

Karl F. Alexander

## **Stand und Perspektiven einer ökologisch und ökonomisch nachhaltigen Weltenergiewirtschaft\***

### **I. Einleitung**

Die bahnbrechenden Erfindungen von Energie erzeugenden und umwandelnden Maschinen und Technologien - Dampfmaschine, Elektrogenerator, Verbrennungsmotor, Gasturbine etc. - legten die Grundlage für die Industrielle Revolution in ihren verschiedenen Stadien bis zum heutigen Tag, vergleichbar vielleicht nur mit dem Feuer des Prometheus, das an der Schwelle der Menschheitswerdung stand.

Die zukünftige Gestaltung des Weltenergiesystems ist daher zweifellos eines der wichtigsten Probleme des globalen Wandels. Ohne eine ausreichende Energieversorgung werden die sozialökonomischen Prozesse zur allmählichen Heranführung der wachsenden Bevölkerung der Entwicklungsländer an die Lebensqualität der Minderheit von Menschen in den entwickelten Gebieten der Welt nicht zu bewältigen sein, und in einem hochentwickelten Land wie Deutschland würde der Zusammenbruch des Energiesystems zu einer kaum vorstellbaren sozialen Katastrophe führen. Mit Recht haben auch im Bewußtsein der breiten Öffentlichkeit das Energieproblem und seine dauerhafte Lösung einen sehr hohen Stellenwert.

Mit dem Bericht an den Club of Rome "Die Grenzen des Wachstums" und der praktischen Erfahrung des "Ölpreisschocks" wurde in der ersten Hälfte der 70er Jahre gerade auch das globale Energieproblem thematisiert und ins öffentliche Bewußtsein gehoben. Auf nationaler und internationaler Ebene wurden umfangreiche Programme für die Entwicklung von Strategien zur langfristigen Sicherung des Energiebedarfs gestartet. Eines dieser Projekte war z.B. das "Energy Systems Program" des International Institute for Applied System Analysis in Laxenburg bei Wien [1], an dem eine größere Zahl von Experten aus Ost und West, darunter auch aus der DDR, beteiligt war. Grundlagen dieser Strategieprojekte oder "Szenarien" waren möglichst detaillierte Schätzungen des zukünftigen Energiebedarfs nach Quantität und Qualität sowie der Verfügbarkeit von Energierohstoffen und Fortschritten relevanter Technologien. Mit umfangreichen Computermodellen wurden daraus konsistente Szenarien entwickelt, in denen Angebot und Nachfrage mit Hilfe empirisch bestimmter Elastizitätsfaktoren marktwirtschaftlich in Über-

---

\* Überarbeiteter Vortrag, gehalten im Plenum der Leibniz-Sozietät am 22. September 1994

einstimmung gebracht wurden. Die Szenarien des IASA Energieprogramms überspannten die Zeit von 1975 bis 2030, also mehr als fünfzig Jahre.

Auch die AdW der DDR hat sich seit Mitte der 70er Jahre mehrfach in Plenar- und Klassensitzungen und speziellen Kolloquien mit dieser Thematik auseinandergesetzt, z.B. auf einem gemeinsamen Seminar mit dem IASA und dem Internationalen Institut für Probleme der Leitung, Moskau, zum Thema "Globale und nationale Probleme der wissenschaftlich-technischen Strategienbildung für das Energiesystem" (Berlin, 25. bis 28. April 1983 [2].) Ich selbst habe am 15.12.1977 einen Plenarvortrag mit dem Titel "Energiequellen der Zukunft" gehalten [3].

Inzwischen sind seit dem Beginn dieser umfangreichen prognostisch-strategischen Arbeiten etwa zwanzig Jahre vergangen, und es dürfte interessant sein, eine Zwischenbilanz zu ziehen. Allerdings sind zwanzig Jahre kein langer Zeitraum für grundlegende Innovationen in Energiesystemen, die - wie in vielen anderen großen technischen Systemen auch - eine lange Zeit zu ihrer festen Etablierung (~ 50 Jahre) und vollen Durchsetzung (~ 100 Jahre) benötigen. Als Beispiel sei die Entwicklung der Starkstrom-Elektrotechnik genannt. Wenn man ihren Beginn mit der Erfindung des Dynamoelektrischen Prinzips durch W. Siemens gleichsetzt, so kann man die Phase der Etablierung dieser neuen Energietechnologie z. B. an folgenden Daten verdeutlichen:

- 1866 Dynamoelektrisches Prinzip der Stromerzeugung
- 1879 Demonstration Beleuchtung, Elektrolokomotive
- 1884 Zwei kleine Kraftwerke in Berlin
- 1926 Kraftwerk Klingenberg in Berlin

Die sich anschließende Phase der vollen Durchsetzung ist bis heute nicht abgeschlossen, denn obwohl weltweit bereits mehr als 1/3 der Primärenergie für die Stromerzeugung eingesetzt wird, wächst weiterhin der Anteil der Elektroenergie am Gesamtenergieverbrauch. Es ist daher verständlich, daß langfristige Studien, wie z.B. das IASA-Projekt, einen Zeitmaßstab von mindestens 50 Jahren anlegen müssen.

## II. Prognosen und Realität

Vergleichen wir nun die tatsächlichen Daten der neunziger mit den Mitte der siebziger Jahre prognostizierten, so stellen wir erhebliche Abweichungen fest. Abb. 1 zeigt diesen Vergleich für die beiden IASA-Szenarien für den Weltenergiebedarf [4]. Im IASA-Projekt wurde versucht, diesen Bedarf mit einer detaillierten Analyse von Nachfrage, Angebot, Technologien und Kosten bis zum Jahre 2030 zu modellieren, wobei zwischen einem "hohen" und einem "niedrigen" Szenarium ein relativ breiter und mit der Zeit wachsender Korridor möglicher Entwicklungen zugelassen wurde. Seit Mitte der

achtziger Jahre fallen die tatsächlichen Verbrauchswerte nach unten aus diesem Korridor heraus, und bezieht man die absoluten Zahlen des Weltenergieverbrauchs auf die wachsende Erdbevölkerung, so stagniert seit 1975 der Verbrauch pro Kopf bei ca. 2 t Steinkohleeinheiten (SKE).

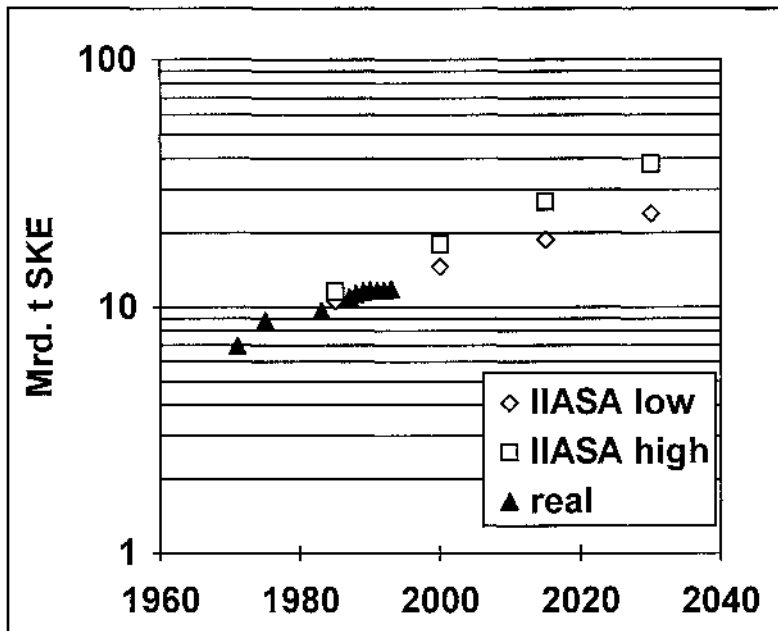


Abb. 1 Szenarien des IIASA-Energieprojekts für den Weltenergieverbrauch bis 2030 und Vergleich mit den tatsächlichen Verbrauchswerten 1973–1993. Wie die logarithmische Darstellung zeigt, liefern die Szenarien ein praktisch exponentielles Wachstum mit Wachstumsraten von 1,1 %/a (high) bzw. 0,8 %/a (low)

Noch wesentlich krassere Differenzen zeigen sich beim Vergleich einer energiepolitischen Zielstellung des EG-Rats für 1975 - 1985 [5], die dem bis in die siebziger Jahre andauernden Wachstumstrend folgte, mit dem tatsächlichen Energieverbrauch, der praktisch stagnierte (Abb. 2). Auch eine Mitte der siebziger Jahre für das BMFT angefertigte Programmstudie [6] für die BRD verschätzte sich genauso eklatant, indem sie ein exponentielles Wachstum des Primärenergiebedarfs von 2,8 % pro Jahr bis in die neunziger Jahre prognostizierte. Demgegenüber stagniert seit zwanzig Jahren der Primärenergieverbrauch in den alten Bundesländern bei ca. 400 Millionen Tonnen SKE pro Jahr bei gleichzeitiger Steigerung des Bruttosozialprodukts auf das Eineinhalbfache.

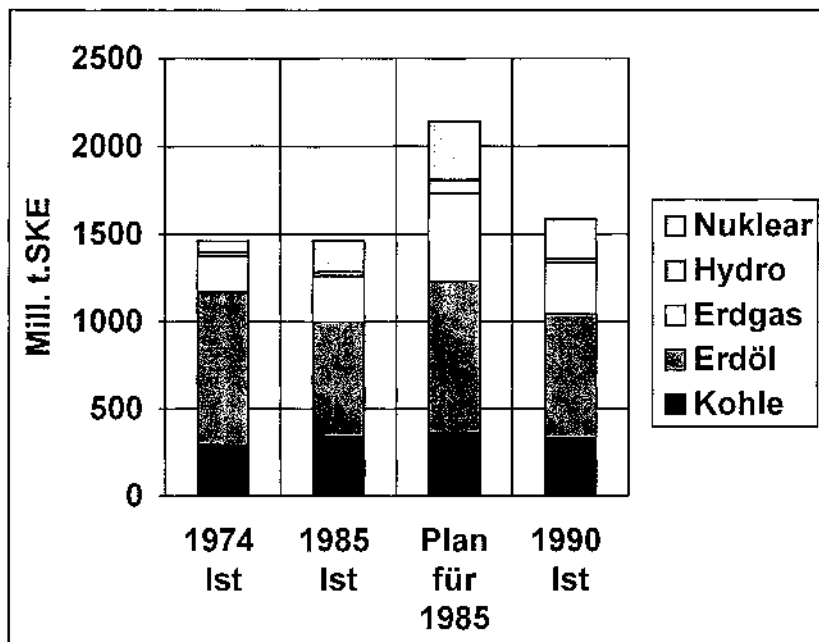


Abb. 2 Energieverbrauch der Europäischen Gemeinschaft 1974–1990 nach Energieträgern. Plan und Wirklichkeit: Nach den 1974 beschlossenen energiepolitischen Zielen der EG wurde für den Zeitraum bis 1985 ein Wachstum des Primärenergieverbrauchs um 45 % erwartet!

Offensichtlich haben die Prognosen der siebziger Jahre trotz großen Aufwandes und ausgefeilter Analysetechniken entscheidend wichtige Prozesse nicht oder methodisch falsch erfaßt, Prozesse, die vermutlich vor allem im Bereich technologischer Innovationen zu suchen sind. Dies ergibt sich z.B. aus der Aufteilung des Energieverbrauchs auf die vier großen Anwenderkategorien (Abb. 3), [7]. Das erstaunlichste Resultat ist, daß beim größten Posten, dem Energieverbrauch der Industrie, eine kontinuierliche *Senkung* des absoluten Verbrauchs erfolgte, und zwar bei einem *Wachstum* der preisbereinigten Bruttowertschöpfung um den Faktor 1,3 seit 1973. Dadurch wurde der etwas über der Prognose liegende starke Anstieg des Energieverbrauchs für den Verkehr kompensiert.

Man kann also hoffen, daß durch weiteren technischen Fortschritt auch in den vor uns liegenden Jahrzehnten neue, in bisherigen Prognosen nicht erfaßte Möglichkeiten der rationellen Energieanwendung erschlossen werden, die exponentielle Wachstumsszenarien für den Energieverbrauch obsolet ma-

chen. Man kann auch erwarten, daß in den hochentwickelten Industriestaaten die gegenwärtige Phase der Stagnation abgelöst werden wird von einer Periode des absoluten Sinkens des Primärenergieverbrauchs. Das würde die notwendige Erhöhung des Energieverbrauchs in der übrigen Welt teilweise kompensieren.

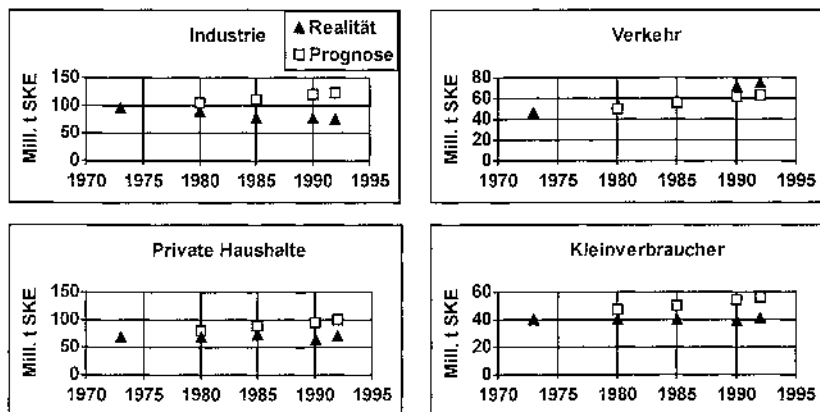


Abb. 3 Energiebedarf der BRD nach Verbraucherkategorien 1975–1992. Tatsächlicher Verbrauch und Prognose von 1975.

### III. Problemfelder zukünftiger Energieperspektiven

Bei der Beurteilung der möglichen perspektivischen Entwicklung von Energiesystemen in bezug sowohl auf die Bereitstellung von Gebrauchsenergie als auch auf deren rationelle Nutzung wollen wir folgende Beurteilungskriterien anwenden:

- Langfristige Versorgungssicherheit,
- Wirtschaftlichkeit,
- Umweltverträglichkeit,
- Anlagen- und Systemsicherheit.

#### a) Nichterneuerbare Energierohstoffe

Bekanntlich ist einer der entscheidenden Faktoren die zeitlich begrenzte Verfügbarkeit der unser gegenwärtiges Energiesystem tragenden fossilen Brennstoffe. Die Weltvorräte an nicht regenerierbaren Energierohstoffen und deren Reichdauer bei gegenwärtigem Verbrauch [7] zeigt die Tabelle 1:

<b>Vorräte und Reichdauer nichtregenerierbarer Brennstoffe</b>					
	Verbrauch für 1 MWh	Maßeinheit	Reserven	Ressourcen	Vorhaltezeit (Jahre)
Kohle (SKE)	123 kg	Mrd. t	677	7000	233
Erdöl	86 kg	Mrd. t	135	100	43
Erdgas	113 m <sup>3</sup>	Bill. m <sup>3</sup>	138	150	64
Uran 1 %	5 g	Mill. t	2,0	1,1	35
Uran 60 %	85 mg				2100

Tabelle 1

Der Weltenergieverbrauch liegt z.Zt. bei 12 Mrd. t SKE pro Jahr, aber an der Nutzung dieser Energie sind die Völker der Welt extrem ungleichmäßig beteiligt. Wegen der weiter wachsenden Erdbevölkerung und wegen des notwendigen Abbaus der gewaltigen sozialökonomischen Unterschiede zwischen den reichen und den armen Völkern wird der Energiebedarf weiter steigen, wodurch der Verzehr der nicht erneuerbaren Ressourcen verstärkt wird. Regenerierbare Energieträger machen bisher nur einen kleinen Bruchteil im Gesamtspektrum aus (der einzige bedeutende Anteil ist die Wasserkraft, die 18 % der Elektroenergie bereitstellt).

Nur Kohle und evtl. Erdgas werden in den nächsten 50 Jahren noch nicht knapp. Ein großes Potential ließe sich jedoch noch beim Kernbrennstoff erschließen, wenn die Ausnutzung des Urans durch Einsatz von Brutreaktoren auf max. 60 % erhöht wird, zumal in diesem Falle auch Uranressourcen nutzbar würden, deren Erschließung heute nicht wirtschaftlich wäre.

Aus diesen Prämissen ergeben sich nach meiner Ansicht zwingende Schlußfolgerungen: Auch wenn es angesichts der früheren Fehlprognosen ratsam scheint, wesentlich vorsichtigere Wachstumsschätzungen zu wagen, muß doch im Interesse einer langfristig stabilen, möglichst friedlich verlaufenden Entwicklung der Welt in den kommenden 50 Jahren mit einem weiteren Anstieg des Energiebedarfs, vielleicht sogar mit einer Verdopplung, gerechnet werden. Die rechtzeitige und konsequente Erschließung neuer Energiequellen mit langfristig ausreichendem Ressourcenpotential ist daher unabdingbar. Auf das große Potential der bereits etablierten Kernenergetik und ihrer Weiterentwicklungen in Richtung Brutreaktoren und später auch Kernfusionsreaktoren (wenn diese einmal technisch und ökonomisch realisierbar sein werden) kann nicht verzichtet werden. Und schließlich müssen natürlich

neben dem Ausbau noch vorhandener Wasserkraftressourcen die neuen regenerativen Energiequellen forciert entwickelt und unter Beachtung ökonomischer Kriterien breit nutzbar gemacht werden.

Eine zusätzliche Dringlichkeit erhalten diese Schlußfolgerungen durch die globale Umweltgefährdung infolge des durch die Verbrennung des fossilen Kohlenstoffs verursachten Treibhauseffekts.

### ***b) Energienutzung***

Bisher haben wir nur über den globalen Bedarf an *Primärenergie* gesprochen. Möglichkeiten und Grenzen einer rationellen Energienutzung hängen jedoch entscheidend von der konkreten Verfügbarkeit der erforderlichen *Nutzenergie*, wie Raumwärme, mechanische Arbeit, Licht oder Prozeßenergie nach Qualität, Zeit und Ort ab. Aus dem Primärenergieträger, wie Kohle, Erdöl oder Uran, wird zunächst die vom Nutzer benötigte *Endenergie*, wie Strom, Kraftstoff, Heizöl oder Fernwärme mit Hilfe von Anlagen zur Energieumwandlung, möglicherweise über Zwischenstufen (*Sekundärenergie*), hergestellt. In dieser Prozeßkette treten mit Notwendigkeit energetische Verluste durch Umwandlung und Transport der Energieträger auf. So stand z. B. in den alten Bundesländern 1992 einem Primärenergieverbrauch von 408 Mill. t SKE ein Endenergieangebot von 264,5 Mill. t SKE gegenüber. Der größte Teil der Differenz waren Umwandlungsverluste und Eigenverbrauch im Energiesektor. Außerdem wurden 27 Mill. t für nichtenergetische Zwecke abgezweigt.

Unter *Rationeller Energieanwendung* müssen wir also einerseits eine Minimierung von Umwandlungs- und Transportverlusten, vor allem aber eine Maximierung des Wirkungsgrades bei der Anwendung der Endenergie zur Erzielung des konkret festgelegten Zwecks verstehen. Zur Erreichung solcher Ziele ist die Weiterentwicklung bereits bewährter und die Schaffung neuer Technologien erforderlich.

Die Erhöhung des energetischen Wirkungsgrades kann *quantitativ* im Sinne eines "Energiesparens" erfolgen. Beispiele dafür sind Beseitigung von Verschwendung, bessere Wärmeisolation, bessere Regelung von Prozessen. So konnte in der BRD im Laufe von vier Jahrzehnten durch verbesserte Wärmedämmung und Erhöhung des Kesselwirkungsgrades der spezifische Brennstoffverbrauch für die Heizung von Einfamilienhäusern halbiert werden [8].

Für *qualitative* Sprünge im Wirkungsgrad sind jedoch in der Regel grundlegende technische Innovationen erforderlich. So wurde z.B. der Umwandlungswirkungsgrad bei der Stromerzeugung auf dem Weg von der Kolbendampfmaschine über die Dampfturbine bis zum Kombikraftwerk (Gasturbine + Dampfturbine) um den Faktor 10 gesteigert. Auch für die modernsten Kraftwerke betragen allerdings die Umwandlungsverluste noch über 40 %,

aber mit Hilfe der Wärme-Kraft-Kopplung zur gleichzeitigen Erzeugung von Strom und Fernwärme können auch diese Verluste noch erheblich reduziert werden. Noch spektakulärer sind manche Beispiele der Erhöhung des Nutzwirkungsgrades bei Energieanwendungen.

So wurde der energetische Wirkungsgrad bei der Lichterzeugung im Laufe der technischen Entwicklung von der Gaslaterne über die Glühlampe bis zur modernen Gasentladungs-Lichtquelle auf etwa das Fünfzigfache erhöht, wobei bekanntlich der Übergang von der modernen Glühlampe zur "Energiesparlampe" nach dem Prinzip der Gasentladung allein den Faktor fünf beisteuert. Bei der Datenverarbeitung schließlich versagen alle quantitativen Maßstäbe, wenn man etwa den Energieverbrauch der Geräte pro verarbeitetes Bit miteinander vergleicht. Die seit den dreißiger Jahren aufeinander folgenden Generationen können durch ihre wesentlichen Elemente Relais, Elektronenröhre, Transistor und Schaltkreis charakterisiert werden. Die Verringerung des Energie- und Materialbedarfs dieser Elemente um viele Größenordnungen machte den Taschenrechner, den PC und die vielen Anwendungen der Mikroelektronik überhaupt erst technisch möglich, die ihrerseits auf allen Gebieten der Technik weitere Rationalisierung, nicht zuletzt auch beim Energieverbrauch, bewirken.

Es ergibt sich die Schlußfolgerung: *Auch in Zukunft werden neue Technologien die entscheidenden Voraussetzungen zur Lösung des Energieproblems schaffen.*

### **c) Rolle der Elektroenergie**

Nicht zufällig wurden als Beispiele für qualitative Sprünge im Wirkungsgrad Anwendungen elektrischer Energie genannt. Die Elektroenergie ist bereits seit Jahrzehnten das dynamischste Element des Weltenergiesystems und wird diese Rolle wohl auch in der überschaubaren Zukunft behalten. Sie ist die am höchsten veredelte Endenergie und erlaubt Anwendungen mit höchstem Wirkungsgrad. In der Industrie werden daher zunehmend auch klassische Anwendungen von Prozeßwärme auf Elektroenergie umgestellt. Beispiele dafür sind die Verdrängung des Siemens-Martin-Stahls durch Elektro Stahl, die Induktionserhitzung anstelle der Gaserhitzung von Brammen, das Schmelzen von Glas usw. Das erhöht nicht nur die Qualität der Produkte, sondern führt auch zu erheblichen Einsparungen auf der Ebene der Primärenergie, trotz der unvermeidbaren Umwandlungsverluste bei der Stromerzeugung. Diese werden überkompensiert durch die bessere Regelbarkeit und Anpassungsfähigkeit der Wärmezuführung bei Elektrotechnologien.

Mit dem Steigen des Stromanteils im Endenergieverbrauch sinkt der absolute Verbrauch der übrigen Energieträger überproportional (Abb. 4). Damit haben wir eine plausible Erklärung für das in den letzten 20 Jahren beobachtete Sinken des absoluten Energieverbrauchs der BRD-Industrie.



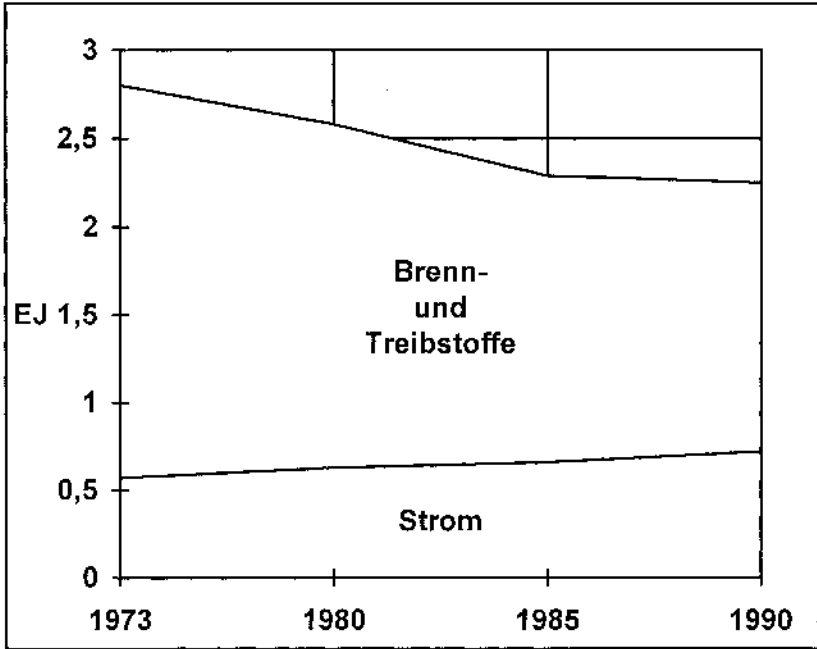


Abb. 4 Endenergieverbrauch der Industrie in Deutschland. Mit dem Wachsen des Stromverbrauchs nimmt der Verbrauch der übrigen Energieträger überproportional ab.

Der steile Anstieg des Stromanteils in der Energieträgerstruktur zeigt sich im Weltmaßstab besonders deutlich (Abb. 5). Diese Entwicklung hat neben den unmittelbaren Effekten einer rationelleren, Ressourcen sparenden Energienutzung noch den langfristig wirkenden Vorteil, daß Strom auch ohne Verwendung fossiler Brennstoffe, also ohne die für diese geltenden Beschränkungen in der Ressourcenverfügbarkeit und ohne die Emission von Treibhausgasen produziert werden kann. Etablierte Technologien dafür sind Wasserkraftwerke und Kernkraftwerke. In Zukunft werden auch die neuen regenerativen Energiequellen einen wachsenden Anteil leisten. In Westeuropa wird bereits mehr als die Hälfte der Stromerzeugung ohne CO<sub>2</sub>-Emission realisiert (Abb. 6).

#### d) Strom aus Kernkraft

Kernenergie als Grundlast und Wasserkraft als gut regelbare Last ergänzen sich optimal bei der Sicherung einer kontinuierlichen bedarfsgerechten Stromversorgung. In Europa sind allerdings die hydroenergetischen Ressourcen

cen bereits weitgehend ausgeschöpft. Auch weltweit sind die noch erschließbaren Wasserkraftressourcen nicht mehr groß. Daher wird sich der Anteil der Kernenergie als wirtschaftliche und umweltschonende Energiequelle weiterhin erhöhen, auch wenn einzelne Länder, wie Deutschland, infolge innergesellschaftlicher Akzeptanzprobleme diesem Trend zunächst nicht folgen können. Im Gegensatz zu Deutschland mit derzeit 30 %, nimmt Frankreich mit 73 % Kernenergieanteil an der Stromerzeugung international den Spitzenplatz ein. In den nächsten Jahrzehnten wird der größte Anstieg der Kernenergienutzung voraussichtlich im pazifischen Raum mit Japan als Vorreiter erfolgen

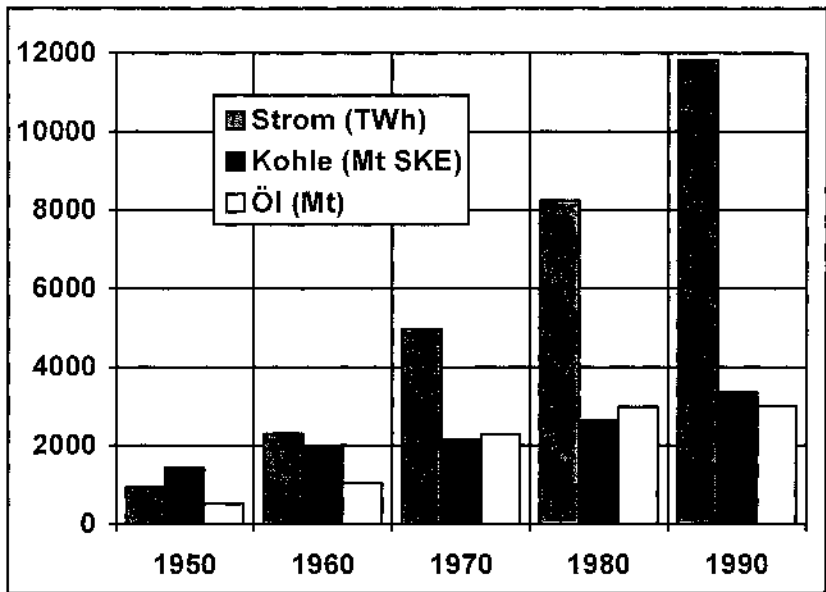


Abb. 5 Entwicklung der Weltproduktion von Strom, Kohle und Erdöl 1950–1990.

Global waren im September 1993 insgesamt 423 Kernkraftwerksblöcke mit 358 Gigawatt elektrischer Bruttoleistung in Betrieb und 62 KKW mit 57 GWe im Bau [9]. Sie deckten 17 % des Weltverbrauchs an Elektrizität ab. Die Verteilung der KKW-Blöcke auf die verschiedenen Reaktortypen zeigt Abb. 7. Auffallend ist die Dominanz der Leichtwasserreaktoren (LWR) im Vergleich zu den Schwerwasserreaktoren (Candu), den gasgekühlten Graphitreaktoren (GGR), den wassergekühlten Graphitreaktoren vom Tschernobyl-Typ (LWGR) und den Brutreaktoren, die es erst in Form einzelner Prototypen gibt.

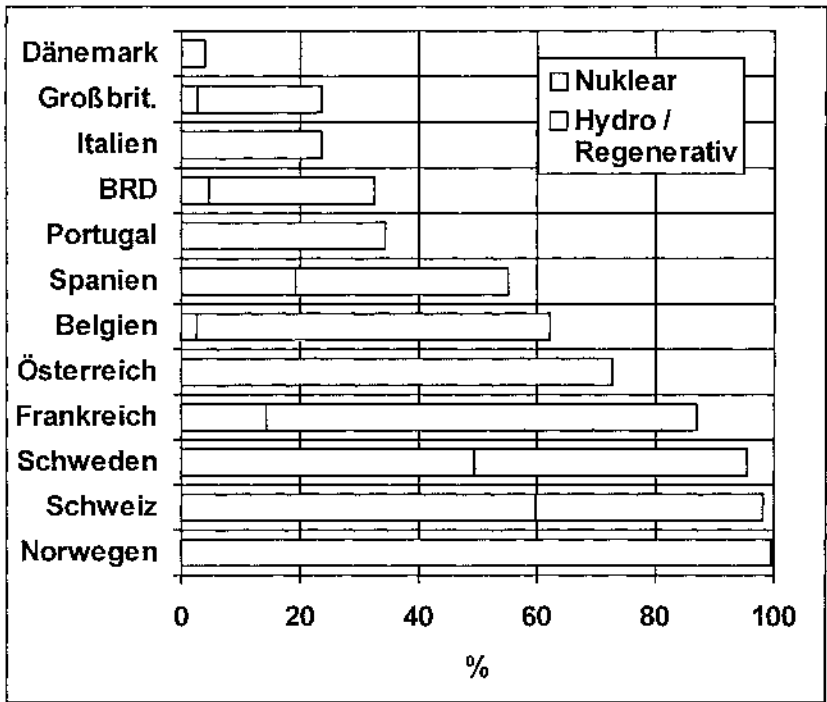


Abb. 6 Beitrag CO<sub>2</sub>-freier Energieträger zur Stromerzeugung in Westeuropa.

Wie dargestellt wurde, ist in dem Zeitraum, währenddessen die heutigen Kernenergiekapazitäten ans Netz gingen, der tatsächliche Energiebedarf stark hinter den ursprünglichen Prognosen zurückgeblieben. Das betrifft, trotz ihres wachsenden Anteils unter den Energieträgern, auch die Elektroenergie. Dadurch sind, zumindest in Westeuropa, Überkapazitäten entstanden, und ein forcierter Zubau ist wirtschaftlich gegenwärtig nicht sinnvoll, es sei denn, die Kernenergie würde aus vorwiegend ökologischen Gründen bei Ersatzinvestitionen zur Zurückdrängung der Kohleverstromung eingesetzt. Wirtschaftlich betrachtet sind aber z. Z. Kohle- und Atomstrom etwa gleichwertig. Dies sind die Randbedingungen, unter denen sich die großenteils irrationale Debatte um die Akzeptanz der Kernenergie abspielt. Diese Situation wird sich ändern, wenn das Ressourcen- und Umweltproblem der fossilen Brennstoffe nicht mehr verdrängt werden kann.

Die dadurch objektiv gegebene Denkpause wird von der kerntechnischen Industrie genutzt, die Sicherheitsstandards der existierenden Kraftwerke zu erhöhen. Eine wichtige Aufgabe ist dabei auch die Hilfeleistung für die ost-

europäische Kernenergetik, um auch dort den heute möglichen Sicherheitsstandard bald zu erreichen. Außerdem wird an der Projektierung einer neuen Generation von Kernkraftwerken des Druckwassertyps gearbeitet, für die der bisher als "hypothetisch" angesehenen gefährlichsten Unfall - die Kernschmelze mit Zerstörung des Druckgefäßes und massiver Freisetzung von Radioaktivität in die Umwelt - zum sicher beherrschten "Auslegungsstörfall" wird.

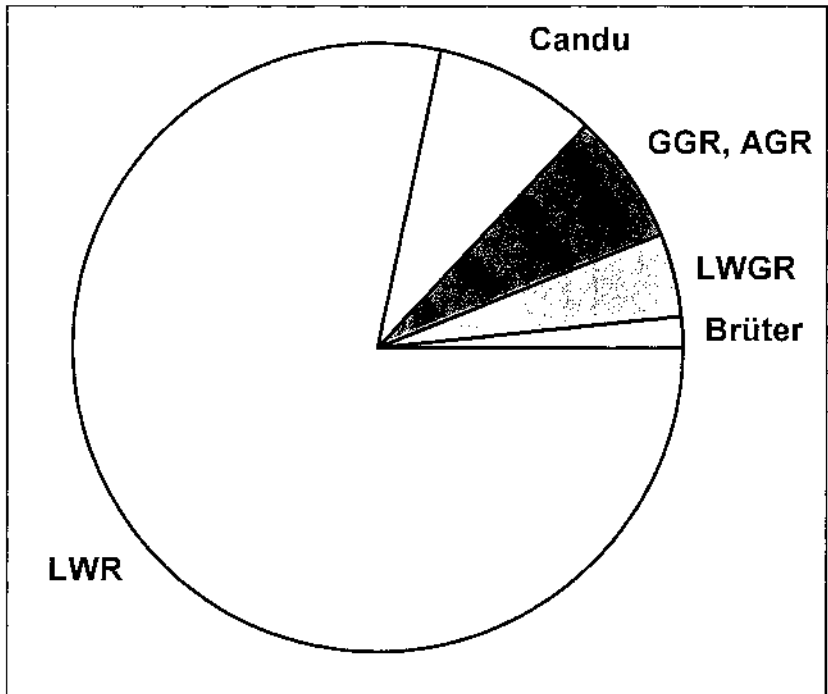


Abb. 7 Verteilung der Kernkraftwerksblöcke auf die Reaktortypen.

Für die *Zukunft der Kernenergie* in den nächsten Jahrzehnten sehe ich folgende Perspektiven:

Der *Leichtwasserreaktor* baut zunächst seine Dominanz als Stromerzeuger aus. Der erreichbare und nachweisbare Sicherheitsstandard und der offensichtliche ökologische Vorteil eines abgasfreien Betriebes wird die in Teilen der Öffentlichkeit verlorengegangene Akzeptanz wiederherstellen. Die ökonomischen Parameter werden sich durch eine mögliche Verdoppelung des Brennstoffabbrands verbessern. Die knappen Uranreserven können durch die Plutonium-Rückführung aus der Wiederaufbereitung gestreckt werden. Auch

der Einsatz der durch Abrüstungsmaßnahmen freigesetzten Kernsprengstoffe als Reaktorbrennstoff wirkt in dieser Weise.

Bei weiterem Ausbau der Kernenergie wird jedoch die vollständigere Ausnutzung des vorhandenen Urans durch Einsatz *schneller Brutreaktoren* notwendig. Die technologischen Grundlagen dafür sind erarbeitet und Prototypen werden in Frankreich, Rußland und Japan erprobt. Neue, kommerzielle Versuchskraftwerke könnten in Europa und in Japan ab 2005 bereitstehen. Angesichts vieler falscher Prognosen der Vergangenheit sollte man sich allerdings zurückhalten, jetzt schon einen Termin für die breite Einführung der Brütertechnologie vorherzusagen. Das gilt in noch stärkerem Maße für eine mögliche übernächste Stufe der Kernenergie, die Anwendung der *thermonuklearen Fusion*. Auf diesem Gebiet läuft bekanntlich seit Jahrzehnten ein großes, internationales Forschungs- und Entwicklungsprogramm, das sich dem Ziel mit beeindruckender Konsequenz nähert. Aber der experimentelle Beweis einer wirtschaftlich nutzbaren Netto-Energieproduktion wird erst mit der großen Demonstrationsanlage ITER gelingen, die sich noch in der Konstruktionsphase befindet und für die bisher weder Standort noch Baubeginn beschlossen ist.

Wichtig und beruhigend ist aber, daß im 21. Jahrhundert neue Technologien zur Verfügung stehen werden, die wesentlich dazu beitragen können, den aus Gründen der Ressourcenverfügbarkeit und des Umweltschutzes notwendigen Ausstieg aus der Verbrennung fossiler Rohstoffe zu bewerkstelligen. Voraussetzung dafür ist allerdings, daß die Gesellschaft auch weiterhin bereit ist, für solche langfristigen und kostspieligen Forschungsvorhaben die notwendigen Mittel vorzuschießen.

Ich möchte an dieser Stelle nicht die mit Vorurteilen und Emotionen geladene Diskussion um die realen oder vermeintlichen Risiken der Kernenergienutzung für friedliche Zwecke führen. Ich will nur auf ein häufig genanntes Argument eingehen: das angeblich nicht gelöste Entsorgungsproblem, das *Problem "Atommüll"*.

Das spezifische Strahlungsrisiko konzentriert sich ganz überwiegend auf die hochradioaktiven und z.T. sehr langlebigen Spaltprodukte, die während des Betriebes im Innern der Brennelemente entstehen. Ein typisches Reaktor-brennelement besteht aus hitze- und druckfesten, hermetisch verschlossenen Metallröhren, die den Kernbrennstoff in Form einer Oxidkeramik enthalten. In dieser Matrix sind nach der Entladung der verbrauchten Brennelemente die gefährlichen radioaktiven Stoffe sehr sicher aufgehoben, denn die Bedingungen einer kalten Lagerung sind ja für die Standfestigkeit der Einschließung viel milder, als die während der jahrelangen Betriebszeit im Reaktor bei sehr hohen Temperaturen herrschenden. Eine Lagerung unter kontrollierten Bedingungen, zunächst zur Nachwärmeabfuhr unter Wasser, und dann in trockenen Abschirmbehältern ("Castor") muß natürlich die aus dem Brenn-

element nach außen dringende Gammastrahlung auf ungefährliche Werte abschirmen, bereitet aber sonst keine besonderen technischen Probleme. Gegen eine unerlaubte Entwendung sichert sich das Material selbst durch seine intensive Strahlung, es sei denn, der Dieb nähme die viele Tonnen schwere Abschirmung gleich mit. Der größte Teil der in Kernkraftwerken bisher verbrauchten Brennelemente werden in solcher Weise, meist noch auf dem Kraftwerksgelände, gelagert. Das kann zu Platzproblemen führen, daher das Bestreben, zentrale (oberirdische) Lagermöglichkeiten zu schaffen (Gorleben!).

Sicherheitstechnisch schwieriger ist demgegenüber die *Wiederaufbereitung* des bestrahlten Kernbrennstoffs, denn dazu müssen die Brennstäbe geöffnet und einem chemischen Prozeß in flüssiger Phase zugeführt werden. Ziel ist die Abtrennung von Plutonium und nicht verbrauchtem Uran, die zu neuem Kernbrennstoff verarbeitet werden können, von den stark radioaktiven Spaltprodukten, die den eigentlichen Atommüll darstellen. Die Aufbereitung wird seit langem technologisch beherrscht, sie wird jedoch z.Zt. noch nicht umfassend angewandt, weil sich das Recycling des Kernbrennstoffs bei den gegenwärtigen niedrigen Uranpreisen noch nicht ökonomisch lohnt. Das wird sich mit weiterem Ausbau der Kernenergetik grundlegend ändern, und dann kann man auf abgelagerte und damit weniger radioaktive Brennelemente zurückgreifen.

Erst dann wird auch das Problem der *Endlagerung* des hochradioaktiven Atommülls wirklich kritisch. An der Entwicklung der dafür notwendigen Technologien - Erschließung und Eignungsuntersuchung unterirdischer Lagerstätten und Konditionierung und sicheren Einschluß der Abfallgebände - wird gearbeitet. Der erforderliche Aufwand hält sich in Grenzen, weil die zu entsorgenden Materialmengen und Volumina klein sind. So verbraucht z.B. ein 1000 MWe Druckwasserreaktor pro Jahr etwa 23 Tonnen angereicherten Uranbrennstoff. Davon bleiben nach der Wiederaufbereitung nur etwa 3 Kubikmeter in Glas eingeschmolzener konditionierter hochaktiver Müll übrig, der bereits 98,8 % der Gesamtaktivität enthält. Dazu kommen noch 140 Kubikmeter mittelaktive Abfälle mit 1,1 % und 490 m<sup>3</sup> niedrigaktive mit weniger als 1 % der Gesamtaktivität. Für solche geringen Mengen kann man, dem jeweiligen Risikopotential angepaßt, auch sehr aufwendige Verfahren anwenden, die einen sicheren Einschluß über Jahrtausende gewährleisten. Ein vergleichbares Braunkohlekraftwerk hinterläßt demgegenüber pro Jahr 800 000 t Asche, 130 000 t SO<sub>2</sub> und 400 t Schwermetalle, die zu entsorgen sind.

### *e) Neue und alte regenerative Energiequellen*

Die seit langem etablierte Stromerzeugung mit *Wasserkraft* wird vermutlich noch für lange Zeit die bedeutendste erneuerbare Energiequelle bleiben, aber wie bereits erwähnt ist ihr noch erschließbares Potential beschränkt. Daher

hat die forcierte Entwicklung neuer Methoden der Nutzung sich ständig erneuernder Energiequellen eine hohe Priorität.

Die *Nutzung von Wind und Sonnenlicht* hat den Vorteil, daß sie an geeigneten Standorten schon heute für lokale Anwendungen wirtschaftlich sein kann. Das beeinflusst zwar noch nicht in merklichem Umfang die globalen Energiebilanzen, unterstützt aber eine rasche Markteinführung. So ist die Brauchwassererwärmung mit Solarkollektoren in vielen Gegenden z.B. Südeuropas bereits allgemein üblich, und die Stromversorgung von Autobahntelefonen oder Parkautomaten mit Solarzellen ist ein Beispiel aus unserer eigenen Umgebung. Aber es gibt auch schon solarthermische und photovoltaische Versuchskraftwerke zur Stromerzeugung. Windkraftanlagen haben an begünstigten Standorten bereits die Schwelle der Wirtschaftlichkeit erreicht.

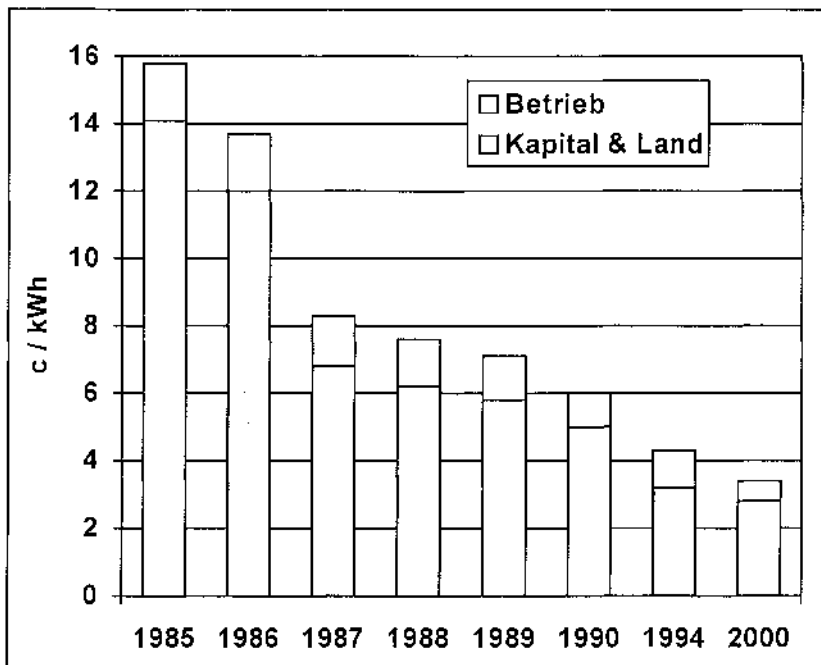


Abb. 8 Kostendegression für neue Windparks in Kalifornien.

Die für die Nutzung verfügbaren Leistungsdichten von Wind und Sonnenstrahlung sind stark standortabhängig und schwanken zeitlich stark. Der intermittierende Betrieb erfordert eine Netzeinbindung bzw. im Inselbetrieb gesonderte Speicher- oder Backupsysteme. Die maximale Leistungsdichte der Sonnenstrahlung beträgt in der BRD ca.  $1000 \text{ W/m}^2$ , im Jahresmittel aber

nur  $133 \text{ W / m}^2$ , beim Wind sind die entsprechenden Leistungsdichten (bezogen auf die vom Rotor überstrichene Fläche) etwa fünfmal größer. Dieses Verhältnis spiegelt sich auch in den Investitions- und Stromgestehungskosten wider. Für die Sonnenenergienutzung sind natürlich Standorte näher zum Äquator wie in Südeuropa, Nordafrika oder Kalifornien wesentlich günstiger. Dort werden doppelt so hohe Leistungsdichten der Sonnenstrahlung wie in unseren Breitengraden erreicht. In Kalifornien gibt es bereits solarthermische Kraftwerke im Leistungsbereich von 100 MW, die mit einem Wirkungsgrad von 10 % und Stromkosten von 0,50 DM / kWh arbeiten. Photovoltaische Anlagen mit Solarzellen gibt es im Bereich von 100 kW, hier liegen die Stromgestehungskosten noch bei 2 DM / kWh.

Die beeindruckende Kostendegression für neue Windparks in Kalifornien während des letzten Jahrzehnts zeigt Abb. 8 [10]. Ein Rechenbeispiel für einen 65 kW-Windkonverter mit 16 m Rotordurchmesser an verschiedenen deutschen Standorten gibt Tabelle 2 [11].

<b>Standortabhängige Wirtschaftlichkeit für 65 kW-Windkonverter</b>			
Standort	Windgeschwindigkeit (m / s)	Ausbeute (kWh / a)	Stromkosten (DM / kWh)
Nordseeinsel	7,0	190 000	0,12
Kahler Asten	5,5	119 000	0,20
Binnenland	4,0	33 000	0,67

Tabelle 2

Die starke Standortabhängigkeit ergibt sich aus der Leistungsdichte des Windes, die mit der dritten Potenz der Windgeschwindigkeit zunimmt.

Der erreichte technische Stand und die staatliche Förderung führten zu einer starken Ausweitung der Windenergienutzung in Deutschland. Ende Juni 1994 gab es bereits 2079 Windkraftanlagen mit einer installierten Leistung von zusammen 429 Megawatt [12], etwa zwei Drittel der Leistung eines modernen Kohlekraftwerks. Da aber die Windgeneratoren, selbst an günstigen Standorten, im Mittel nur auf etwa 2000 - 3000 Vollast-Benutzungsstunden im Jahr kommen, werden mit dieser Kapazität pro Jahr nur rund 1 Mrd. kWh elektrische Arbeit erzeugt, das sind weniger als 0,2 % der deutschen Stromerzeugung. Dementsprechend bescheiden ist auch die für die Ökologie entscheidende Substitution von ca. 400 000 t Kohle pro Jahr.

Zur allgemeinen Beurteilung der Wirtschaftlichkeit verschiedener Methoden der Stromerzeugung unter Beachtung der unter ökologischen Gesichtspunkten wichtigen Faktoren Energie- und Ressourcenverbrauch eignen sich die Begriffe "Erntefaktor" und "Energetische Amortisationszeit" (Tabelle 3, [13]).



Unter Erntefaktor wird das Verhältnis der während 20 Jahren erzeugten Nutzenergie zu der für die Errichtung der Anlage verbrauchten Energie verstanden. Die energetische Amortisationszeit ist dann die Zeit, die diese Anlage arbeiten muß, um die vorgeschossene Energie zurückzuerstatten. Aus der Gegenüberstellung geht hervor, daß auch unter diesem Gesichtspunkt die photovoltaische Stromerzeugung noch einen großen Innovationsschub braucht, ehe sie ökonomisch und ökologisch als Energiequelle in größerem Umfang einsetzbar sein wird. Das gilt nicht in diesem Maße für solarthermische Kraftwerke nach dem Solarfarm- oder Solarturmkonzept mit Konzentration des Sonnenlichts durch Spiegel, das allerdings nur verwendbar ist in ariden, sonnenreichen Gebieten. Einen Vergleich der Stromgestehungskosten der verschiedenen Verfahren zeigt Abb. 9, [13].

<b>Erntefaktor und energetische Amortisationszeit</b>			
Anlage	Jahresnutzungsdauer (h / a)	Erntefaktor	Amortisationszeit (Monate)
Kernkraftwerk (1300 MW)	7000	108	2,2
Kohlekraftwerk (700 MW)	5000	71	3,4
Windkonverter (500 kW)	3000	30	8
Solarzellen	2000	2 - 3	80 - 120

Tabelle 3

Ein Grundproblem der auf Wind oder Sonnenstrahlung beruhenden Stromerzeugung liegt im zeitlich intermittierenden mit Jahreszeit und Wetter schwankenden Betrieb der Anlagen. Soweit sie nur einen kleinen Beitrag liefern und eine Einbindung ins Verteilungsnetz möglich ist, spielt das keine große Rolle. Im Inselbetrieb oder in der ferneren Zukunft, wenn ein großer Teil des Energieaufkommens aus solchen Quellen geliefert werden muß, wird eine effektive Speicherung der gewonnenen Energie notwendig. Eine interessante Variante hierfür ist die chemische Speicherung in Form von *Wasserstoff*, der mit einem energetischen Wirkungsgrad von bis zu 90% elektrolytisch erzeugt werden kann. Dieser Wasserstoff könnte in der nachfossilen Ära, wenn Erdöl und Erdgas knapp geworden sind, deren Rolle übernehmen. Der Aufbau von Großanlagen zur solaren Wasserstoffproduktion in Wüstengebieten könnte eine Perspektive für viele erdölexportierende Länder sein. Gegenwärtig ist eine Wirtschaftlichkeit solcher Verfahren noch nicht in Sicht.

aber Versuchsanlagen mit Solarzellen im 100 kW-Bereich sind im Bau oder in der Erprobung ([11], S.188).

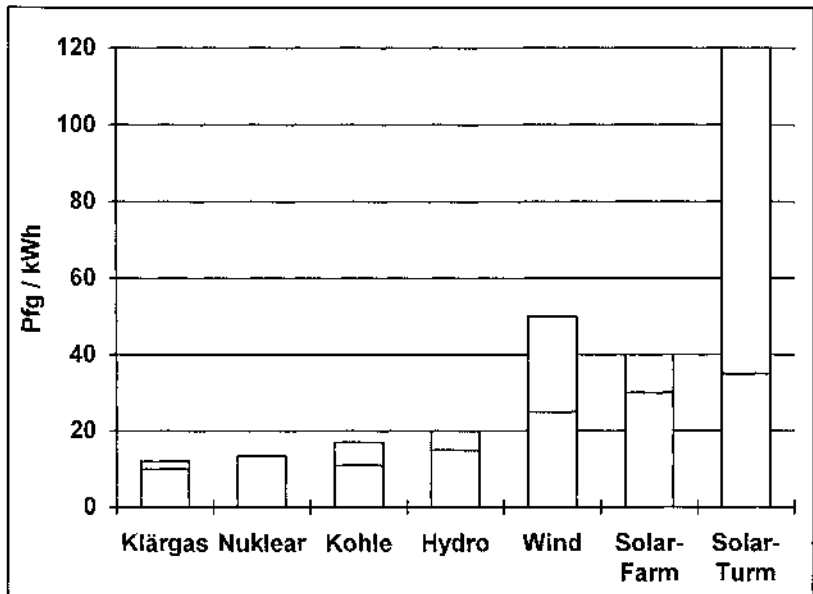


Abb. 9 Ungefähre Stromgestehungskosten für unterschiedliche Energie-träger.

Bis zur industriellen Revolution war Holz die wichtigste Energiequelle. Heute spielt in den Industrieländern die Verbrennung von Holz oder allgemein die *Nutzung von Biomasse* nur noch eine untergeordnete Rolle. Dies ist in den Entwicklungsländern, mit 77 % der Weltbevölkerung, aber nur 35 % des Weltenergieverbrauchs, grundsätzlich anders (Abb. 10, [14]). Dort führt die exzessive und ineffektive Nutzung von Brennholz, pflanzlichen Rückständen und Viehdung zum Kochen und Heizen zu verheerenden Umweltschäden. Diese traditionelle energetische Nutzung von Biomasse muß im Interesse der Umwelt durch Einsatz moderner Technologien abgelöst werden. Damit kann sie zu einer regenerativen Energiequelle werden, die nicht nur für die Dritte Welt von Bedeutung ist.

Zur CO<sub>2</sub>-Bilanz der Erdatmosphäre trägt die Verbrennung von Biomasse nur dann nichts bei, wenn in gleichem Maße neue Pflanzen nachwachsen. Außer der Nutzung von sowieso anfallenden Abfällen ist auch daran gedacht, Pflanzen für die vorwiegend energetische Nutzung in speziellen "Energie-plantagen" anzubauen. Aktuelle Beispiele dafür sind der Dieselmotorkraftstoff aus Rapsöl oder die Verwendung von Gärungsalkohol als Kraftstoff.

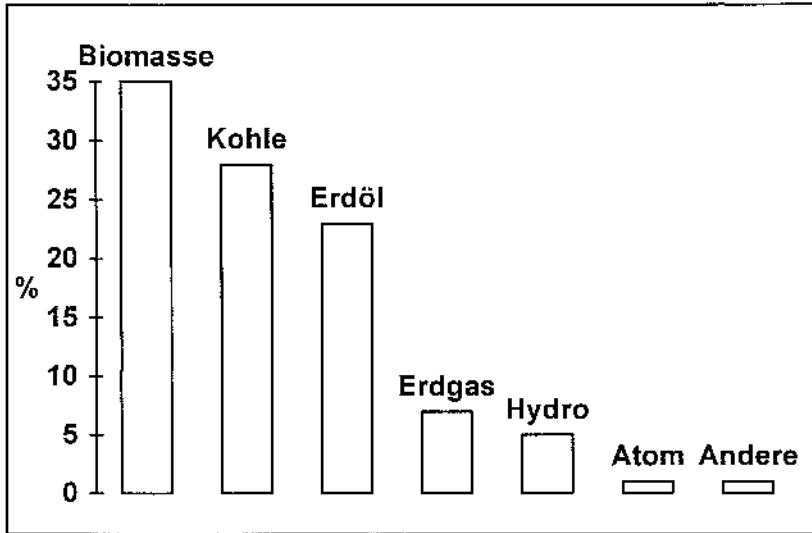


Abb. 10 Struktur des Primärenergieverbrauchs in der Dritten Welt.

Das Problem dieser Art Ernte von Sonnenenergie ist der geringe Wirkungsgrad der Umwandlung von Sonnenenergie in pflanzlichen Brennstoff, der für Wälder bei 0,5 % liegt und nur bei Intensivkulturen wie Zuckerrohr 5 % erreichen kann. Daher ist der Flächenbedarf im Vergleich zur direkten Nutzung der Sonnenstrahlung sehr groß. Einen Leistungsvergleich zwischen Windkonvertern, Solarzellen und Biomasse zur Stromerzeugung in bezug auf die erforderliche aktive Fläche gibt die Tabelle 4. Um die gleiche Energiemenge wie ein 1300 MW Kernkraftwerk mit 7000 Betriebsstunden pro Jahr durch Verbrennung von Biomasse bei einer Energieausbeute von 5,3 kWh / m<sup>2</sup> zu erzeugen, brauchte man eine Erntefläche von 1700 Quadratkilometern!

Flächenbedarf für Strom aus regenerativen Quellen			
	Angebot (kWh / m <sup>2</sup> a)	Wirkungsgrad (%)	Stromausbeute (kWh / m <sup>2</sup> a)
Wind (7 m / s)	3300	30	1000
Sonne (Sahara)	2200	15	330
Biomasse	17,5	30	5,3

Tabelle 4

Wenden wir im Fall von Energieplantagen den Begriff des Erntefaktors (hier definiert als Energiegewinn / Energieaufwand) wieder an, so wird die Bilanz noch ungünstiger. Als Beispiel zeigt Tabelle 5 (nach [11], S.238) den Endenergieaufwand für Anbau und Verarbeitung zur Herstellung von Bioalkohol, bezogen auf dessen Energieinhalt, und den sich daraus ergebenden Erntefaktor. Nur bei vollständiger energetischer Verwertung der Reststoffe kann in diesem Falle ein Nettoenergiegewinn erzielt werden, und für die Variante Zuckerrüben auch dann nicht.

<b>Energieaufwand für Alkoholherstellung</b>			
	Zuckerrüben	Zuckerrohr	Weizen
Energieaufwand	1,68	1,13	2,14
Energieinhalt der Reststoffe	0,42	1,69	3,40
Erntefaktor einschl. Reststoffe	0,85	2,38	2,10

Tabelle 5

Ob und unter welchen Bedingungen "Energieplantagen" als Brennstofflieferant für die großtechnische Stromerzeugung anstelle fossiler Brennstoffe eine Chance haben werden, erscheint zumindest fraglich. Aber die Nutzung organischer Reststoffe aus Land- und Forstwirtschaft einschließlich Müll, Biogas aus Gülle, Kläranlagen und Deponien kann durchaus einen merklichen Beitrag leisten. Eine Prognose für die Stromerzeugung aus solchen regenerativen Energiequellen in Deutschland für das Jahr 2005 zeigt Abb. 11, [15]. Im Jahre 1992 erbrachten diese 0,77 % des gesamten Stromaufkommens.

#### IV. Szenarien des Übergangs zur nachhaltigen Entwicklung

Jede Projektion in die Zukunft muß sich zunächst auf heute bekannte Tatsachen und auf historische Trends stützen. Für Energieprognosen muß selbstverständlich auch gefordert werden, daß naturgesetzlich gegebene Randbedingungen beachtet werden (was bei manchen "alternativen" Projekten nicht geschieht!).

Wichtiger aber scheinen für die konkrete Ausgestaltung von Entwicklungsszenarien subjektive Einschätzungen von Chancen und Risiken zu sein, die sich - insbesondere im Bewußtsein einer breiten Öffentlichkeit - schlecht objektivieren lassen. Die zähe Kontroverse um die wirklichen oder vermeint-

lichen Gefahren der Kernenergie ist ein herausragendes Beispiel dafür. Dahinter dürfen aber die wahrscheinlich noch gewichtigeren und ebenfalls kontrovers diskutierten Problemfelder Ressourcenverbrauch, Treibhauseffekt und andere Umweltschädigungen, sozio-ökonomische Gefahren des Energiemangels nicht zurücktreten.

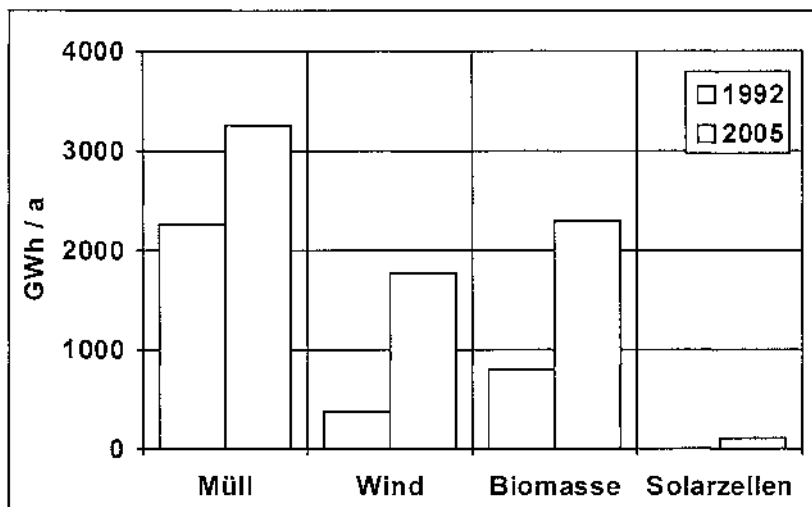


Abb. 11 Stromerzeugung aus regenerativen Energiequellen in Deutschland 1992 und Schätzung für 2005.

Angesichts dieser Sachlage ist es nicht erstaunlich, daß es unterschiedliche Prognosen gibt, die sich in ihren Aussagen gegenseitig widersprechen. Dies soll hier an einer mittelfristigen Prognose der Internationalen Energieagentur [16] bis zum Jahr 2010 und einer im Auftrag der United Nations Solar Energy Group for Environment and Development ausgearbeiteten langfristigen Studie [10] dargestellt werden (Abb. 12 und Abb. 13).

Beim Vergleich beider Szenarien springt sofort ins Auge, daß ihnen ganz unterschiedliche Prämissen zugrunde liegen. Die IEA-Prognose ist offensichtlich eine Trendfortschreibung nach dem Prinzip "Business as usual", während die UN-Studie versucht, im Sinne einer "grünen" Politik das Potential der erneuerbaren Energiequellen maximal auszuweiten und, verbunden mit einer rigorosen Einsparungsstrategie, die Belastung der Umwelt, insbesondere im Hinblick auf den Treibhauseffekt, deutlich zu reduzieren. Unvereinbar zwischen beiden Projektionen ist z.B. die radikale Reduzierung des Kohleanteils oder die gewaltige Ausweitung der Nutzung von Biomasse und Sonnenenergie zwischen 2010 (IEA) und 2025 (UN). Die UN-Studie scheint

demgegenüber die Ressourcenbegrenzung beim (gegenüber der Kohle umweltfreundlicheren) Erdgas nicht besonders ernst zu nehmen, begrenzt aber ohne Diskussion die Kernenergie auf das gegenwärtige Niveau. Man hat das Gefühl, daß derartigen Prognosen ein ähnliches Schicksal bevorsteht wie denen der siebziger Jahre.

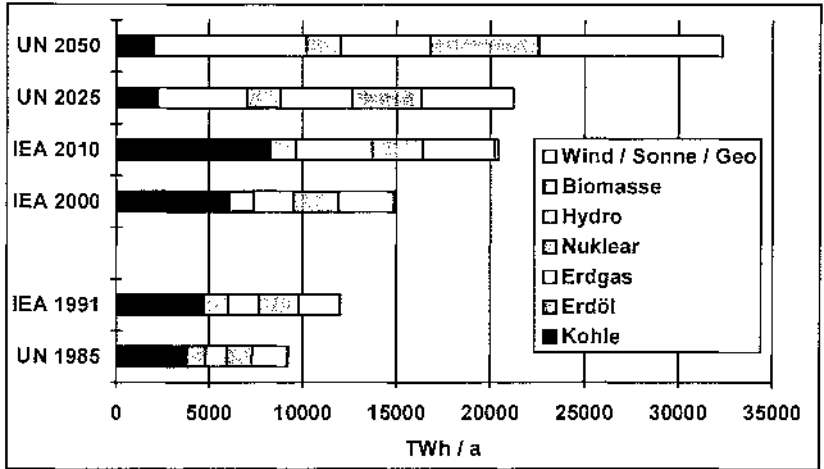


Abb. 12 Zwei Szenarien für die Weltstromerzeugung

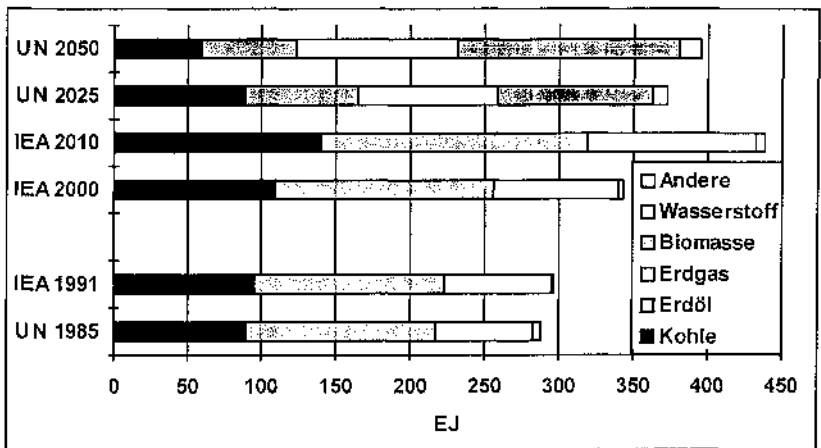


Abb. 13 Zwei Szenarien für die Weltproduktion von Brennstoffen.

Abb. 14 zeigt, welche Rolle die Kernenergie spielen könnte in Bezug auf die Abwendung einer möglichen Klimakatastrophe, wenn man ihren Anteil soweit erhöhen würde, daß im "grünen" Szenario ab 2025 die Hälfte der für die Stromerzeugung vorgesehenen fossilen Energieträger ersetzt wird. Die grün-alternative Bewegung hat zweifellos große Verdienste bei der Entwicklung des Umweltbewußtseins und der Hinwendung zu den erneuerbaren Energiequellen. Die damit in der Regel verbundene Antiatomkraft-Ideologie ist nach meiner Überzeugung demgegenüber ausgesprochen kontraproduktiv.

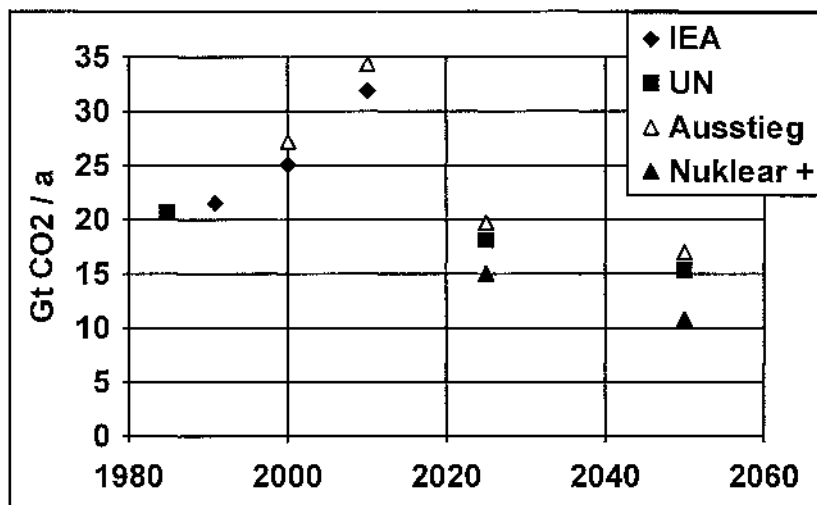


Abb. 14 Kohlendioxidemission der beiden Szenarien und Alternativen in Bezug auf Ausstieg aus der Kernenergie oder deren forciertem Ausbau im Rahmen des UN-Szenariums.

## V. Vision einer Energiewirtschaft in der nachfossilen Ära

Der Übergang zur nachhaltigen Entwicklung der Energiewirtschaft müßte schon wegen der Ressourcenschöpfung, aber auch zur Entlastung der Umwelt im Laufe des kommenden Jahrhunderts im wesentlichen abgeschlossen werden. Die Struktur einer solchen Energiewirtschaft, die sich vor allem aus erneuerbaren oder noch für Hunderte von Jahren verfügbaren Primärenergiequellen versorgt, ist heute in Umrissen sichtbar, aber wohl kaum quantitativ prognostizierbar. Ihre Hauptkomponenten werden in Tabelle 6 aufgezählt.

<b>Energieträger der nachfossilen Ära</b>		
<b>Primärenergieträger</b>	<b>Umwandlung</b>	<b>Endenergieträger</b>
Wasserkraft	Turbine + Generator	Strom
Windkraft	Rotor + Generator + Elektrolyse	Strom Wasserstoff
Sonnenlicht	Flachkollektor Spiegel + Dampfkraftwerk photoelektrisch + Elektrolyse	Warmwasser Strom Wasserstoff
Erdwärme	Wärmetauscher Dampfkraftwerk	Fernwärme Strom
Uran Thorium Lithium + Deuterium	Thermischer Reaktor Brutreaktor Fusionsreaktor + Elektrolyse	Strom Fernwärme Wasserstoff
Biomasse	Biochemie Chemie Dampfkraftwerk	Methan Kraftstoffe Strom Fernwärme
Kohle	Chemie	Kraftstoffe

Tabelle 6

Grundvorstellungen dafür sind:

- Stromerzeugung ohne fossile Brennstoffe,
- großer Anteil der Elektroenergie am Endenergieverbrauch,
- Substitution von Erdgas durch Wasserstoff,
- neue Anwendungen für Wasserstoff (z.B. Flugzeugantrieb),
- Kombination lokaler und zentralisierter Erzeugungsanlagen durch leistungsfähige Transport- und Verteilungsnetze für Strom und Wasserstoff,
- Produktion flüssiger Heiz- und Kraftstoffe aus Kohle und Wasserstoff,
- Ausbau von Fernwärmenetzen unter Einbindung nuklearer Energieerzeuger.

Für alle genannten Aufgabenstellungen gibt es bereits Technologien, die sich wenigstens schon im Erprobungsstadium befinden. Was die Zukunft noch an



grundsätzlich neuen Technologien bereithält, können wir nicht wissen. Wer hat schon vor hundert Jahren an die Kernenergie gedacht!

Aus heutiger Sicht kann man leicht wünschenswerte, heute aber noch utopisch scheinende wissenschaftlich-technische Durchbrüche nennen. Zum Beispiel würde die Erfindung aufladbarer Elektroenergiespeicher mit einer Energiedichte in kWh / kg, die der von Kraftstoff nahekommt (dies würde gegenüber einer gewöhnlichen Autobatterie einen Faktor 100 bedeuten), das Problem des umweltfreundlichen Elektroautos lösen. Auch könnte man sich vorstellen, daß es einmal gelingt, eine direkte Photosynthese organischer Brennstoffe aus CO<sub>2</sub> und Wasser nach dem Vorbild der Natur, aber mit einem wenigstens zehnfach höheren Wirkungsgrad in großtechnischen Anlagen zu realisieren. Dies könnte eine flächensparende Alternative zu Energieplantagen sein. Doch - wie wir schon zu Anfang sahen - erstens kommt es anders und zweitens als man denkt.

Richtig aber bleibt: *Forschungs- und Technologiepolitik sind gefordert, die Grundlagen für eine ökonomisch, ökologisch und sozial nachhaltige Entwicklung der Weltenergiewirtschaft zu schaffen.*

Ich möchte schließen mit einem Zitat aus dem Buch "Die neuen Grenzen des Wachstums" [17]:

"Alle Visionen und Kommunikation sind nutzlos, wenn sie nicht zu Handlungen führen. Und die Schaffung eines nachhaltigen Zustands fordert nun einmal Handlungsbereitschaft. (...) Jeder Mensch muß in diesem Wandlungsprozeß seine eigene Handlungsposition finden. Wir können sie für ihn nicht bestimmen. Aber wir möchten doch einen Vorschlag machen, wie man seine Aufgaben erledigen sollte: bescheiden. Nicht mit unumstößlichem Plan, sondern als Experiment: das eigene Handeln zum Lernen benutzen. Die Abgründe menschlicher Unwissenheit sind tief. Gerade in einer Epoche, in der die Menschheit stärker als jemals zuvor gegen die dynamischen Begrenzungen dieses Planeten vorstößt, kann niemand, auch kein Entscheidungsträger, die Situation einigermaßen durchschauen. Und es gibt noch keine verbindlich anerkannte Politik, um die Lage zu meistern."

## Literatur

1. Energy in a Finite World: A Global Systems Analysis Report by the Energy Systems Program Group of the International Institute of Applied Systems Analysis, W. Häfele, Program Leader. Ballinger, Cambridge, Mass. 1981
2. Globale und nationale Probleme der wissenschaftlich-technischen Strategienbildung für das Energiesystem, Herausg. K. F. Alexander, G. Flach, H. Maier. Akademie der Wissenschaften der DDR, Institut für Theorie, Geschichte und Organisation der Wissenschaft, Kolloquien Heft 44, Berlin 1984.
3. K. F. Alexander, Energiequellen der Zukunft. Akademie der Wissenschaften der DDR, Sitzungsberichte 21 N (1978). Siehe auch: spectrum 9 (1978) Nr. 2, 5
4. V. G. Chant, Two Global Scenarios: The Evolution of Energy Use and the Economy to 2030. IIASA-Report RR-81-35, Laxenburg 1981
5. Energiequellen für morgen? Teil I: Zukünftige Energiebedarfsdeckung und die Bedeutung der nichtfossilen und nichtnuklearen Primärenergieträger. Programmstudie durchgeführt im Auftrag des BMFT. Umschau-Verlag Frankfurt am Main 1976, S. 13
6. Energiequellen für morgen? L. c. S. 18, 81
7. Die in dieser Arbeit verwendeten allgemeinen statistischen Daten für den Energieverbrauch wurden folgenden Zusammenstellungen entnommen: Bundesministerium für Wirtschaft: Energiedaten 92/93, Energieversorgung der Europäischen Gemeinschaft. Bonn 1993. BP Statistical Review of World Energy. London 1994. Statistische Jahrbücher der DDR und der BRD
8. Bundesbauministerium, Energiesparbuch für das Eigenheim. Bonn 1991
9. Jahrbuch der Atomwirtschaft 25 (1994) 127
10. Renewable Energy. Sources for Fuels and Electricity. Ed. by T. B. Johansson, H. Kelly, A. K. N. Reddy, R. H. Williams. Island Press, Washington 1993, S. 65
11. M. Kleemann, M. Meliß, Regenerative Energiequellen. Springer-Verlag, 2. Aufl. 1993, S. 300
12. Deutsches Windinstitut, DEWI-Magazin 5/94
13. G. Dumsky, Die Rolle der Kernenergie beim Umweltschutz. Atomwirtschaft 30 (1993) 596
14. UN, Weltbank (nach Energietrends 9 / 1994)
15. J. Grawe, E. Wagner, Nutzung erneuerbarer Energien durch die Elektrizitätswirtschaft, Stand 1992. Elektrizitätswirtschaft 92 (1993) 1511
16. Internationale Energie-Agentur, Welt Energie Ausblick 1994. Pressemitteilung 12. 4. 94
17. D.H. Meadows, D. L. Meadows, J. Randers, Die neuen Grenzen des Wachstums. Deutsche Verlags-Anstalt Stuttgart, 6. Aufl. 1992, S. 274