</sup> zur Festbrennstoffproduktion v.a. Lignocellulosepflanzen, die im Kurzumtrieb<sup>53</sup> angebaut werden können, z.B. die schnellwachsenden Baumarten Pappel und Weide, die bis zu 30 Jahre lang jeweils nach 3-4 Jahren geerntet werden, wonach die Stöcke im Folgejahr erneut austreiben. Der jährliche Trockenmassezuwachs dieser Bäume liegt bei etwa 6-18 t/ha, was bei 18,4 GJ Energiegehalt je t einen Bruttoenergieertrag<sup>54</sup> von ca. 110-330 GJ/ha ergibt. Ebenfalls im Kurzumtrieb angebaut, aber jährlich geerntet, werden auch die C<sup>4</sup>-Gräser Rutenhirse und Chinaschilf. Letzteres, auch als Miscanthus bekannt, liefert z.B. ab dem 3.Bestandsjahr für ca. 20 Jahre 10-30 t/ha\*a Trockenmasse und damit ca. 170-530 GJ/ha\*a. Prinzipiell eignen sich aber auch C<sup>3</sup>-Pflanzen wie Rohrglanzgras und Futtergräser oder die 1-jährigen Getreide (100-340 GJ/ha\*a bei Ganzpflanzennutzung) Weizen, Roggen und Triticale für eine energetische Verwertung. (57ff, 264)

Als Ölpflanzen bieten sich in Mitteleuropa z.B. der Raps, der jährlich 750-2000 kg Öl, d.h. 27-74 GJ/ha (bei 37 MJ/kg) liefert, und die Sonnenblume, die 850-2000 kg Öl/ha\*a erbringt, an. Zusätzlich kann von diesen Pflanzen auch ein Teil<sup>55</sup> des Strohertrags energetisch genutzt werden, was z.B. bei Raps weitere 35-80 GJ/ha\*a erbringt. Einen geringeren energetischen Ertrag mit 250-600 kg Öl/ha\*a bietet Hanf, dafür läßt sich hier der hohe Strohertrag aufgrund der hohen Faserstabilität gut in der Textilindustrie oder auch im Fahrzeugbau verwerten. (72ff)

Für eine Ethanolproduktion eignen sich hingegen primär die Zucker- und Stärkepflanzen. In Deutschland kommt dafür z.B. die Zuckerrübe in Frage, aus deren Zuckerertrag sich eine jährliche Ethanolmenge von 4300-5750 l je Hektar bereitstellen läßt, was einem Bruttoenergieertrag von 92-122 GJ entspricht. Ähnliche Erträge bringt auch die Kartoffel mit ca. 75-140 GJ/ha\*a, wohingegen Getreide(korn) nur 25-81 GJ/ha\*a liefert. (Beim Getreide kann allerdings zusätzlich ein Teil<sup>56</sup> des Strohertrags als Festbrennstoff genutzt werden, was weitere 15-80 GJ/ha\*a ergibt.<sup>57</sup>) Denkbar wäre eine Ethanolherstellung i.ü. auch aus den bislang in Deutschland kaum angebauten C<sup>4</sup>-Pflanzen Zuckerhirse (ca. 35-128 GJ/ha\*a, zzgl. ~35-140 GJ aus Fasermasse) und Topinambur. (80ff)

---

<sup>52</sup> Damit ist i.allg. ein agrarischer Pflanzenbau gemeint, der zusätzlich zu der, in Deutschland aufgrund der stofflichen Nutzungskonkurrenz sehr geringen, forstwirtschaftlichen Brennholzproduktion (derzeit 85 PJ/a) durchgeführt wird.

<sup>53</sup> Der Energiepflanzenbau in Kurzumtriebsplantagen ist nicht nur recht praktisch, sondern kann zusätzlich einen vorteilhaften Zweitnutzen als Kläranlage für Hausabwässer und als landschaftsökologisch wirksames Retentionsgebiet für Stoffe und Wasser erfüllen, was wiederum auch den Dünge- und Bewässerungsbedarf der Energiepflanzen verringert. (Hänel 1998:97ff)

<sup>54</sup> Dieser sagt allerdings wenig über die Energiebilanz nach Gegenrechnung des Anbau- und Verarbeitungsaufwandes aus, siehe Kap.5.

<sup>55</sup> Bei Raps-, Sonnenblumen- und Maisstroh lassen sich erntetechnisch bedingt nur ca. 50-80 % effektiv bergen, außerdem ist der teilweise Verbleib von Ernteresten auf dem Feld zur Nährstoffrückführung und Bodenverbesserung vorteilhaft.

<sup>56</sup> Aufgrund der Vorteile einer teilweise Einarbeitung sind auch vom Weizenstroh nur maximal 50 % als Energieträger verfügbar.

<sup>57</sup> Bei der Ethanolherstellung aus Getreide, Kartoffeln und Rüben kann außerdem mit ein wenig mehr Energieaufwand auch der Gärückstand, die sog. Schlempe, zur Biogaserzeugung genutzt werden, was z.B. bei Zuckerrüben den Bruttoenergieertrag um bis zu 45 GJ/ha\*a steigert. (Kleemann/Meliß 1993)

Wie die Energiepflanzen, so weist auch die Biomasse aus Rückständen und Abfällen eine große Vielfalt auf. Das Waldrestholz z.B. besteht im wesentlichen aus dem Schlagabraum, der nach der Stammentnahme oder Durchforstung im Wald verbleibt.<sup>58</sup> Unter Landschaftspflegeholz, auch als Baumschnitt bezeichnet, wird hingegen das Holz verstanden, das in Land- und Gartenbauwirtschaft oder bei gärtnerisch-landschaftspflegerischen Maßnahmen anfällt, Industrie-restholz bezeichnet i.allg. die bei industrieller Holzverarbeitung entstehenden Abfälle wie Hackschnitzel, Abschnitte, Rinde, Späne etc. (wobei Rinde und Späne eher für eine stoffliche Nutzung geeignet sind) und mit Altholz ist das aus dem Nutzungsprozeß ausscheidende, von Recyclingunternehmen gesammelte Gebrauchtholz gemeint, welches aber vielfältig mit Schadstoffen belastet sein kann und daher erst nach entsprechender Aufarbeitung (bzw. nur in mit entsprechenden Filtern ausgerüsteten Verbrennungsanlagen) energetisch verwertbar ist. (96ff)

Neben Holz fallen in Deutschland aber auch halmgutartige Reststoffe, v.a. Stroh und Grasschnitt, an. Vom Stroh des gegenwärtig zu Ernährungszwecken angebauten Getreides sind aufgrund der stofflichen Nutzung als Futter und Einstreu, sowie der Einarbeitung in den Acker zur Nährstoffrückführung und Bodenverbesserung, allerdings nur 10 bis 30 % als Energieträger verfügbar. Dies gilt z.T. auch für Raps-, Sonnenblumen- und Maisstroh, zudem läßt sich dieses (vgl. Anmerkung 10) nur zu 50-80 % effektiv bergen und erfordert überdies eine Trocknung, will man es als Festbrennstoff nutzen. Ebenfalls getrocknet genutzt werden kann, sofern der Bergeaufwand oder eine Verwertung als Kompost/Viehfutter dem nicht entgegensteht, der landschaftspflegerisch anfallende Grasschnitt aus Gärten, Parks und extensiv bewirtschafteten Flächen, aufgrund der hohen Feuchte ist dessen Umwandlung zu Biogas aber sinnvoller. (109f)

Die in der Landwirtschaft (Gülle, Erntereste), in Industrie, Gewerbe und Handel (Schlachte- und Gemüsereste, Schlempe) oder den Haushalten anfallenden, feuchten organischen Abfälle können energetisch ebenfalls nur per Biogaserzeugung<sup>59</sup> genutzt werden, wobei das die in der Landwirtschaft übliche Verwendung der Jauche als Dünger übrigens nicht beeinträchtigen würde, da die Biomasse nach der Vergärung immer noch als (dann sogar hochwertigerer) Dünger eingesetzt werden kann. (116ff) Auch die kommunalen Abwässer können, sofern sie nicht zur Bewässerung einer Kurzumtriebsplantage eingesetzt werden (vgl. Anmerkung 8), zur Biogasgewinnung genutzt werden.<sup>60</sup>

---

<sup>58</sup> Dazu gehört v.a. das Kronenderbholz mit 7 bis etwa 14 cm Durchmesser. Das Reisholz (unter 7 cm) sowie evtl. anfallende Rinde sollten aufgrund ihres hohen Nährstoffgehaltes nicht entnommen werden, zudem dies, wie auch die Stockentnahme, nicht wirtschaftlich ist

<sup>59</sup> Dies kann bei fehlender Biomüllerrfassung auch auf den Restmülldeponien (Deponiegas) erfolgen, die ohnehin entgast werden müssen.

<sup>60</sup> Wobei neben dem Klärgas auch der Klärschlamm, solange dessen Ausbringung auf landwirtschaftliche Flächen aufgrund der hohen Schadstoffbelastungen nicht möglich ist, energetisch genutzt werden kann, z.B. durch eine Mitverbrennung in Kraftwerken.

#### 4.3.1.2. Biomassenutzung zur Wärme- und Stromgewinnung

Zur Wärmeengewinnung aus Biomasse wird nach wie vor überwiegend die direkte Verbrennung von Festbrennstoffen zu CO<sup>2</sup>, H<sub>2</sub>O und Asche (sowie NO<sup>x</sup>, Ruß, und Kleinstmengen sonstiger Verbindungen) genutzt. Dies erfolgt bisher v.a. in privaten Kleinanlagen, für die mittlerweile neben der klassischen Kamin- oder Kachelofen-Heizung auch sehr effiziente und komfortable, halbautomatische Stückholz- oder vollautomatische Hackschnitzel- und Pelletfeuerungen zum Betreiben von Zentralheizungssystemen erhältlich sind. (vgl. FNR 2001)

Die Erzeugung von Raum- und Prozeßwärme aus Biomasse kann aber auch in Nahwärmeheizwerken bzw. gekoppelt mit der Stromerzeugung in Heizkraftwerken erfolgen, wobei letzteres, sofern man mit Biomasse auch Strom erzeugen will, vorzuziehen wäre, da mit Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) die Energieträger mit 85-95 % Wirkungsgrad insgesamt wesentlich effizienter genutzt werden als selbst in modernsten GuD<sup>61</sup>-Kraftwerken. Die KWK wird bisher vorwiegend bei Dampfturbinen-Kraftwerken eingesetzt<sup>62</sup>, kann (und sollte) aber auch bei Gasturbinen(bzw. GuD)-Kraftwerken angewendet werden, wobei dies nicht nur eine im Verhältnis zur Wärmeentnahme größere Stromerzeugung (bis zu 50:50) sondern auch eine höher temperierbare Nutzwärmeauskopplung (bis zu 550°C) ermöglichen würde. (Enquete 2002: 450ff)

Grundsätzlich kraft-wärme-gekoppelt arbeiten auch die v.a. bei Kraftwerksleistungen unter 1 MW<sub>el</sub> (max. bis 10 MW) eingesetzten Motor-Blockheizkraftwerke, die, regenerativ mit Pflanzenöl, Ethanol oder Bio-, Klär- und Deponiegas<sup>63</sup> betrieben, per Generator Strom erzeugen, wonach dann die Abwärme (max. 120°C) zum Heizen genutzt werden kann, was ebenfalls hohe Gesamtwirkungsgrade von 85-95 % ergibt. (Hein/Steer 1997) Für kleinere Blockheizkraftwerke (BHKW) könnten dabei zukünftig auch die mittlerweile technisch ausgereiften Stirlingmotoren oder stationäre Brennstoffzellen interessant werden, die bei geringem Wartungsaufwand und gutem Teillastverhalten (Herbst/Frühjahr) ebenfalls Gesamtwirkungsgrade von über 90% erreichen. (Enquete 2002:460ff)

---

<sup>61</sup> Gas und Dampf-Technologie: Hierbei wird das heiße Brandabgas (wobei hier prinzipiell sowohl die Verbrennung von Gasen als auch, wenn auch noch nicht ganz ausgereift, die interne Vergasung von Festbrennstoffen möglich ist) zunächst zum Antreiben einer Gasturbine eingesetzt und danach, u.U. sogar mehrfach hintereinander, per Wärmetauscher zur Dampf- und damit zur Stromerzeugung genutzt. Der so bisher erreichte maximale elektrische Wirkungsgrad liegt bei 58 %. (405f)

<sup>62</sup> Dabei wird der max. 220°C heiße Wasserdampf nach der Stromerzeugung (mit einem elektrischen Wirkungsgrad von 25-42 %) zur Bereitstellung von Nah- oder Fernwärme genutzt Dies kann wärmeorientiert, in einem festen Verhältnis von 2:1 bis 4:1 (d.h. daß 1 Einheit Strom nur dann erzeugt wird, wenn 2 bzw. 3 oder 4 Einheiten Wärme verbraucht werden) erfolgen, v.a. größere Anlagen werden aber, trotz der teureren Technik, stromorientiert, d.h. mit einem flexiblen Wärme/Strom-Verhältnis, betrieben, da sie nur bei einem permanenten Betrieb wirtschaftlich sind. (Hein/Steer 1997)

<sup>63</sup> Bei Gasmotoren kommt (wie bei Gasturbinen) auch die Nutzung von (intern vergasten) Festbrennstoffen in Frage und mit sog. Dampfkolbenmotoren können Festbrennstoffe auch über die Erzeugung von heißem Wasserdampf genutzt werden.(397ff)

Schätzungen zufolge dürften ca. 80% des derzeitigen Festbrennstoffverbrauchs von 199 PJ/a<sup>64</sup> durch die über 7 Mio. dezentralen Heizungen (v.a. Kamin- und Kachelöfen) verursacht werden. Biomasse-Heiz(kraft)werke gibt es bisher nur rund 1000, v.a. industrielle, mit Alt- oder Restholz befeuerte Anlagen, von denen der größte Teil i.ü. weder in Kraft-Wärme-Kopplung betrieben wird, noch mit Nahwärmenetzen verbunden ist.<sup>65</sup> Auch biomassennutzende BHKW gibt es noch wenige, meist in Verbindung mit den ca. 1000 Biogasanlagen (~ 6 PJ), die Nutzung von Deponie- und Klärgas (~10 PJ) ist hingegen schon recht gängig. (Staiß 2001:I-26ff)

#### 4.3.1.3 Biomassennutzung als Kraft- und Treibstoff

Zur Bereitstellung mechanischer Energie für Maschinen und Fahrzeuge gibt es (neben dem Umweg über die Dampf- oder Stromerzeugung) z.B. die Möglichkeit der Nutzung von Pflanzenöl in Diesel- oder Ethanol in Ottomotoren. Während Ethanol nur in speziellen Motoren bzw. nur in 10-20%-iger Beimischung zu Benzin problemlos in gängigen Ottomotoren eingesetzt werden kann, kann Pflanzenöl in Reinform zwar ebenfalls nur in speziellen<sup>66</sup> (bzw. nachgerüsteten) Motoren, nach einer chemischen Umwandlung zu Pflanzenölmethylester („Biodiesel“) aber auch in gängigen Dieselmotoren eingesetzt werden. (TU München 1995:71ff) Ebenfalls unkompliziert ist der Einsatz von Biogas in Gasmotoren bzw. nachgerüsteten herkömmlichen Motoren, wobei allerdings für mobile Anwendungen ein Drucktank erforderlich ist. (682) Für die Zukunft zeichnen sich schließlich mit der Wasserstoff- und Methanolsynthese zwei weitere Varianten ab, wobei H<sup>2</sup> andere Motoren und spezielle Tanks (und Tankstellen) erfordern würde, während Methanol ohne große Veränderungen mit der heutigen Technik und auch in variabler Mischung mit Benzin genutzt werden könnte.<sup>67</sup> (Schindler 1997:61f,84f)

Ethanol spielt in Deutschland bisher keine Rolle, der Biodieselabsatz hingegen hat sich in den letzten Jahren von 220 t auf 360.000 t bis an die Grenze der Verarbeitungskapazitäten vervielfacht und stellt ca. 0,5 % des gesamten deutschen Kraftstoffverbrauches. (Staiß 2001:I-9f) Die Nutzung von reinem Pflanzenöl erfolgt hingegen bisher nur in einigen hundert Fahrzeugen, v.a. in der Landwirtschaft, sowie z.B. in der Prignitzer Eisenbahn (Berliner Zeitung 13.8.2002), und Methanolsynthese sowie Wasserstofftechnik befinden sich noch im Versuchsstadium.

---

<sup>64</sup> 85 PJ Brennholz (Stammholz) aus der Forstwirtschaft, 111 PJ Rest- und Altholz, 3 PJ Stroh (25)

<sup>65</sup> Gleichzeitig werden (leider, weil sie das Biomasseangebot ineffizient verbrauchen) auch große Biomassekraftwerke zur reinen Stromerzeugung betrieben und sogar noch zugebaut, da die BiomasseVO diese mit in die EEG-Förderung einbezieht. (Staiß 2001:I-181)

<sup>66</sup> z.B. in Duotherm-Motoren, wie dem weitgehend ausgereiften Elsbett-Motor, oder in speziellen Vor-/Wirbelkammermotoren (573f)

<sup>67</sup> Beide Kraftstoffe könnten auch in Verbindung mit Brennstoffzellen eingesetzt werden, siehe dazu Kap. 5.4



#### 4.3.1.4 Das Potential der Energiegewinnung aus Biomasse

Wie groß der Beitrag der Biomasse zur Energieversorgung in Deutschland sein könnte, ist sehr umstritten, da dies v.a. davon abhängt, wieviel Fläche für den Anbau von Energiepflanzen als zur Verfügung stehend angesehen wird. Diese Fläche kann zudem mit unterschiedlich ergebnisreichen Energiepflanzen bebaut werden, wobei die Wahl der Anbaufrucht auch von den regionalen Boden- und Klimabedingungen, vom jeweiligen Arbeits- und Energieaufwand, von bestehenden Betriebs- und Anbaustrukturen und nicht zuletzt der kommerziellen Verwertbarkeit beeinflusst wird, und schließlich ist für die Potentialbewertung auch noch die Komplexität der Nutzung (Festbrennstoff oder Umwandlung zu Strom/Kraftstoff/Gas) von Bedeutung.

Unter Berücksichtigung der aus ökologischen Gründen notwendigen Extensivierung der Landwirtschaft, z.T. sogar ausgehend von einer Vollumstellung auf ökologischen Landbau (und z.T. auch berücksichtigend, daß im Hinblick auf die ebenfalls zu minimierende stoffliche Verwertung von Erdöl auch verstärkt pflanzliche Industrierohstoffe angebaut werden müssen), wird von den meisten Studien ein Energiepflanzenbau auf 1,5-2,5 Mio. Hektar (ca. 8-15 % der gesamten heutigen Landwirtschaftsfläche von 17,4 Mio. ha) Überschußfläche für möglich gehalten<sup>68</sup>. Kaltschmitt/Hartmann (2001) gehen z.B. von 2 Mio. ha aus, mit denen sie ein Festbrennstoffpotential von ca. 350 PJ/a (bei Getreide, Ganzpflanzennutzung) bis ca. 420 PJ/a (bei hohem Anteil an Miscanthus u.a. Gräsern) errechnen. (14ff) Auch die Studie der TU München (1995:137) benennt ein ähnliches Potential von 304 PJ/a (50% Getreide-Festbrennstoff, 50% Treibstoffe aus Raps und Rüben) bis 430 PJ/a (50% Getreide, 25% Miscanthus, 25% Kurzumtriebsholz). Das DLR ist mit 285 PJ/a auf 1,5 Mio. ha (bei Festbrennstoffnutzung, alternativ 90 PJ/a Rapsöl oder 210 PJ/a Ethanol) wiederum etwas pessimistischer (Nitsch/Trieb 2000: 6ff), während eine BMWi-Studie die verfügbare Fläche mit 4 Mio. ha sehr viel höher einschätzt und daher ein Potential von 840 PJ/a angibt. (BMWi 1994 zit. in ebd.) Zu dem sich also auf etwa 400 PJ/a belaufenden Ertrag der Energiepflanzen muß aber noch das Potential des für eine energetische Nutzung zur Verfügung stehenden Anteils am Stammholzertrag der Forstwirtschaft addiert werden (wobei dessen Verbrennung aber heutzutage oft noch mehr ästhetischen als energetischen Zwecken dient), das immerhin bis zu 220 PJ/a betragen könnte.<sup>69</sup>

---

<sup>68</sup> Unter der Voraussetzung eines um 50 % verminderten Fleischkonsums (ersetzt durch vegetarische Nahrung), lassen sich nach Wolters (1999) sogar ca. 4-6,5 Mio. ha für die Energiepflanzenproduktion freigeben (Nitsch/Trieb 2000:8) Andererseits basiert unsere heutige Nahrungsmittelversorgung netto, d.h. abzüglich der Inlandsflächen für Exporte, zu ca. 23 % auf Flächenbelegung und Energieverbrauch im Ausland (BUND/Misereor 1996:117), dies gilt i.ü. noch viel mehr für Textilien, Holz, Papier u.v.m., daher würde eine evtl. Ausweitung der materiellen Selbstversorgung Deutschlands wiederum einen deutlichen Anstieg des Flächenbedarfs zur Folge haben.

<sup>69</sup> Ob auf Dauer mehr als die gegenwärtig energetisch genutzten 9 Mio. m<sup>3</sup> Stammholz, (das sind ca. 23,5 % des derzeitigen Holzeinschlags) zur Verfügung stünden, wurde von keiner der mir bekannten Studien untersucht, aber ausgehend von der Tatsache, daß sich der Ertrag der deutschen Wälder nachhaltig um bis zu 50 % (auf 57 Mio. m<sup>3</sup>) steigern ließe (BML 2000) kann man eine Verfügbarkeit

Die Abschätzungen bezüglich der energetisch verwertbaren Reststoffe streuen nicht so stark: die Werte liegen in den Studien der TU München (125ff, z.T. basierend auf Kaltschmitt/Wiese 1993), des DLR und von Kaltschmitt/Hartmann (2001) bei 189-218 PJ/a Restholz, 100-108 PJ/a Stroh<sup>70</sup> und 90-92 PJ/a Biogas aus organischen Abfällen (incl. Gülle) sowie 35-42,5 PJ/a Klär- und Deponiegas, zusätzlich nennen Kaltschmitt/Hartmann noch 81 PJ/a an Altholz.

Aus Anbau und Reststoffverwertung ergibt sich damit insgesamt ein gasförmiges Brennstoffangebot von 130 PJ/a sowie ein Festbrennstoffpotential von 1000 PJ/a. Im Falle einer Umwandlung der Hälfte der Festbrennstoffe zu Methanol-Treibstoff mit einem Wirkungsgrad von 70 % würde sich das Potential allerdings auf 130 PJ Gas, 500 PJ Festbrennstoff und 350 PJ Treibstoff<sup>71</sup> reduzieren. Würde man zur Treibstoffgewinnung stattdessen auf der Hälfte der 2 Mio. ha Anbaufläche Öl- oder Zuckerpflanzen anbauen, ergäben sich nur ca. 50 PJ/a an Rapsöl(methylester) bzw. 100 PJ/a an Ethanol (zzgl. rund 50 PJ aus Rapsstroh oder Schlempe) sowie 800 PJ/a Festbrennstoff und 130 PJ/a Gas, und würde man gar die ganze Fläche zur Rapsöl- oder Ethanolproduktion nutzen, hätte man 100 bzw. 200 PJ Treibstoff jährlich, bei dann aber nur noch 600 PJ Festbrennstoff, 130 PJ Gas sowie 100 PJ aus Stroh oder Schlempe.

Variante 1 (Festbrennstoffanbau):	1130 PJ/a
Variante 2 (Methanolherstellung 50 %):	980 PJ/a
Variante 3 (Zucker-/Ölpflanzenanbau 50 %):	1030-1080 PJ/a
Variante 4 (Zucker-/Ölpflanzenanbau 100%):	930-1030 PJ/a

Damit ließen sich, bei kraft-wärmegekoppelter Nutzung<sup>72</sup> der Hälfte<sup>73</sup> der Brennstoffe, ca. 26-47 TWh/a Strom und 472-847 PJ/a nutzbare Wärme (entsprechend einer Substitution von 496-892 PJ fossiler Brennstoffe<sup>74</sup>) sowie 0-350 PJ Treibstoff bereitstellen, woraus sich ein end-energetisches Substitutionspotential von 780 PJ/a (Variante 4 mit Raps), 942 PJ/a (Variante 2), 1043 PJ/a (Variante 3 mit Ethanol) oder 1062 PJ/a (Variante 1) ergäbe. Es gibt aber auch sehr viel optimistischere Schätzungen, z.B. die des IER mit einem Substitutionspotential von 1789-2541 PJ/a (BIZ 2001) wobei aber unklar bleibt, auf welchen Annahmen diese beruhen.

---

von ca. 23 Mio. m<sup>3</sup> Stammholz für die energetische Nutzung unterstellen. (Sofern im Falle einer evtl. Reduzierung des gegenwärtigen Nettoholzimportes von 16 Mio. m<sup>3</sup> der stoffliche Verbrauch an deutschem Stammholz um nicht mehr als 5 Mio. m<sup>3</sup> gesteigert würde.)

<sup>70</sup> Ausgehend von einem 20%-igen Anteil am gesamten Strohaufkommen von ca. 541 PJ/a, der ohne Nachteile für Bodenstruktur und -fruchtbarkeit und unter Berücksichtigung des Streu- und Futterbedarfs für eine energetische Nutzung zur Verfügung stünde

<sup>71</sup> Zum Vergleich: Der jährliche Kraftstoffverbrauch in Deutschland beläuft sich auf ca. 2800 PJ. (AG Energiebilanzen 2002)

<sup>72</sup> Angenommene Durchschnittswerte: elektrischer Wirkungsgrad 30 %, thermischer Wirkungsgrad 65 %, Gesamtwirkungsgrad 95 %

<sup>73</sup> Verwertung der anderen Hälfte v.a. in privaten Heizungsanlagen mit einem durchschnittlichen Wirkungsgrad von 85%

<sup>74</sup> Bei der Berechnung der Menge substituierter fossiler Brennstoffe wird hier davon ausgegangen, daß Wärme mit einem durchschnittlichen Wirkungsgrad von 95 % bereitgestellt wird, wobei hier nur die Verluste nach der Erzeugung der Endenergieträger berücksichtigt werden, z.B. bei Öl oder Gas im Heizkessel, bei Fernwärme oder Strom die Leitungs- bzw. Netzverluste. Beim Treibstoff Ethanol ist außerdem zu berücksichtigen, daß er aufgrund höherer Oktanzahl (allerdings nur in bis zu 10%-iger Beimischung zu Benzin) einen um den Faktor 1,23 höheren Wirkungsgrad hat als Benzin. (TU München 1995:170)

### 4.3.2 Solarthermische Wärmegegewinnung

Das Grundprinzip der solarthermischen Energiegewinnung ist die Umwandlung der die Erdoberfläche erreichenden Solarstrahlung in Wärme. Diese Strahlung wird beim Passieren der Atmosphäre allerdings in ein tages- und jahreszeitlich schwankendes Verhältnis von Direkt- und Diffusstrahlung aufgeteilt und auch die Gesamtleistung dieser Einstrahlung, die in Deutschland durchschnittlich  $133 \text{ W/m}^2$  beträgt, variiert stark mit den Tages- und Jahreszeiten: in den Wintermonaten beträgt sie  $20\text{-}60 \text{ W/m}^2$  (fast ausschließlich Diffusstrahlung), im Sommer  $100\text{-}210 \text{ W/m}^2$  (max. zu etwa einem Drittel Direktstrahlung). Daraus resultieren mittlere Strahlungsjahressummen von  $805\text{-}1305 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ , da das Strahlungsangebot aber auch wetterbedingten Schwankungen unterworfen ist, können sich diese Werte von Jahr zu Jahr um bis zu 25 % unterscheiden. Außerdem ergibt sich durch die unterschiedlich häufige Wolkenbedeckung und die nach Süden hin zunehmende Einstrahlungsintensität eine deutliche regionale Differenzierung des Strahlungsangebotes in Deutschland. (52ff)

Abb. 4.4: Verteilung der mittleren Globalstrahlungssummen in Deutschland (aus: Kaltschmitt/Wiese 1997)

Die Solarthermie macht sich nun die Tatsache zu Nutze, daß beim Auftreffen von Licht auf einen Kollektor ein bestimmter Anteil der Strahlung absorbiert und zu Wärme transformiert wird. Diese kann dann über ein zirkulierendes Wärmeträgermedium (meist Wasser) abtransportiert und über einen Wärmetauscher an das Brauch- oder Heizungswasser abgegeben wer-

den<sup>75</sup>. Mit einfachen Absorbern kann dieses so auf max. 30°C, bei verglasten Kollektoren auf bis zu 80°C und bei Vakuum-Flachkollektoren auf bis zu 120°C erhitzt werden.<sup>76</sup> (111ff)

Weitere wichtige Elemente einer solarthermischen Anlage sind der Wärmespeicher und (sofern dieser nicht oberhalb der Kollektoren angeordnet ist) eine Pumpe für den Umlauf des Wärmeträgermediums. Zur Tagesspeicherung in Einzelhäusern werden meist die gängigen Wasser-Druckspeicher eingesetzt, der jahresdurchschnittliche Deckungsgrad<sup>77</sup> einer dezentralen Anlage zur Warmwasserbereitstellung liegt dann bei 50-60 % (des Brauchwasserbedarfs), wenn 1-1,5 m<sup>2</sup> Kollektorfläche pro Person und ein Speichervolumen von 250-500 l angesetzt werden (133ff) und eine EFH-Anlage, die nicht nur Warmwasser erzeugt, sondern auch die Raumheizung unterstützt, kann sogar, mit etwa doppelt soviel Speichervolumen und Kollektorfläche, einen Gesamtwärmedeckungsgrad von 20-30 % erreichen. (Staiß 2001: I-72) Für höhere Deckungsgrade muß hingegen eine saisonale Langzeitspeicherung erfolgen, z.B. in kies- oder wassergefüllten Erdbecken oder auch mittels Erd- oder Aquifersonden<sup>78</sup> (124f), dafür können dann aber (mit 0,4-0,7 m<sup>2</sup> Kollektorfläche und 1-2 m<sup>3</sup> Speichervolumen pro GJ Jahreswärmebedarf) bis zu 60 % der gesamten jährlich benötigten Wärme solar bereitgestellt werden. (149f) Mit den aufgrund ihrer hohen Speicherdichte sich für eine thermische Langzeitspeicherung auch in dezentralen Anlagen anbietenden (allerdings noch nicht marktreifen) Neuentwicklungen Magnesium-Hydrid- (Scheer 1999:194) und Sorptionsspeicher<sup>79</sup> (Luther 2001) wäre ein Gesamtdeckungsgrad von 50 % aber auch für Einfamilienhäuser erreichbar.

Abb. 4.5: Solarthermische Anlagenkonzeptionen (aus: Kaltschmitt/Wiese 1997)

---

<sup>75</sup> Mittels einer Absorptionskältemaschine können mit Solarwärme auch Kühlsysteme in Bürogebäuden oder Lagerhallen betrieben werden (Berliner Zeitung 15.8.2002)

<sup>76</sup> Werden höhere Temperaturen benötigt, können strahlungskonzentrierende Kollektoren wie z.B. Parabolspiegel eingesetzt werden, in denen bis zu 1600°C Absorbtemperatur erreicht werden. Da diese aber nur den Direktanteil der Strahlung konzentrieren, finden sie in Deutschland kaum Anwendung. (127ff)

<sup>77</sup> Der Deckungsgrad besagt, wieviel der jährlich benötigten Wärme allein vom solarthermischen System bereitgestellt werden kann.

<sup>78</sup> Dabei wird die sommerlich überschüssige Wärme per Wärmepumpensystem im Erdboden oder Grundwasserleiter gespeichert.

<sup>79</sup> Hierbei wird ein sog. Silikageladsorber „getrocknet“ und der entstehende Wasserdampf zur späteren Readsorption aufbewahrt.

Derzeit (Stand:Ende 2000) waren in der Bundesrepublik 3,267 Mio. m<sup>2</sup> Kollektorfläche installiert, dies entspricht einer Wärmebereitstellung von ca. 43,6 PJ pro Jahr. Vom Bestand 1990 ausgehend bedeutet das einen mittleren jährlichen Zubau von 300.000 m<sup>2</sup>. (Staiß 2001:II-76f)

Abb. 4.6: Absatz- und Bestandsentwicklung von Solarkollektoren (aus: Staiß 2001)

Das Potential solarthermischer Wärmeerzeugung wird (ohne die Flächenkonkurrenz der Photovoltaik zu berücksichtigen) von Kaltschmitt/Wiese auf 608 bis 920 PJ/a von 800 Mio. m<sup>2</sup> genutzter Dachfläche, zzgl. 2660-4025 PJ/a von 3,5 Mrd. m<sup>2</sup> gebäudenahen Freiflächen geschätzt. Unter Berücksichtigung der weit niedrigeren und lokal nicht immer mit geeigneten Flächenpotentialen einhergehenden Nachfrage nach niedertemperierter Wärme (160ff) reduziert sich dieses Potential allerdings auf nur noch 922,4 PJ/a<sup>80</sup>, entsprechend einer Substitution fossiler Brennstoffe von ca. 970 PJ/a. Die Studie des DLR errechnet hingegen einen nachfrageseitig vollständig nutzbaren Wärmeertrag von 1107 PJ/a auf 750 Mio. m<sup>2</sup> Dachfläche<sup>81</sup>, ergänzt durch 1028 PJ/a auf 350 Mio. m<sup>2</sup> sonstiger Siedlungsfläche (z.B. Lärmschutzwände, Garagen) und 350 Mio. m<sup>2</sup> Freiflächen. (Nitsch/Trieb 2000:6ff) Dieses Ergebnis muß m.E. aber aufgrund der vom DLR wohl unterschätzten nachfragebedingten Restriktionen in Frage gestellt werden<sup>82</sup>, besonders im Hinblick auf zukünftige Effizienzsteigerungen im Raumwärmebereich (vgl. Kap. 5.2) dürfte das Potential der Solarthermie wohl kaum bei mehr als 800-1200 PJ/a (entsprechend einer Substitution von 850-1250 PJ/a fossiler Endenergie) liegen.

---

<sup>80</sup> davon 717,9 PJ/a in solaren Nahwärmenetzen mit Langzeitspeicherung, 188,9 PJ in Nahwärme- bzw. Einzelhaussystemen ohne Langzeitspeicher und 15,6 PJ mit dezentralen Warmwasseranlagen (eigene Berechnung nach den Angaben von Kaltschmitt/Wiese:160ff)

<sup>81</sup> Die Rechnungen des DLR berücksichtigen dabei den konkurrierenden Flächenbedarf der Photovoltaik.

<sup>82</sup> Von der gesamten heutigen Niedertemperatur-Wärmenachfrage (ca. 3800 PJ/a, vgl. Kap. 5.2) könnten selbst bei geeigneten Flächenpotentialen in der Nähe aller Verbraucher und deren vollständiger Erschließung mit einem durchschnittlichen Jahresdeckungsgrad von 40 % (was ebenfalls sehr optimistisch ist) nur max. 1500 PJ/a solarthermisch bereitgestellt werden.

### 4.3.3. Geothermische Energiegewinnung

#### 4.3.3.1 Grundlagen geothermischer Energienutzung

Der permanente Transport des Wärmeinhalts der Erde an die Erdoberfläche, ein Wärmestrom von  $0,065 \text{ W/m}^2$  (102ff), kann zwar nicht direkt energetisch genutzt werden, aber der Wärmeinhalt der oberen Erdschicht bis 100 m Tiefe kann dieser, unter Zufuhr von Antriebsenergie, durch in Leitungen zirkulierende Wärmetauscher entzogen und in einer Wärmepumpe auf ein nutzbares Temperaturniveau angehoben werden. (345) Ein viel größeres Wärmeangebot besteht allerdings in der mit zunehmender Tiefe um durchschnittlich  $30^\circ\text{C}$  je km (in tektonisch aktiven Gebieten und Grabenregionen sogar um bis zu  $200^\circ\text{C}/\text{km}$ ) ansteigenden Temperatur der Erdkruste. Diese Wärme kann über die Förderung von heißem Wasser (bzw. Wasserdampf) aus natürlichen hydrothermalen Lagerstätten, durch die Einbringung einer Tiefensonde oder durch das sog. „Hot Dry Rock“<sup>83</sup>-Verfahren gewonnen und ab Temperaturen  $>150^\circ\text{C}$  sogar zur Stromerzeugung eingesetzt werden. (102ff) Während das oberflächennahe Erdreich z.T. jahreszeitlich bedingten Temperaturschwankungen unterworfen ist, unterliegt der geothermische Wärmestrom keinem zeitlich wechselnden Einfluß. Allerdings ist die räumliche Temperaturverteilung in 2000 m Tiefe sehr differenziert, die Maxima finden sich v.a. im Oberrheingraben und im Norddeutschen Becken. Für die energetische Nutzung sind außerdem hinreichend große Tiefenwasservorkommen von Vorteil, die sich in Deutschland ebenfalls im Oberrheingraben und norddeutschen Becken, sowie im süddeutschen Molassetrog finden. (107ff)

.

Abb. 4.7: Temperaturverteilung in 2000 m Tiefe in Deutschland (aus: Kaltschmitt/Wiese 1997)

---

<sup>83</sup> Verpressung (und anschließende Förderung) von Wasser in 3000-7000 m tiefliegende, künstlich erzeugte Risse und Klüfte (421ff)

#### 4.3.3.2. Oberflächennahe Erdwärmenutzung

Die Gewinnung oberflächennaher Wärme aus dem Erdreich bzw. dem Grundwasser erfolgt durch horizontal oder vertikal verlegte Wärmetauscherrohre<sup>84</sup>, durch die ein Wärmeträgermedium (meist Wasser mit Frostschutzzusatz) zirkuliert<sup>85</sup>, welches in der Wärmepumpe ein Arbeitsmittel (bis 1995 FCKW, heute u.a. Propan) zum Verdampfen bringt. Dieses wird dann vom Kompressor angesaugt und verdichtet, wodurch sich die Temperatur auf einen dem Heizungsvorlauf entsprechenden Wert erhöht. Aufgrund der Wärmeabgabe an diesen verflüssigt sich das Arbeitsmittel und tritt durch ein Ventil wieder in den Verdampfer ein. (346ff) Die so jährlich gewinnbare Wärme beträgt etwa  $360 \text{ MJ/m}^{286}$ , wobei dafür aber je  $\text{m}^2$  und Jahr ca. 40 kWh (d.h. 144 MJ) Strom<sup>87</sup> für den Antrieb aufgewendet werden müssen. Insgesamt ergibt sich daraus dann aber eine Nutzwärmebereitstellung von ca.  $500 \text{ MJ/m}^2\text{a}$ , da die Abwärme des Antriebs ebenfalls als Heizenergie genutzt wird. (ebd.)

Abb. 4.8: Wärmepumpenheizungsanlage mit Erdreichwärmetauscher (aus: Kaltschmitt/Wiese 1997)

Eine Variante dieser Technik ist die Abluftwärmepumpe, die zusätzlich zur passiven Wärmerückgewinnung in Passivhäusern eingesetzt werden kann (Luther 2001), darüber hinaus kann das Wärmepumpenprinzip auch (evtl. mit sommerlicher Raumkühlung verbunden) zur saisonalen Wärmespeicherung im Erdboden oder Aquiferen eingesetzt werden. (356f)

---

<sup>84</sup> Eine neuere, kostengünstige Variante ist die Nutzung von Bauwerksgründungen (sog. „Energiepfähle“) hierfür. (Staiß 2001:I-89)

<sup>85</sup> Bei grundwassernutzenden Anlagen wird dieses direkt abgepumpt und nach Wärmeentzug reinjiziert.(350)

<sup>86</sup> Da der natürliche Erdwärmestrom nur  $2,2 \text{ MJ/m}^2 \text{ a}$  liefert, handelt es sich im Falle horizontaler Anlagen eigentlich um Solarenergie, die (v.a. im Sommer) im oberflächennahen Erdreich gespeichert wurde und auch bei vertikalen Anlagen ist im Sommer eine zusätzliche technische Regeneration des Wärmehaushalts des genutzten Erdreichs erforderlich, z.B. durch die Einspeisung der aus Raumkühlung gewonnenen Wärme. (Möglich wären hierfür auch Solarkollektoren, dann besteht aber eine Flächenkonkurrenz zu deren Potential.)

<sup>87</sup> Dies entspricht bei der Stromerzeugung im heutigen Kraftwerksmix einem primärenergetischem Aufwand von 379 MJ, daraus resultiert eine sog. Heizzahl von ca. 1,3. Etwas effizienter (1,2-1,6) sind die neueren verbrennungsmotorisch betriebenen Wärmepumpen.

Derzeit sind in Deutschland etwa 60.000 Anlagen installiert, von denen allerdings die Hälfte alte Außenluftwärmepumpen sind, die aufgrund ihrer viel geringeren Effizienz (primärenergetisch bewertet sind diese sogar fast sinnlos) vorwiegend nur zur Warmwasserbereitung genutzt werden. (Staiß 2001:I-89ff) Die insgesamt durch Wärmepumpen bereitgestellte Nutzwärme lag im Jahr 2000 bei ca. 1-1,2 PJ (ebd.:II-14), abzüglich der als Strom hierfür investierten fossilen Energie dürfte der Energieertrag allerdings höchstens 0,3 PJ ausgemacht haben.

#### 4.3.3.3. Tiefe Erdwärmenutzung

Die Gewinnung der Erdwärme aus bis zu 3000m Tiefe erfolgt meist über die Förderung warmer Tiefenwässer, deren Wärme mithilfe von Wärmetauschern an ein Heizungssystem übertragen wird (wonach das Wasser in den Aquifer reinjiziert wird). Finden sich keine Tiefenwässer, besteht aber auch die Möglichkeit Sonden einzubringen, deren Wasserkreislauf den Wärmetransport an die Oberfläche leistet. (371ff) Während hydrothermale Anlagen in Deutschland Leistungen von bis zu 9 MW (ohne den z.T. zusätzlich eingesetzten fossilen Spitzenlastkessel) und Fördertemperaturen von bis zu 100°C erreichen können, dafür aber große Investitionen erfordern und daher an große Nah-/Fernwärmesysteme bzw. große Einzelverbraucher (mind. 5 MW thermische Gesamtleistung) angebunden werden müssen (falls keine weitere kommerzielle Nutzung des Thermalwassers z.B. zu Heilzwecken möglich ist), kommen Erdwärmesonden meist nur auf 50-500 kW und max. 40°C (weshalb zusätzlich Wärmepumpen<sup>88</sup> eingesetzt werden müssen), sind aber auch schon bei geringerer Wärmeabnahme finanzierbar. (381,405)

Im Moment existieren in Deutschland lediglich 19 hydrothermale Anlagen und 1 tiefe Erdwärmesonde mit einer Gesamtleistung von ca. 50 MW (Staiß 2001:I-84,II-94), die im Jahr max. 0,3 bis 0,5 PJ Wärme bereitstellen dürften. Die Stromerzeugung mit hydrothormaler Erdwärme ist in Deutschland aufgrund zu niedriger Temperaturen bisher kaum möglich, für die Zukunft verspricht aber das HDR-Verfahren ein (allerdings nur in Kraft-Wärme-Kopplung rentables<sup>89</sup>) geothermisches Strompotential (und auch erweiterte Prozeßwärmenutzungen). Dies erfordert jedoch einen größeren technischen Aufwand, da tiefere Bohrungen eingebracht und die natürlichen Riß- und Kluftsysteme durch hydraulische Stimulation erweitert werden müssen. Es bestehen aber Chancen, das bald zwei erste HDR-Heizkraftwerke realisiert werden. (ebd.:I-85)

---

<sup>88</sup> Daher liegt der Wirkungsgrad der tiefen Erdwärmesonden primärenergetisch auch nur bei 150 %, d.h. die Erzeugung von 1 MJ Nutzwärme erfordert den Einsatz von ca. 0,069 kWh (d.h. im gegenwärtigen Kraftwerksmix: ca. 650 kJ Primärenergie) Strom.

<sup>89</sup> Der Wirkungsgrad der thermalen Stromerzeugung liegt beim heutigen Stand der Technik nämlich nur bei 8-10 %. (422f)



#### 4.3.3.4. Das Potential geothermischer Energiegewinnung

Das Angebotspotential oberflächennaher Erdwärme auf den hinsichtlich Grundwasserschutz, Bodenstruktur, Bebauung, Versorgungsleitungen und Nutzungsstrukturen geeigneten Gebäudeflächen bzw. gebäudenahen Freiflächen beziffert Kaltschmitt/Wiese auf 940 PJ/a, zzgl. der Antriebswärme ergibt sich daraus eine Nutzwärmebereitstellung von ca. 1316 PJ/a (364f) bzw. eine Brennstoffsubstitution von 1385 PJ, bei einem Stromverbrauch von ca. 104 TWh.

Das technische Angebotspotential hydrothermalen Energievorkommen in Deutschland wird von Kaltschmitt/Wiese auf 198 EJ geschätzt, davon entfallen 88 EJ auf das süddeutsche Molassebecken, 60 EJ auf das Gebiet des Oberrheingrabens und 50 EJ auf das Norddeutsche Becken. Dabei ist nun aber zu berücksichtigen, daß die hydrothermale Wärmeentnahme mit 0,2-2,5 W/m<sup>2</sup> deutlich schneller erfolgen würde als die natürliche Wärmestromdichte beträgt, und daher nach einigen Jahrzehnten ein langsames Absinken der Lagerstättentemperatur in den unwirtschaftlichen Bereich droht. Kaltschmitt/Wiese begrenzen die Nutzung des Potentials deswegen auf 100 Jahre, woraus sich 1980 PJ/a Nutzwärme bzw. 2084 PJ substituierter Endenergie ergeben. (389ff). Da nach diesen 100 Jahren aber mehrere Jahrhunderte Regenerationszeit erforderlich wären (und die Vorräte schon nach 50 Jahren viel zu kalt sein dürften), ist auch das m.E. nicht als nachhaltig anzusehen, das Substitutionspotential dürfte daher, wenn jeweils ein Fünftel der Vorkommen 100 Jahre lang genutzt und danach 400 Jahre „brachliegen“ würde, höchstens 165 PJ/a betragen.<sup>90</sup> Auch die Schätzungen von Heinloth (1997) mit 612 PJ/a, des DLR mit 1260 PJ/a (Nitsch/Trieb 2000:6ff) und des IER mit 1175 PJ/a (BIZ 2001) scheinen eine solche Lagerstättenschonung nicht zu berücksichtigen.

Das Angebotspotential der tiefen Erdwärme bis 3000 m wird von Kaltschmitt/Wiese mit 3010 PJ/a (auf 5.000 km<sup>2</sup> verfügbarer gebäudenaher Fläche) angegeben. Zum einen reduziert sich dieses Potential aber durch die dabei nicht berücksichtigte Flächenkonkurrenz zur oberflächennahen Erdwärmegewinnung, zum anderen beträgt der natürliche Wärmestrom auf dieser Fläche nur 11 PJ/a, so daß hier eigentlich nur der Wärmevorrat (unter ca. 3.500 km<sup>2</sup>) genutzt werden kann, der, wenn man einen gewissen seitlichen Wärmezustrom mitberücksichtigt, nicht größer als ca. 2400 EJ<sup>91</sup> sein dürfte, und daher selbst bei einer Entnahme von nur 240 PJ/a schon nach 10.000 Jahren erschöpft wäre. Aufgrund der beständig absinkenden Temperatur

---

<sup>90</sup> Dies entspricht auch dem per natürlichem Wärmestrom jährlich bereitgestellten Energieangebot auf der (von Kaltschmitt/Wiese auf 75.000 km<sup>2</sup> geschätzten) hydrothermal nutzbaren Fläche.

<sup>91</sup> eigene Berechnung nach den Angaben von Kaltschmitt/Wiese (407)

würde die Gewinnung dieser Wärme aber schon weit früher unwirtschaftlich werden, so daß m.E. höchstens von einem langfristig nutzbaren Potential von 120 PJ/a (entsprechend einer Nutzwärmebereitstellung von 342 PJ, bei 23 TWh Stromverbrauch) ausgegangen werden kann.

Auch die auf etwa einem Drittel der Fläche Deutschlands mögliche Nutzung der Erdwärme zwischen 3000 und 7000 m Tiefe per HDR-Verfahren wäre ein solcher Lagerstättenabbau, der aber, aufgrund der Menge an gespeicherter Wärme (150.000 EJ, davon 66.000 EJ über 180°C), dennoch eine über 10.000 Jahre hinweg immer über 150°C temperierte Wärmebereitstellung von mind. 1210 PJ/a (entsprechend der heutigen Nachfrage ließen sich damit ca. 125 PJ industrielle Prozeßwärme >100°C substituieren, sowie, in Kraft-Wärme-Kopplung<sup>92</sup>, 15-30 TWh/a Strom und ca. 880 PJ/a Niedertemperaturwärme erzeugen) ermöglichen würde.<sup>93</sup> Hinzu käme ein dauerhaft über 90°C liegendes Wärmeangebot von weiteren 1210 PJ/a, daß aber aufgrund der nur begrenzt mit HDR-Anlagen erschließbaren Nachfrage<sup>94</sup> kaum genutzt werden könnte.

#### **4.3.4. Photovoltaische Stromerzeugung**

Neben der Wärmegewinnung bzw. der wärmebasierten Stromerzeugung (siehe Kap. 6.2), kann die auf die Erdoberfläche auftreffende solare Strahlung (s.o.) auch für die direkte Erzeugung von Strom genutzt werden. Dabei macht man sich den sog. photovoltaischen Effekt zunutze, der darauf beruht, daß Elektronen in einem Halbleiter<sup>95</sup> die Quantenenergie der Photonen aufnehmen und dabei in potentielle und kinetische Energie umwandeln. Die so entstandenen Leitungselektronen und „Löcher“ geraten dann in ein durch aneinandergrenzende n- und p-dotierte Bereiche erzeugtes elektrisches Feld und wandern in Richtung n- bzw. p-Gebiet, wobei sich ersteres negativ und letzteres positiv auflädt, bis das dadurch gebildete elektrische Potential dem Diffusionspotential des n-p-Überganges entspricht. Werden nun p- und n-Seite kurzgeschlossen, fließt Strom, der bei konstanter Temperatur der Solarzelle proportional zur Bestrahlungsintensität und der damit steigenden Anzahl absorbiertes Photonen steigt. (178ff)

---

<sup>92</sup> angenommene Wirkungsgrade: 5-10 % Stromerzeugung, 80 % Wärmeezeugung (d.h. 90 % der Abwärme werden zu Nutzwärme)

<sup>93</sup> eigene Berechnungen nach den Angaben in Kaltschmitt/Wiese 1997 (S.420ff)

<sup>94</sup> Aufgrund der hohen Investitionskosten und der großen Menge der zentral anfallenden (Ab-)Wärme werden HDR-Anlagen wahrscheinlich eine lokale Mindestwärmefachfrage von 25 MW benötigen. Falls es sich nicht um Großverbraucher handelt, müssen dabei gleichzeitig die räumlichen Voraussetzungen für die Wärmeverteilung, also für Nahwärmesysteme, gegeben sein.

<sup>95</sup> Halbleiter (z.B: Silicium, Germanium, Gallium-Arsenid) sind Nichtleiter deren schmaler Bandabstand es ermöglicht, daß unter Zufuhr von Energie Elektronen in das Leitungsband rücken und diese dann, wie auch die entstandenen Lücken („Löcher“) im Valenzband, Strom leiten. Zusätzlich kann durch den Einbau von Fremdatomen die Leitfähigkeit erhöht werden, da diese entweder zusätzliche Elektronen (n-Dotierung) oder Löcher (p-Dotierung) bereitstellen.

Die erzeugte Stromstärke steigt außerdem mit sinkendem Bandabstand des Halbleiters, denn dies ermöglicht eine größere Menge der unterschiedlich „starken“ Photonen zu nutzen. Aus dem Anteil nicht nutzbarer Photonen, dem nicht nutzbaren Energieanteil der absorbierten Photonen und den Reflexions- Abschattungs- und Widerstandsverlusten resultieren so für die verschiedenen Halbleitermaterialien unterschiedliche Wirkungsgrade mit einem theoretischen Maximum von 30 %. Die bisher in der Produktion erreichten Maximalwerte liegen für monokristalline Galliumarsenidzellen bei 21 %, bei mono- und polykristallinen Siliciumzellen zwischen 13 und 18 %, bei Dünnschichtzellen aus Cadmium-Tellurid oder Kupfer-Indium-Diselenid bei 11-14 % und bei amorphen Dünnschicht-Siliciumzellen, die aufgrund eines grundsätzlich anderen Aufbaus sogar Wirkungsgrade von 50 % erreichen könnten, bei 8-10 %.<sup>96</sup> (187ff)

Abb. 4.9: Aufbau einer Solarzelle und Schaltbild (aus: Kaltschmitt/Wiese 1997)

Zur Netzeinspeisung muß der solar erzeugte Gleichstrom aber noch in Wechsel- oder Drehstrom umgewandelt werden, wobei es hierbei sowie in den außerhalb der Solarzelle liegenden Stromleitungen zu weiteren Verlusten von 1,4-5 % kommt. Ein durchschnittliches Photovoltaiksystem kann daher auf 1 m<sup>2</sup> bei einer Einstrahlung von 3 kWh/Tag nur ca. 0,35 (polykristallin) bis 0,4 kWh (monokristallin) Gleichstrom oder 0,3 bzw. 0,35 kWh Wechselstrom erzeugen. Dabei ist die Gesamtleistung des Systems aber unbegrenzt, d.h. es können sowohl mW-Anwendungen (z.B. Uhren, Parkscheinautomaten, Taschenrechner) wie auch kW- (z.B. Hausstromversorgung) und MW-Systeme (als Kraftwerke) betrieben werden. (197ff). Bis Ende 2001 waren insgesamt ca. 195 MW Spitzenleistung installiert (davon 90% netzgekoppelt), wobei alleine im Jahr 2001 der Zubau 80 MW betrug, noch ist der Beitrag der ca. 50.000 Anlagen mit 150 Mio. kWh jährlicher Netzeinspeisung aber bescheiden. (ARGE Solarwirtschaft 2002)

---

<sup>96</sup> Besonders die Dünnschichtzellen werden trotz ihrer bislang niedrigeren Wirkungsgrade als zukunftsfruchtig angesehen, da sie billiger zu produzieren sind und neue Anwendungsmöglichkeiten erlauben, so z.B. integriert in Gerätegehäuse oder Glasfassaden. Noch werden für netzgekoppelte Photovoltaik-Anlagen aber fast ausschließlich mono- und polykristalline Siliziumzellen verwendet.

Das Potential der photovoltaischen Stromerzeugung in Deutschland hängt primär ebenso wie das der solaren Wärmegegewinnung von den verfügbaren Dachflächen ab. Kaltschmitt/Wiese gehen hier wieder (ohne die konkurrierende Solarthermie zu berücksichtigen) von 800 Mio. m<sup>2</sup> aus, auf denen mit monokristallinen Siliciumzellen maximal 120 TWh/a Strom produziert werden könnten. Zusätzlich geben sie photovoltaisch nutzbare Freiflächen von 3,5 Mrd. m<sup>2</sup> an, die weitere 527 TWh/a erbringen könnten. Dieses Angebotspotential würde aber sowohl durch Netzverluste (ca. 5%), als auch durch nachfrageseitige Restriktionen eingeschränkt, da ja der Strombedarf oft nicht mit dem jahres- und tageszeitlich variierenden PV-Angebot korreliert ist. So muß bei Stromüberschüssen Energie gespeichert werden, die bei Bedarf wieder zu Strom umgewandelt werden kann, die dadurch entstehenden Verluste vermindern den möglichen Stromertrag auf maximal 410 TWh pro Jahr.<sup>97</sup> (226ff) Heinloth (1997) und das IER (BIZ 2001) beurteilen das Potential mit 10 TWh/a bzw. 35-40 TWh/a allerdings sehr viel skeptischer, und auch das DLR schätzt den möglichen Beitrag (allerdings unter Berücksichtigung der Flächenkonkurrenz zur Solarthermie) mit 135 TWh/a auf 350 Mio. m<sup>2</sup> Dach- und Fassadenfläche, 350 Mio. m<sup>2</sup> sonstiger Siedlungsfläche und 300 Mio. m<sup>2</sup> Freiflächen deutlich geringer ein. (Nitsch/Trieb 2000:6) Ausgehend von der Schätzung des DLR scheint m.E. ein Substitutionspotential von maximal 100 TWh/a (nach Abzug der speicher- und netzbedingten Verluste) möglich.<sup>98</sup>

Diese Werte beziehen sich allerdings nur auf relativ großflächig gewonnenen, netzgekoppelt erzeugten Strom. Ein weiteres großes, bislang vernachlässigtes Potential der Photovoltaik liegt aber in der Stromversorgung von sog. „Inselsystemen“ (z.B. Beleuchtung, Ampeln, Automaten, Sender) oder elektrischen Kleingeräten bis hin zu deren gänzlicher Abkopplung vom Netz. So verbraucht z.B. ein durchschnittlicher Klingeltrafo 9-22 kWh im Jahr, d.h. wenn auch nur die Hälfte aller Klingeln in Deutschland mit einem 10-20 cm<sup>2</sup> großen PV-Modul ausgerüstet wäre, ergäbe das einen vermiedenen Netzstromverbrauch von ca. 200 GWh/a, und würde die Hälfte der mindestens 50 Millionen Handys und schnurlosen Telefone mit einem Solarakku-ladegerät und/oder geräteintegrierten Solarzellen betrieben, würde das weitere 1000 GWh/a Netzstrom ersetzen. Ein weiteres sinnvolles Anwendungsgebiet wären z.B. auch die Stand-By-Schaltungen an Stereoanlage, Fernseher, Videorekorder, Faxgerät, etc., die zwar z.T. auch sparsamer ausgelegt oder ganz weggelassen werden könnten, aber ohne Komfortverlust auch mit in die Gerätegehäuse integrierten PV-Modulen betrieben werden könnten. (Scheer 1999:178ff)

---

<sup>97</sup> Würde der zeitliche Ausgleich über Speichersysteme nicht stattfinden, könnten laut Kaltschmitt/Wiese lediglich 37 TWh/a des photovoltaischen Potentials genutzt werden.

<sup>98</sup> Bei derartig hohen Anteilen dargebotsabhängig fluktuierender Leistung an der gesamten Stromerzeugung können allerdings Frequenz- und Spannungsstabilitätsprobleme im Stromnetz auftreten, denen aber zum Großteil durch technische Maßnahmen an den Anlagen und im Netz sowie durch die flexible Zuschaltung nicht-fluktuierender Stromerzeuger begegnet werden kann. (TAB 2000:11ff,106ff)

#### 4.3.5. Stromerzeugung aus Windenergie

Etwa 2,5 % der auf die Atmosphäre auftreffenden Solarstrahlung werden aufgrund der unterschiedlichen Erwärmung der Erdoberfläche und den daraus entstehenden Ausgleichsströmungen in globale, regionale und lokale Luftmassenbewegungen umgesetzt. Die kinetische Energie dieser strömenden Luft kann durch die Abbremsung der Luftmassen in einem Rotor abgelenkt und verzögert und dadurch teilweise (maximal zu  $16/27$ , d.h. mit einem theoretischen Wirkungsgrad von 59,3 %) zu Antriebsenergie für einen Generator umgewandelt werden. Die im Wind enthaltene Leistung ist dabei proportional zur dritten Potenz der Windgeschwindigkeit, welche nicht nur von der sich ständig verändernden Intensität der Ausgleichsströmungen bestimmt, sondern auch von den topographischen Verhältnissen beeinflusst wird. Zum einen nimmt die Windgeschwindigkeit nämlich mit abnehmender Höhe ab, da die Rauigkeit der jeweiligen Oberfläche die Bewegung der Luftmassen abbremst, zum anderen bewirkt die Topographie eines Gebietes verschiedenste lokale Luftzirkulationen wie Auf- und Ab-, Tal- und Berg- oder Land- und Seewinde, die in den für eine Windkraftnutzung geeigneten Höhen zwischen 10 und 100 m den Effekt der großräumigen Luftbewegungen sehr stark überlagern können. Außerdem ist auch eine weitgehende Abschirmung eines Gebietes von großräumigen Winden durch vorgelagerte Höhenzüge (Lee-Effekt) möglich. Die in Deutschland vorherrschenden Wetterlagen führen im Zusammenwirken mit den topographischen Verhältnissen daher zu einer deutlichen Nord-Süd-Differenzierung der mittl. Windgeschwindigkeiten von 7,5 m/s auf der Nordsee, über 3-4 m/s im Binnenland bis hin zu 2 m/s in geschützten Flußtätern.

Abb. 4.10: Mittlere Windgeschwindigkeiten in Deutschland in 10 m Höhe (aus: Kaltschmitt/Wiese 1997)

Diese Windgeschwindigkeiten sind zudem aufgrund der wechselnden meteorologischen Gegebenheiten und den Jahres- und Tagesgängen der solaren Einstrahlung (und damit der Temperatur) großen zeitlichen Schwankungen unterworfen. (siehe Abb. 5.2) An den meisten Standorten tritt bei störungsfreiem Wetter dabei ein Maximum am frühen Nachmittag auf, in exponierten Gipfellagen sowie in wenig reliefierten Gelände ab 100 m Höhe über Grund kehrt sich dieser Tagesgang um. Im Bereich zwischen 50 und 100 m über Grund treten hingegen zwei Maxima, am Mittag und um Mitternacht, auf. Während dieser Tagesgang der Windgeschwindigkeiten relativ gleichmäßig verläuft und meist in einem Bereich von  $\pm 1$  m/s liegt, kann der Wind im Verlauf eines Monats mit unter 2 bis über 10 m/s sehr unregelmäßig wehen. Der Jahresgang wiederum kann mit einem Maximum im November und Dezember und einem zweiten Maximum im Frühjahr als typisch charakterisiert werden. (65ff, 239ff)

Das Spektrum der technischen Anlagenkonzepte zur Windkraftnutzung ist groß, im wesentlichen bestehen aber alle heute betriebenen Windkraftanlagen (WKA) aus einem Rotor mit einem oder mehreren, meist zur Leistungsregelung verstellbaren, Blättern<sup>99</sup>, einem Getriebe und einem zwischen 20 und 100 m hohen Turm, sowie (falls sie nicht direkt zum Antrieb z.B. einer Pumpe genutzt werden) einem Generator und einem Netzanschluß. Mithilfe der Rotorblätter wird dem Wind die Bewegungsenergie nach dem Auftriebsprinzip entzogen, der in der Praxis erreichte Wirkungsgrad liegt dabei zwischen 40 und 50 %. Die nun in Form von 30-50 Rotordrehungen pro Minute vorliegende Energie wird dann über ein Getriebe in die von den marktgängigen Generatoren benötigten 1000-15000 U/min übersetzt. (Allerdings werden in letzter Zeit zunehmend auch getriebelose Anlagen gebaut, die mit einem vielpoligen Ringgenerator arbeiten.) Außer den mechanischen und aerodynamischen Verlusten im bzw. am Rotor entstehen in dieser Energiewandlungskette zusammen mit dem Energieaufwand für Blattverstellung und Windrichtungsnachführung weitere Verluste. Der Systemwirkungsgrad einer heute gängigen WKA beläuft sich damit auf 30-45 %<sup>100</sup>, wobei aber Windgeschwindigkeiten unterhalb von 3-4 m/s und oberhalb von 24-26 m/s gar nicht genutzt werden können, da im ersten Fall die Kraft für ein Anlaufen nicht ausreicht und im zweiten Fall der Generator sowie die gesamte mechanische Installation Schaden nehmen könnten. (Weswegen die Leistungsaufnahme i.allg. auf die Auslegungsgröße des Generators begrenzt wird, durch das Abreißen der Luftströmungen am Rotorblatt oder eine Verstellung der Blattwinkel.) Eine mittelgroße Anlage von 600 kW bis 1 MW kann so je nach Standort 1-3 GWh Strom im Jahr erzeugen. (245ff)

---

<sup>99</sup> Zur Stromerzeugung haben sich v.a. Dreiblattrotoren durchgesetzt, da sie höhere Schnellaufzahlen erreichen und weniger Material benötigen als vielblättrige Rotoren, aber noch nicht die schwingungsdynamischen Probleme eines Ein- oder Zweiblattrotors bereiten.

<sup>100</sup> In Windparks kommen noch Verluste zwischen 2 und 10 % durch Abschattungseffekte hinzu.

Die Windenergie hat in Deutschland seit der Einführung des Stromeinspeisegesetzes 1991 mit anhaltenden Zuwachsraten von über 40 % einen weltweit bisher einzigartigen Boom erlebt. Waren es 1990 noch 488 Anlagen mit einer Gesamtleistung von 56 MW, so wurde im Sommer 2002 mit über 12.000 Anlagen bereits die 10.000 MW-Grenze überschritten, womit in einem durchschnittlichen Jahr knapp 20 TWh (ca. 4% des deutschen Strombedarfs) bereitgestellt werden könnten. Im Jahr 2001 wurde auch der erste Offshore-Windpark genehmigt, insgesamt 60.000 MW wurden beantragt. (Bundesverband Windenergie 2002) Der starke Wachstumstrend wird sich wohl weiter fortsetzen, bis 2010 wird ein Bestand von 22.500 MW (incl. Offshore), bis 2030 von 47.000 MW (davon 26.000 MW Offshore) erwartet. (Molly/Ender 2002)

Abb. 4.11: Jährlich neu installierte und kumulierte Windkraftleistung in Deutschland (aus: Enquete 2002)

Das technische Potential der Stromerzeugung aus Windenergie auf dem Festland wird von Kaltschmitt/Wiese auf 104-128 TWh/a (bei 58.400 bis 87.900 MW Leistung auf 2,6 Mio. ha verfügbarer Fläche) geschätzt, nach der Studie des DLR beträgt das Potential allerdings nur 80 TWh/a (Nitsch/Trieb 2000:6) und eine dritte (auf einer sehr viel skeptischeren Flächenangabe beruhende) Schätzung beziffert es sogar nur auf 68,6 TWh/a. (Wolfrum 2000:46) Unter Berücksichtigung der Netz- und Speicherverluste (wie bei der Photovoltaik) reduziert sich dieses Potential nochmals auf 55-85 TWh/a. Zusätzlich wird ein von Matthies/Garrad errechnetes (technisch mögliches, wirtschaftlich allerdings noch etwas unsicheres) Offshore-Potential von 237 TWh/a (in Wassertiefen bis 40 m) angegeben, hierfür aber keine Berechnung unter nachfrageseitigen Restriktionen durchgeführt. (281ff) Zieht man entsprechend dem obigen Vorgehen Netz- und Speicherverluste ab, dürfte das gesamte Potential der Windenergie dann, je nach Ausweitung der Offshore-Nutzung, bei ca. 175-265 TWh/a liegen<sup>101</sup>.

---

<sup>101</sup> Da auch Windstrom in erheblichem Maß fluktuiert, trifft hier ebenfalls die in Anmerkung 53 erläuterte Problematik bezüglich Netzspannung und Frequenzhaltung zu.

#### 4.3.6. Stromerzeugung aus Wasserkraft

Die weltweit wohl verbreitetste regenerative Stromerzeugungstechnologie ist die Nutzung der kinetischen Energie des fließenden Wassers. Immerhin ca. 21 % der auf die Erde eingestrahelten Sonnenenergie werden zur Aufrechterhaltung des globalen Wasserkreislaufs umgesetzt, davon stehen 0,02 % in Form abfließenden Oberflächenwassers, bzw. gespeichert in Flüssen und Seen, für eine energetische Nutzung zur Verfügung, da Wasser immer von einem Ort größerer geodätischer Höhe zu einem Ort niedrigerer Höhe, und letztendlich zur Meereshöhe hin, abfließt. Die Größe dieser Fallhöhe bestimmt zusammen mit der Abflußmenge, die sich aus regionaler Niederschlagscharakteristik, Verdunstung (durch Wärme oder Vegetation), Wasser-rückhaltefaktoren (Böden, Schnee) und Größe des Einzugsgebietes ergibt, das jeweilige Leistungsangebot des Wassers. (78ff) In Deutschland ist die räumliche Niederschlagsverteilung mit Werten von ca. 500 mm/a im Nordosten bis über 2500 mm/a am Alpenrand v.a. durch die Orographie und die Richtung (Süd-)Osten zunehmende Kontinentalität des Klimas bedingt. Die Abflußcharakteristika der meisten größeren Flüsse werden allerdings nicht ausschließlich davon bestimmt, sondern auch (z.T. sogar überwiegend) vom mitgeführten Abfluß aus anderen Ländern beeinflusst. Ausgehend von den jahreszeitlich schwankenden Niederschlagsmengen mit einem Maximum im Sommer und der Tatsache, daß in den Gebirgen im Winter ein Großteil der Niederschläge in Form von Schnee gespeichert wird, kommt es dabei zu unterschiedlich ausgeprägten saisonalen Abflußschwankungen mit einem oder zwei Maxima im Frühjahr und Sommer. Zwischen den einzelnen Jahren können bezüglich Abflußspitzen und Jahresgesamtabfluß allerdings Abweichungen von bis zu + 80 % und -60 % auftreten. (85ff)

Mittels einer Wasserkraftanlage kann die potentielle Energie des oberirdisch abfließenden Wassers in einer Turbine in mechanische Energie transformiert werden, die dann, sofern sie nicht vor Ort z.B. zum Antrieb von Pumpen oder Mühlen genutzt wird, per Generator zu Strom umgewandelt werden kann. Die theoretisch im Wasser enthaltene Leistung kann allerdings nur zu einem Teil in nutzbare Energie überführt werden, denn sowohl in der Turbine als auch im Einlaufbauwerk, den Rohrleitungen und im Auslauf treten unvermeidbare, wenn auch minimierbare, Verluste aufgrund von Strömungswiderständen, Reibung und Verwirbelungen auf. Hinzu kommen Verluste bei der Stromerzeugung im Generator, in evtl. den Turbinen nachgelagerten Getrieben, sowie ggf. durch eine Spannungstransformation vor der Netzeinspeisung. Insgesamt sind im Vollastbetrieb Systemwirkungsgrade von 80-90 % erreichbar, in Teillast und bei älteren Wasserkraftanlagen im kleineren Leistungsbereich können sie aber auch bei



nur 50-70 % liegen. Bezogen auf das Arbeitsvermögen des gesamten abfließenden Wassers liegt der Wirkungsgrad allerdings generell niedriger, da entweder nur ein Teil dieses Wassers überhaupt der Turbine zugeleitet wird (Ausleitungskraftwerk) oder bei Hochwasser ein Teil des Wassers (in Stau- und Flußkraftwerken) ungenutzt über das Wehr abgeleitet werden muß.<sup>102</sup>

Abb. 4.12: Funktionsschema einer Wasserkraftanlage (aus: Kaltschmitt/Wiese 1997)

Nach der jeweiligen Fallhöhe unterscheidet man Wasserkraftwerke in Niederdruck-, Mittel- und Hochdruckanlagen. Erstere sind meist Laufwasserkraftwerke, also Fluß- oder Ausleitungskraftwerke, deren Leistung primär von der Durchflußmenge bestimmt wird, Mittel- und Hochdruckanlagen sind hingegen meist Speicherkraftwerke, als Stau- oder als Ausleitungskraftwerk konzipiert, deren Leistung v.a. aus großen Fallhöhen resultiert. Aufgrund der daher sehr unterschiedlichen Drücke, Geschwindigkeiten und Schwankungen des Abflusses wurden diverse Turbinenvarianten entwickelt, so z.B. die Peltonturbine für niedrige, stark schwankende Durchflußmengen bei großen Fallhöhen (über 600 m), die Francisturbine bei mittlerem bis hohem Abfluß zwischen 30 und 700 m Fallhöhe und die Kaplan- und Propellerturbinen für hohen Durchfluß bei Fallhöhen unter 60 m. Während sich erstere durch ein sehr gutes Teillastverhalten auszeichnet, da sie schon bei 20 % des Auslegungsdurchflusses einen Wirkungsgrad von 80 % aufweist, werden die höchsten Wirkungsgrade mit über 90 % von der Francis- und den Propellerturbinen erreicht, dies allerdings erst bei 70 bzw. 90 % der maximalen Durchflußmenge. Bei Laufwasserkraftwerken werden, da die Abflußmengen im Sommer meist stark zurückgehen, meist sog. Durchström- oder auch Kaplan-Turbinen eingesetzt. (301ff)

---

<sup>102</sup> Die Menge des ungenutzt abgeleiteten Wassers beeinflusst darüberhinaus auch den internen Wirkungsgrad der Wasserkraftanlage, da sich so bei Hochwasser der Unterwasserspiegel erhöht und damit die nutzbare Fallhöhe sinkt.

Von allen erneuerbaren Energien weist die Wasserkraft den am weitesten fortgeschrittenen Ausbau auf und leistet dementsprechend den momentan größten Beitrag aller erneuerbaren Energien zur Stromversorgung. Die 403 großen (> 1 MW) und ca. 5500 bis 6600 kleineren Anlagen mit einer seit 1990 fast unveränderten Gesamtleistung von etwa 4500 MW haben im Jahr 2000 etwa 22 TWh<sup>103</sup>, also ca. 4,4 % der Nettostromerzeugung, bereitgestellt. Dieser Wert liegt allerdings an der oberen Grenze des derzeitigen Erzeugungspotentials, das momentane sog. Regelarbeitsvermögen beträgt 17,8 TWh/a zzgl. der bahn- und industrieeigenen Erzeugung von ca. 1,2 bis 1,5 TWh/a, insgesamt also ca. 19 TWh/a. (Staiß 2001:I-43ff, II-56)

Das technische Potential der Wasserkraft-Stromerzeugung wird von Kaltschmitt/Wiese sowie von den anderen hier angeführten Studien übereinstimmend auf nur rund 24 TWh/a<sup>104 105</sup> geschätzt (also auf nicht viel mehr als bereits realisiert ist), wobei i.ü. aufgrund der orographisch-klimatischen Situation Deutschlands bzw. Mitteleuropas und der Bündelung eines Großteils des Abflusses in wenigen großen Flüssen sehr große regionale Unterschiede auftreten. (siehe Abb. 4.13) Das geringe Ausbaupotential von ca. 6 TWh/a beschränkt sich zudem im wesentlichen auf die Modernisierung bestehender Wasserkraftwerke und die Reaktivierung einer gewissen Anzahl stillgelegter Kleinanlagen (insbesondere in Sachsen und Thüringen). (329ff)

---

<sup>103</sup> Eingespeister Strom ohne Pumpwasserstrom, zzgl. der bahn- und industrieinternen Erzeugung.

<sup>104</sup> Unter Berücksichtigung der Netzverluste von 5%. Speicherverluste können hier aufgrund des stetigeren Angebots und der geringen Gesamtstromerzeugung vernachlässigt werden.

<sup>105</sup> Da einige Studien ein etwas größeres Potential bei Klein(st)wasserkraftwerken sehen und in den bisherigen Berechnungen auch eine Nutzung der Flachlandflüsse oder -flußabschnitte nicht berücksichtigt wurde, sind möglicherweise 1-2 TWh/a mehr möglich.

Abb. 4.13: Regionale Verteilung des technischen Potentials der Wasserkraft (aus: Kaltschmitt/Wiese 1997)

## 5. Konturen eines nachhaltigen Energiesystems in Deutschland

### 5.1 Grundsätzliche Überlegungen

In diesem Kapitel soll nun versucht werden, so weit es die in Deutschland verfügbaren regenerativen Energiequellen erlauben, ein möglichst nachhaltiges, ergo regeneratives, Energieversorgungsschema zu entwerfen. Es geht dabei v.a. um die Frage, welche der erneuerbaren Energien in welchem Mix und in welcher technologischen Struktur (Erzeugung, Verteilung, Umwandlung, Nutzung) die drei wesentlichen energetischen Bedürfnisse einer modernen Industriegesellschaft: Wärme, Strom und Mobilität,

1. ökologisch und sozial verträglich,
2. energetisch und (volks)wirtschaftlich effizient und
3. ausreichend (unter der Annahme, das das Ausmaß des zukünftigen Energiebedarfs, in Anlehnung an die in Kap.3 vorgestellten Nachhaltigkeitsstrategien, zunächst so weit wie möglich durch sinnvolle, d.h. gesamtwirtschaftlich effiziente und ökologisch unbedenkliche, und auch halbwegs realistisch durchsetzbare Effizienzmaßnahmen minimiert werden wird <sup>106</sup> <sup>107</sup> und unter der Annahme, daß bis 2050 zwar ein Bevölkerungsrückgang von ca. 10 % erfolgt, der aber durch einen entsprechenden Anstieg des Konsumniveaus kompensiert wird.)

befriedigen können. Ausgehend von den in Kap.4 erörterten technischen Angebotspotentialen (wobei berücksichtigt werden muß, daß diese nachfrageseitig z.T. in Konkurrenz zueinander stehen) innerhalb Deutschlands wird die dabei notwendig werdende Abwägung zwischen den verschiedenen technologischen und strukturellen Energieversorgungsoptionen v.a. anhand der ökologisch-energetischen Gesamtbilanzen und auch anhand der zukünftigen Kosten der jeweiligen Energiebereitstellung (bzw. der technologischen Optionen wie z.B. Brennstoffzellen oder Wasserstoffnutzung) zu treffen sein, es wird aber versucht, auch weniger quantifizierbare

---

<sup>106</sup> Die diesbezügliche Einschätzung der unzählbar vielen möglichen Effizienzpotentiale im Energieverbrauch Deutschlands kann im Rahmen dieser Arbeit nur ungefähr, und z.T. auch nur durch eine subjektive Beurteilung der politischen, soziokulturellen und ökonomischen Voraussetzungen ihrer Umsetzung erfolgen, dies sollte aber für eine ungefähre Abschätzung des zu erwartenden Bedarfs an Wärme, Strom und Kraftstoffen ausreichen. Für den gesamten Endenergieverbrauch Deutschlands liegen die maximalen Einsparpotentiale nach den Szenarien der Enquete-Kommission „Nachhaltige Energieversorgung“ bei 20-37 % gegenüber dem Referenzszenario, was einem Endenergiebedarf von 5200 bis 6600 PJ im Jahre 2050 entspricht (Enquete 2002:676), bezogen auf den Primärenergiebedarf wären noch etwas größere Effizienzpotentiale von bis zu 41 % (bezogen auf den Referenzwert 2050) zu erwarten, da hier die Effizienzsteigerungen im Umwandlungssektor hinzukommen. (ebd.:692) Eine vollständige Ausschöpfung dieser Potentiale ist m.E. allerdings, angesichts des verständlichen Desinteresses der meisten Menschen für solche Anstrengungen sowie der v.a. von ökonomischen Interessen dominierten Machtverhältnisse in Deutschland und nicht zuletzt aufgrund der zahlreichen finanziellen, organisatorischen und rechtlichen Hemmnisse (wie z.B. dem bekannten Investor-Nutzer-Dilemma), als äußerst unwahrscheinlich anzusehen.

<sup>107</sup> Die evtl. darüber hinaus notwendig werdenden Einsparungen durch kulturell-psychologisch-sozioökonomische Veränderungen (Suffizienz) oder auch radikalere Effizienzsteigerungen (durch schärfere Vorschriften oder die Reorganisation ganzer Produktionsketten) werden in Kap.6 angesprochen.

Fragen, z.B. bezüglich der gesellschaftlichen Akzeptanz und technologischen Komplexität (Aufwand, Anfälligkeit, Zugänglichkeit) der verschiedenen Technologien, zu berücksichtigen. Neben technischen und ökologischen Aspekten ist für die Nachhaltigkeit von Energieversorgungsoptionen aber auch deren räumlich-organisatorische und ökonomisch-rechtliche Struktur von Bedeutung (wie hoffentlich in Kap. 2 und 3 deutlich wurde), weshalb m.E. im Zuge des Aufbaus eines regenerativen Energiesystems auch eine grundsätzliche Reorganisation der Energieversorgung hin zu dezentralen und kommunalwirtschaftlichen Strukturen angestrebt werden sollte, um damit eine größere politische und ökonomische Unabhängigkeit von Regionen und Kommunen, sowie eine bessere demokratische Kontrolle und ökologische Ausrichtung der Energiewirtschaft zu ermöglichen. (Paul 1998:52ff) Zudem könnten so die vielfältigen lokalen Einsparpotentiale und die auf kommunaler Ebene oft gut beeinflussbaren Nachfrageentwicklungen besser in die Versorgungsplanung integriert werden und nicht zuletzt ist (besonders bei den z.T. nur begrenzt transportablen regenerativen Energien und bei der KWK) eine dezentrale Bereitstellung auch oft effizienter<sup>108</sup> oder sogar notwendig.<sup>109</sup> (Hennicke 1985:30ff)

Eine solche dezentrale Energieversorgung könnte z.B. durch regional-kommunale Versorgungsunternehmen (KVU) erfolgen, die zur optimalen Koordination aller Energieangebote und -bedürfnisse die Verteilung sämtlicher Endenergieträger organisieren (d.h. die lokalen/regionalen Strom-, Gas- und Fernwärmenetze sowie den Großhandel mit Kraftstoffen betreiben) und dabei auch die durch den fluktuierenden Charakter mancher regenerativer Energien notwendig werdende Energiespeicherung<sup>110</sup> und den in gewissen Umfang immer notwendigen überregionalen Energietransfer (vgl. Anmerkung 4) übernehmen. Anders als heute wird aber die Erzeugung bzw. Umwandlung von Energie nicht unbedingt von den Netzbetreibern durchgeführt werden, denn die dezentrale Verfügbarkeit der regenerativen Energiequellen wird aus vielen Verbrauchern, zumindest periodisch, auch Erzeuger machen, die in den Fällen, wo sie die ge-

---

<sup>108</sup> Dies gilt zwar nicht uneingeschränkt, z.B. ist die Stromerzeugung in einem Heizkraftwerk deutlich sparsamer und umweltverträglicher als mit einem Dieselmotor (Paul 1998:10), aber überregionale Versorgungssysteme sind doch im allg. mit einem nicht unerheblichen Aufwand verbunden. Beim Strom fallen z.B. Netzverluste von 5-9 % zzgl. des Energieaufwandes von 3-4 % für Bau und Unterhalt des Netzes an (Heinloth 1997:359), was übrigens auch fast die Hälfte der gesamten Bereitstellungskosten verursacht (Scheer 1999:81).

<sup>109</sup> Bei einer solchen dezentral-regenerativen Energieversorgung ist allerdings zu berücksichtigen, daß die in Kap.4 diskutierten Potentiale räumlich sehr unterschiedlich verteilt sind. Während das Windstromangebot z.B. zu 80 % in den drei Küstenländern liegt, ist das Wasserkraftpotential zu 80% in Baden-Württemberg und Bayern zu finden. Ebenfalls leicht südlastig, aber v.a. siedlungsstrukturabhängig ist hingegen das Solarpotential, das in ländlichen Gebieten und Kleinstädten absolut geringer ausfällt, wg. der niedrigeren Verbrauchsdichte dort aber doch einen etwa doppelt so großen Anteil des Bedarfs abdecken kann wie in Groß- und Mittelstädten. (Nitsch 2000) Eine nach Ländern oder Regionen differenzierende Potentialstudie für Deutschland liegt bis jetzt leider nicht vor, eine überwiegend regionale Organisation der in 5.2. und 5.3. dargestellten regenerativen Wärme- und Stromversorgung dürfte m.E. jedoch machbar sein. Eine genaue regionale Differenzierung der hier entworfenen Energieversorgungsstruktur incl. der Ermittlung des unabdingbar notwendigen (oder auch des ökonomisch-ökologisch optimalen) Ausmaßes der überregionalen Energietransfers kann i. R. dieser Arbeit aber nicht vorgenommen werden.

<sup>110</sup> Man kann zwar davon ausgehen, daß sich die Angebotsschwankungen verschiedener regenerativer Energiequellen, z.B. im Stromnetz, z.T. gegenseitig neutralisieren (Kaltschmitt/Wiese 1997:428) und die zunehmende Eigenerzeugung sowie v.a. eine preisliche Nachfragenlenkung die Energienachfrage stärker an das regenerative Angebot anpassen wird (Enquete 2002:613), trotzdem

wonnene Energie (z.B. Solarstrom oder Biogas) nicht selbst verbrauchen oder speichern (bzw. im kleinen Rahmen verteilen, wie z.B. in Nahwärmenetzen), gegenüber dem KVVU zu Energie-

---

wird, besonders bei Strom und Wärme, eine umfangreiche und auch längerfristige Speicherung von überschüssiger Energie unausweichlich sein.

anbietern werden. (ebd.:274f) Bei nicht ausreichenden oder ineffizienten Angebotsstrukturen könnten aber auch die KVV selbst die Erzeugung von Endenergie übernehmen, z.B. indem sie ein „Grundversorgungszentrum“ betreiben, das neben dem Betrieb eines (Block-)Heizkraftwerkes und der Speisung der lokalen Energienetze auch die Wasserver- und -entsorgung sowie die Verwertung organischer Abfälle aus Haushalten, Gewerbe und Landwirtschaft übernimmt und dabei das Schließen der regionalen Nährstoffkreisläufe mit der Nutzung lokaler Energiepotentiale verbindet.<sup>111</sup> (TU Berlin 1998:146ff)

Abb. 5.1.: Modell eines kommunal-regenerativen Energieversorgungssystems (aus: Scheer 1999)

Auch aus der Perspektive des gesamtwirtschaftlichen Strukturwandels hin zur Nachhaltigkeit bietet sich eine solche möglichst weitgehende Regionalisierung der Energiegewinnung bzw. -versorgung an, da die (Wieder-)Herstellung kleinräumiger Stoff- und Energiekreisläufe i.allg. als der ökologischen (z.B. durch die schnelle Rückmeldung von Tragfähigkeitsüberschreitungen oder die Vermeidung unnötiger Transporte) und auch der sozialen und ökonomischen Nachhaltigkeit (z.B. durch die Schaffung weltmarktunabhängiger Arbeitsplätze) dienlich angesehen wird. (Hänel 1998:45ff, Kujath 1998, Busch-Lüty 1992) In jedem Fall liegt in der einzig mit regenerativen Energien möglichen Dezentralisierung wirtschaftlicher Prozesse eine Chance, die gegenwärtig global verwickelten, von ihrer sozial-ökologischen Basis entkoppelten und systemimmanent zu unaufhörlichem Wachstum gezwungenen Wirtschaftsstrukturen grundlegend zu verändern, die nicht durch eine vorschnelle Beschränkung auf den bloßen Austausch einzelner Elemente des fossilen Energiesystems vergeben werden sollte. (Scheer 1999:177)

---

<sup>111</sup> Z.B. durch Biogaserzeugung, Klärwassereinsatz beim Energiepflanzenbau oder Kompostabwärme nutzende Gewächshäuser.

## 5.2 Regenerative Wärmeversorgung

### 5.2.1. Abschätzung des zukünftigen Wärmebedarfs

Wie in Kap. 2 dargestellt, beträgt der Endenergieverbrauch zwecks Wärmeproduktion heute etwa 5270 PJ/a. Davon sind etwa 2880 PJ der Raumwärme<sup>112</sup>, 450 bzw. 400 PJ<sup>113</sup> dem Warmwasser und 1940 bzw. 1590 PJ<sup>114</sup> der Prozeßwärme zuzuordnen. Besonders beim Raumwärmebedarf kann aber langfristig von erheblichen Effizienzgewinnen ausgegangen werden, da der heutige Gebäudebestand noch immer einen durchschnittlichen Heizenergiebedarf von ca. 195 kWh/ m<sup>2</sup>a aufweist (Enquete 2002:291), während die seit 2001 gültige Energieeinsparverordnung bei Neubauten max. 75 kWh/m<sup>2</sup>a zuläßt, und mit konsequent auf passive Solarenergienutzung ausgerichteter Bauweise<sup>115</sup> schon heute, mit nur geringen Mehrkosten, bei allen Gebäudetypen Niedrigenergiehaus- (40-60 kWh/m<sup>2</sup>a) und sogar Passivhausstandards (~15 kWh/m<sup>2</sup>a) erreicht werden könnten. (ebd.:306ff) Auch der Heizenergieverbrauch der bereits bestehenden Gebäude kann mit zusätzlicher Wärmedämmung, Wärmeschutzfenstern, Heizungsaustausch, Dachbegrünung u.a. Sanierungsmaßnahmen auf 50-90 kWh/m<sup>2</sup>a abgesenkt werden (ebd.:292ff), sodaß (bei gleichbleibender Gebäudefläche) langfristig eine Reduzierung des gesamten Raumwärmebedarfs auf unter 750 PJ/a denkbar wäre, und einige Studien davon ausgehend ein bis 2050 realisierbares Einsparpotential von 70 % bei Wohn- und 50 % bei Nichtwohngebäuden angeben, was dann einen Bedarf von ca. 1050 PJ/a ergäbe. (ebd.:298,355)

Abgesehen davon, daß eine solche Effizienzanstrengung aber politisch unsicher ist und auf diverse ökonomische Hemmnisse (z.B. Finanzierungsprobleme oder das sog. Investor/Nutzer-Dilemma, vgl. Enquete 1995:554ff) stößt, ist auch fraglich, ob dies in der energetisch-ökologischen Gesamtbilanz wirklich bei allen Gebäuden sinnvoll ist, da z.T. auch ökotoxisch bedenkliche oder energieaufwendige Baustoffe verwendet werden, um die Einsparziele zu erreichen. Auch die u.U. sehr weitgehende „Technisierung“ (kontrollierte Lüftung, automatische Fenstererschattung) sollte zumindest bei Wohngebäuden kritisch hinterfragt werden. Wenn man un-

---

<sup>112</sup> Die Raumwärmebereitstellung erfolgt heutzutage noch zu ca. 100 PJ/a per Nachtspeicher- u.a. Elektroheizungen. Aufgrund deren primärenergetischer Ineffizienz sollten diese aber bis 2050 abgebaut oder wenigstens durch Wärmepumpensysteme ersetzt werden.

<sup>113</sup> Von den 450 PJ Warmwassererzeugung beruhen im Moment zwar ca. 125 PJ auf Strom; sowohl bei Waschmaschinen u.ä. als auch bei Elektroboilern sollte aus Effizienzgründen aber eine Substitution durch andere Wärmequellen angestrebt werden, trotzdem werden auch in Zukunft noch etwa 50 PJ/a davon dem Strombedarf zufallen (und werden daher in Kap. 5.3. berücksichtigt).

<sup>114</sup> Da ein Teil der Prozeßwärme technisch bedingt nur per Strom erzeugt werden kann, v.a. in der Industrie, aber auch z.B. in Kochherden, werden diese ca. 350 PJ/a ebenfalls in Kap. 5.3. berücksichtigt. (Der gegenwärtig in Gasherden und „sonstigen“ anfallende Prozeßwärmeverbrauch in Haushalten von ca. 20 PJ/a Endenergie wird hier zur Vereinfachung mit zum Strombedarf gerechnet.)

<sup>115</sup> Zum Beispiel durch ein günstiges Verhältnis Außenfläche/Volumen, gute Wärmedämmung und Speichermassen im Gebäude, opti-



ter Berücksichtigung dieser Aspekte daher von einer Absenkung des durchschnittlichen Heizenergiebedarfs auf nicht unter 60 (Neubau) bzw. 120 (Altbau) kWh/m<sup>2</sup>a ausgeht, ergibt sich langfristig ein Endenergiebedarf von ca. 1350 PJ/a in Wohn- und Gewerbegebäuden, zzgl. etwa 150 PJ/a Raumwärmebedarf (heute ca. 225 PJ/a) im Industriesektor ergibt das 1500 PJ/a.

Um den gesamten zukünftigen niedertemperierten Wärmebedarf zu erfassen, muß hierzu aber noch der industriell-gewerbliche Prozeßwärmebedarf unter 100°C, der heute bei etwa 340 PJ/a liegt und im Jahr 2050 (bei gleichbleibendem Produktionsumfang) noch ca. 300 PJ/a betragen dürfte<sup>116</sup>, sowie die Warmwasserbereitung (400 PJ/a) addiert werden.. Alles in allem ergibt sich damit ein Endenergiebedarf von 2200 PJ/a, was bei Annahme eines mittleren Wärmeerzeugungswirkungsgrades von 90 % einem Verbrauch von ca. 1980 PJ nutzbarer Wärme entspräche.

In den Sektoren Industrie/Bergbau und GHD besteht darüberhinaus ein großer Bedarf an sehr hoch temperierter Prozeßwärme (>200°C), der langfristig, nach Ausschöpfung aller wirtschaftlichen Effizienzpotentiale (ca. 10%), noch ca. 800 PJ/a Brennstoff erfordern wird, sowie ein nicht unwesentlicher Bedarf an Prozeßwärme mit Temperaturen zwischen 100° und 200°C, der im Jahr 2050 bei ca. 300 PJ/a Endenergie (~250 PJ Nutzwärme) liegen wird.<sup>117</sup> Der gesamte abzudeckende Wärmebedarf (ohne die per Strom erzeugte Wärme) dürfte im Jahr 2050 also bei ca. 3300 PJ/a Endenergie liegen, d.h. 33 % unter dem heutigen Verbrauch.

### 5.2.2. Wärmebereitstellung

Während die benötigte Hochtemperaturwärme eigentlich nur per Verbrennungsprozeß erzeugt werden kann, stellt sich für die restliche Wärmeversorgung die Frage, welche der regenerativen Energietechniken hierfür vorrangig genutzt werden sollten.<sup>118</sup> Dabei ist v.a. auf die energetisch-ökologische Gesamtbilanz<sup>119</sup>, d.h. den Energieverbrauch für Herstellung, Entsorgung und Be-

---

mierte Lüftung mit Wärmerückgewinnung, südseitige Fenster mit temporärem Wärmeschutz, Wintergärten, usw. (Enquete 2002:306ff)  
<sup>116</sup> eigene Schätzung des durch technische Einzelmaßnahmen realistisch erreichbaren Einsparpotentials nach den Angaben in Enquete 2002:339f,373

<sup>117</sup> siehe Anmerkung 11

<sup>118</sup> Neben den im folgenden betrachteten Optionen käme für die Wärmeerzeugung prinzipiell auch photovoltaisch erzeugter Wasserstoff in Frage, der in Deutschland aufgrund des begrenzten regenerativen Stromerzeugungspotentials (vgl. Kap. 5.3) aber kaum überschüssig produziert werden dürfte. Der Import von Solarwasserstoff soll, entsprechend der hier verfolgten Absicht, die Energieversorgung möglichst weitgehend von internationalen Strukturen freizuhalten, zunächst nicht weiter betrachtet werden. (siehe hierzu Kap. 6.2)

<sup>119</sup> Auf die methodische Problematik solcher Bilanzen und die Unterschiede in den Verfahren der hier verwendeten Studien kann hier nicht näher eingegangen werden, für die folgende Zusammenstellung wurde aber versucht, sämtliche verwendeten Werte einheitlich auf die Bereitstellung von 1 GJ Nutzenergie (Wärme) umzurechnen.

trieb der Anlagen (sowie ggf. für die Produktion der Brennstoffe) sowie die dabei entstehenden Emissionen, aber auch auf Flächenverbrauch und Kosten der Energiegewinnung einzugehen.

	SOLAR-THERMIE (EFH <sup>120</sup> )	SOLAR-THERMIE (Nahwärme <sup>121</sup> , MFH,Büro.)	GEO-THERMIE (Wärmepumpe/ Erdsonde <sup>122</sup> )	GEO-THERMIE (Hydrother. <sup>123</sup> , HDR <sup>124</sup> )	BIOMASSE (Heizwerk <sup>125</sup> )	FOSSIL (Öl/Gas)
Bruttoenergieertrag in MJ/ m <sup>2</sup> pro Jahr	1260-1370	830-1260	360	XXXX	10-30 (Anbau)	XXXX
Primärenergieaufwand in MJ/GJ <sub>Wärme</sub>	69	38	873/700 <sup>126</sup> (380/275)	273 (<100)	50-210 <sup>127</sup>	1200-1340
Treibhauspotential <sup>128</sup> in CO <sub>2</sub> -Äquivalenten/GJ	6,24 kg	4 kg	47/38 kg (5/4 kg ???)	18,3 (6) kg	6-27,5 kg <sup>129</sup>	73-99 kg
Versauerungspotential in SO <sub>2</sub> -Äquiv./GJ <sup>130</sup>	96 g	56 g	312 g (35g ???)	53,6 (19) g	50-440 g <sup>131</sup>	70-258 g
Eutrophierungspotential in g N/GJ	3,6	2,9	30,6 (3 ???)	10,5 (3,8)	15-133 <sup>132</sup>	16,2-30,5
Humantoxisches Potential <sup>133</sup> (je TJ)	3,12 km <sup>3</sup>	0,83 km <sup>3</sup>	13,7 km <sup>3</sup> (1,5 km <sup>2</sup> ???)	1,9 (0,7) km <sup>3</sup>	Mittel-Hoch	3-9,5 km <sup>3</sup>
Wärmegestehungskosten in Pf./kWh	34-47 <sup>134</sup>	10-50	11-39 <sup>135</sup>	3-22	3-10 (EFH 12-17)	8-14

<sup>120</sup> Die Werte beziehen sich auf eine ausschließliche Warmwasserbereitstellung, können tendenziell aber auch für die mit etwas mehr Material- und Energieaufwand verbundenen Raumwärme/Warmwasser-Kombinationsanlagen (Deckungsgrad 25%) gelten.

<sup>121</sup> Die Werte beziehen sich auf ein Nahwärmesystem mit Langzeiterbeckenspeicher (Deckungsgrad 50%)

<sup>122</sup> Für die tiefen Erdwärmesonden liegen noch keine ausführlichen Untersuchungen vor, die Werte dürften denen der oberflächennahen Wärmepumpentechnik aber vergleichbar sein.

<sup>123</sup> Dies bezieht sich auf eine Anlage, die 15 % der Wärme durch Zufueuerung in einem Spitzenlastkessel bereitstellt, der Großteil des Energieinputs und damit auch der Emissionen entfällt auf diesen Brennstoffverbrauch (Kaltschmitt/Wiese 1997:386f), die Werte in Klammern sind Schätzungen für den rein geothermischen Anteil.

<sup>124</sup> Für das „Hot Dry Rock“-Verfahren liegen noch keine Angaben vor, die Werte dürften aber nicht viel höher als die der hydrothermalen Energiegewinnung liegen.

<sup>125</sup> Die Werte dürften bei EFH-Feuerungsanlagen (Holz, Miscanthus/Getreidepellets) ähnlich liegen.

<sup>126</sup> Bei beiden Technologien resultieren über 90 % des primärenergetischen Aufwandes aus der Stromversorgung der Wärmepumpe, wobei hier der Wirkungsgrad des heutigen Kraftwerkparks unterstellt wird. (Kaltschmitt/Wiese 1997:360) Bei einer Versorgung mit z.B. Windstrom würden sich die Werte um ca. 60 % reduzieren, die Emissionen würden sogar um ca. das 10-fache niedriger liegen. (hierfür geschätzte Werte in Klammern)

<sup>127</sup> Die niedrigsten Werte erreichen Biogas aus Gülle und Grasschnitt aus der Landschaftspflege (50-60 MJ/GJ), im Mittelfeld liegen Kurzumtriebs- und Waldrestholz (75-85 MJ/GJ) sowie Stroh. Miscanthus liegt bei 120 MJ/GJ und Getreide (Ganzpflanzennutzung) hat mit 150 bis 190 MJ/GJ die ungünstigsten Werte. Dabei ist aber zu berücksichtigen, daß bei allen Anbauenergieträgern (besonders bei Getreide) ein nicht geringer Teil des Energieaufwandes durch teilweise substituierbaren Mineräldünger entsteht und bei Miscanthus auf eine technische Trocknung (ca. 35 % des Energieaufwandes) unter Umständen verzichtet werden kann.

<sup>128</sup> Das Treibhauspotential errechnet sich aus den Emissionen an CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> und N<sub>2</sub>O. (Kaltschmitt/Wiese 1997:21)

<sup>129</sup> Waldrestholz/Grasschnitt 6 kg, Stroh 9 kg, Kurzumtriebsholz 10 kg, Miscanthus 13 kg, Weizen 27,5 kg

<sup>130</sup> Das Versauerungspotential errechnet sich aus den Emissionen von SO<sub>2</sub>,NO<sub>x</sub>,NH<sub>3</sub> und HCl. (Kaltschmitt/Wiese 1997:22)

<sup>131</sup> Biogas ca. 50 g, Restholz 134 g, Kurzumtriebsholz 184 g, Stroh 243 g, Miscanthus/Grasschnitt 275 g, Weizen 440 g

<sup>132</sup> Biogas ca. 15 g, Waldrestholz 52 g,Stroh 58 g, Kurzumtriebsholz 67 g, Miscanthus 77 g, Grasschnitt 80 g, Weizen 133 g

<sup>133</sup> Kaltschmitt/Wiese aggregieren die betreffenden Emissionen (Cadmium, Blei, SO<sub>2</sub>,NO<sub>x</sub>) in Form des kritischen Luftvolumens, das notwendig ist, um durch Verdünnung die Grenzwerte der TA Luft zu unterschreiten.

<sup>134</sup> Der untere Wert gilt bei Eigenmontage einer industriell produzierten Anlage, bei komplettem Selbstbau in Heimwerker/Handwerker-Kooperation können sogar unter 25 Pf./kWh erreicht werden. (Lehmann/Reetz 1995:110) Die Kollektorkosten (etwa 50 % der Gesamtkosten) könnten zudem bis 2020 um bis zu 66 % sinken. (Enquete 2002:522)

Tabelle 1: Vergleich der regenerativen Wärmebereitstellungsoptionen (eigene Zusammenstellung, z.T. eigene Berechnung, nach den Angaben aus Kaltschmitt/Wiese 1997, Staiß 2001, Reinhardt/Zemanek 2000, TU München 1995)

Wie aus Tabelle 1 hervorgeht, ist die solarthermische und hydrothermale Energiegewinnung (sowie voraussichtlich HDR) am effektivsten und mit den geringsten Umweltbelastungen verbunden. Hinsichtlich der Kosten und wegen des höheren Jahresdeckungsgrades (bis zu 100%) erscheint dabei besonders die Hydrogeothermie (sowie langfristig HDR) als vielversprechende Option, aber auch solarthermische Großsysteme (Nahwärme, Mietshäuser, Bürogebäude) mit Langzeitspeicherung oder günstigen Nachfragezeiten (Prozeßwärme) können akzeptable Deckungsgrade und wettbewerbsfähige Wärmekosten erreichen. Bei Kleinanlagen (EFH) liegt der Material-, Energie- und Kostenaufwand bezogen auf die damit gewonnene Energie zwar etwas höher, es ist aber langfristig noch mit deutlichen Preissenkungen zu rechnen und gerade bei EFH-Systemen kann mit etwas Eigeninitiative viel gespart werden. (vgl. Anmerkung 29)

Die Wärmebereitstellung mit Biomasse-Brennstoffen ist wiederum sehr kostengünstig, weist aber sowohl einen höheren Energieaufwand als auch einen hohen Flächenverbrauch auf und verursacht, z.T. aufgrund des landwirtschaftlichen Anbaus, v.a. aber infolge des Verbrennungsprozesses, deutlich mehr Emissionen. Dies betrifft insbesondere die Weizenganzpflanzennutzung, die nicht nur den energie- und emissionsintensivsten Anbau, sondern auch derart ungünstige Verbrennungseigenschaften aufweist, daß eine Rauchgasreinigung erforderlich ist. Auch Reststroh schneidet bezüglich der Verbrennung nicht gut ab, wobei hier v.a. der hohe Chlorgehalt problematisch ist, da daraus kritische Dioxinkonzentrationen resultieren und sogar Korrosionsschäden an den Anlagen auftreten können. (CMA 1997:45) Alles in allem erscheint also für die biomassebasierte Wärmeerzeugung, neben der Stammholz-, Restholz- und Biogasnutzung, der Anbau von Kurzumtriebsholz als effizienteste und ökologisch verträglichste Option, aber auch der Miscanthusanbau könnte, aufgrund des höheren Flächenertrages, sinnvoll sein.

Die Nutzung der oberflächennahen und tiefen Erdsondentechnik weist, zumindest bei der hier unterstellten fossilen Stromerzeugung, von allen betrachteten Optionen die bei weitem ungünstigste Energie- und Ökobilanz auf. Aber auch im Falle einer komplett regenerativen Stromerzeugung bleibt diese Technologie problematisch, da das Inlands-Potential der hierfür verfügbaren Energiequellen (vgl. Kap. 5.3) sehr begrenzt ist. Wärmepumpen und Erdsonden sollten deshalb nur dann eingesetzt werden, wenn Solar- oder Hydrothermie zusammen mit der regional verfügbaren Biomasse den Wärmebedarf eines Gebäudes nicht abdecken können.

---

<sup>135</sup> Unter 20 Pf. werden nur bei einem speziellen Wärmepumpen-Stromtarif von 11 Pf. erreicht. (Kaltschmitt/Wiese 1997:369)

Aufbauend auf diesen Überlegungen und ausgehend von den in Kap. 4 erörterten Potentialen (die z.T. allerdings nachfrageseitig in Konkurrenz zueinander stehen) und dem zukünftigen Wärmebedarf<sup>136</sup> kann nun ein mögliches regeneratives Versorgungsszenario entworfen werden:

- Wie bereits erwähnt, kann der Bedarf an industrieller und gewerblicher Prozeßwärme mit Temperaturen über 200°C ausschließlich mit Brennstoffen abgedeckt werden. Dabei wäre zwar bei ca. 35 % der Verbraucher eine KWK mit Gasturbinen oder auch Brennstoffzellen denkbar (Enquete 2002:455), aufgrund des begrenzten Potentials der Biomasse in Deutschland ist dies aber als wenig sinnvoll anzusehen, denn mit der vorgeschalteten Stromerzeugung verringert sich ja die Menge an nutzbarer Verbrennungswärme und daher wäre für denselben Wärmebedarf dann mehr Brennstoff erforderlich. Angebracht ist die KWK daher nur, wenn der Strombedarf des Standortes so hoch ist, daß die Fremdversorgung mit Strom infrastrukturell sehr aufwendig wäre und die regionalen Netze zu stark belasten würde. Wenn man unterstellt, daß dies auf ca. 10 % des Bedarfs zutrifft, ergibt sich letztlich ein Brennstoffbedarf von 925 PJ/a bei einer Stromerzeugung von ca. 11 TWh.<sup>137</sup>
- Für die Bereitstellung der industriellen bzw. gewerblichen Prozeßwärme von 100 bis 200°C bietet sich zunächst das HDR-Verfahren (sofern dieses in nicht allzuferner Zukunft praxisreif wird) an. Aufgrund der benötigten Nachfragedichte solcher Anlagen (mind. 25 MW<sub>th</sub>) und der nicht immer zum Wärmeträger Heißwasser passenden Verbraucher dürften aber höchstens 30 % der 250 PJ/a per HDR versorgt werden können, so daß sich (bei 10 % KWK-Anteil an der Biomassenutzung, s.o.) ein restlicher Brennstoffbedarf von ca. 205 PJ/a ergibt, womit dann die restlichen 175 PJ Nutzwärme + 2 TWh Strom bereitgestellt würden.
- Vom heißeren HDR-Potential (vgl. 4.3.3.4) verbleiben so 1125 PJ/a, die zur Stromerzeugung zur Verfügung stehen, wobei dann die Abwärme zur Raum- und Niedertemperaturprozeßwärmeerzeugung genutzt werden kann. Aufgrund der benötigten Nachfragedichte der HDR-Anlagen (s.o.) dürfte der hiermit maximal mögliche Wärmeabsatz aber maximal 500 PJ/a betragen. In Kraft-Wärme-Kopplung<sup>138</sup> würden (bei einem Erdwärmeverbrauch von insgesamt dann 625 PJ/a) dabei dann ca. 17,5 TWh/a Strom erzeugt. (Hierfür müssten dann etwa 1500-2500 HDR-Anlagen gebaut werden.)

---

<sup>136</sup> Dabei ist zu berücksichtigen, daß die Bereitstellung der regenerativen Wärme zusätzlichen Energieaufwand für Anlagen- und Brennstoffproduktion erfordert. Beim hier vorgesehenen Umfang wären das ungefähr 40 PJ/a Kraftstoff, 30 TWh/a Strom und 40 PJ Brennstoff, ohne das für die Düngemittelherstellung benötigte Erdgas. (eigene Schätzung nach diversen Angaben in Kaltschmitt/Wiese 1997 und TU München 1997) Darüberhinaus entsteht auch bei der regenerativen Stromerzeugung (vgl. Kap. 5.3) ein Energievorleistungsbedarf, von dem hier der Brennstoffeinsatz in der Industrie (ca. 40 PJ) berücksichtigt werden muß. Damit erhöht sich der gewerbliche Brennstoffbedarf von 800 auf 880 PJ/a.

<sup>137</sup> angenommene Wirkungsgrade der KWK: 30 % elektrisch, 60 % thermisch.

<sup>138</sup> unterstellte Wirkungsgrade: Stromerzeugung 10%, Nutzwärmebereitstellung 80 % (d.h. 90 % der Abwärme werden zu Nutzwärme)

- Mit hydrothormaler Energiegewinnung können ca. 165 PJ/a Wärme < 100°C bereitgestellt werden. Dabei sollten die Anlagen möglichst so installiert werden, daß sie ohne zusätzlichen Spitzenkessel auskommen, dennoch wird wohl ein Brennstoffbedarf von ca. 25 PJ/a anfallen, womit dann letztlich 185 PJ/a an nutzbarer Wärme bereitgestellt werden würden.
- Durch die KWK bei der Stromzwischenlagerung (vgl. Kap. 5.3) werden weitere 60 PJ/a Raum- und Prozeßwärme <100°C bereitgestellt, außerdem dürften sich aus der Abwärme der industriellen Hochtemperaturprozesse mindestens 35 PJ/a nutzen lassen.
- Damit verbleiben ca. 1200 PJ/a an Raumwärme- und Warmwasserbedarf, die für eine solarthermische Energiebereitstellung in Frage kämen. Wenn man davon ausgeht, daß hiervon für eine Versorgung per Nahwärme mit Langzeitspeicherung (Deckungsgrad 55%) nur etwa 40% zur Verfügung stehen<sup>139</sup>, und der Rest zu 60% mit Anlagen ohne Langzeitspeicher (Deckungsgrad 25%) und zu 20% mit Nur-Warmwasser-Anlagen (Deckungsgrad 15%) versorgt werden kann, ergibt sich eine solarthermische Wärmegewinnung von 395 PJ/a. Der Restwärmebedarf der so versorgten Gebäude (665 PJ/a) müßte durch Biomasse-Zentralheizungen bzw. Biomasse-Heiz(kraft)werke abgedeckt werden, womit sich (bei 10 % KWK, s.o.) eine Stromerzeugung von 9,5 TWh/a und ein Brennstoffverbrauch von 775 PJ/a ergibt. (Damit ergibt sich, zusammen mit dem o.g. Brennstoffbedarf, eine Deckungslücke von ca. 800 PJ pro Jahr, wenn man von einem Biomassepotential von 1130 PJ/a ausgeht. )
- Für eine Wärmebereitstellung per Wärmepumpe oder tiefer Erdsonde stehen damit noch 145 PJ/a zur Verfügung, daraus ergibt sich ein Strombedarf von ca. 11,5 TWh/a.

## 5.3 Regenerative Stromversorgung

### 5.3.1 Abschätzung des zukünftigen Bedarfs

Wie in Kap. 2 dargestellt, liegt der heutige endenergetische Stromverbrauch bei 480,5 TWh/a. Davon sind allerdings 68 TWh der elektrischen Raumwärme- und Warmwassererzeugung zuzurechnen, die wie bereits erwähnt, in Zukunft so weit wie möglich durch andere Wärmebereitstellungstechniken substituiert werden sollte. Damit verbleiben ca. 426,5<sup>140</sup> TWh (d.h. 1535 PJ),

<sup>139</sup> Die Wärmeversorgung mit einem solarem Nahwärmesystem unterliegt nicht nur der Einschränkung, daß die räumlichen Voraussetzungen für Kollektorinstallation, Leitungen, Speicher und Heizzentrale gegeben sein müssen, sondern erfordert aus ökonomischen und energetischen Gründen (Verluste beim Wärmetransport) auch eine hohe Wärmebedarfsdichte (>1080 GJ/a je Hektar), was v.a. im Gebäudebestand schwer zu erreichen ist, da die potentiellen Abnehmer meist nur auf freiwilliger Basis eingebunden werden können. (Staiß 2001: I-31f)

<sup>140</sup> Hier sind die verbleibenden 14 TWh/a Warmwassererzeugung miteingerechnet.

die gegenwärtig pro Jahr für Anwendungen benötigt werden, die ausschließlich per Strom versorgt werden können, d.h. mechanische Antriebe in Geräten und S-/U-/Straßen- und Eisenbahnen, Licht und IuK-Geräte sowie elektrischen Prozeßwärmeerzeugern.

Davon ausgehend läßt sich nun der zu erwartende Verbrauch nach Ausschöpfung aller Effizienzpotentiale abschätzen<sup>141</sup>. Neben den Einsparungen von ca. 40 TWh (das sind ca. 16 % des derzeitigen Verbrauchs) in den Bereichen „Prozeßwärme“ und „mechanische Anwendungen“ in Industrie und Gewerbe dürften sich sehr große Einsparpotentiale v.a. beim Strombedarf für Licht, Haushaltsgeräte und Elektronik-Geräte (40 TWh, das ist ein Viertel des gegenwärtigen Verbrauchs hierfür) ergeben, z.B. durch den Austausch normaler Glühbirnen mit Energiesparlampen, den allmählichen Ersatz ineffizienter Waschmaschinen, Kühlschränke usw. (hier liegen die mit einem durchschnittlichen Neugerät erreichbaren Einsparungen bei bis zu 35 %, mit einem neuen Bestgerät können sogar bis zu 67 % erreicht werden) und die Minimierung des Stromverbrauchs von Stand-By-Funktionen (gegenwärtig ca. 20 TWh/a) durch neue Geräte ohne (oder mit photovoltaisch betriebenen) Stand-By-Schaltungen. (Enquete 2002: 317ff)

Diese Einsparungen von 80 TWh werden allerdings zum einen durch die zukünftig stark ansteigende Verkehrsleistung der Bahnen (+ 16 TWh, siehe Kap. 5.4) und zum anderen durch den zukünftig anfallenden Strombedarf für die Produktion regenerativer Energiegewinnungsanlagen u. -brennstoffe (ca. 30 TWh/a im Bereich Wärme, ca. 25 TWh/a im Bereich Strom<sup>142</sup>) und den Betrieb der Wärmepumpen (ca. 11,5 TWh/a) mehr als kompensiert. Daher dürfte langfristig (also im Jahr 2050) mit einem Stromanwendungsbedarf von ca. 430 TWh/a zu rechnen sein, zzgl. der Netzverluste (die aufgrund der regionalisierten Netzstruktur gegenüber heute etwas gesenkt werden können) ergibt das einen Stromerzeugungsbedarf von 450 TWh/a.

### 5.3.2 Strombereitstellung

Wie im Wärmebereich sollen hier zunächst die Energie- und Ökobilanzen der verschiedenen regenerativen Strombereitstellungsoptionen innerhalb Deutschlands verglichen werden.

---

<sup>141</sup> Eigene Schätzung des mit technischen Einzelmaßnahmen realistisch erreichbaren Einsparpotentials nach den Angaben in Enquete 2002:317ff,339f,364ff

<sup>142</sup> Eigene Schätzung nach diversen Angaben in Kaltschmitt/Wiese 1997 und TU München 1995

	PHOTO-VOLTAIK (Dachanlage <sup>143</sup> )	WIND-ENERGIE (1 MW <sup>144</sup> )	WASSER-KRAFT (0,4/2,6MW)	BIOMASSE (Heiz-kraftwerk <sup>145</sup> )	GEO-THERMIE (HDR <sup>146</sup> )	FOSSIL (Steinkohle/ Erdgas)
Bruttoenergieertrag In kWh/m <sup>2</sup> pro Jahr	70-190	10 <sup>147</sup>	20000/25000	2,8-8,3 (Anbau)	Sehr hoch	500/666
Primärenergieaufwand in kWh/MWh <sub>Endenergie</sub>	599/832 <sup>148</sup> (360/420)	85	62,8/29,4	50-210 <sup>149</sup>	<100	2620/2080
Treibhauspotential <sup>150</sup> in CO <sub>2</sub> -Äquivalenten/MWh	150/200 kg (7/9 kg)	21 kg	16,1/8,6 kg	6-27,5 kg <sup>151</sup>	6 kg	938/450 kg
Versauerungspotential <sup>152</sup> in SO <sub>2</sub> -Äquiv./MWh	1739/1060 g <sup>153</sup> (1280/500g ??)	82 g	55,5/30,5 g	50-440 g <sup>154</sup>	19 g	1338/570 g
Eutrophierungspotential in g N/MWh	650/100 <sup>155</sup> (550/5 ??)	13,5	13,3/7	15-133 <sup>156</sup>	3,8	218/147
Humantoxisches Potential <sup>157</sup> (je GWh)	19,5/23,2 <sup>158</sup> (1,1/2,2)	3,3 km <sup>3</sup>	2,3/1,25 km <sup>3</sup>	Mittel-Hoch	0,7 km <sup>3</sup>	49,6/24 km <sup>3</sup>
Stromgestehungskosten In Pf./kWh	78-138 <sup>159</sup>	14-35	15/10	15-59	3-22	8/7

<sup>143</sup> Diese Werte gelten für amorphe (Systemwirkungsgrad 5%) und multikristalline (SWG 10 %) Siliziumzellen, für letztere sind hier die Werte der monok. Zellen angegeben, da Kaltschmitt/Wiese aus unerfindlichen Gründen die multik. Zellen um bis zu 67% schlechter bewerten, obwohl laut Hagedorn (1994) deren Bilanz (trotz geringerem Wirkungsgrad) aber besser als die der monok. Zellen ist.

<sup>144</sup> Diese Werte beziehen sich auf eine 1 MW-Anlage, die bei 5 m/s mittlerer Windgeschwindigkeit eine Auslastung von 22-23 % (Durchschnitt Küstländer) hat und so 2 GWh Strom pro Jahr produziert. Die zukünftig bedeutsamen Offshore-Anlagen dürften (trotz des größeren Aufwandes) wg. ihrer höheren Stromerträge (bis zu 15 GWh/a pro Anlage) mindestens doppelt so gute Werte erreichen.

<sup>145</sup> Die Werte gehen von einem 90%-igen Gesamtwirkungsgrad in einer kraft-wärme-gekoppelten Anlage aus.

<sup>146</sup> Für das „Hot Dry Rock“-Verfahren liegen noch keine Angaben vor, hier wurden die Werte der hydrothermalen Wärmegewinnung (ohne fossilen Spitzenkessel) verwendet, da diese ähnlich liegen dürften. Dies gilt allerdings nur bei Stromproduktion in KWK, ohne Wärmeauskopplung würde die Bilanz etwa 8-10mal schlechter ausfallen.

<sup>147</sup> Der Flächenbedarf von 20 ha (z.T. allerdings landwirtschaftlich nutzbar) pro Anlage ist noch sehr gering geschätzt (Wolfrum 2000:49).

<sup>148</sup> Hier muß berücksichtigt werden, daß der Energiebedarf bei der Herstellung der Module zu 60 % (amorph) bis 80 % (multikristallin) auf Stromverbrauch beruht, der hier gemäß des Primärenergieeinsatzes im heutigen Kraftwerkspark bewertet wurde. Unter Annahme einer Stromerzeugung mit z.B. Windkraft würde sich der Primärenergieaufwand um 40 bzw. 50 % reduzieren und auch die Emissionen lägen bedeutend niedriger. (Werte in Klammern) Eine weitere Reduktion des spezifischen Energieverbrauchs (und der Emissionen) dürfte sich außerdem mit der zu erwartenden Steigerung der Zellwirkungsgrade (Für Anlagen mit amorphen Zellen werden in absehbarer Zeit Systemwirkungsgrade von 8 % , für Anlagen mit multikristallinen Zellen sogar von 13 % erwartet, vgl. Enquete 2002:496f) sowie mit den noch möglichen Effizienzsteigerungen bei der Herstellung (über 50 %, vgl. Hagedorn 1994) ergeben.

<sup>149</sup> Die niedrigsten Werte erreichen Biogas aus Gülle und Grasschnitt aus der Landschaftspflege (50-60 kWh), im Mittelfeld liegen Kurzumtriebs- und Waldrestholz (75-85 kWh) sowie Stroh. Miscanthus liegt bei 120 kWh und Getreide (Ganzpflanzennutzung) hat mit 150 bis 190 kWh die ungünstigsten Werte. Dabei ist aber zu berücksichtigen, daß bei allen Anbauenergieträgern (besonders bei Getreide) ein nicht geringer Teil des Energieaufwandes durch teilweise substituierbaren Mineraldünger entsteht und bei Miscanthus auf eine technische Trocknung (ca. 35 % des Energieaufwandes) unter Umständen verzichtet werden kann.

<sup>150</sup> Das Treibhauspotential errechnet sich aus den Emissionen an CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> und N<sub>2</sub>O. (Kaltschmitt/Wiese 1997:21)

<sup>151</sup> Waldrestholz/Grasschnitt 6 kg, Stroh 9 kg, Kurzumtriebsholz 10 kg, Miscanthus 13 kg, Weizen 27,5 kg

<sup>152</sup> Das Versauerungspotential errechnet sich aus den Emissionen von SO<sub>2</sub>,NO<sub>x</sub>,NH<sub>3</sub> und HCl. (Kaltschmitt/Wiese 1997:22)

<sup>153</sup> Laut Kaltschmitt/Wiese entstehen bei der Herstellung der Photozellen hohe NH<sub>3</sub>- bzw. HCl-Emissionen. (Kaltschmitt/Wiese 1997:218)

<sup>154</sup> Biogas ca. 50 g, Restholz 134 g, Kurzumtriebsholz 184 g, Stroh 243 g, Miscanthus/Grasschnitt 275 g, Weizen 440 g

<sup>155</sup> siehe Anmerkung 48

<sup>156</sup> Biogas ca. 15 g, Waldrestholz 52 g, Stroh 58 g, Kurzumtriebsholz 67 g, Miscanthus 77 g, Grasschnitt 80 g, Weizen 133 g

<sup>157</sup> Kaltschmitt/Wiese aggregieren die betreffenden Emissionen (Cadmium, Blei, SO<sub>2</sub>,NO<sub>x</sub>) in Form des kritischen Luftvolumens, das notwendig ist, um durch Verdünnung die Grenzwerte der TA Luft zu unterschreiten.

<sup>158</sup> Bei Gallium-Arsenid-, Cadmium-Tellurid- oder Kupfer-Indium-Diselenid-Dünnschichtzellen dürfte das toxische Potential sehr viel höher liegen, weshalb auf diese Varianten auch verzichtet werden sollte.

<sup>159</sup> Bei diesen Kosten sind einerseits die bei einer stark ausgeweiteten PV-Stromerzeugung benötigten Zwischenspeicher nicht berücksichtigt, andererseits kann man davon ausgehen, daß die Anlagenkosten sich langfristig um bis zu 50 % reduzieren werden und da gleichzeitig der Wirkungsgrad steigen wird, würden die Stromgestehungskosten damit um bis zu 70 % sinken. (Enquete 2002:505) Durch die Integration der Photozellen in Bauelemente (Dachziegel, Fassadenteile) könnten sogar noch größere Kostensenkungen erreicht werden.

Tabelle 2: Vergleich der regenerativen Strombereitstellungsoptionen (eigene Zusammenstellung, z.T. eig. Berechn., nach Angaben aus Kaltschmitt/Wiese 1997, Staiß 2001, Reinhardt/Zemanek 2000, Enquete 2002, TU München 1995)

Die Ergebnisse dieses Vergleichs sind allerdings z.T. widersprüchlich und nicht ohne weitere Erörterung aussagefähig. So scheint z.B. die Photovoltaik auf den ersten Blick ungeeignet für eine zukünftige Energieversorgung, wenn man aber berücksichtigt, daß deren hier angegebene Energie-/Emissionsbilanz größtenteils auf der mit 38 % bewerteten Primärenergieeffizienz des verbrauchten Stroms beruht und bei Solarzellen zudem noch deutliche Herstellungseffizienz- und Wirkungsgradsteigerungen möglich scheinen (vgl. Anmerkung 43), muß die Photovoltaik bzgl. Energieverbrauch und Umweltbelastung als mindestens der Biomassenutzung ebenbürtig bezeichnet werden, und das bei einer jetzt schon um das 25-fache höheren Flächeneffizienz. Allerdings wäre für eine photovoltaische Energieerzeugung in größerem Umfang die angekündigte Kostensenkung (vgl. Anmerkung 54) zwingend erforderlich.

Zur Biomasse ist anzumerken, daß diese aufgrund ihres begrenzten Potentials in Deutschland (vgl. Kap. 4) vorrangig zur Wärmeerzeugung genutzt werden sollte und daher nur einen kleinen Beitrag in KWK-Anlagen an Standorten sehr hohen Strombedarfs liefern wird. (vgl. Kap. 5.2.2) Ebenfalls sehr klein wird der Beitrag der HDR-Stromerzeugung bleiben, da diese aufgrund des geringen elektrischen Wirkungsgrades ökologisch und ökonomisch nur Sinn macht, wenn sie in KWK erfolgt, und auch die Wasserkraft kann nicht viel zur Stromversorgung beitragen, nicht zuletzt deshalb weil die gewässerökologischen Auswirkungen der Stauanlagen (Sedimentation, teilweises Trockenfallen, Fisch-/Tierwanderungsbarriere, etc.) einer Nutzung in vielen Fällen entgegenstehen (Harlacher 1997). Bei der Erschließung des in Kap. 4 genannten Restpotentials und auch bei Modernisierungen bestehender Anlagen sollten diese Aspekte aber ausreichend berücksichtigt werden können, z.B. durch die Beschränkung auf Ausleitungskraftwerke und eine ökologisch orientierte Wasserhaltung und Gestaltung (wie z.B. Fischtrepfen).

Damit bietet sich v.a. die Windenergie mit ihrer guten Energie- und Ökobilanz als zukünftiger Hauptstromerzeuger an, aber auch hier sind einige Einschränkungen zu machen. Wie schon an der sehr geringen Flächeneffizienz von 10 kWh/m<sup>2</sup>a deutlich wird, ist die Erschließung des in Kap. 4 genannten Windkraftpotentials mit einer gewaltigen Flächenbeanspruchung verbunden und daher nicht unproblematisch. Zum Beispiel bleibt (trotz der inzwischen ausgeräumten Bedenken bzgl. Vogelschlag) besonders die Anlage großer Windparks in vielen natürlich verbliebenen Gebieten Deutschlands bedenklich, da saisonale und tagtägliche Zugrouten von Vögeln diese z.T. sehr weiträumig umgehen und so oft der Zugang zu wichtigen Nahrungs- und Brutplätzen verhindert wird. (Wolfrum 2000:140ff)



Ein weiteres großes Hemmnis für die Windkraftnutzung besteht zudem in deren deutlicher Beeinträchtigung des Landschaftsbildes (oftmals gerade in den wenigen noch nicht verbauten Gebieten) und den nicht unerheblichen Belästigungen der Anwohner durch Lärm und Schattenwurf (sog. „Disco-Effekt“), zumal die Anlagen immer größer werden und sich gehäuft in wenigen Bundesländern befinden. (BMU 1999:33) Da die hierbei geltenden (länderspezifisch allerdings unterschiedlichen bzw. unterschiedlich gehandhabten) Regelungen oft nicht nur einen viel zu geringen Abstand zur Wohnbebauung (z.T. nur 200-300m statt der benötigten 1500 m) fordern (Berliner Zeitung 15.8.2002), sondern auch keine ausreichend niedrigen Grenzwerte für Schattenwurf<sup>160</sup> und Lärmemission<sup>161</sup> beinhalten, und durch leichtfertig erteilte Baugenehmigungen, Meßfehler oder „frisierte Bilanzen“ auch des öfteren umgangen werden, sind vielerorts viel zu große Windparks viel zu nah an Wohngebieten gebaut worden. Daher gibt es immer mehr (oft auch rechtlich erfolgreiche) Einwände von Anwohnern und Verbänden, obwohl gegenwärtig noch nicht einmal ein Sechstel des Festlandpotentials installiert wurde. Hinzu kommt der nicht unbedenkliche Nebeneffekt, daß gewachsene Sozialgefüge auseinanderbrechen, weil plötzlich die einen (Landbesitzer) viel Geld verdienen, während die anderen den Anblick und den Lärm der WKA tagtäglich ertragen müssen. (Wolfrum 2000:109ff)

Zu den geplanten Offshore-Anlagen gibt es bisher zwar noch keine genauen Untersuchungen zu Auswirkungen auf Flora und Fauna, aber auch hier ist z.B. mit Vogelzugproblemen (v.a. in Küstennähe) zu rechnen. Auch evtl. Konflikte mit der Schifffahrt und der Fischerei sind noch zu klären, zudem werden die bis zu 160 m hohen Anlagen noch in bis zu 35 km Entfernung vom Ufer aus sichtbar sein, was bei massivem Ausbau u.a. auch für den Tourismus ein Problem werden könnte. Darüberhinaus würde ein voller Ausbau des in Kap. 4 genannten Offshore-Potentials i.ü. auch einen ökologisch und ästhetisch problematischen umfangreichen Ausbau des Hochspannungsnetzes an Land erforderlich machen, um die großen Strommengen überhaupt aufnehmen und weiterverteilen zu können. (BMU 1999:42f)

Aufgrund all dieser Nachteile sollten daher m.E. nicht mehr als max. 20.000 MW Offshore<sup>162</sup> (mit einer Mindestküstenentfernung von 15-20 km) realisiert werden, und auf dem Festland

---

<sup>160</sup> Als planungsrechtlich (durch zeitweilige programmierte Abschaltung) zu vermeidender Schattenwurf gilt eine Verdeckung der Sonnenscheibe (durch den Rotor) zu 20 %, während das Auge aber bereits Helligkeitsschwankungen von 2,5 % wahrnimmt. (Wolfrum 2000: 130f)

<sup>161</sup> Die 45db-Grenze der TA Lärm (das entspricht dem Gebrumm eines älteren Kühlschranks) ist ungeeignet für die Beurteilung des Mindestabstandes, da erstens eine Dauerbelastung gegeben ist und zweitens die Werte im gängigen Rechenverfahren durch Mittelung entfremdet werden. Außerdem wird z.T. Verkehrs- oder Gewerbelärm gegengerechnet und die Belastung durch Infraschall wird gar nicht berücksichtigt. (Wolfrum 2000:110ff)

<sup>162</sup> Schon das entspricht einer Flächenbelegung von ungefähr 2000 km<sup>2</sup>. (Eigene Berechnung nach den Angaben in Staiß 2001:I-64)

sollte, zur Minimierung der o.g. Beeinträchtigungen, ein möglichst großer Teil der Windkraftnutzung durch einzelne, weiträumig verteilte Anlagen erfolgen<sup>163</sup>, die vorwiegend regionalen Betreibern gehören (und sozusagen auch primär die Anwohner mit Strom beliefern) und, dem jeweiligen Bedarf entsprechend, möglichst klein ausgelegt werden sollten<sup>164</sup>. Dies dürfte zwar die Energie- und Emissionsbilanz des Windstroms etwas verschlechtern und das Potential erheblich verkleinern, da die verfügbaren Standorte dann nicht voll ausgenutzt werden, aber einzelne und nicht ganz so massive Anlagen mit einer Nabenhöhe von 10-35 m (50-250 kW) dürften i.allg. doch besser akzeptiert werden (und auch besser in die Landschaft passen) als großflächige Windparks mit bis zu 100 m hohen Türmen und 70 m großen Rotoren.

Da voraussichtlich Photovoltaik- und Windstrom zusammen den größten Anteil an der zukünftigen Stromerzeugung ausmachen werden, muß schließlich auch noch die Problematik der Fluktuation des natürlichen Energieangebotes bei gleichzeitig stark variierender Nachfrage angesprochen werden, besonders wenn primär regionale Versorgungsstrukturen angestrebt werden. Sehr kurze Spannungsschwankungen (im Sekunden- und Minutenbereich), die theoretisch zu Oberschwingungen, Flickern und Frequenzinstabilitäten führen können, dürften dabei kein sehr großes Problem darstellen, da sie erstens durch (evtl. anlageninterne) Schwungrad- oder Kondensatorenspeicher minimiert werden können, zweitens mit netzintegrierter Leistungsregelung (kurzfristiges Zuschalten von schnell regelbaren Stromerzeugern, ggf. interregionale Transfers) beherrschbar sein dürften, und sich drittens schon bei einem Verbund von mehr als 10 Anlagen, die räumlich etwas verteilt sind, eine deutliche Glättung des Leistungsverlaufes ergibt, so daß bei hunderten Anlagen, die über viele Kilometer verteilt stehen, lediglich noch mit Tages- und Jahregängen zu rechnen ist. (TAB 2000:11ff,106ff) Diese tages- und jahreszeitlichen Schwankungen der verschiedenen Stromquellen aber werden (obwohl sie sich z.T. gegenseitig kompensieren, vgl. Abb. 5.2) wohl des öfteren zu deutlichen Über- und Unterangeboten führen, denen zwar, soweit diese regelmäßig und vorhersagbar auftreten, z.T. auch durch eine zeitliche Verlagerung der Nachfrage<sup>165</sup> per Tarifstruktur begegnet werden kann, die aber trotzdem eine tage- bis monatelange Zwischenspeicherung eines nicht unerheblichen Anteils des erzeugten Stroms erforderlich machen werden. Die sich (neben den ökotoxisch bedenklichen

---

<sup>163</sup> Eventuell sind, besonders im unmittelbaren Küstenbereich, einige größere Windparks auch wieder zurückzubauen.

<sup>164</sup> Zum Beispiel würde bereits im windschwachen Binnenland (< 5 m/s, 1500 Vollaststunden) eine 200 kW-Anlage ausreichen, um den Strombedarf eines Dorfes (ohne Gewerbe) mit 300 Einwohnern zu decken, in Gebieten mit 5-6 m/s (2000 Vollaststunden) wäre damit sogar die Versorgung eines Dorfes mit 400 Einwohnern möglich. Darüberhinaus sind viele dezentrale Standorte wie Einzelgehöfte, Gewerbegebiete und kleine Dörfer denkbar, an denen (u.U. sogar als Inselnetz) sehr kleine Anlagen (<100 kW) aufgestellt werden könnten. (Bei den meisten Varianten müßte natürlich zum Fluktuationsausgleich ein Anschluß an das regionale Stromnetz bestehen.)

<sup>165</sup> So ist man z.B. beim Wäsche- oder Geschirrwaschen zeitlich flexibel, und manche Geräte (z.B. Kühlschränke) könnten auch per Wärme- oder Kältespeicher ihren Strombedarf auf einen bestimmten Zeitraum konzentrieren. (Nitsch 2000:64)

und viel zu kurzlebigen Batterien) dafür anbietenden technischen Varianten sind v.a. Pumpspeicherkraftwerke, Druckluftkammern und die Wasserstoffherzeugung. (Nitsch 1990:73)

Abb. 5.2: Jahres- und Wochengänge regenerativer Stromerzeugung (aus: Kaltschmitt/Wiese 1997)

Da erstere in Deutschland topographisch bedingt nur begrenzt zur Verfügung stehen und die Speicherung per Druckluft nur einen Gesamtwirkungsgrad von 40-60 % hat und zudem auch recht hohe Ruheverluste aufweist (Strößenreuther 1996/Pelte 2002), wird v.a. die Wasserstoffherzeugung als Stromspeichermedium in Frage kommen. Dieses bereits im 19. Jahrhundert als Energieträger entdeckte (Büttner 1990:47ff) und in der Industrie seit langem energetisch und nicht-energetisch genutzte Gas wurde bisher vorwiegend aus fossilen Rohstoffen gewonnen („reformiert“), kann aber auch per Elektrolyseverfahren aus Wasser erzeugt werden. Der Wirkungsgrad der alkalischen Elektrolyse liegt derzeit bei 73-75 % (Nitsch 2002), langfristig dürften aber mit der sog. Hochtemperaturelektrolyse Wirkungsgrade von über 85 % erreichbar sein. (Strößenreuther 1996)

Gespeichert werden kann der erzeugte Wasserstoff z.B. in Untertagespeichern (bis zu 50 bar) oder Hochdrucktanks (200-300 bar), im Flüssigzustand (bei  $-250\text{ °C}$ ) oder auch im Molekülgestalt bestimmter Metallverbindungen (Metallhydridspeicher). Dabei weist die Flüssigspeicherung die höchste Speicherdichte auf, etwas ungünstiger ist die Druckspeicherung und noch schlechter schneiden Metallhydridspeicher ab. (vgl. Abb. 5.3) Da für die Verflüssigung aber 20-30 % des Energieinhalts des Tanks verbraucht werden (Nitsch 2002/Pelte 2002), erscheint für große Mengen gegenwärtig nur die Druckspeicherung wirklich sinnvoll. Allerdings gibt es auch noch die in der Entwicklung befindlichen Varianten, den Wasserstoff in sog. Nanospeichern einzulagern (Nitsch 2002), oder ihn mit aus der Luft entnommenem  $\text{CO}_2$  (sehr aufwendig, Wirk-

ungsgrad nur 38 %) oder zusammen mit Synthesegas aus Biomasse (Gesamtwirkungsgrad z.Zt. 53 %, bis zu 70 % realisierbar) zu Methanol umzuwandeln (Specht/Bandi 1998).

Abb. 5.3: Energiedichten von Wasserstoffspeichern i.Vgl. zu Kohlenwasserstoffen (aus: Nitsch 2002)

Zur Wiederverstromung des gespeicherten Wasserstoffs gibt es grundsätzlich drei Möglichkeiten: Gasturbinen (bzw. -motoren), Brennstoffzellen<sup>166</sup> (BZ) oder eine Kombination aus beidem. Während der Einsatz stationärer BZ im fossilen Energiesystem aus energetisch-ökologischer Sicht keine großen Vorteile bringt, wäre dies in dem hier vorliegenden Fall aufgrund des hohen elektrischen Wirkungsgrades der BZ von bis zu 70 % (auch in Teillast) überlegenswert, da Gasturbinen nur 55 bis max. 60 % (bei GuD-Kombination) erreichen. Noch effizienter wäre die Kombination aus Hochtemperatur-BZ und nachgeschalteter (Mikro-)Gasturbine, da so elektrische Wirkungsgrade von bis zu 85 % erreicht werden können. (Bundestag 2001: 16,99,121ff) (Bei allen Varianten sollte natürlich die Abwärme zur Wärmeversorgung genutzt werden.)

Unter Berücksichtigung aller hier diskutierten Einschränkungen könnte ein mögliches regeneratives Stromversorgungsszenario dann vielleicht wie folgt aussehen:

- Die 20.000 MW Offshore-WKAs liefern bei 3500 Vollaststunden jährlich etwa 70 TWh Strom. Aufgrund der großen Menge an Leistung, die noch dazu konzentriert im Norden Deutschlands liegt, kann aber höchstens ein Drittel<sup>167</sup> der gesamten Stromerzeugung direkt an das Festlandnetz abgegeben werden, der Rest müßte am Netzanschluß zwischengespeichert und bei Bedarf wieder verstromt werden, was unter Annahme eines durchschnittlichen

---

<sup>166</sup> Die bereits vor über 150 Jahren erstmalig entwickelten Brennstoffzellen sind elektrochemische Wandler, in denen die chemische Energie von Wasserstoff ohne heiße Verbrennung in elektrischen Strom (und Wärme) umgewandelt wird, wobei als Endprodukt Wasser entsteht. Mit vorgeschalteter „Reformierung“ können dafür auch wasserstoffhaltige Gase wie Erd-, Bio- oder Synthesegas in BZ eingesetzt werden, außerdem befindet sich eine BZ in Entwicklung, die direkt mit Methanol betrieben werden kann. (Bundestag 2001:19ff)

<sup>167</sup> Eigene Schätzung beruhend auf den Angaben in Kaltschmitt/Wiese 1997 (S.282). Alle hier gemachten Einschätzungen bzgl. Angebots- und Nachfragefluktuation sind allerdings mit großer Unsicherheit behaftet und bedürften einer fachlichen Überprüfung.

(elektrischen) Gesamtwirkungsgrades von 70 % eine Jahresstromerzeugung von 56 TWh ergibt. (Bei der Wiederverstromung des H<sup>2</sup> würden dann etwa 20 PJ/a an Wärme anfallen.)

- Obwohl es sehr schwierig ist, aus den vorliegenden Potentialangaben abzuleiten, wieviel Leistung auf den 1-2,6 Mio. ha verfügbarer Festlandsfläche installiert werden könnte, wenn man nur wenige Windparks und bevorzugt eher kleinere Anlagen errichtet, soll hier grob geschätzt werden, daß in den drei Küstenländern und den restlichen Bundesländern jeweils maximal 10.000 MW realisierbar sind, woraus eine Stromerzeugung von etwa 35 TWh/a resultieren würde. Da diese Strommenge recht gering ist und zum größten Teil ja auch weitläufig verteilt anfällt, wird dabei nur wenig Zwischenspeicherung notwendig sein, so daß die Stromverluste höchstens 5 TWh/a betragen. Damit ergibt sich eine Nettogesamterzeugung von 30 TWh/a Strom (und eine Wärmeerzeugung von ca. 5 PJ/a).
- Ausgehend von 1000 km<sup>2</sup> verfügbarer Fläche und einer mittleren Jahresstromerzeugung von 125 kWh/m<sup>2</sup> (bei einem durchschnittlichen Systemwirkungsgrad von 11 %) könnten Photovoltaik-Anlagen in Deutschland im Jahr etwa 125 TWh Strom erzeugen. Davon dürften jedoch höchstens 40 TWh direkt (also zeitgleich mit der Erzeugung) genutzt werden können<sup>168</sup>, der Rest müßte (wieder mit 70 % Wirkungsgrad) zwischengespeichert werden, womit sich ein jährlicher Stromertrag von 99,5 TWh (und eine Wärmeerzeugung von ca. 35 PJ) ergibt.
- Mit dem vollen Potential (vor Abzug der Netzverluste) der Wasserkraft können weitere 25 TWh/a erzeugt werden. Außerdem fallen noch die 17,5 TWh/a aus der KWK der HDR-Anlagen und 22,5 TWh/a aus der KWK in Biomasseheizkraftwerken an.
- Damit ergibt sich insgesamt eine regenerative Strombereitstellung von ca. 250 TWh/a, d.h. es verbleibt eine Deckungslücke von ca. 200 TWh/a.

## 5.4 Regenerative Kraftstoffversorgung

### 5.4.1 Abschätzung des zukünftigen Bedarfs

Im Jahre 2000 wurden in Deutschland zum Zwecke der Fortbewegung von Menschen, Gütern oder Maschinenfahrzeugen (z.B. Bagger, Mähdrescher, usw.) eine Personenverkehrsleistung von 935,7 Mrd. Pkm (zu 79,1 % im motorisierten Individualverkehr) und eine Güterverkehrsleistung von 504,6 Mrd. tkm (zu 68,8 % auf der Straße) erbracht (UBA 2002), und dafür, neben den 14,7 TWh Strom für den Eisenbahnbetrieb, etwa 2795 PJ Kraftstoff verbraucht.

---

<sup>168</sup> Eigene Schätzung beruhend auf den Angaben in Kaltschmitt/Wiese 1997 (S.229). Alle hier gemachten Einschätzungen bzgl. der Angebots- und Nachfragefluktuation sind allerdings mit großer Unsicherheit behaftet und bedürften einer fachlichen Überprüfung.

Davon entfielen ca. 1480 PJ auf den MIV, 40 PJ auf den Öffentlichen Straßenpersonenverkehr (also v.a. Busse), 810 PJ auf LKWs, 12 PJ auf die Binnenschifffahrt, 300 PJ auf den Luftverkehr<sup>169</sup>, 30 PJ auf die Bahn und 123 PJ auf den Sektor GHD (v.a. Landwirtschaft und Militär.)<sup>170</sup>

Im Gegensatz zu der zukünftig relativ stabil bleibenden Strom- und Wärmenachfrage ist im Verkehrssektor nach Ansicht der meisten Prognosen noch mit deutlichen Zuwächsen zu rechnen. Nach dem in Kap. 2 skizzierten Referenzszenario könnte nämlich nicht nur der Bedarf an persönlicher Mobilität noch um bis zu 28 % (je Einwohner) zunehmen, wobei sich v.a. der Luftverkehr mehr als verdoppeln würde (Enquete 2002:261), auch die Güterverkehrsleistung wird, mit der weiter fortschreitenden (und sich nach Osteuropa ausdehnenden) räumlichen Arbeitsteilung und der zunehmenden Verlagerung der Lagerhaltung auf die Straße („just in time“), noch erheblich (bei einer Verdoppelung des BIP um bis zu 91 %) wachsen, wobei hier v.a. der Straßenverkehr überproportional zulegen wird. (ebd.:264) Unter den diesem Kapitel zugrundeliegenden Annahmen (10 % Bevölkerungsrückgang und gleichbleibender Produktionsumfang) und wenn man bedenkt, daß für eine solche Zunahme des Verkehrs die räumlichen Kapazitäten (und bei der langfristig zu erwartenden Verteuerung auch die finanziellen Mittel) gar nicht vorhanden sind, dürfte allerdings mit nicht mehr als 1075 Mrd. km<sup>171</sup> (+15 %) im Personen- und 655 Mrd. km (+30 %) im Güterverkehr zu rechnen sein.

Dabei ist in einem (realistischen) Effizienzscenario bei Straßenfahrzeugen langfristig nicht nur mit den (laut Referenzszenario) auch ohne besondere Maßnahmen erfolgenden Einsparungen beim Durchschnittsverbrauch<sup>172</sup> um 35 (PKWs) bzw. 25 % (LKWs/Busse) zu rechnen, sondern sogar eine Reduktion um 45 % (d.h. auf ca. 4 l Diesel bzw. 4,5 l Benzin je 100 km) bei PKWs, 30 % bei LKWs und Bussen und 20 % bei den Nutzfahrzeugen im Sektor GHD denkbar. Auch im Luftverkehr dürften sich durch technische Verbesserungen noch bis zu 30 % einsparen lassen, während die Effizienz des Bahntransports nur noch um etwa 10 (Personenfernverkehr) bis 20 % (ÖPNV/Güterverkehr) steigen wird. (ebd.:364,396ff, TAB 2002:88ff) Außerdem könnte durch eine leichte steuerliche Anhebung der (ohnehin steigenden) Kraftstoffpreise und die Einführung einer LKW-Maut die durchschnittliche Auslastung von PKWs um

---

<sup>169</sup> Der Energieverbrauch des Luftverkehrs wird i.allg. nach dem Standortprinzip berechnet, wobei der Verbrauch der aus Deutschland abgehenden internationalen Flüge bis zur ersten Zwischenlandung gewertet wird. Die Transportleistung des Luftverkehrs wird hingegen nach dem Territorialprinzip erstellt, d.h. daß nur die über deutschem Gebiet zurückgelegten Strecken gewertet werden.

<sup>170</sup> Alle Angaben (z.T. verändert) nach VDEW 2001, AG Energiebilanzen 2002, Enquete 2002:270

<sup>171</sup> nach dem Standortprinzip (im Luftverkehr) berechnet wären das dann allerdings 1200 Mrd. pkm.

<sup>172</sup> Z.B. durch Gewichtsreduktion, Verminderung des Luft- und Rollwiderstands, Energierückgewinnung und Antriebsverbesserungen (Enquete 2002:397) Mindestens ebenso wirksam wie eine Optimierung der Verbrennungsmotoren wäre auch die Verwendung von Brennstoffzellen-Antrieben, evtl. könnte der Durchschnittsverbrauch damit sogar um bis zu 10 % mehr abgesenkt werden, siehe 5.4.2.

5% und die der LKWs um 10 % gesteigert werden, wobei die dadurch erreichte Energieeinsparung bei LKWs aber zur Hälfte durch gewichtsbedingt höheren Verbrauch wieder kompensiert würde.

Eine halbwegs konsequent auf Energieeinsparung ausgerichtete Politik müßte allerdings auch berücksichtigen, daß die verschiedenen Fortbewegungsarten deutlich unterschiedliche Energieverbräuche verursachen. So verbrauchte die Bahn (incl. S-/U- u. Straßenbahnen) im Jahr 2000 für einen Pkm etwa 610 kJ (Endenergie) und für einen Tkm etwa 400 kJ und auch die Schifffahrt (180 kJ/tkm) und der öffentliche Straßenverkehr (610 kJ/pkm) haben eine recht gute Energiebilanz, während der MIV mit knapp 2000 kJ/pkm, der Straßengüterverkehr mit 2333 kJ/tkm und der Luftverkehr mit ungefähr 1750 kJ/pkm deutlich schlechter abschneiden.<sup>173</sup> Auch wenn man die o.g. Effizienzsteigerungen zugrundelegt, ergibt sich noch immer ein deutlicher Vorteil von Bus (450 kJ) und Bahn (540/320 kJ) gegenüber dem MIV (1000 kJ), den LKWs (1500 kJ) und dem Flugzeug (1225 kJ), so daß es also nicht nur aufgrund der weitaus höheren gesundheitlichen, volkswirtschaftlichen und ökologischen „Neben“kosten des Straßen- und Luftverkehrs<sup>174</sup>, sondern auch aus Effizienzgründen ratsam ist, durch entsprechende Besteuerung und Ausbauförderung einen möglichst großen Teil des Verkehrs auf Schiff, Schiene und Bus zu verlagern.<sup>175</sup> Dem stehen allerdings nicht nur politische Hemmnisse und die (z.T. allerdings behebbaren) Nachteile<sup>176</sup> des ÖPNV und Schienengüterverkehrs im Weg, auch der Ausbau der Kapazitäten des ÖPNV-, Bahn- und Schifffverkehrs ist natürlich (u.a. auch aus ökologischen Gründen) begrenzt. Es ist deswegen m.E. nicht mit einer Ausweitung der Anteile dieser Verkehrsmittel auf über 35 % (selbst das wäre schon mehr als eine Verdopplung) zu rechnen.

Damit könnte der Energieverbrauch des gesamten Verkehrs trotz der Zunahme der Verkehrsleistungen im Jahre 2050 auf etwa 900 PJ im Personenverkehr<sup>177</sup> und 700 PJ im Güterverkehr gesenkt werden, wobei davon etwa 110 PJ auf den Stromverbrauch des Schienenverkehrs entfallen. Zuzüglich des voraussichtlichen Bedarfs von etwa 100 PJ im Sektor GHD und des aufgrund der regenerativen Strom- und Wärmebereitstellung zusätzlich anfallenden Kraftstoffverbrauchs (ca. 60 PJ) ergibt sich damit ein Kraftstoffbedarf von 1550 PJ pro Jahr, das sind etwa

---

<sup>173</sup> eigene Berechnungen nach Enquete 2002, UBA 2002 und TAB 2002

<sup>174</sup> Die sog. externen Kosten des Luft- (4,8 cent/pkm), Auto- (11,3 cent/pkm) und Straßengüterverkehrs (9,6 cent/tkm) liegen z.T. erheblich über denen von Bahn (2,5 cent/pkm, 2,8 cent/tkm) und Schiff (2 cent/tkm). (Enquete 2002:386f) Der Luftverkehr gilt i.ü. im Hinblick auf eine evtl. Klimaerwärmung als besonders problematisch, da dessen Emissionen (incl. des sonst eigentlich harmlosen Wasserdampfes) in der normalen Flughöhe besonders stark treibhauswirksam sind. (IPCC 1999 zit. in Enquete 2002:401)

<sup>175</sup> Dies gilt allerdings nur bei einer Bahnstromerzeugung mit weit höheren Wirkungsgraden als heute und bei einer flexiblen Anpassung der ÖPNV-Angebote an die zeitlich und räumlich wechselnde Nachfrage (z.B. mit Kurzzügen und Minibussen). Bei heutigen Nahverkehrszügen ist der Energieverbrauch pro Person und km z.T. genauso hoch wie in einem Flugzeug (Maxeiner/Miersch 2000:284f) und ein heutiger Durchschnitts-PKW, der mit 4 Personen besetzt ist, ist z.B. auch energieeffizienter als ein durchschnittlich besetzter Zug.

<sup>176</sup> Dazu ist z.B. die begrenzte zeitliche und räumliche Abstimmbarkeit von Angebot und Nachfrage, die unzureichende Flächenerschließung, die bisher oft schlechte Kopplung mit anderen Verkehrsträgern, die unzureichende Transportmöglichkeit für private Güter (Einkauf etc.) und die mangelnde Aufenthaltsqualität zu zählen. (Hesse 1995:150ff)

<sup>177</sup> nach dem Standortprinzip, also bezogen auf 1200 Mrd. Pkm, berechnet.



45 % weniger als heute. (Falls sich der Brennstoffzellenantrieb ökonomisch durchsetzen kann und dessen angestrebten Gesamtwirkungsgrade von bis zu 60 % in der Massenfertigung realisiert werden können, könnte der Kraftstoffbedarf sogar auf 1400 PJ/a sinken.)

## 5.4.2 Kraftstoffbereitstellung

Obwohl im Inland voraussichtlich kaum Potential zur Verfügung stehen wird, um diesen Bedarf zu decken, soll nun kurz erörtert werden, welche der regenerativen Kraftstoffoptionen aus energetisch-ökologischer, ökonomischer und alltagspraktischer Sicht die beste Lösung wäre.

	ETHANOL aus Rüben	ETHANOL aus Weizen	RAPSÖL <sup>178</sup>	RME (Biodiesel)	MEOH o. H <sup>2</sup> aus	H <sup>2</sup> (MEOH) aus	FOSSIL (Benzin/Diesel)
Treibstofftertrag In GJ/ha pro Jahr	100-110	50-80	37-74	42,5-77 <sup>181</sup>	70-210	85-200000 <sup>182</sup> (60-140000 ??)	XXXX
Primärenergieaufwand in MJ/GJ <sub>Endenergie</sub> <sup>183</sup>	45-450	220	143-175	-155-350	70-200 <sup>184</sup>	50-100 (70-140 ??)	1260/1200
Treibhauspotential <sup>185</sup> i.	10-22 kg	23 kg	30-50 kg	20-55 kg	8-25 kg <sup>186</sup>	3-7 kg (4-10 ??)	87/84
Versauerungspotential in SO <sub>2</sub> -Äquiv./GJ <sup>187</sup>	485 g	>500 ?	938 g	376-480 g	65-350 g <sup>188</sup>	14-22 g (20-31,5 ??)	190/230
Eutrophierungspotential in g N/GJ <sup>189</sup>	170	>200 ?	400	210-250	20-100 <sup>190</sup>	3-4 (4-5,5 ??)	60/77
Herstellungskosten in Euro/GJ (ohne Steuern)	30	>30 ?	15-50 <sup>191</sup>	20-70 <sup>192</sup>	20-40	20-100 <sup>193</sup>	8-9

Tabelle 3: Vergleich der regenerativen Kraftstoffoptionen (eig. Zusammenstellung, z.T. eig. Berechn., nach Angaben

<sup>178</sup> Die Emissionswerte beziehen sich in der Studie Reinhardt/Zemanek auf die Nutzung in einem Traktormotor. In einem PKW mit Rapsöl-optimiertem Antrieb, z.B. einem Elsbett-Motor, dürften die Verbrauchs- und Emissionswerte z.T. erheblich besser ausfallen.

<sup>179</sup> Unter Annahme einer Bio-Methanolsynthese mit einem Wirkungsgrad von 70 %. Gegenwärtig liegt dieser allerdings noch bei 60 %. (Stucki/Biollaz 2001) Auch die direkte Wasserstoffgewinnung aus Biomasse wäre mit ähnlichen Wirkungsgraden möglich. - Im Falle der Verwendung von H<sup>2</sup> oder Methanol in BZ würden sich Verbrauchs- und Emissionswerte voraussichtlich etwas verbessern.

<sup>180</sup> Unter Annahme einer Stromerzeugung aus Wasser- und Windkraft (oder ggf. auch solarem Importstrom, siehe Kap. 6.2), einer H<sup>2</sup>-Erzeugung per Hochtemperatur-Elektrolyse mit einem Wirkungsgrad von 85 % und einer Bereitstellung als komprimiertes Gas (300 bar). Die Methanolsynthese mit Elektrolyse-H<sup>2</sup> und CO<sup>2</sup> (aus Abgasen) wird hier mit einem Gesamtwirkungsgrad von 60 % angenommen. - Im Falle der Verwendung von BZ würden sich Verbrauchs- und Emissionswerte voraussichtlich etwas verbessern.

<sup>181</sup> Der höhere Flächenenergieertrag des RME gegenüber Rapsöl resultiert aus der Beimischung von Methanol im Umesterungsprozess.

<sup>182</sup> Bei der Stromquelle Windenergie ist der Flächenenergieertrag sehr gering, bei Wasserkraft hingegen sehr hoch. Eine solarthermische Stromerzeugung in der Wüste würde (unter Berücksichtigung der Transportverluste) bei mindestens 2000 GJ/ha liegen. (Schiel/Schlaich 2001)

<sup>183</sup> Unter Gutschrift der Energieeinsparung oder Energiebereitstellung durch eventuelle Kuppel- und Nebenprodukte wie Stroh, Kraut, Schlempe, Glycerin, Rapsschrot, etc. (In einer Studie kommt es bei RME dadurch sogar zu Negativwerten, allerdings müßte die Gutschrift für Glycerin bei einer stark ausgedehnten RME-Erzeugung entfallen, da niemand so viel davon braucht.) - Bei einer teilweisen Substitution des Mineraldüngers durch Gülle wäre noch eine weitere Senkung des Energieverbrauchs (und der Emissionen) möglich.

<sup>184</sup> Die besten Werte erreichen Biogas und Grasschnitt (70-75 MJ/GJ), diese sind aber potentialseitig unbedeutend. Kurzumtriebsholz und Miscanthus (ohne Trocknung) sowie Waldrestholz/Stroh liegen bei 100-110 MJ/GJ. (Nitsch nennt für Restholz allerdings 200 MJ/GJ)

<sup>185</sup> Das Treibhauspotential errechnet sich aus den Emissionen an CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> und N<sub>2</sub>O. (Kaltschmitt/Wiese 1997:21) Dabei werden auch die Emissionen bei der Verbrennung der Kraftstoffe berücksichtigt.

<sup>186</sup> Waldrestholz/Grasschnitt 8 kg (Nitsch nennt für Restholz allerdings 25 kg), Stroh 11,5 kg, Kurzumtriebsholz & Chinaschilf (ohne Trocknung) 13 kg. (Dabei wird hier rechnerisch von denselben Emissionsmengen ausgegangen, als würde der Festbrennstoff direkt verbrannt, wahrscheinlich liegen die Emissionen bei der Methanol/H<sup>2</sup>-Erzeugung u. -nutzung aber deutlich niedriger, besonders in BZ.)

<sup>187</sup> Das Versauerungspotential errechnet sich aus den Emissionen von SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, NH<sub>3</sub> und HCl. (Kaltschmitt/Wiese 1997:22) Dabei werden auch die Emissionen bei der Verbrennung der Kraftstoffe berücksichtigt.

<sup>188</sup> Biogas ca. 80 g, Restholz 175 g, Kurzumtriebsholz 235 g, Stroh 312 g, Schilf/Grasschnitt 350 g. (Dabei s.Anm.81)

<sup>189</sup> Dabei werden auch die Emissionen bei der Verbrennung der Kraftstoffe berücksichtigt.

<sup>190</sup> Biogas ca. 20 g, Waldrestholz 70 g, Stroh 75 g, Kurzumtriebsholz 86 g, Miscanthus & Grasschnitt 100 g. (Dabei s.Anm.81)

<sup>191</sup> Die hohen Werte gelten für dezentrale Kleinanlagen.

<sup>192</sup> Siehe Anmerkung 86. Allerdings kann der Verkaufspreis wg. der Kopplung an den Dieselpreis weit höher liegen.

<sup>193</sup> Derzeit ist nur die Erzeugung von H<sup>2</sup> in Wasserkraftwerken konkurrenzfähig (20-25 Euro/GJ), langfristig sollten aber auch für mit Windkraft oder solarthermisch erzeugten H<sup>2</sup> Kosten von 20-30 Euro/GJ (incl. Transport HGÜ/Tanker) erreichbar sein. (Nitsch 2002)

aus Kaltschmitt/W. 1997, Schindler 1997, Reinhardt/Zemanek 2000, Nitsch 2002, TU München 1995, Bundestag 2001)

Dabei ist allerdings anzumerken, daß im Bereich regenerativer Antriebstechniken und Kraftstoffe z.Zt. eine unüberschaubare Vielfalt von oft widersprüchlichen und wenig verifizierten Einzeluntersuchungen existiert<sup>194</sup>, weshalb die Ergebnisse in der obigen Tabelle z.T. auch sehr breit streuen. Eine exakte Angabe des human- und ökotoxischen Potentials der verschiedenen Kraftstoffpfade war aufgrund der unklaren Datenlage z.B. überhaupt nicht möglich, hierzu kann allenfalls angemerkt werden, daß H<sup>2</sup>, und mit Abstrichen auch Methanol<sup>195</sup> und Ethanol, deutlich besser abschneiden als die klassischen Treibstoffe Benzin und Diesel (wobei die mit H<sup>2</sup> und Methanol mögliche Verwendung von Brennstoffzellen noch eine zusätzliche Emissionsminderung zur Folge hätte), während Rapsöl und RME in fast allen Studien eine deutliche Vermehrung der toxischen Verbrennungsemissionen (Dioxine, Partikel, Benzol, Aldehyde etc.) zugeschrieben wird.<sup>196</sup> (TU München 1995, Bundestag 2001, Auerbach 1992, UBA 1993)

Auch hinsichtlich der anderen ökologisch relevanten Emissionen und v.a. im Hinblick auf den Flächenbedarf wäre der Miscanthus- oder Kurzumtriebsholzanzbau (und natürlich die Restbiomassen) zum Zwecke der Vergasung (und Umwandlung zu Methanol oder H<sup>2</sup>) wohl die sinnvollere Variante, wenn man Kraftstoffe aus Biomasse herstellen will. In bezug auf den Nettoenergiegewinn und die Emissionen noch viel besser wäre allerdings eine technische Wasserstoffherzeugung, wobei aber Windstrom einen zu hohen Flächenbedarf hat, während PV-Strom (in Deutschland) zwar immerhin 350-400 MJ/m<sup>2</sup>a an Wasserstoff liefern würde, beim heutigen Stand der Technik aber noch einen zu hohen spezifischen Energiebedarf aufweist. (vgl. Kap. 5.3.2) Momentan wäre deshalb eigentlich nur die H<sup>2</sup>-Erzeugung mit Wasserkraft (oder mit solarthermisch erzeugtem Strom) eine praktikable Lösung. Für alle diese Optionen ist zwar, wie bereits erwähnt, im Inland keinerlei Potential vorhanden<sup>197</sup> bzw. ist die direkte Verwertung der jeweiligen Energiepotentiale als Strom oder Festbrennstoff vorzuziehen<sup>198</sup>, prinzipiell erscheint aber Wasserstoff als der nachhaltigste Kraftstoff-Energieträger (wobei Praktikabilität und Energiedichte eher für die Verwendung von Methanol, der zusätzliche Energieaufwand für die Methanolsynthese aber eher für die Verwendung von gasförmigem Wasserstoff sprechen).

---

<sup>194</sup> Im Verlaufe der F+E könnten sich auch noch völlig andere Möglichkeiten eröffnen, wie z.B. die photolytische Wasserstoffherzeugung, Sand/Silizium als Energiespeicher etc.

<sup>195</sup> Allerdings ist Methanol ähnlich wie Benzin schon bei geringer Aufnahme von Dämpfen oder Flüssigkeit giftig, weshalb entsprechende Sicherheitsvorkehrungen getroffen werden müssen. Auch eine lokale Grundwassergefährdung an Tankstellen ist wg. der Löslichkeit nicht auszuschließen, allerdings wird Methanol auch schnell biologisch abgebaut. (Schindler 1997:84f, Bundestag 2001:64)

<sup>196</sup> Eine weitere Komponente, die sich der exakten Bilanzierung entzog, ist der Beitrag der jeweiligen N<sup>2</sup>O-Emissionen zum stratosphärischen Ozonabbau (Reinhardt/Zemanek 2000:20ff), wobei diesem eigentlich nur beim Anbau von Energiepflanzen evtl. problematischen Nebeneffekt aber durch eine sparsame und gezielte N-Düngung und die Bevorzugung genügsamer Pflanzen (v.a. Miscanthus, Kurzumtriebsholz) begegnet werden kann.

<sup>197</sup> Für den Bedarf von 1500 PJ/a wären etwa 7.500.000 ha Miscanthusanbau nötig (mit Raps wären das sogar 25 Mio. ha), oder 200.000-300.000 1-MW starke WKA oder 7500 km<sup>2</sup> Photovoltaik (wenn man vom einem Nettoenergieertrag von 200 MJ/m<sup>2</sup> ausgeht).

---

<sup>198</sup> Denkbar ist allenfalls, den zwecks Zwischenspeicherung von Wind- und PV-Strom zwangsweise erzeugten Wasserstoff nicht „rückzuverstromen“, sondern als Kraftstoff zu nutzen. Damit würden dann zwar ca. 450 PJ/a Kraftstoff zur Verfügung stehen, dafür aber das regenerative Inlands-Stromangebot um ca. 100 TWh verringert werden (und die 60 PJ Wärme aus der Rückverstromung fehlen).

## **6. Zusätzliche Optionen: Mehr Einsparung und Energieimport**

### **6.1 Verstärkte Effizienzanstrengungen und Suffizienzmaßnahmen**

Wie aus Kap. 5 hervorgeht, wird es unter den dort angenommenen Bedingungen (leicht wachsendes Wohlstandsniveau bei leicht rückläufiger Bevölkerung und forcierter, aber wirtschaftsverträglicher Effizienzanstrengungen) wahrscheinlich nicht möglich sein, den im Jahre 2050 bestehenden Energiebedarf Deutschlands alleine mit den im Inland verfügbaren regenerativen Energiepotentialen zu decken. Am erfolgreichsten wird voraussichtlich noch der Bereich der Wärmeerzeugung umstrukturiert werden können, immerhin etwa 75 % des dort zu erwartenden Endenergiebedarfs werden wohl durch Geo- und Solarthermie sowie mit Brennstoffen aus Biomasse bereitgestellt werden können. Etwas schwieriger gestaltet sich hingegen schon die Stromversorgung per Photovoltaik, Windenergie und Wasserkraft, die wohl nicht mehr als 55 Prozent der zukünftigen Nachfrage abdecken können wird, und eine regenerative Kraftstoffherzeugung erscheint, jedenfalls angesichts der benötigten Mengen, sogar vollkommen unmöglich. Bevor nun aber die daher wohl unvermeidliche Option eines regenerativen Energieimports untersucht werden soll (in Kap. 6.2), müßte m.E. jedoch noch analysiert werden, ob diese Mangelsituation nicht mittels einer radikaleren Effizienzpolitik oder auch mit Einschränkungen des materiellen Konsumniveaus vermieden oder zumindest abgeschwächt werden kann.

Zunächst zur Raumwärme: hier sind zwar m.E. definitiv nicht mehr als die bereits veranschlagten Einsparungen von etwa 50 % realisierbar, dafür wäre es wohl aber nicht unmöglich, auf den in Kap. 5 veranschlagten 10%-igen Wohn- und Gewerbeflächenzuwachs (pro Kopf) zu verzichten. Damit würde sich der prognostizierte Endenergiebedarf für Raumwärme (und Warmwasser) schon von 1900 PJ/a auf 1710 PJ/a verringern, und selbst wenn man berücksichtigt, daß damit auch die mögliche Absatzmenge geo- und solartermischer Wärme sinkt, dürfte das eine Brennstoffeinsparung von bis zu 100 PJ/a ermöglichen.<sup>199</sup>

Beim Bedarf an Prozeßenergie, der ja v.a. vom Ausmaß der industriellen, gewerblichen und landwirtschaftlichen Produktion abhängig ist, dürfte sich hingegen noch ein größeres Effizienzpotential verwirklichen lassen, als es in Kap. 5 veranschlagt ist, wenn mittels schärferer Vorschriften und/oder stärkerer finanzieller Anreize nicht nur die einzelnen prozeß- und pro-

---

<sup>199</sup> Darüberhinaus könnte man auch noch auf die durchgängige Beheizung mancher selten genutzter Räume, auf 0,5-1°C an Raumtemperatur und auf allmorgendliche Vollbäder verzichten, das dürfte allerdings in der Summe kaum wirklich relevante Einsparungen erbringen, deswegen soll das hier nicht weiter betrachtet werden.

duktbezogenen technischen Verbesserungsmöglichkeiten vollständig umgesetzt werden, sondern im Sinne eines weiter gefaßten Effizienzverständnisses (weniger Aufwand für gleichen Nutzen) auch unpopuläre (weil für einzelne Branchen evtl. nachteilige) strukturelle Veränderungen durchgesetzt werden, wie z.B. „Downsizing“ und Verzicht auf unnötige Verpackungen, Materialsubstitutionen hin zu weniger energieintensiven Werkstoffen<sup>200</sup> oder die Verlängerung der Lebensdauer von Produkten (oder Produktionsmitteln) durch entsprechende Qualität und modulare und reparable Gestaltung (und natürlich durch bewußte Pflege und Reparaturwilligkeit seitens des Nutzers). Eine ebenfalls auf die Absenkung des industriellen Produktionsumfanges ausgerichtete Einsparmaßnahme (sowohl für den gewerblichen als auch für den privaten Konsum<sup>201</sup>) wäre auch die Intensivierung der Nutzung bestimmter Güter durch eine gemeinschaftliche Nutzung, sei es auf freundschaftlicher (z.B. Waschküche) oder auch auf kommerziell organisierter Basis (z.B. Maschinenverleih, Car-Sharing, Contracting). (Enquete 2002:585ff)

Neben der optimierten Nutzung bzw. dem sparsamen Ge- und Verbrauch materieller Güter (was i.ü. auch aus anderen Gründen, wie z.B. dem Rohstoffverbrauch und der Müllproblematik, zu befürworten ist) liegt ein weiteres, ebenfalls sehr großes Einsparpotential für den industriellen/gewerblichen Prozeßenergiebedarf aber auch im freiwilligen (bzw. durch entsprechend höhere Preise angeregten) privaten Verzicht, z.B. auf das zwanzigste elektrische Küchengerät, den dritten Fernseher, den alljährlichen Neukauf von Winter- und Sommergarderobe, fünf verschiedene Wochenzeitschriften, die Geschirrspülmaschine, das immer neueste Handy- oder Gameboymodell, usw. (Damit soll hier kein Urteil über bestimmte Tätigkeiten oder Dinge gesprochen, sondern deutlich gemacht werden, daß das Alltagsleben fast aller Menschen hierzulande ein gewisses Maß an unreflektiertem Konsum birgt, auf das ohne große Einbuße an Lebensqualität verzichtet werden könnte, vgl. Enquete 2002:612ff)

Alles in allem wäre m.E. also nicht nur ein Verzicht auf den in Kap. 5 vorausgesetzten 10 %-igen Wohlstandszuwachs (pro Kopf), sondern sogar ein 10 %-iger Minderkonsum an industriellen/gewerblichen Produkten gegenüber heute denkbar<sup>202</sup>, weitere 5 % Energieeinsparung dürften sich zudem durch die oben angesprochene verschärfte und ausgeweitete Effizienzstra-

---

<sup>200</sup> Hier ist v.a. der Einsatz von Primär-Aluminium aus energetischen Gründen abzulehnen (obwohl diese Ersparnis dann v.a. im Ausland anfällt) aber auch die meisten anderen Werkstoffe (Papier, Glas, Stahl, usw.) sind als Recyclingprodukt deutlich weniger energieaufwendig. (Enquete 2002:589ff)

<sup>201</sup> Diese Strategie wird allerdings im privaten Bereich auf starke psychologische Hindernisse stoßen (Image, Freude am Eigentum, Zugriffsgewißheit, Unzuverlässigkeit der Mitnutzer, etc.) und auch seitens der Wirtschaft wohl kaum gefördert werden.

<sup>202</sup> Allerdings dürfte dies nicht durch einen Zuwachs an Exporten kompensiert werden und v.a. müßte dem daraus resultierenden zusätzlichen Stellenabbau durch eine gerechte Umverteilung der verbleibenden Arbeit und eine radikale Umgestaltung der Sozialsysteme begegnet werden. (Dies wird mit der zunehmenden Automatisierung der Produktion aber ohnehin notwendig werden.)

tegie realisieren lassen. Damit ließe sich der gewerbliche Prozeßwärmebedarf von 1480 PJ/a (Endenergie) auf 1110 PJ/a verringern, womit bis zu 300 PJ/a an Brennstoff eingespart würden, und auch der Stromverbrauch in Industrie und Gewerbe würde um ca. 60 TWh/a<sup>203</sup> sinken.

Auch für die Absenkung des privaten Stromverbrauches wäre der (zumindest zeitweilige, z.B. durch höhere Energiepreise motivierte) Verzicht auf manche elektrische Geräte übrigens nicht ganz unbedeutend, wenn man z.B. statt eines Wäschetrockners auch mal eine Leine benutzt oder die Einfahrt nicht wöchentlich mit dem Hochdruckstrahler reinigt. Etwa 5 % Einschränkung (gegenüber heute) beim privaten Verbrauch würden dann, zusammen mit dem Verzicht auf den 10 %-igen Mehrverbrauch an Strom, und mit weiteren 10 % Einsparung durch die oben angesprochene verstärkte Effizienzpolitik (also v.a. durch noch sparsamere Geräte) eine Stromeinsparung von weiteren 40 TWh/a<sup>204</sup> ermöglichen.

Das hier vorgeschlagene leichte Zurückfahren der industriellen Produktion würde natürlich auch im Bereich Mobilität/Transport einen verringerten Bedarf an Energie zur Folge haben (vielleicht 100 PJ), in diesem Bedarfsfeld lassen sich aber noch weit größere Einsparungen erzielen, u.a. durch eine verschärfte Effizienzstrategie. Mit spezieller Leichtbauweise (Kohlefasern), allgemeinem „Downsizing“ und einem Verzicht auf überdimensionierte Motorleistungen (für das Durchschnittstempo in der Stadt würden schon 15-30 PS völlig ausreichen) könnte der durchschnittliche Verbrauch von PKWs zum Beispiel schon in der nächsten Fahrzeuggeneration auf 1-3 l/100 km gesenkt werden (damit wäre dann eine zusätzliche Einsparung von ca. 250 PJ/a gegenüber dem Szenario in Kap.5 denkbar), wenn auch im Landstraßen- und Autobahnverkehr eine weniger auf Spitzengeschwindigkeiten ausgerichtete Verkehrskultur gefördert würde, u.a. auch mit einem allgemeinen Tempolimit.<sup>205</sup> (Seifried 1991b:27,75,138f)

Neben einer solchen Entschleunigung (die sich i.ü. auch hinsichtlich Verkehrslärm, Unfallschäden und Streßbelastung der Verkehrsteilnehmer positiv auswirken würde) besteht eine weitere Möglichkeit Energie zu sparen, ohne auf Mobilität zu verzichten, in der unmotorisierten Fortbewegung, es ist ja eine seit langem bekannte Tatsache, daß von den zurückgelegten Entfernungen her (1-10 km) theoretisch die Hälfte aller mit dem Auto gefahrenen Kilometer auch zu Fuß oder mit dem Fahrrad bewältigt werden könnte. (ebd.:99) Zwar ist aufgrund von Wetter-

---

<sup>203</sup> incl. der durch den geringeren Stromverbrauch ebenfalls vermiedenen Netzverluste von ca. 3 TWh/a.

<sup>204</sup> incl. der durch den geringeren Stromverbrauch ebenfalls vermiedenen Netzverluste von ca. 2 TWh/a.

<sup>205</sup> Ein PKW, der bei 60 km/h 7 l Benzin auf 100 km verbraucht, benötigt 14 l/100 km, wenn er 150 km/h fährt. (Seifried 1991b:78) Allein der Einspareffekt eines allgemeinen Tempolimits (80/120 km/h) wird mit 5 % angegeben. (TAB 2002:51) Der Zusammenhang Tempo-Energieverbrauch gilt i.ü. auch für die Bahn, weshalb man vielleicht nicht jede Strecke mit 250 km/h befahren sollte und auch im Flugverkehr bietet sich mit der wiederbelebten Luftschiff-Technologie evtl. ein zusätzliches Einsparpotential.

bedingungen, unterschiedlicher Fitneß und der begrenzten Warenmitnahmemöglichkeit eine vollständige Ausnutzung dieses Einsparpotentials unrealistisch, mit technischen Innovationen, wie z.B. Kabinenfahrrädern (evtl. auch mit einem kleinem Motor ausgestattet), die nicht nur einen Wetterschutz und mehr Transportraum als ein normales Fahrrad bieten, sondern auch den Luftwiderstand und damit die erforderliche Anstrengung bedeutend verringern, könnte der Verzicht auf den PKW aber noch deutlich erleichtert werden. (Lehmann/Reetz 1995:217)

Noch wichtiger für die Verringerung motorisierter Fortbewegung, bzw. für die Vermeidung von Verkehr generell, wäre allerdings die Wiederherstellung bzw. Neuschaffung verkehrsarmer Raumstrukturen, die aber weit über die baulich-planerische Raumgestaltung (kurze Wege zwischen Wohnen, Freizeit, Einkauf und Arbeit) hinaus auch eine weitgehende Reorganisation der räumlichen Verteilung ökonomischer Prozesse erfordern würde (unterstützt durch eine deutliche Verteuerung des LKW-Transportes), und das betrifft nicht nur solche drastischen Fehlentwicklungen wie 1000 Kilometer weit transportierter Joghurt (oder sogar Biomilch), Butter aus Irland, Türverkleidungen aus Portugal, Mineralwasser aus Frankreich usw., sondern die gesamte (und noch immer eher zunehmende) räumliche Arbeitsteilung innerhalb der gewerblichen Produktionsabläufe. (Hesse 1995:107ff, BUND/Misereor 1996:162ff) Weniger eine Frage der räumlichen Organisation als eine des freiwilligen Verzichts (bzw. ökologisch „wahrer“ Preise) ist hingegen der winterliche Import von frischen Erdbeeren oder Schnittblumen per Flugzeug, und auch der momentan stark zunehmende Flugtourismus ist wohl eher eine auf zu niedrigen Preisen beruhende Angewohnheit als ein unersetzbares Grundbedürfnis.

M.E. ließe sich mit all diesen Maßnahmen (mehr unmotorisierte Fortbewegung, ein leichter Rückgang beim Konsum transportintensiver Produkte, verkehrsvermeidende Stadtstrukturen und mehr regionalisierte wirtschaftsräumliche Verflechtungen) nicht nur der in Kap. 5 prognostizierte 15 bzw. 30%-ige Verkehrszuwachs vermeiden, sondern sogar noch eine zusätzliche Verminderung des Verkehrsbedarfs um 5 % erreichen, womit dann zwar nur noch 200 PJ/a mit der oben angesprochenen zusätzlichen Verbesserung der PKW-Antriebseffizienz eingespart werden könnten, dafür aber weitere 300 PJ/a an Kraftstoffverbrauch vermieden würden.

Insgesamt würde eine konsequente Umsetzung all dieser zusätzlichen Effizienz- und Suffizienzoptionen (sofern man diese denn umsetzen will bzw. dies politisch durchsetzen kann) es also ermöglichen, daß sich der jährliche Endenergiebedarf Deutschlands von etwa 6500 PJ auf 5200 PJ verringern würde, und damit der die inländischen regenerativen Ressourcen überstei-



gende Brennstoffbedarf im Bereich Wärme auf 400 PJ/a, der das regenerative Angebot übersteigende Strombedarf auf 100 TWh/a und der Kraftstoffbedarf auf ca. 950 PJ/a sinken würde

## **6.2 Der Import regenerativer Energie**

Abgesehen davon, daß es wahrscheinlich halbwegs dauerhaft möglich und ökologisch nicht allzu problematisch wäre, zumindest einen Teil des restlichen Brennstoffbedarfs von 400 PJ/a aus den heimischen Stein- und Braunkohlereserven Deutschlands von über 1 Million PJ (BMWi 2002:49) abzudecken, wird in einem nicht-fossilen Energieversorgungsszenario für Deutschland also voraussichtlich ein Bedarf am Import zusätzlicher regenerativer Energie bestehen, der pro Jahr mindestens 100 TWh Strom und 950 PJ Kraftstoff betragen wird. Hierfür bietet sich, neben einem bisher allerdings noch nicht mengenmäßig abgeschätzten und ökobilanziell bewerteten Import überschüssiger Biomasseenergieangebote (evtl. in Form von Methanol), z.B. aus Kanada oder Sibirien, und einem relativ geringen Ausbaupotential norwegischer Wasserkraft von ca. 60 TWh/a (nach ODIN 1999 zit. in Nitsch 2000:20), v.a. der Import von solar erzeugtem Strom (und/oder Wasserstoff) aus südeuropäischen, nordafrikanischen und arabischen Ländern an, da aus der dortigen intensiven Sonneneinstrahlung, besonders in Verbindung mit den in Wüstengebieten vorhandenen riesigen Freiflächen, ein enormes regeneratives Energieangebot resultiert, das den dort bestehenden Bedarf bei weitem überschreitet.<sup>206</sup>

Die Gewinnung dieser solaren Energie würde (jedenfalls beim heutigen Stand der Technik) aber nicht photovoltaisch, sondern solarthermisch erfolgen, da dies sehr viel kostengünstiger und auch mit weit weniger Material- und Energieeinsatz verbunden ist<sup>207</sup>. Hierfür existieren im wesentlichen vier Technologien: Solarturm- und Parabolrinnenkraftwerke, Dish-Stirling/Brayton-Systeme und Aufwindkraftwerke. Die ersten drei Varianten beruhen dabei auf der Konzentration der Sonneneinstrahlung durch (nachführbare) Spiegel, wobei im Solarturmkraftwerk die Wärmeaufnahme in einem einzigen großen, in der Mitte des Spiegelfeldes stehenden Receiver (gefüllt mit Salzschnmelze oder Luft) erfolgt, während beim Parabolrinnensystem die Strahlungsenergie auf ein direkt an den Spiegeln entlanglaufendes Rohr (gefüllt mit Öl oder Wasser) und beim Dish-Stirling-System auf viele einzelne, im Brennpunkt der jeweiligen Paraboloid-Spiegel befestigte Receiver (gefüllt mit Gas, Flüssigmetall oder Luft) konzentriert wird. Mit den erhitzten Wärmeträgermedien wird dann per Gas- oder Dampfturbine bzw. Stirlingmotor

---

<sup>206</sup> Rein rechnerisch könnte z.B. allein Saudi-Arabien den heutigen Weltprimärenergiebedarf mit Solarenergie zu 25 % abdecken (Kleemann/Meliß 1993:188) und bereits 1 % des in Nordafrika nutzbaren technischen Potentials (1.360.000 TWh/a) würden ausreichen, um den gesamten heutigen Weltstrombedarf (14.700 TWh/a) sicherzustellen (Nitsch 2000:20).

<sup>207</sup> Ein weiterer, bedeutender Vorteil der solarthermischen Stromerzeugung liegt darin, daß durch die zusätzliche Speicherung von Wärme auch in der Nacht durchgängig Strom erzeugt werden kann. (Nitsch 1990:75f)

Strom erzeugt. Im Gegensatz dazu funktionieren Aufwindkraftwerke, indem die unter einem sehr großen Glasdach (bis 20 km<sup>2</sup>) erwärmte Luft in einem zentral stehenden Turm von bis zu

1000 m Höhe aufsteigt und dabei eine Windturbine antreibt. (Kaltschmitt/Wiese 1997:467ff)

Allein in Spanien, Portugal, Italien und Griechenland könnten nach einer Studie des DLR von 1992 (zit. in Lehmann/Reetz 1995:124f) 1400 TWh/a Strom solarthermisch erzeugt werden (das sind ca. 43 % der heutigen Nettostromerzeugung in ganz Europa), weshalb anzunehmen ist (allerdings unter der Voraussetzung, daß auch die südeuropäischen Photovoltaik-, Wasserkraft- und Windenergiepotentiale voll genutzt werden), daß selbst bei einem in den betreffenden Ländern zukünftig noch zunehmenden und vollständig regenerativ abzudeckenden Strom- (und Kraftstoff)verbrauch exportierbare Stromüberschüsse (v.a. in Spanien) bestehen werden.

Damit dürfte die Bereitstellung von zusätzlichen 100 TWh/a Regenerativ-Strom in Deutschland evtl. schon mit Transfers aus Südeuropa lösbar sein, für den Import der für Transport und Verkehr benötigten Energie wird Deutschland (zusammen mit einigen anderen mitteleuropäischen Industrieländern) allerdings auf die außereuropäischen Energieangebote angewiesen sein, wobei der Import der solaren Energie entweder in Form flüssigen Wasserstoffs in Tankern (Energieverlust bei Verflüssigung, Transport und Weiterverteilung: 30-35 %), als gasförmiger Wasserstoff per Tanker und/oder Pipeline (Energieverlust durch Komprimierung und Transport: 15 %) oder aber in Form von Strom (Energieverlust bei der Hochspannungsgleichstrom-Übertragung: 10 bis 15 %), der dann mehr oder weniger dezentral zur Erzeugung von Wasserstoff (oder auch Methanol, vgl. Kap. 5.4) genutzt werden könnte, erfolgen kann<sup>208</sup>. (Nitsch 2002) Beim Transport als Strom oder als Gas wäre für die Bereitstellung von 950 PJ/a Kraftstoff (in Form gasförmigen Wasserstoffs) eine Erzeugung von ca. 375 TWh/a Strom (in 1000-2000 solarthermischen Kraftwerken bzw. auf einer Fläche von ca. 2000 km<sup>2</sup>) erforderlich.

Die Erzeugungskosten des solarthermischen Importstroms betragen zur Zeit noch ca. 15 cent pro kWh, könnten nach Meinung der Fachleute langfristig aber auf 5-7 cent sinken (Berliner Zeitung 22.10.2002), zzgl. der Transportkosten (nach Nitsch 2002 1,5-2 cent/kWh) würde dies dann Stromgestehungskosten von 6,5-9 cent/kWh bedeuten. Der mit diesem Strom erzeugte Wasserstoff würde dann 3-4 cent/MJ kosten, was (ohne Steuern) einem Benzinpreis von 0,90 bis 1,20 Euro je Liter entspräche. (Nitsch 2002) Hierbei wird allerdings nicht berücksichtigt, daß die Flächenpreise in den Erzeugerländern bei der zu erwartenden Nachfrage stark steigen werden, daher ist m.E. doch mit etwas höheren Strom- bzw. Wasserstoffkosten zu rechnen.

---

<sup>208</sup> Logistisch einfacher und weniger anfällig wäre ein per Tanker durchführbarer Wasserstoffimport in Form von Methanol, die hierfür benötigten größeren Mengen an CO<sup>2</sup> aus Biomasse oder Verbrennungsabgasen stehen in den betreffenden Regionen jedoch nicht zur

---

Verfügung und die Gewinnung des CO<sup>2</sup> aus der Luft ist beim gegenwärtigen Stand der Technik zu aufwendig und energetisch ineffizient.

## 7. Zusammenfassung und Fazit

Obwohl die in dieser Arbeit gemachten Abschätzungen bzgl. der regenerativen Energiepotentiale, möglicher Einspareffekte und zukünftigen Verbrauchsentwicklungen sicherlich nicht sehr exakt sind und z.T. auf strittigen technischen, ökonomischen oder ökologischen Annahmen beruhen, kann aus den hier entwickelten Energieversorgungsszenarien m.E. doch zumindest abgeleitet werden, daß eine ökologisch und sozial verträgliche und (fast) vollständig auf erneuerbaren Energien basierende Energieversorgung Deutschlands technisch machbar und auch wirtschaftlich tragbar ist und sogar relativ weitgehend auf regionaler Basis möglich sein wird. Die Erfüllung der Nachhaltigkeitskriterien durch ein regeneratives Energiesystem ist allerdings keine Selbstverständlichkeit, sondern bedarf in allen Phasen der Etablierung desselben einer Berücksichtigung ökologischer und sozialer Belange, und v.a. wird es nötig sein, anhand einer (regelmäßig zu erneuernden) übergreifenden Gesamtschau (wie sie hier versucht wurde) ein Rahmenkonzept zu entwerfen, an dem sich die einzelnen wirtschaftlichen und institutionellen (Forschung & Entwicklung, Wirtschafts- und Umweltverbände, Regierung & Verwaltung) Akteure orientieren können bzw. müssen, damit die Erschließung des (zumindest im Inland doch eher begrenzten) regenerativen Potentials nicht durch interessengeleitete Aktivitäten oder falsche Steuerungsimpulse ineffizient erfolgt oder gar strukturell behindert wird.

Im Bereich Wärmeversorgung wird es z.B. nicht nur von Vorteil sein, die F&E-Anstrengungen bei der HDR-Technologie zu verstärken und die staatliche Förderung der Solarthermie deutlich zu intensivieren, es muß v.a. auch die Bau- und Architekturbranche sowie die Stadt- und Flächenplanung auf eine (möglichst in Nahwärmesystemen erfolgende) Nutzung der solar- und tiefengeothermischen Energiepotentiale (und gleichzeitig natürlich auf eine Minimierung des Heizbedarfs) ausgerichtet werden. Erst an zweiter Stelle steht dann die Erschließung des Biomassepotentials für die restliche Wärmeversorgung (wobei hier v.a. der bislang immer noch stark vernachlässigte Kurzumtriebsplantagenbau und auch die Forstholznutzung gefördert werden müßten, während die Konzepte der Reststroh- und Altholznutzung eher noch einmal überprüft werden sollten<sup>209</sup>) und völlig nachrangig sollte schließlich die Wärmebereitstellung per Wärmepumpe behandelt werden (weshalb z.B. der undifferenzierten Verbreitung und Förderung dieser Technologie durch einige EVUs rechtzeitig entgegengetreten werden muß).

---

<sup>209</sup> Nicht nur aufgrund der bei Stroh und Altholz besonders großen Schadstoffproblematik, sondern v.a. weil die bestehenden Stroh- und Altholzheizwerke aufgrund zu großer Dimensionierung (was i.ü. auch ein lokales Verkehrs- und Lärmproblem darstellen kann), potentiell ungünstiger Platzierung oder einfach aufgrund der besseren Preise z.T. Brennstoff aus anderen Bundesländern oder gar aus dem Ausland (z.B. Stroh aus Dänemark) importieren.

Bei der Stromversorgung wird es m.E. am wichtigsten sein, durch verstärkte Forschungsanstrengungen die Energieeffizienz und Wirtschaftlichkeit der Photovoltaik-Technologie zu verbessern, da diese ansonsten nicht als nachhaltig gelten kann. Des weiteren bedarf es dringend einer Überarbeitung des EEG, zum einen in bezug auf die (im Hinblick auf deren begrenztes Potential m.E. völlig unsinnige) Förderung der Biomasseverstromung<sup>210</sup> und zum anderen hinsichtlich des für einen ökologisch und sozial verträglichen Ausbau m.E. nicht ausreichend in soziale und regionale Kontexte eingebetteten Förderungsmechanismus in Sachen Windenergie auf dem Festland. Im Hinblick auf das sehr begrenzte Potential der innerdeutschen Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien wird es darüberhinaus von großer Bedeutung sein, alle erdenklichen Effizienzpotentiale beim Stromverbrauch auch gegen die Widerstände von EVUs und Industrie zu erschließen, denn je weniger REG-Strom importiert werden muß, desto eher können nicht-nachhaltige Übernutzungen anderer Regionen vermieden werden.<sup>211</sup>

Kaum absehbar ist derzeit die Entwicklung im Bereich Kraftstoffversorgung. Zwar kann man aus energetisch-ökologischer Sicht feststellen, daß diese in Deutschland eher nicht mit Pflanzenöl oder Ethanol, sondern mit Wasserstoff erfolgen sollte, ob dieser aber nun in Form von Methanol oder als Gas, in Verbrennungsmotoren oder Brennstoffzellen eingesetzt wird und ob er aus Biomasse oder mittels regenerativem Strom erzeugt werden sollte, ist weder aufgrund von Nachhaltigkeitskriterien eindeutig zu entscheiden, noch läßt sich beurteilen, welche Variante sich technisch-ökonomisch letztlich durchsetzen wird. Mit großer Wahrscheinlichkeit wird Deutschland dabei aber nicht um den v.a. im Hinblick auf soziale und ökonomische Nachhaltigkeit eher kritisch zu bewertenden, großtechnisch organisierten Energieimport aus dem außereuropäischen Raum herkommen, weshalb beim Aufbau dieser Strukturen zumindest darauf geachtet werden sollte, daß sich die heutigen, politisch-ökonomisch problematischen Machtkonstellationen in der Mineralölwirtschaft nicht in einer Wasserstoff- oder Methanolwirtschaft nahtlos fortsetzen. Außerdem gilt, wie beim Strom, daß alle erdenklichen Einsparpotentiale genutzt werden sollten, um das Ausmaß der Energieimporte möglichst gering zu halten. Angesichts der Aussichtslosigkeit, Deutschland dezentral und regional mit Biomassetreibstoffen zu versorgen und auch aus Effizienzgründen, ergibt sich i.ü. auch die Notwendigkeit, die v.a. von der Landwirtschaftslobby derzeit forcierte Biodieselproduktion wieder zurückzufahren, um die entsprechenden Flächen für den Miscanthus- oder Kurzumtriebsholzanbau freizusetzen.

---

<sup>210</sup> Besonders da die geltenden Regelungen v.a. Großkraftwerke mit 10-20 MW fördern und überdies eine Kraft-Wärme-Kopplung durch ungeeignete technische Vorgaben eher verhindern (DLR/IfEU/WI 2001:48ff)

<sup>211</sup> Für eine genaue Beurteilung des europa- bzw. des weltweiten Potentials an erneuerbaren Energien sind allerdings, wie bereits erwähnt, noch entsprechende Untersuchungen erforderlich, meiner Einschätzung nach dürften im Raum Europa allerdings nirgends sehr große Überschüsse anfallen, so daß die zukünftige Stromversorgung vornehmlich auf den nationalen Potentialen aufbauen sollte, wenn man sich nicht auch in diesem Bereich von großtechnischer, interkontinentaler Energiewirtschaft abhängig machen will.

Die gegenwärtige Energiepolitik ist aber nicht nur wegen dieser hier angesprochenen diversen kleineren Mängel und Konzeptdefizite in den Instrumenten und Strategien zur Förderung erneuerbarer Energien zu kritisieren, vielmehr ist es wohl die fehlende Entschlossenheit, wirklich einen vollständigen Ausstieg aus der fossil-atomaren Energieversorgung anzustreben bzw. die auch innerhalb des Regierungsapparates auftretenden Widerstände gegen ein solches Vorhaben, die derzeit daran zweifeln lassen, ob die hierfür nötigen Strukturen in den nächsten 50 Jahren aufgebaut werden können. Dabei sind es nicht nur diverse hemmende rechtliche Rahmenbedingungen, sondern z.B. auch die Unbeständigkeiten (z.B. plötzliche Fördermittelstreichungen) und die z.T. viel zu kurzfristige Bindung des Gesetzgebers (fehlende Nachfolgeregelungen) in den staatlichen Förderprogrammen, die ungenügende Planungssicherheit und damit geringe Investitionstätigkeiten zur Folge haben (DLR/IfEU/WI 2001:32), vor allem aber sind die derzeit zur Förderung der regenerativen Energien bereitgestellten Mittel insgesamt noch viel zu gering, besonders wenn man sie mit der Höhe der Subventionen vergleicht, die nach wie vor in den Kohlebergbau oder die Atomindustrie fließen. Im Hinblick auf die Schaffung nachhaltiger Strukturen in der Energieversorgung kritisch zu bewerten ist i.ü. auch die gegenwärtige Liberalisierung der Energiewirtschaft (die nicht nur Gefahr läuft, die Energieversorgung noch weiter von ihrer regionalen und sozialen Basis zu entkoppeln, sondern die Anstrengungen zugunsten regenerativer Energien mit der Ermöglichung von Billigatomstromimporten geradezu konterkariert) und auch die deutsche Umweltpolitik ist noch weit von einer konsequenten Nachhaltigkeitsorientierung entfernt, wie man u.a. an der für wirksame Lenkungsimpulse viel zu niedrigen (und nach 4 Jahren schon wieder eingefrorenen) „Ökosteuer“ oder an der noch immer völlig unveränderten Verkehrspolitik (ungebremster Straßenausbau, unzureichende Förderung des ÖPNV- und Bahnverkehrs, keine Besteuerung des Flugverkehrs, usw.) sehen kann.

Es bleibt zu hoffen, daß sich die Notwendigkeit eines tiefgreifenden Wandels in unserer heutigen Lebens- und Wirtschaftsweise, und dabei v.a. im Umgang mit Energie, im gesellschaftlichen Bewußtsein noch durchsetzen kann, bevor akute Krisen dies erzwingen. Angesichts der gegenwärtigen (nicht nur in Deutschland) kaum als nachhaltig zu bezeichnenden Gesamtpolitik muß allerdings befürchtet werden, daß die bestehenden, in funktional spezialisierte Verwaltungsbürokratien zersplitterten und in jahrzehntelang gewachsene Besitzstände und Klientelinteressen eingebundenen politischen Steuerungsmechanismen für diesen Prozeß nicht mehr geeignet sind (vgl. z.B. Summerer 1995, Scheer 1998:186f), weshalb es in Zukunft um so mehr darauf ankommen wird, alternative und nachhaltige Lösungsansätze aus der sog. „Zivilgesellschaft“ heraus (zusammen mit handlungswilligen Akteuren aus der Wirtschaft) zu entwickeln.

# **Anhang**



## Energieeinheiten und Umrechnungsfaktoren

Vorsätze:

Kilo	k	$10^3$	=	Tausend
Mega	M	$10^6$	=	Million
Giga	G	$10^9$	=	Milliarde
Tera	T	$10^{12}$	=	Billion
Peta	P	$10^{15}$	=	Billiarde
Exa	E	$10^{18}$	=	Trillion

Umrechnungsfaktoren:

## **Literatur**

AG Energiebilanzen, „Auswertungstabellen zur Energiebilanz für die Bundesrepublik Deutschland 1990 - 2000“ (Stand: September 2002), Berlin/Köln 2002

ARGE Solarwirtschaft, „Solarenergie - Fakten, Perspektiven“, 2002 ([www.dfs.solarfirmen.de](http://www.dfs.solarfirmen.de))

Auerbach, Andreas, „Nachwachsende Rohstoffe als regenerative Energieträger am Beispiel Raps“, Münster/Hamburg 1992

Berliner Zeitung vom 13.8.2002, 15.8.2002 und 22.10.2002

Biomasse-Informations-Zentrum (BIZ), „Basisdaten Bio-Energie Deutschland“, Stuttgart 2001

Bode, Thilo, „Zukunftsgestaltung ohne Wirtschaftswachstum ?“, Beitrag zum Workshop „Nachhaltiges Wirtschaften“ 1997 in Hamburg ([www.greenpeace.de](http://www.greenpeace.de))

Brauch, Hans Günter, „Energiepolitik im Zeichen der Klimapolitik beim Übergang zum 21. Jahrhundert“, in: Brauch, Hans Günter, „Energiepolitik“, Berlin/Heidelberg/New York 1997

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), „Klimaschutz durch Nutzung erneuerbarer Energien“, Stuttgart 1999

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), „Nationales Klimaschutzprogramm“, Berlin 2000 (a)

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), „Erneuerbare Energien und nachhaltige Entwicklung“, Berlin 2000 (b)

- Bundesministerium für Verbraucherschutz, Landwirtschaft und Forsten (BML), „Daten und Fakten 2000“, Berlin 2000 ([www.verbraucherministerium.de](http://www.verbraucherministerium.de))
- Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMW), „Nachhaltige Energiepolitik für eine zukunftsfähige Energieversorgung“, Berlin 2001
- Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMW), „Reserven, Ressourcen und Verfügbarkeit von Energierohstoffen“, Bornheim 1999
- Bundesregierung, Deutsche, „Perspektiven für Deutschland - Unsere Strategie für eine nachhaltige Entwicklung“, Berlin 2002
- Bundestag, Deutscher, „Bericht des Ausschusses für Bildung, Forschung und Technikfolgenabschätzung - TA Projekt Brennstoffzellentechnologie“, Berlin 2001
- Bundesverband Windenergie, „Ein Quartal voller Highlights“, Pressemitteilung 2002
- BUND/Misereor (Hrsg.), „Zukunftsfähiges Deutschland - Ein Beitrag zu einer global nachhaltigen Entwicklung“, Basel/Boston/Berlin 1996 (4. Auflage 1997)
- Busch-Lüty, Christiane, „Nachhaltigkeit als Leitbild des Wirtschaftens“ in: Busch-Lüty, Dürr, Langer (Hrsg.), „Ökologisch nachhaltige Entwicklung von Regionen“, Politische Ökologie Sonderheft 4, 1992
- Büttner, Sebastian, „Solare Wasserstoffwirtschaft - Voreinschätzung ihrer Grenzen und Möglichkeiten“, Berlin 1990
- Calder, Nigel, „Die launische Sonne widerlegt Klimatheorien“, Wiesbaden 1997
- Centrale Marketing-Gesellschaft der deutschen Agrarwirtschaft mbH (CMA), „Biomasse - nachwachsende Energie aus Land- und Forstwirtschaft“, 2.Auflage, Bonn 1997
- Conrad, Jobst, „Grundsätzliche Überlegungen zu einer nachhaltigen Energieversorgung“, in: Nutinger (Hrsg.), „Nachhaltige Wirtschaftsweise und Energieversorgung - Konzepte, Bedingungen, Ansatzpunkte“, Marburg 1995

- DLR-Institut für Technische Thermodynamik, Institut für Energie und Umweltforschung, Wuppertal Institut für Klima, Umwelt und Energie (DLR/IfEU/WI), „Ökologisch optimierter Ausbau der Nutzung erneuerbarer Energien“, Stuttgart/Heidelberg/Wuppertal 2001
- Enquete-Kommission „Nachhaltige Energieversorgung unter den Bedingungen der Globalisierung und Liberalisierung“, Bericht, Berlin 2002
- Enquete-Kommission „Schutz der Erdatmosphäre“, „Mehr Zukunft für die Erde“, Bonn 1995
- Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR), „Heizen mit Holz - Ein Überblick zu Heizungsvarianten für den privaten Kleinverbraucher“, Gülzow 2001
- Hagedorn, Gerd, „Kumulierter Energieverbrauch und Erntefaktoren von Photovoltaik-Systemen“, in: Erneuerbare Energie 4/1994 (www.aee.de)
- Hänel, Mirko, „Regionale Energiekonzepte - Möglicher Einstieg in eine nachhaltige Energieversorgung“, Diplomarbeit TU Berlin, 1998
- Harlacher, Hans-Burkhard, „Energietechnik der Wasserkraftnutzung: Globales und nationales Potential der Hydroenergie“ in: Brauch, Hans Günter, „Energiepolitik“, Berlin/Heidelberg/New York 1997
- Hauff, Volker (Hrsg.), „Unsere gemeinsame Zukunft - Der Brundtland-Bericht der Weltkommission für Umwelt und Entwicklung“, Greven 1987
- Hein, Dietmar/ Steer, Thomas, „Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen“, in: CMA, „Biomasse - nachwachsende Energie aus Land- und Forstwirtschaft“, 2.Auflage, Bonn 1997
- Heinloth, Klaus, „Die Energiefrage - Bedarf, Potentiale, Nutzung, Risiko und Kosten“, Braunschweig/Wiesbaden 1997
- Hennicke, Peter u.a., „Die Energiewende ist möglich - Für eine neue Energiepolitik der Kommunen“, Frankfurt a.M. 1985

- Hesse, Markus, „Verkehrswende - Ökologisch-ökonomische Perspektiven für Stadt und Region“, 2. Auflage, Marburg 1995
- Huber, Joseph, „Allgemeine Umweltsoziologie“, Wiesbaden 2001
- Huber, Joseph, „Nachhaltige Entwicklung durch Suffizienz, Effizienz und Konsistenz“, in: Fritz, Huber, Levi, „Nachhaltigkeit in naturwissenschaftlicher und sozialwissenschaftlicher Perspektive“, Stuttgart 1995
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), „3rd Assessment Report - Summary for Policy-Makers“, 2001
- International Energy Agency (IEA), „Energy Balances of OECD Countries“, Paris 2001
- Kaltschmitt, Martin/ Hartmann, H. (Hrsg.), „Energie aus Biomasse - Grundlagen, Techniken und Verfahren“, Berlin/Heidelberg/New York 2001
- Kaltschmitt, Martin/ Wiese, Andreas (Hrsg.), „Erneuerbare Energien - Systemtechnik, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte“, 2. Auflage, Berlin/Heidelberg 1997
- Kleemann, Manfred/ Meliß, Michael, „Regenerative Energiequellen“, 2. Auflage, Berlin/Heidelberg/New York 1993
- Kristof, Kora, „Dezentralisierung in der Elektrizitätswirtschaft“, Frankfurt a.M./New York 1992
- Kujath, Hans Joachim, „Räumliche Modelle eines nachhaltigen Ressourcenmanagements in Berlin und Brandenburg“, in: Akademie für Raumforschung und Landesplanung, „Nachhaltige Raumentwicklung - Szenarien und Perspektiven für Berlin-Brandenburg“, Hannover 1998
- Lehmann, Harry/ Reetz, Torsten, „Zukunftsperspektiven - Strategien einer neuen Energiepolitik“, Berlin/Basel/ Boston 1995
- Luther, Joachim, „Solares Bauen heute - auf dem Weg zu zukunftsfähigen Wohn- und Bürogebäuden“ in: Langniß, Pehnt (Hrsg.), „Energie im Wandel - Politik, Technik und Szenarien einer nachhaltigen Energiewirtschaft“, Berlin/New York 2001

- Massarrat, Mohssen, „Das Dilemma der ökologischen Steuerreform“, Marburg 1998
- Maxeiner, Dirk/ Miersch, Michael, „Lexikon der Öko-Irrtümer“, München. 2000
- Molly, Jens Peter/ Ender, Carsten., „Windenergie Studie 2002 - Markteinschätzung der Windindustrie bis 2010“, Wilhelmshaven 2002
- Nentwig, Wolfgang, „Humanökologie“, Berlin/Heidelberg/New York 1995
- Nitsch, Joachim, „Die Rolle der regenerativen Energien in der Zukunft“, Vortrag auf der Tagung „Regenerative Energien“, Hotel Adlon, Berlin 2001
- Nitsch, Joachim, „Potentiale der Wasserstoffwirtschaft“, Stuttgart 2002
- Nitsch, Joachim / Luther, Joachim , „Energieversorgung der Zukunft“, Berlin/Heidelberg/New York 1990
- Nitsch, Joachim/ Trieb, Franz, „Potentiale und Perspektiven regenerativer Energieträger“, Stuttgart 2000
- Nutzinger, Hans G., Radke, Volker, „das Konzept der nachhaltigen Wirtschaftsweise“, in: Nutzinger (Hrsg.) „Nachhaltige Wirtschaftsweise und Energieversorgung - Konzepte, Bedingungen, Ansatzpunkte“, Marburg 1995
- Paul, Nicole, „Dezentrale und zentrale Strukturen der Energiewirtschaft in Deutschland und ihre Auswirkungen auf eine Energiewende“, Diplomarbeit FU Berlin, 1998
- Pelte, Dietrich, „Die Zukunft unserer Energieversorgung“, Vorlesung Uni Heidelberg 2002 ([www.energie1.physik.uni-heidelberg.de](http://www.energie1.physik.uni-heidelberg.de))
- Priewe, Jan, „Die Öko-Steuer-Diskussion“, Berlin 1998
- Reinhardt, Guido/ Zemanek, Guido, „Ökobilanz Bioenergieträger - Basisdaten, Ergebnisse, Bewertungen“, Berlin 2000

- Sachs, Wolfgang, „Die vier E's - Merkposten für einen maßvollen Wirtschaftsstil“, in: Politische Ökologie 33 (1993)
- Sachverständigenrat des Bundes für Umweltfragen, „Umweltgutachten 2000 - Schritte ins nächste Jahrtausend“, Berlin 2000
- Scheer, Hermann, „Solare Weltwirtschaft - Strategie für die ökologische Moderne“, München 1999
- Scheer, Hermann, „Sonnen-Strategie - Politik ohne Alternative“, 2.Auflage, München 1998
- Schiel, Wolfgang/ Schlaich, Jörg, „Wieviel Wüste braucht ein Auto ?“, in: Langniß, Pehnt (Hrsg.), „Energie im Wandel - Politik, Technik und Szenarien einer nachhaltigen Energiewirtschaft“, Berlin/New York 2001
- Schindler, Volker, „Kraftstoffe für morgen - Eine Analyse von Zusammenhängen und Handlungsoptionen“, Berlin/Heidelberg/New York 1997
- Seifried, Dieter, „Gute Argumente: Energie, 3.Auflage, München 1991 (a)
- Seifried; Dieter, „Gute Argumente: Verkehr“, 2.Auflage, München 1991 (b)
- Sieferle, Rolf Peter, „Das vorindustrielle Solarenergiesystem“, in: Brauch, Hans Günter, „Energiepolitik“, Berlin/ Heidelberg/New York 1997
- Specht, Michael/ Bandi, Andreas, „Der Methanol-Kreislauf - nachhaltige Bereitstellung flüssiger Kraftstoffe“ in: Forschungsverbund Sonnenenergie, „Themen 98/99“
- Staiß, Frithjof, „Jahrbuch Erneuerbare Energien 2001“, Radebeul 2001
- Strößenreuther, Florian, „Machbarkeitsstudie und Konzept einer stationären Schwungradanlage zur dezentralen, verbrauchernahen Energiespeicherung“, Diplomarbeit TH Aachen 1996
- Stucki, Samuel/ Biollaz, Serge, „Treibstoffe aus Biomasse“, in: Motortechnische Zeitschrift 62 (2001)

- Summerer, Stefan, „Rahmenbedingungen einer nachhaltigen Weltentwicklung“ in: Deutscher, Jahn, Moltmann (Hrsg.), „Entwicklungsmodelle und Weltbilder“, Frankfurt a.M. 1995
- Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB), „Elemente einer Strategie für eine nachhaltige Energieversorgung“, Berlin 2000
- Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB), „Maßnahmen für eine nachhaltige Energieversorgung im Bereich Mobilität“, Berlin 2002
- TU Berlin, „Ziele und Verfahrensvorschläge für eine nachhaltige Regionalentwicklung“, Projektbericht Hauptstudienprojekt, 1997
- TU Berlin, „Das zukunftsfähige Dorf“, Projektbericht Hauptstudienprojekt, 1998
- TU München, „Die Stellung der Biomasse im Vergleich zu anderen erneuerbaren Energieträgern aus ökologischer, ökonomischer und technischer Sicht“, Münster 1995
- Umweltbundesamt (UBA), „Ökologische Bilanz von Rapsöl bzw. RME als Ersatz von Dieselmotoren“, Berlin 1993
- Umweltbundesamt (UBA), „Umweltdaten Deutschland 2002“, Berlin 2002
- Vereinigung Deutscher Elektrizitätswerke e.V. (VDEW), „Endenergieverbrauch in Deutschland 2000“, Frankfurt a.M. 2001
- Winter, Carl-Jochen, „Energie, Entropie und Umwelt - Worin unterscheiden sich fossile/nukleare und erneuerbare Energiesysteme ? “ in: Brauch, Hans Günter, „Energiepolitik“, Berlin/Heidelberg/ New York 1997
- Wolfrum, Ottfried (Hrsg.), „Windkraft - Eine Alternative, die keine ist“, 3.Auflage, Frankfurt a.M. 2000



# ERKLÄRUNG

Ich erkläre, daß ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe. Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Inhalte sind als solche kenntlich gemacht.

Berlin, den 01.04.2003