

„Erneuerbare Energien und nachhaltige Energieversorgung“

Prof. Dr.- Ing. A. Voß

Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, Universität Stuttgart

Vortrag am 14.11. 2002

Frankfurt

1. Einleitung

In der energiepolitischen Diskussion klaffen die Vorstellungen über die Rolle der regenerativen Energien, ihre Möglichkeiten und Grenzen, für die zukünftige Energieversorgung weit auseinander. Großen Hoffnungen und Zukunftsvisionen von einer vornehmlich auf erneuerbaren Energien beruhenden Energieversorgung steht die Auffassung gegenüber, dass ihr Beitrag in den nächsten beiden Jahrzehnten günstigstenfalls wenige Prozent unseren Energiebedarf decken wird. Den

Einen gelten die erneuerbaren Energien als Alternative zu den fossilen Energieträgern und der Kernenergie und als wesentlicher Weg zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen sowie als die Energiequelle einer nachhaltigen Energieversorgung. Andere sehen durch eine Vorrangpolitik für erneuerbare Energien, aufgrund ihrer hohen Kosten, die Wettbewerbsfähigkeit der Energieversorgung in unserem Land und damit den Wirtschaftsstandort und Arbeitsplätze gefährdet.

Vor diesem Hintergrund ist es natürlich keine leichte Aufgabe die Bedeutung der erneuerbaren Energien für eine nachhaltige klimaverträgliche Energieversorgung darzustellen. Eine Beurteilung der Rolle der regenerativen Energien für eine nachhaltige Energieversorgung kann dabei sinnvollerweise nicht auf die Bestimmung des Anteils der erneuerbaren Energien an der Energieversorgung im Jahr 2010 oder 2020 abzielen, sondern allenfalls den Versuch darstellen, ausgehend von den energiepolitischen und energiewirtschaftlichen Zielen sowie den Herausforderungen denen sich die Energieversorgung gegenüber sieht, die Rolle der erneuerbaren Energien im Kontext der anderen Energieversorgungsoptionen zur Lösung der vor uns liegenden Probleme aufzuzeigen und zu umreißen. Wobei natürlich die verschiedenen Problemdimensionen der Energieversorgung möglichst umfassend zu beachten sind.

In diesem Sinne will ich im Folgenden den Versuch machen zur Beantwortung der Frage nach der Rolle der regenerativen Energien für

eine nachhaltige Entwicklung einige Fakten, Sachverhalte und Zusammenhänge aufzuzeigen. Dabei geht es nicht um technische oder wirtschaftliche Einzelaspekte der verschiedenen Möglichkeiten zur Nutzung erneuerbarer Energien, sondern es geht um systemare Überlegungen, die Einordnungen und Orientierungen ermöglichen sollen.

Ich will beginnen mit Anmerkungen zur derzeitigen Nutzung, den Entwicklungsperspektiven und den Potentialen erneuerbarer Energie in Deutschland. Danach will ich auf die Herausforderungen im Energiebereich zur Realisierung einer zukunftsfähigen und nachhaltigen Energieversorgung eingehen und den Begriff der Nachhaltigkeit erläutern, um vor diesem Hintergrund die wesentlichen Nutzungsmöglichkeiten erneuerbarer Energien und die anderen Optionen der Energieversorgung im Hinblick auf die Bewältigung der Herausforderungen einzuordnen.

2. Derzeitige Nutzung, Entwicklungsperspektiven und Potentiale

In der ersten Abbildung (Folie 2) ist der derzeitige Beitrag der erneuerbaren Energien zu unserer Energieversorgung dargestellt. Die erneuerbaren Energien tragen heute rd. 2,5 % zur gesamten Energieversorgung bei. Ihr Anteil an der Stromerzeugung macht rd. 7 % aus. Den mit Abstand größten Beitrag leisten die Wasserkraft und die Nutzung vom Holz zur Wärmeerzeugung. Der Beitrag der sog. neuen erneuerbaren Energien - Wind, solare Strahlung und Umgebungswärme ist derzeit energetisch noch unbedeutend.

Diesen geringen Beiträgen zur derzeitigen Energieversorgung stehen aber technische Energiebereitstellungspotentiale gegenüber, die sowohl weltweit als auch in unserem Land in Bezug auf den derzeitigen Energieverbrauch durchaus beachtlich sind.

Hierauf, sowie auf den Entwicklungsstand, sowie auf die Entwicklungsperspektiven der Techniken zur Nutzung erneuerbarer Energien in Deutschland will ich nun näher eingehen.

Beginnen wir mit der Wasserkraft.

2.1 Wasserkraft

- Abbildung 3 zeigt die Entwicklung der in Wasserkraftanlagen installierten Leistung sowie ihre Stromerzeugung (Einspeisung ins öffentlich Netz).

 - Die Stromerzeugung in Laufwasserkraftwerken und Speicherkraftwerken mit natürlichem Zufluss beträgt heute rd. 20 TWh. Das entspricht knapp 4 % der Stromerzeugung in Deutschland.

 - 90 % des Wasserkraftstroms werden in Bayern und Baden-Württemberg erzeugt.

 - 341 Anlagen größer 1 MW
~ 5000 Anlagen kleiner 1 MW
- ⇒ Begrenzte Ausbaumöglichkeiten

- Es stellen sich natürlich auch ökologische Fragen

- Wasserstau

- Fischwandern

⇒ Windenergie

2.2 Windenergie

- Die Windstromerzeugung (Abb. 5) ist in Deutschland in den letzten zehn Jahren erheblich ausgeweitet worden

 - Ende 2001 waren rd. 11 500 WEK in Betrieb
 - installierte Leistung 8750 MW:
 - erzeugte Strommenge 11500 GWh, entspricht rd. 2 % der gesamten Bruttostromerzeugung

 - Grund für diese Entwicklung war die Förderung durch das Strom-einspeisungsgesetz und das Erneuerbare Energien-Gesetz.
- ⇒ Vergütung für den eingespeisten Windstrom von rd.
9 €-Ct/kWh

2.2.1 Wind-Technische Entwicklung

- Die Technik der Windenergienutzung hat sich deutlich weiter entwickelt. (Abb. 6)
 - erhöhte Zuverlässigkeit
 - Reduktion der Geräuschemissionen
 - verbesserte Wirtschaftlichkeit durch Steigerung der Konverterleistung

- Eindeutiger Trend zu größeren Anlagen war nicht nur bedingt durch die damit mögliche Reduktion der spezifischen Konverterkosten (Kosten je KW Konverterleistung), sondern auch durch die mit wachsender Turmhöhe zunehmende mittlere Windgeschwindigkeit und die damit verbundene höhere jährliche Stromerzeugung.

2.2.2 Technische Potentiale der Windenergie

- Entscheidend für die Stromerzeugungsmenge an einem Standort sind die Windverhältnisse
 - Leistung des Windes ist proportional der dritten Potenz der Windgeschwindigkeit
 - ⇒ Verdopplung der Windgeschwindigkeit bedeutet eine Verachtfachung der Leistung
 - Technisch nutzbar sind praktisch nur Standorte mit einer mittleren Windgeschwindigkeit größer als 4 m/s
 - Das technische Erzeugungspotential in Deutschland beläuft sich auf rd. 120 TWh/a (Abb. 9)
 - ⇒ entspricht 22 % der gesamten derzeitigen Bruttostromerzeugung
 - On-shore Potential an den norddeutschen Küstenländern konzentriert. Potential windgünstiger Standorte vergleichsweise klein.
 - Off-shore Potential beträgt rd. 240 TWh/a
- ⇒ Photovoltaik

2.3 Photovoltaik

- Für eine Stromerzeugung aus solarer Strahlung in Deutschland kommen praktisch nur photovoltaische Wandler in Frage
- Thermische Solaranlagen (Solarfarm – bzw. Solarturmkonzepte), die die solare Strahlung konzentrieren, können nur die direkte Strahlung nutzen. Diese macht aber nur rd. 50 % des solaren Strahlungsangebots in Deutschland aus.
- Abb. 10 zeigt Entwicklung der netzgekoppelten photovoltaischen Stromerzeugung in Deutschland
- Trotz der hohen Zuwachsraten in den letzten zehn Jahren ist der Beitrag der Photovoltaik mit einer installierten Peakleistung von 175 MW und einer Stromerzeugung von 140 GWh in 2001 noch außerordentlich bescheiden (0,02 % an der Stromerzeugung).

2.3.1 Photovoltaik - Derzeitige Technik

- Über 90 % der weltweit produzierten Solarzellen nutzen Silizium als Halbleitermaterial (Abb. 11)
- Marktbeherrschender Zelltyp sind heute mono- und multikristalline Solarzellen (Dicke $250 - 350 \mu\text{m} = 0,25 - 0,3 \text{ mm}$).
- Modulwirkungsgrad in der Fertigung 13 bis 18 %
- Systemwirkungsgrade $\sim 10 \%$
- Nachteil: hohe Herstellungskosten

⇒ Photovoltaik-Kosten

2.3.2 Photovoltaik- Kosten

- Abb. 13 zeigt Entwicklung der spezifischen Investitionskosten für netzgekoppelte Photovoltaikanlagen (bis 10 kW)

- Spez. Investitionskosten liegen heute bei 8000 €/kWp, davon entfallen
 - 60 % auf die Solarmodule
 - 40 % auf Wechselrichter, Netzanschluss, Tragstrukturen und Installation
 - Erdgaskraftwerk 500 €/kW

- Typische Energieausbeuten liegen bei 800 kWh/kWp/
800 Vollastbenutzungsstunden

2.4 Solarthermische Wärmegegewinnung

- Der Markt für solarthermische Anlagen hat in den letzten 10 Jahren einen starken Aufschwung erlebt (Abb. 14)
- Die jährliche installierte Fläche bei verglasten Kollektoren stieg zwischen 1990 und 2001 von 50.000m² auf rd. 500.000 m² an
- In Summe dürften Ende 2001 etwas mehr als 4 Mio. m² Solarkollektorfläche installiert sein, die rund 1900 Gwh/a an nutzbar angegebener Wärme bereitstellen.
Das entspricht etwa 0,1 % des gesamten Niedertemperaturwärmebedarfs.

2.4.1 Solarthermie

- Anlagentechnik weitgehend ausgereift (Abb. 15)
 - Einfache Absorber
 - ⇒ Schwimmbadwassererwärmung
 - Flachkollektoren und Röhrenkollektoren
 - ⇒ Warmwasserbereitung und Heizungsunterstützung

- solare Deckungsanteile
 - Brauchwarmwassererwärmung ~ 50 %
 - Brauchwarmwasser- und Heizungsunterstützung ~ 25-80 %

- Kosten:
 - 1000 €/m²
 - ~ 0,25 €cent/kWh
 - Wärmegestehungskosten etwa 5-mal höher als bei Heizöl oder Erdgas

⇒ Biomasse

2.5 Biomasse

- Biomasse → Stoffe organischer Herkunft
- Vielzahl von Umwandlungs- und Nutzungsverfahren sind verfügbar, um feste, flüssige oder gasförmige Energieträger aus Biomasse herzustellen (Abb. 16)
- thermochemische Umwandlung:
 - Pyrolyse
 - Vergasung
- physikalisch-chemische Umwandlung:
 - Pflanzenöl (aus Ölsaaten)
 - Rapsölmethylester (Umesterung von Pflanzenöl)
- Biochemische Verfahren
 - Vergärung zu Ethanol
 - anaerobe Fermentation zu Biogas
- Verbrennung

2.5.1 Biomasse-Potentiale

- Bei den Potentialangaben muss man unterscheiden
- biogene Nebenprodukte und Abfälle
- Energiepflanzen \Rightarrow angebaut zur energetischen Nutzung

\Rightarrow Potential der organischen rüchstände, Nebenprodukte und Abfälle liegt bei 470 PJ/a (Abb. 17)

\Rightarrow 5 % des Endenergieverbrauchs

\Rightarrow Kosten weisen große Bandbreite auf 0,3 bis 3 €-cents/kWh

Heizöl \sim 0,3 €-cents/kWh

\Rightarrow Investitionskosten z. B. von Biomassekesseln höher als die von Öl und Gas.

2.5.2 Potentiale Energiepflanzen

- Potential direkt abhängig von der Fläche, die für den Anbau zur Verfügung steht (Abb. 18)
- unterstellt man, dass von der landwirtschaftlich genutzten Fläche (17,2 Mio. ha) bis zu 2 Mio. ha für den Energiepflanzenbau zur Verfügung stehen,

⇒ Festbrennstoffe 330 - 420 PJ

Pflanzenöl 100 PJ

Alkohol 120 PJ

⇒ 0,5 bis knapp 5 % des heutigen Endenergieverbrauchs

2.6 Fluktuierendes Angebot

- Das Angebot von Wind, Sonne und Wasser ist über der Zeit starken, oftmals stochiastischen Schwankungen unterworfen (Abb. 19)
- kontinuierliche Leistungsbereitstellung erfordert

- Speichersysteme oder

- back-up Systeme

⇒ geringe Einsparung an Kraftwerksleistung

⇒ Einsparung von Brennstoff

- Bei einem Anteil der Windstromerzeugung von 15 % an der gesamten Stromerzeugung überschreitet die Erzeugung schon die zeitgleiche Nachfrage nach Elektrizität

⇒ Bei den Angaben von Potentialen zu berücksichtigen

2.7 Potentiale-Stromerzeugung

- Unterschieden zwischen dem technischen Erzeugungspotential und dem technischen Endenergiepotential, welches nachfrageseitige Restriktionen berücksichtigt (Abb. 20)
 - fehlende nachgefragte Leistung (Überschussstromerzeugung)
 - Erfordernisse der Spannungs- und Frequenzhaltung
 - technische Erzeugungspotentiale ~ 586 bis 1040 TWh/a übersteigt die derzeitige Bruttostromerzeugung
 - technische Endenergiepotential ~ 88,5 bis 100 TWh/a
- ⇒ 16 bis knapp 20 % der Bruttostromerzeugung

Nach dieser kurzen Darstellung des Entwicklungsstandes, der Entwicklungsperspektiven und der Potentiale der erneuerbaren Energien in Deutschland, lassen Sie mich nun auf die Anforderungen an eine zukunftsfähige Energieversorgung näher eingehen, um anschließend die Rolle der erneuerbaren Energien vor diesem Hintergrund einzuordnen.

3. Anforderungen an eine zukunftsfähige Energieversorgung

Zu den zentralen Herausforderungen an der Schwelle zum dritten Jahrtausend gehören

- die Schaffung humaner Lebensbedingungen für eine weiter wachsende Weltbevölkerung
- die Vermeidung nicht tolerierbarer Klimaveränderungen sowie
- die Sicherung der Zukunftsfähigkeit der Wirtschaftsstandorts und von ausreichender Arbeit in Deutschland.

Alle diese Herausforderungen haben einen direkten Bezug zur Energieversorgung

- da die Verfügbarmachung von mehr Energiedienstleistungen eine notwendige Voraussetzung zur Überwindung von Hunger und Armut und ich denke auch zur Begrenzung des Wachstums der Weltbevölkerung ist,
- da der überwiegende Teil der anthropogenen Treibhausgasemissionen aus dem Energiebereich, der Nutzung fossiler Energieträger stammt und
- da die Sicherung des Wirtschaftsstandortes und die Schaffung zukunftsfähiger Arbeitsplätze in einem wachsenden internationalen Wettbewerb ohne eine leistungsfähige Energieinfrastruktur und wettbewerbsfähige Energiepreise wohl nicht gelingen wird.

Obwohl alle diese Herausforderungen eine globale Dimension haben, tangieren sie natürlich die Energieversorgung in unserem Land. Alle diese Herausforderungen sind darüber hinaus wichtige Aspekte einer nachhaltigen Entwicklung. Das Leitbild einer „Nachhaltigen oder dauerhaft umweltgerechten Entwicklung“ hat in den letzten Jahren als normatives ethisches Handlungskonzept eine herausragende Stellung erlangt, sowohl auf nationaler wie auf der internationalen Ebene. Nachhaltigkeit war z.B. das Leitbild der Rio-Deklaration und damit des Aktionsprogramms „Agenda 21“ und der UN-Klimarahmenkonvention.

Die Brundtland-Kommission definiert als „Nachhaltige Entwicklung“ eine Entwicklung, „die die Bedürfnisse der gegenwärtig lebenden Menschen befriedigt, ohne die Befriedigung ähnlicher Bedürfnisse zukünftiger Generationen zu beeinträchtigen“. (Abb. 21)

Nachhaltige Entwicklung meint also eine Entwicklung, welche die Verbesserung der ökonomischen und sozialen Lebensbedingungen aller Menschen, der heute und zukünftig lebenden, mit der langfristigen Sicherung der natürlichen Lebensgrundlagen in Einklang bringt. Nachhaltige Entwicklung als Leitbild geht also über die ökologischen Fragen weit hinaus und betrifft insbesondere auch den Erhalt bzw. die Verbesserung ökonomischer und sozialer Leistungsfähigkeiten. Es sind diese drei Dimensionen von Nachhaltigkeit, die untereinander verflochten sind und als Einheit zu betrachten sind.

Das Leitbild Nachhaltigkeit betont also unsere Nachweltverantwortung oder anders ausgedrückt, besagt es, dass wir nicht auf Kosten unserer Enkel und Urenkel leben sollen.

Diese allgemeine Beschreibung von Nachhaltigkeit, die für viele Zustimmungsfähig ist, sagt aber noch wenig darüber aus, worauf es bei der Gewährleistung der Befriedigung ähnlicher Bedürfnisse der künftigen Generationen konkret, z.B. in Bezug auf die Energieversorgung ankommt.

Jede praktische Konkretisierung des Leitbildes Nachhaltigkeit kann aber nur dann tragfähig sein, wenn sie, was die materiell – energetischen Aspekte betrifft, den Naturgesetzen Rechnung trägt. In diesem Kontext kommt dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik, den der Chemiker und Philosoph Wilhelm Ostwald "das Gesetz des Geschehens nannte" eine besondere Bedeutung zu. (Abb. 22)

Die wesentliche Aussage des zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik ist, dass Leben und die dazu notwendige Befriedigung von Bedürfnissen, aber auch die Erbringung kultureller Leistungen unumgänglich mit dem Verbrauch von arbeitsfähiger Energie und verfügbarer Materie verbunden ist.

Darüber hinaus ist der besonderen Rolle der Ressource Wissen Rechnung zu tragen. Unser Wissen ist zwar zu jedem Zeitpunkt begrenzt, es wird aber nicht verbraucht, sondern ist sogar vermehrbar. Die durch Wissenszuwachs steigende Gestaltungsfähigkeit und die damit mögliche Weiterentwicklung von Technik sind die Basis um die Entfaltungsspielräume für die kommenden Generationen zu erhalten und zu erweitern.

Im Kontext einer Konkretisierung des Leitbildes der Nachhaltigkeit lässt sich die Notwendigkeit der Begrenzung von ökologischen Belastungen und von Klimaänderungen wohl begründen. Schwieriger wird es schon bei der Frage, ob denn die Nutzung erschöpfbarer Energieressourcen mit dem Leitbild einer "Nachhaltigen Entwicklung" vereinbar ist, denn Erdöl und Erdgas oder auch Kernbrennstoffe, die wir heute verbrauchen, stehen zukünftigen Generationen ja nicht mehr zur Verfügung. Hieraus wird dann abgeleitet, dass nur die Nutzung "erneuerbarer Energien" oder „erneuerbarer Ressourcen“ mit dem Leitbild Nachhaltigkeit vereinbar sei.

Dies ist aus zwei Gründen nicht tragfähig. Zum einen ist auch die Nutzung erneuerbarer Energie, z.B. von solarer Energie, immer mit einer Inanspruchnahme von nicht-erneuerbaren Ressourcen, z.B. nichtenergetischen Rohstoffen und Materialien verbunden, deren Vorräte auch begrenzt sind. Und zum zweiten würde dies bedeuten, dass

nicht-erneuerbare Ressourcen überhaupt nicht, auch nicht von den zukünftigen Generationen genutzt werden dürften.

Wenn also eine unveränderte Weitergabe der nicht-erneuerbaren Ressourcenbasis offensichtlich unmöglich ist, dann kommt es im Sinne des Leitbildes einer Nachhaltigen Entwicklung darauf an, den nachkommenden Generationen eine technisch-wirtschaftlich nutzbare Ressourcenbasis zu hinterlassen, die ihnen die Befriedigung ihrer Bedürfnisse mindestens entsprechend unserem heutigen Niveau erlaubt.

Die jeweils verfügbare Energie- und Rohstoffbasis wird aber wesentlich durch die verfügbare Technik bestimmt. Energie- und Rohstofflagerstätten, die zwar in der Erdkruste vorhanden sind, aber mangels entsprechender Explorations- und Fördertechniken nicht gefunden und gefördert bzw. nicht wirtschaftlich genutzt werden können, können keinen Beitrag zur Sicherung der Lebensqualität leisten. Es ist also der Stand des Wissens und der Technik, der aus wertlosen Ressourcen verfügbare Ressourcen macht und ihre Quantität mitbestimmt.

Für die Nutzung begrenzter Energievorräte bedeutet dies, dass ihre Nutzung mit dem Leitbild Nachhaltigkeit so lange vereinbar ist, wie es gelingt, den nachfolgenden Generationen eine mindestens gleich große technisch-wirtschaftlich nutzbare Energiebasis verfügbar zu machen. Anzumerken ist hier, dass in der Vergangenheit – trotz steigenden Verbrauchs fossiler Energieträger – die nachgewiesenen Reser-

ven, d.h. die technisch und ökonomisch verfügbaren Energiemengen, zugenommen haben. Darüber hinaus konnten durch technisch-wissenschaftlichen Fortschritt neue Energiebasen, wie die Kernenergie oder ein Teil der erneuerbaren Energieströme, technisch-wirtschaftlich nutzbar gemacht werden.

Was nun die Inanspruchnahme der Senkenfunktion der Ressource Umwelt betrifft, so müsste in der Diskussion stärker beachtet werden, dass Umweltbelastungen, auch die im Zusammenhang mit unserer heutigen Energieversorgung, vorrangig durch anthropogen hervorgerufene Stoffströme, durch Stoffzerstreuung, d.h. Stofffreisetzung in die Umwelt, verursacht werden. Es ist also nicht die Nutzung der Arbeitsfähigkeit der Energie, die die Umwelt schädigt, sondern es sind vielmehr die mit dem jeweiligen Energiesystem verbundenen stofflichen Freisetzungen, wie z.B. das Schwefeldioxid oder das Kohlendioxid bei der Verbrennung von Kohle, Öl und Gas, die zu Umweltbelastungen führen.

Dies wird deutlich an der Sonnenenergie, die mit ihrer zur Verfügung gestellten Arbeitsfähigkeit - der solaren Strahlung - einerseits Hauptquelle allen Lebens auf der Erde ist, andererseits aber auch der bei weitem größte Entropiegenerator ist, weil nahezu die gesamte Energie der Sonne nach ihrer Entwertung als Wärme bei Umgebungstemperatur in den Weltraum wieder abgestrahlt wird. Da ihre Energie, die Strahlung, nicht an einen stofflichen Energieträger gebunden ist, resultieren aus der Entropieerzeugung aber keine Umweltbelastungen im heutigen Sinn. Dies schließt natürlich Stofffreisetzungen und damit verbundene

Umweltbelastungen im Zusammenhang mit der Herstellung einer Solaranlage nicht aus.

Der hier angesprochene Sachverhalt ist deshalb von besonderer Bedeutung, weil er die Möglichkeit einer Entkopplung von Energieverbrauch (Verbrauch an Arbeitsfähigkeit) und Umweltbelastung beinhaltet. Ein wachsender Verbrauch an arbeitsfähiger Energie und sinkende Umwelt- und Klimabelastungen sind somit kein Widerspruch. Die Stofffreisetzungen nicht die Energieströme müssen begrenzt werden, will man die Umwelt und das Klima schützen.

Neben der Erweiterung der verfügbaren Ressourcenbasis kommt unter dem Leitbild der „Nachhaltigen Entwicklung“ natürlich auch dem haushälterischen Umgang mit Energie, oder besser gesagt mit allen knappen Ressourcen eine besondere Bedeutung zu. Effiziente Ressourcennutzung im Zusammenhang mit der Energieversorgung betrifft dabei nicht nur die Ressource Energie, da die Bereitstellung von Energiedienstleistungen immer auch den Einsatz anderer knapper Ressourcen, wie nicht energetische Rohstoffe, Kapital, Arbeit und Umwelt erfordern.

Die effiziente Nutzung aller Ressourcen, die sich aus dem Leitbild Nachhaltigkeit ableitet, entspricht aber auch genau dem allgemeinen ökonomischen Prinzip. Aus beiden folgt, dass ein Energiesystem, eine Energiewandlungskette zur Bereitstellung von Energiedienstleistun-

gen, dann effizienter als eine andere ist, wenn es für die Energiedienstleistung weniger Ressourcen einschließlich der Ressource Umwelt in Anspruch nimmt.

In der Ökonomie dienen Kosten und Preise als Maß für die Inanspruchnahme knapper Ressourcen. Geringere Kosten bei gleichem Nutzen bedeuten eine ökonomisch effizientere, eine ressourcenschonendere Lösung. Dieses Verständnis von Kosten ist, so scheint es, weitgehend verlorengegangen. Gegen Kosten als Bewertungskriterium von Energiesystemen mag man einwenden, dass gegenwärtig die Kosten sog. externer Effekte, z.B. von Umweltschäden, in den Kostenkalkülen noch nicht erfasst werden. Diesem Umstand kann natürlich durch die Internalisierung externer Kosten abgeholfen werden.

Wenn wir uns bewusst machen, dass Kosten, die externe Effekte soweit wie möglich mit berücksichtigen, das beste Maß für die Inanspruchnahme knapper Ressourcen sind, dann müsste ihnen doch wieder ein größerer Stellenwert in der energiepolitischen Diskussion bei der Bewertung verschiedener Energiesysteme gerade im Hinblick auf das Leitbild Nachhaltigkeit zukommen.

Vor dem Hintergrund der angesprochenen energieseitigen Herausforderungen und dem Leitbild einer nachhaltigen Entwicklung sollen nun die erneuerbaren Energien und ihre Nutzungstechniken im Hinblick auf eine wettbewerbsfähige, klimaverträgliche und nachhaltige Energieversorgung eingeordnet werden.

4. Perspektiven der erneuerbaren Energien

Hierzu sollen um die Ressourceninanspruchnahme der Bereitstellung von Energie durch Techniken zur Nutzung erneuerbarer Energiequellen vergleichend aufzuzeigen, Ergebnisse von Material-, Energie- und Stoffbilanzen erläutert werden, die alle Stufen und Prozesse erfassen, die für die Energiebereitstellung notwendig sind. Die Bilanzierung erfolgt also über den gesamten Lebensweg und erfasst alle vor - bzw. nachgelagerten Prozessschritte der Bereitstellung des Energieträgers sowie der Materialien für die involvierten technischen Anlagen, insbesondere die Energiewandler. Dies entspricht einer Betrachtung von der Wiege bis zur Bahre. Wegen der begrenzten Zeit wird exemplarisch nur auf Stromerzeugungssysteme eingegangen.

4.1 Energieaufwand

Die Bereitstellung von Energie ist immer mit einem investiven Energieaufwand für die Errichtung der Anlagen und im Falle der fossilen und nuklearen Energieträger auch für die Bereitstellung des Brennstoffs sowie für die Entsorgung verbunden.

Der kumulierte Energieaufwand, der in Abbildung 23 für verschiedene Stromerzeugungssysteme dargestellt ist, erfasst den Aufwand an Primärenergie für die Herstellung und Entsorgung des Kraftwerks und die Gewinnung und Bereitstellung des Brennstoffes, um eine kWh Elektrizität bereitzustellen. Für die Windenergie liegt er im Bereich von 5 bis 15 %. Bei der Steinkohle und beim Erdgas wird er wesentlich durch den Energieaufwand für die Gewinnung, Aufbereitung und den Transport des Brennstoffs bestimmt. Für die Kernenergie und die Wasserkraft ist er im Bereich von 3 bis 8 % und für die Photovoltaik liegt er derzeit noch um einen Faktor 10 höher. Dies schlägt sich dann auch in der energetischen Amortisationszeit nieder, die bei der Photovoltaik etwa 6 bis 12 Jahre beträgt, und damit deutlich größer als bei allen anderen Systemen ist.

4.2 Materialaufwand

Abbildung 24 zeigt für ausgewählte Materialien die Ressourcenintensität der hier betrachteten Stromerzeugungssysteme. Erfasst ist der jeweilige Materialaufwand für den Bau des Kraftwerks sowie für alle Prozessschritte zur Bereitstellung des Brennstoffs.

Die Tabelle erfasst nur einen kleinen Teil der Rohstoffressourcen, sie stellt also keine vollständige Materialbilanz dar. Sie lässt aber erkennen, dass die geringere Energiedichte der solaren Strahlung und des Windes über die notwendigen großen Energiesammelungsflächen zu einem vergleichsweise hohen Materialbedarf führt.

⇒ Dem hohen Materialaufwand bei Wind und Photovoltaik steht andererseits gegenüber, dass die Stromerzeugung nicht an die Umsetzung eines stofflichen Energieträgers gebunden ist. Diesbezügliche Stoff-freisetzen, die zu Umweltbelastungen führen, treten somit nicht auf. Umweltbelastungen, die aus Stoffemissionen resultieren, können demnach nur im Zusammenhang mit der Herstellung und Entsorgung des Kraftwerks entstehen.

4.3 Kumulierte Emissionen

In Abbildung 25 sind die kumulierten über den gesamten Lebensweg aufsummierten Emissionen ausgewählter Schadstoffe der hier betrachteten Stromerzeugungssysteme gegenübergestellt.

Bei den hier erfassten Schadgasen sind die auf die erzeugte kWh bezogenen Emissionen der Kernenergie, der Wasserkraft und der Windstromerzeugung vergleichsweise niedrig. Verglichen mit der Steinkohle und dem Erdgas sind die kumulierten Emissionen der Photovoltaik durchaus beachtlich. Beim CO₂ machen sie rund 50 - 80 % der Emissionen einer Stromerzeugung mit Erdgas aus.

Hier drückt sich der Umstand aus, dass ein hoher kumulierter Energieaufwand und eine hohe Materialintensität auch bei energierohstofflosen Energiebereitstellungssystemen mit hohen indirekten Schadstoffemissionen verbunden sein kann.

4.4 Gesundheitsrisiken

- Man kann natürlich auch die kumulierten Gesundheitsrisiken, die unter anderem aus den Schadstoffemissionen resultieren ermitteln.
- Die Abb. 26 zeigt, die über die gesamte Kette der Stromerzeugung ursächlich zuzurechnenden Gesundheitsrisiken für verschiedene Stromerzeugungssysteme.
- Die Zahlen beinhalten auch die Risiken von Stör- und Unfällen
- Es gibt keinen Null-Risiko-Technologie
- Risiken der Kernenergie sind vergleichsweise klein
- Aufgrund der öffentlichen Diskussion würde vermutlich niemand von Ihnen diese Relationen vermutet haben.

⇒ Kosten

4.5 Externe Kosten

Zuvor wurde erwähnt, dass wenn Kosten als Maß für die Nachhaltigkeit von Energiesystemen verwendet werden sollen, auch die Kosten der Umweltinanspruchnahme in die Kostenermittlung mit einbezogen werden müssen.

Bezüglich der Ermittlung dieser sogenannten externen Kosten sind zwar in den letzten Jahren erhebliche Fortschritte gemacht worden, dennoch sind die Unsicherheiten für Teilbereiche wie z.B. die Klimaveränderung, vergleichsweise groß.

Die entsprechend dem derzeitigen Stand quantifizierbaren externen Kosten sind in der Abbildung 27 dargestellt. Sie umfassen die Gesundheitsschäden, Schäden der Agrarproduktion, Materialschäden und Schäden an Ökosystemen durch Versauerung. Für die externen Kosten des Treibhauseffektes, deren monetäre Bewertung noch mit erheblichen Unsicherheiten verbunden ist, ist hier eine Bandbreite angegeben, die aus alternative Bewertungsansätzen resultiert.

Die externen Kosten sind für die Kohlekraftwerke am höchsten und für die Kernenergie, der Wind- und Wasserkraftnutzung am geringsten. Die externen Kosten der derzeitigen photovoltaischen Stromerzeugung sind von derselben Größenordnung, wie die der Stromerzeugung aus Erdgas.

4.6 Kosten

Ich hatte schon erwähnt, dass Kosten ein Maß für die Inanspruchnahme knapper Ressourcen sind.

Vor diesem Hintergrund ist dann auch verständlich, dass aufgrund ihrer Ressourcenintensität die Energiebereitstellung aus erneuerbaren Energien mit hohen Kosten verbunden ist.

Die Abbildung 28 zeigt, dass die Stromerzeugungskosten aus erneuerbaren Energien deutlich größer sind als die aus fossilen oder nuklearen Kraftwerken.

Im Rahmen der bisherigen Ausführungen zur Einordnung der erneuerbaren Energien im Hinblick auf eine zukunftsfähige Energieversorgung ist auf die Klimaproblematik noch nicht explizit eingegangen worden.

Die Energiebereitstellung durch Techniken zur Nutzung erneuerbarer Energien ist in ihrer Betriebsphase frei von CO₂-Emissionen, so dass sie zur Minderung energiebedingter Treibhausgasemissionen beitragen können. Im Hinblick auf das zuvor angesprochene Effizienzprinzip ist aber auch hier die entscheidende Frage, die nach der Effizienz, nach dem Kosten-Nutzen-Verhältnis, im Vergleich zu anderen Treibhausgasminderungsmöglichkeiten. In Abbildung 29 sind für verschiedene CO₂-

Minderungsmaßnahmen die spezifischen CO₂-Minderungskosten dargestellt.

Als Effizienzmaß geben die spezifischen CO₂-Minderungskosten, den Aufwand in DM an, um durch die jeweilige Maßnahme die Emission einer Tonne CO₂ zu vermeiden. Dabei bedeuten negative Werte, dass die Maßnahme auch ohne eine Bewertung ihrer CO₂-Minderung wirtschaftlich sinnvoll wäre (No-Regret-Maßnahme).

Die spezifischen CO₂-Minderungskosten der dargestellten Maßnahmen weisen eine große Bandbreite auf. Für die Nutzung meisten Techniken zur Nutzung erneuerbarer Energie die Minderungskosten vergleichsweise hoch sind. Oder anders ausgedrückt, es gibt andere Maßnahmen mit denen CO₂-Minderungen ökonomisch effizienter zu erreichen sind. Die meisten erneuerbaren Energien stellen also derzeit, obwohl im Prinzip CO₂-frei, keine klimaökologisch effizienten Optionen zur Minderung von energiebedingten Treibhausgasen dar.

5. Zusammenfassende Bilanz

Sinn einer Bilanz ist es, die Situation umfassend und nüchtern, d.h. ohne Schönung zu beschreiben, um aus einer solchen Bestandsaufnahme die richtigen Schlussfolgerungen für das weitere Handeln und Vorgehen abzuleiten.

In diesem Sinne fällt eine zusammenfassende Bilanz wie folgt aus:

An der Schwelle zum dritten Jahrtausend sehen wir uns im Energiebereich in unserem Lande zwei großen Herausforderungen gegenüber, nämlich der Schaffung der energieseitigen Voraussetzungen für die Zukunftsfähigkeit des Wirtschaftsstandortes und damit für die Sicherung von Beschäftigung in Deutschland und der Vermeidung nicht tolerierbarer Klimaveränderungen auf dem Weg zu einer nachhaltigen Energieversorgung.

Versucht man die Techniken zur Nutzung erneuerbarer Energiequellen im Hinblick auf die Bewältigung dieser Aufgaben im Vergleich zu anderen Optionen zu bewerten, so weisen sie beachtliche technische Potentiale auf, die einen deutlich größeren Beitrag als heute zur Deckung des Energiebedarfs ermöglichen. Von Ausnahmen abgesehen, sind ihre Kosten der Energiebereitstellung derzeit höher, teilweise deutlich höher als die der fossilen und nuklearen Energieträger, auch wenn man im Sinne einer notwendigen Betrachtung der wahren Kosten, die heute quantifizierbaren externen Kosten mit einbezieht.

Neben den Kosten deuten auch andere aus einer Lebensweganalyse gewonnenen Kenngrößen darauf hin, dass beim gegenwärtigen und in naher Zukunft erreichbaren Entwicklungsstand, die Bereitstellung von Energie aus erneuerbaren Energiequellen einen vergleichsweise hohen Einsatz an knappen volkswirtschaftlichen Ressourcen erfordert. Obwohl im Prinzip CO₂-frei, ist derzeit die Nutzung erneuerbarer Energien aufgrund ihrer hohen Kosten häufig klimaökologisch nicht effizient, da Treibhausgasminderungen durch andere Maßnahmen mit wesentlich geringerem Aufwand zu erreichen sind.

Die erneuerbaren Energien sind, bei nüchterner Abwägung aller Aspekte, nicht der Königsweg zu einer nachhaltigen klimaverträglichen Entwicklung.

Kontinuierliche, längerfristig angelegte Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen sind notwendig, um die Techniken zur Nutzung erneuerbarer Energien zu einer effizienten und tragfähigen Option für eine nachhaltige Energieversorgung zu machen.

Untaugliche Marktanführungsversuche sind eine Verschwendung knapper öffentlicher Mittel: Stromeinspeisungsgesetz, 100.000 Dächer-Solarprogramm.

In diesem Sinne haben die erneuerbaren Energien Zukunft, aber es wäre nicht verantwortbar sich bereits heute auf die erneuerbaren

Energiequellen als die Energie der Zukunft festzulegen und damit die Möglichkeiten, die andere Energieträger und ihre sich weiter entwickelnden Nutzungstechniken für den Übergang zu einer dauerhaften Entwicklung bieten, nicht oder nicht adäquat zu nutzen.

Die eigentliche Gefahr für unsere Zukunft bzw. zur Erreichung einer nachhaltigen Entwicklung besteht wohl nicht in der begrenzten Tragekapazität von Umwelt oder Natur oder in der baldigen Erschöpfung der natürlichen Ressourcen, sondern in dem Erlahmen unserer geistig-moralischen Kraft den Herausforderungen der Zukunft richtig zu begegnen.

Betroffenheit tritt in unserer Gesellschaft immer häufiger an die Stelle von Kompetenz und Urteilsfähigkeit. Die Bereitschaft, Sachfragen zu politisieren, statt sie sachverständig zu durchdringen, nimmt ständig zu.

Der berühmte Staatsmann David Lloyd George hat einmal gesagt: „Jede Generation hat ihren Tagesmarsch auf der Straße des Fortschritts zu vollenden. Eine Generation, die auf dem schon gewonnenen Grund wieder rückwärts schreitet, verdoppelt den Marsch für ihre Kinder“. Der Eindruck ist wohl nicht unberechtigt, dass wir in Deutschland nach einem Stillstand den Weg zurück einläuten, in dem wir leichtfertig eine Problemlösungsoption aufgeben und mit einer falsch konzipierten ökologischen Steuerreform den

kommenden Generationen zusätzliche Hindernisse auf dem Weg zu einer nachhaltigen Entwicklung aufbauen.

Erneuerbare Energien und nachhaltige Energieversorgung

Prof. Dr.-Ing. Alfred Voß
Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER)
Universität Stuttgart
www.ier.uni-stuttgart.de

Zukunftskurs Energie: Innovation und Evaluation im
Energiebereich im 21. Jahrhundert

Frankfurt, 14. November 2002

Nutzung erneuerbarer Energien in Deutschland im Jahr 2001

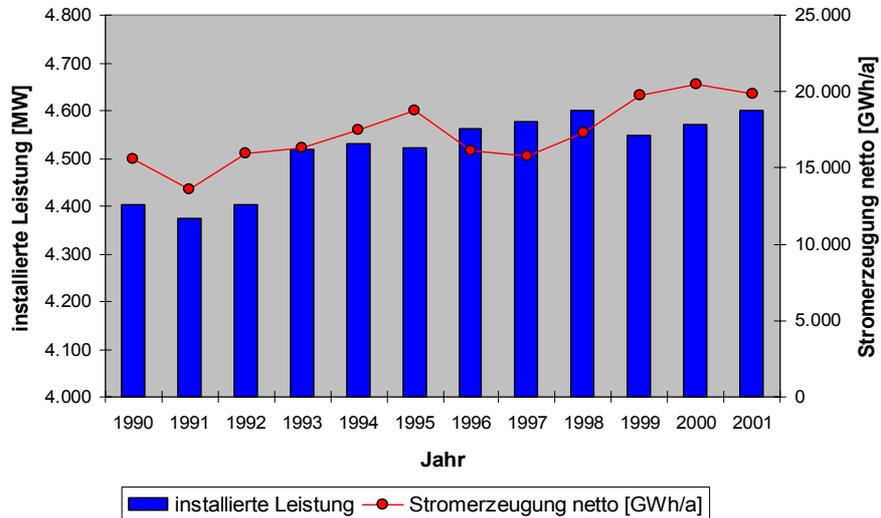
	Primärenergie [PJ/a]	Elektrizität [GWh/a]
Wasserkraft	85,8	23.830
Wind	41,4	11.500
Biomasse	226,0	2.000
Geothermie	3,7	--
Solare Strahlung	7,3	140
Gesamt	364,2 (2,5 %*)	37.470 (6,6 %**)

* Anteil am Primärenergieverbrauch

** Anteil an der Stromerzeugung (2001: 570 TWh brutto)

Quelle: BMU, Erneuerbare Energien und Umwelt in Zahlen, 2002

Entwicklung der Wasserkraftnutzung in Deutschland

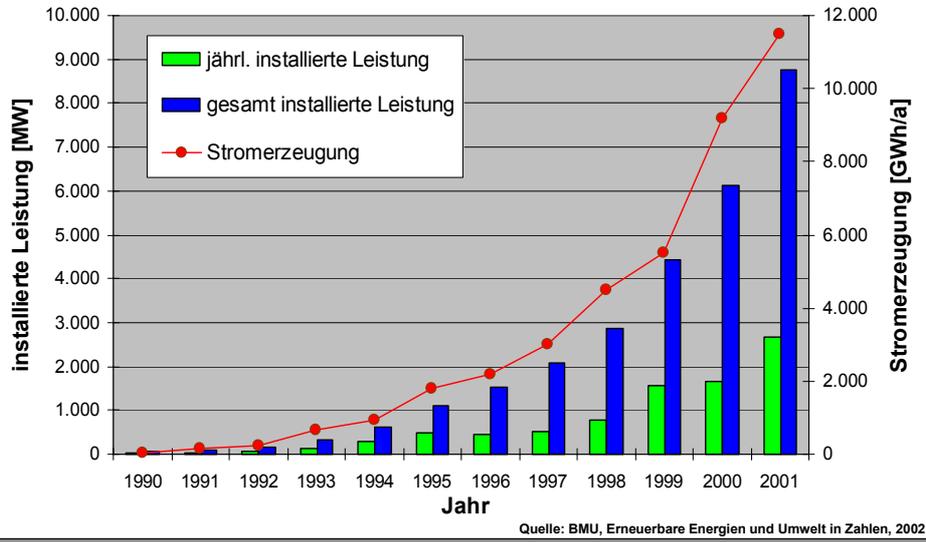


Quelle: Staiß, Jahrbuch Erneuerbare Energien 2001; VDEW (Wert 2001)

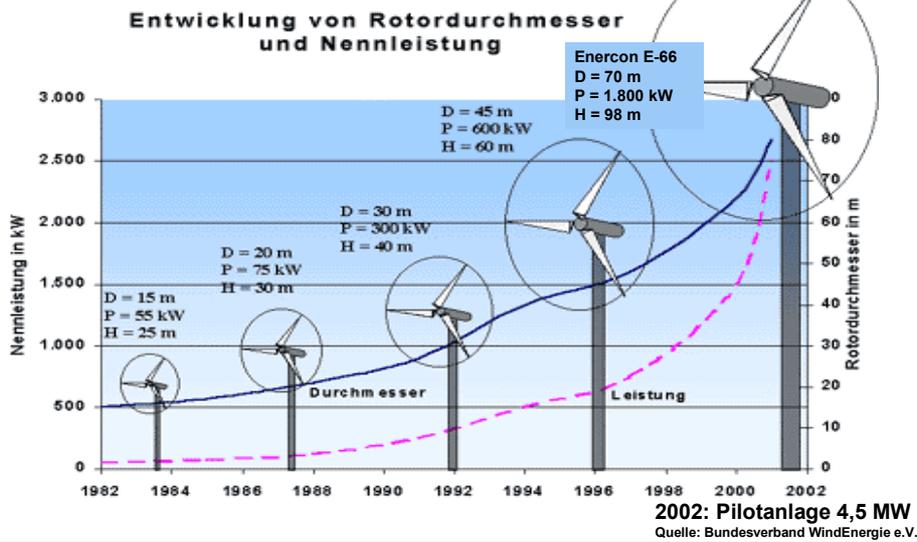
Entwicklungsperspektiven der Wasserkraftnutzung

- ◆ Ausgereifte Anlagentechnik für praktisch alle Leistungsbereiche verfügbar.
- ◆ Das technische Erzeugungspotenzial beträgt ca. 25 TWh/a. Es ist zu rund 80 % bereits ausgeschöpft.
- ◆ Stromerzeugungskosten je nach Randbedingungen und Anlagenleistung zwischen 5 und 19 Eurocents/kWh.

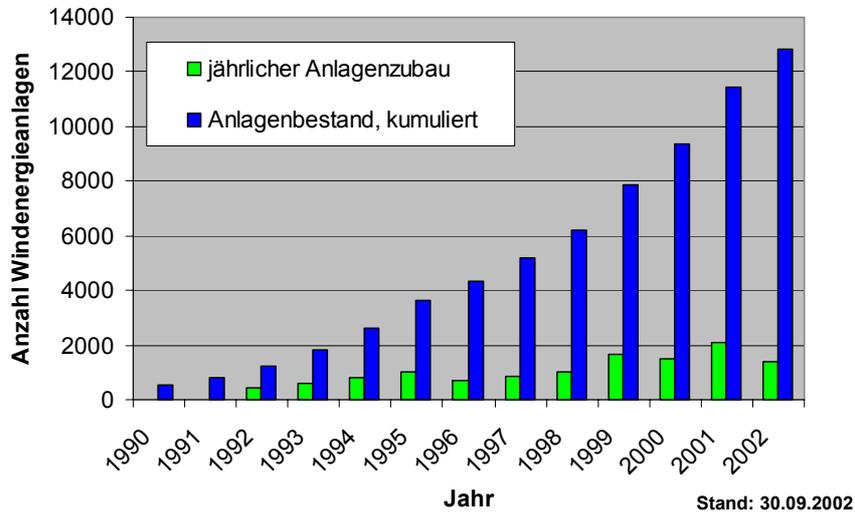
Entwicklung der Windkraftnutzung in Deutschland



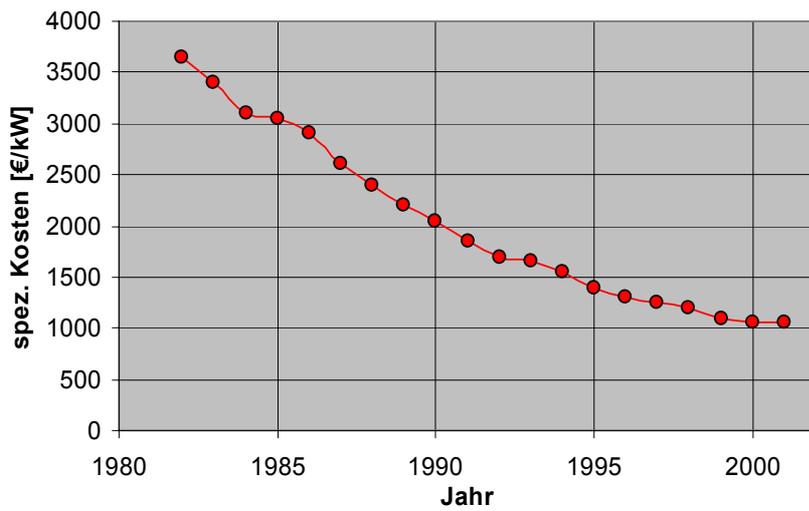
Größenentwicklung von Windenergieanlagen



Entwicklung des Bestands von Windenergieanlagen in Deutschland

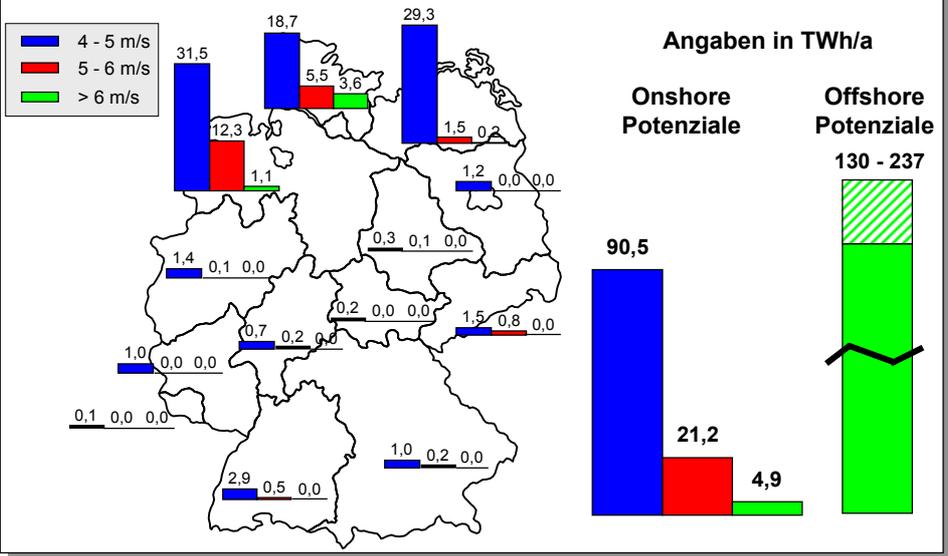


Entwicklung der Kosten von Windenergieanlagen (inkl. Nebenkosten)

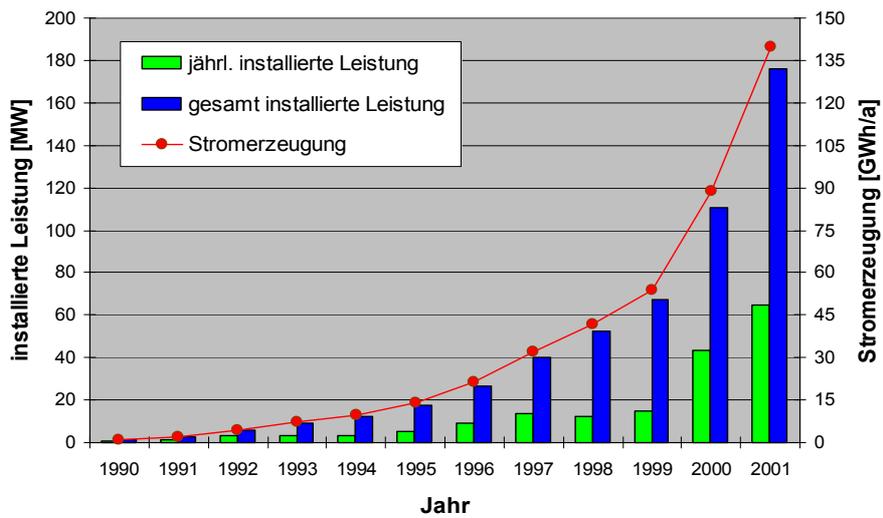


Quelle: BMU, Erneuerbare Energien und nachhaltige Entwicklung, 2002

Technische Potenziale der Windenergieerzeugung in Deutschland

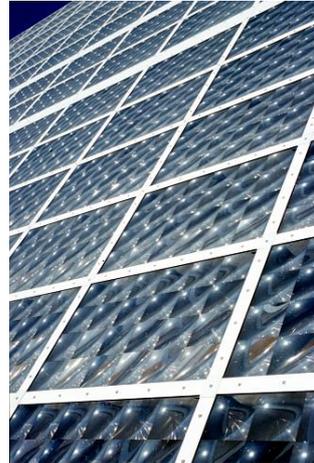
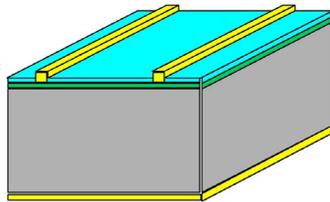


Entwicklung der photovoltaischen Strahlungsnutzung in der BRD



Konventionelle Si-Solarzelle

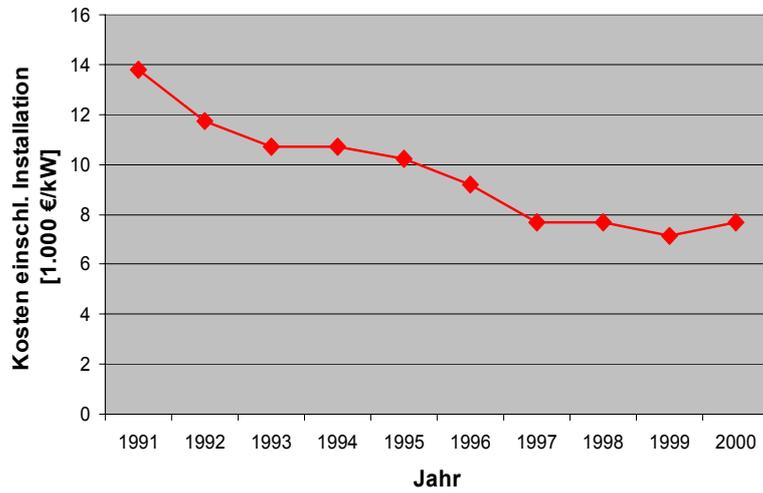
- ◆ Mono- oder multikristalline Si-Scheiben
- ◆ Fläche: $100 \times 100 \text{ mm}^2$ bis $150 \times 150 \text{ mm}^2$
- ◆ Dicke: 250 bis 350 μm
- ◆ Kontaktierung auf Vorder- und Rückseite
- ◆ Marktbeherrschender Zelltyp heute
- ◆ Modul-Wirkungsgrade in der Fertigung: 13 - 18 %
- ◆ Nachteil: hohe Herstellungskosten (Si-Material, Sägen, Serienschaltung)

**Kostenreduktion von PV-Zellen durch neue Technologien**

- ◆ fortgeschrittenes Design für kristalline Si-Zellen
- ◆ Dünnschichtsolarzellen
 - ⇒ amorphes Silizium
 - ⇒ dünnes kristallines Silizium
 - ⇒ Cadmiumtellurid CdTe
 - ⇒ Kupfer-Indium-Diselenid CIS
- ◆ Konzentratoren Systeme
- ◆ Tandemzellen

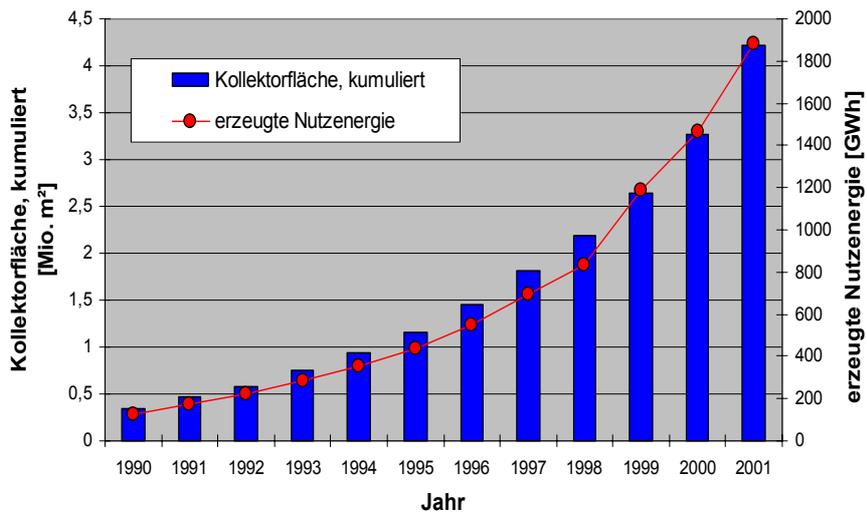


Kostenentwicklung für netzgekoppelte Photovoltaikanlagen (bis 10 kW)



Quelle: IWR 1998/99

Entwicklung der solarthermischen Wärmebereitstellung in der BRD

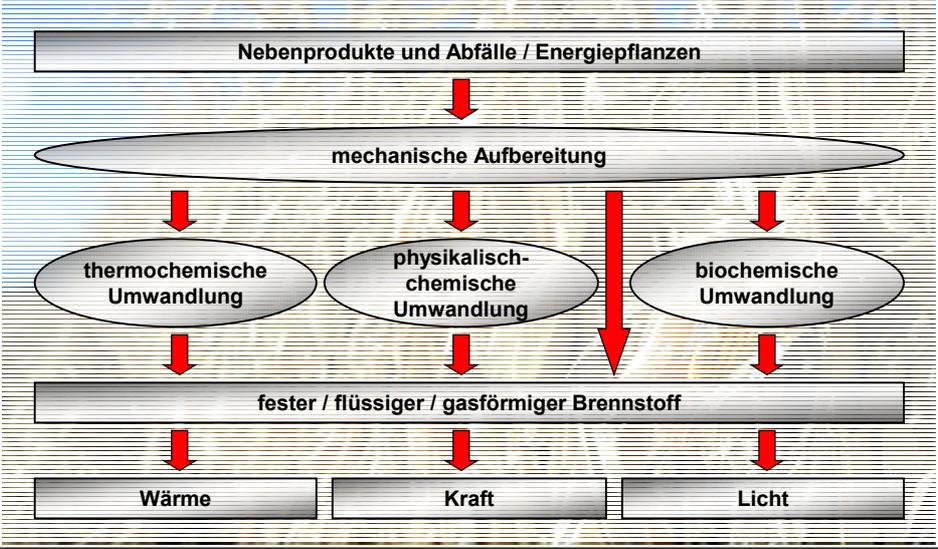


Quelle: BMU, Erneuerbare Energien und Umwelt in Zahlen, 2002

Anlagen der solarthermischen Wärmebereitstellung



Möglichkeiten der energetischen Nutzung von Biomasse



Potenziale u. Nutzung von organischen Nebenprodukten u. Abfällen

	Technisches Potenzial [PJ/a]	Derzeitige Nutzung [PJ/a]
Waldrestholz	142	55
sonst. Restholz	99	56
Stroh	104	3
Biogas-Gülle, Mist	81	17
Deponiegas	16	10
Klärgas	27	8
Summe	470	149

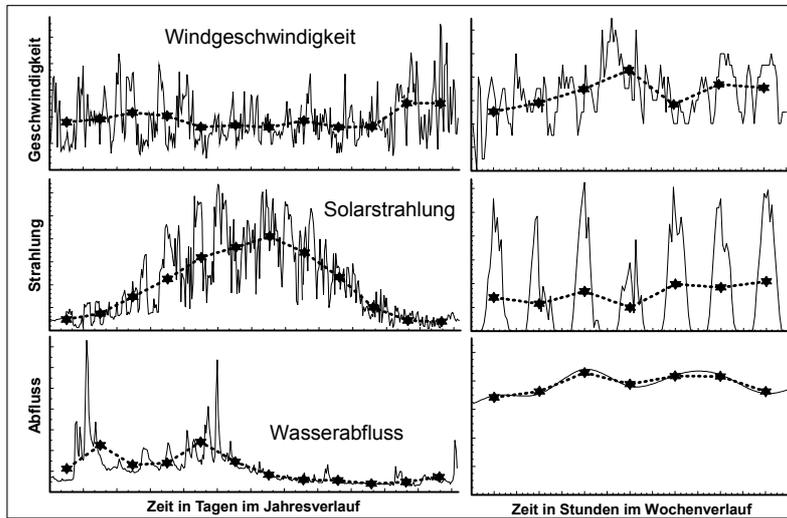
Endenergieverbrauch 2000: 9.185 PJ

Potenziale u. Kosten von Energieträgern aus Energiepflanzenanbau

	Technisches Potenzial [PJ/a] ¹⁾	Energieträgerkosten [€/GJ] [€cent/kWh]	
Festbrennstoffe	330 - 420	6 - 9 ²⁾	ca. 2 - 3
Pflanzenöl	max. 103	ca. 23 ³⁾	ca. 8
Alkohol	max. 120 ⁴⁾	ca. 36	ca. 13

¹⁾ max. Potentiale für eine Fläche von 2 Mio. ha²⁾ Basis: Getreide (Ganzpflanzenballen) ab Anbaufläche³⁾ RME-Kosten ab Fabrik⁴⁾ Alkohol aus Weizen

Jahres- u. Wochengänge aus Monats-, Tages- bzw. Stundenmitteln



Potenziale u. Nutzung regenerativer Energien zur Stromerzeugung

	Technisches Erzeugungspotenzial [TWh/a]	Technisches Endenergiepotenzial [TWh/a]	Nutzung 2001 [TWh/a]
Wasserkraft	ca. 25	ca. 23,5	23,8
Windenergie onshore	104 - 128	30 - 35	11,5
Windenergie offshore	130 - 237		
Photovoltaik Dachflächen	40 - 120	35 - 40	0,14
Photovoltaik Freiflächen	180 - 530		

Bruttostromerzeugung 2001: 570 TWh

Nachhaltige Entwicklung (Sustainable Development)

Brundtland Kommission:

„Nachhaltige Entwicklung“ ist eine „Entwicklung, die die Bedürfnisse der Gegenwart befriedigt, ohne zu riskieren, dass künftige Generationen ihre eigenen Bedürfnisse nicht befriedigen können“.

Ziel

Die Verbesserung der ökonomischen und sozialen Lebensbedingungen aller Menschen, der heute und zukünftig lebenden, mit der langfristigen Sicherung der natürlichen Lebensgrundlage in Einklang zu bringen.

➤ Nachhaltige Entwicklung - Konkretisierung des Leitbildes für den Energieverbrauch

- Naturwissenschaftliche Grundlagen -
Der zweite Hauptsatz der Thermodynamik
- Nachhaltige Energieversorgung und die Nutzung erschöpfbarer Energievorräte
- Energie und die Senkenfunktion der Umwelt
- Nachhaltige Entwicklung und das allgemeine ökonomische Prinzip

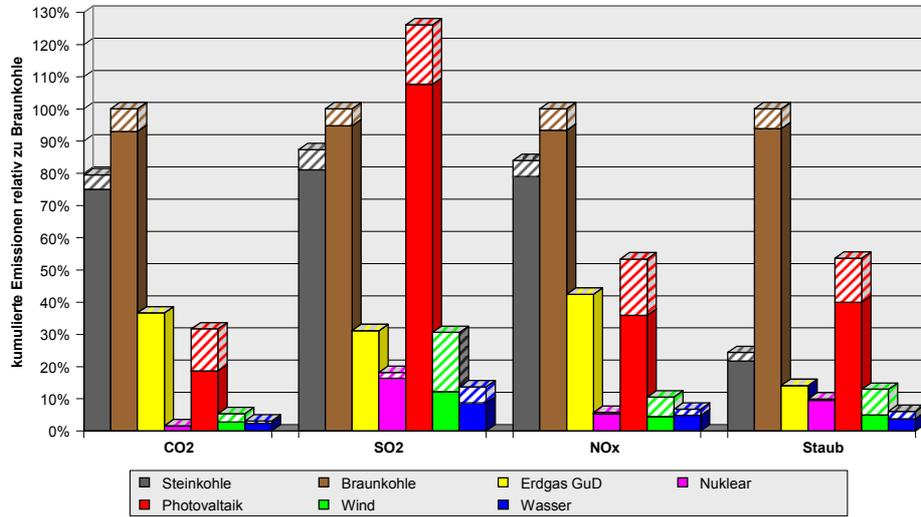
Kumulierter Energieaufwand und energetische Amortisationszeit

	KEA (ohne Brennstoff) [kWh _{Prim} / kWh _{ei}]	EAZ [Monate]
Steinkohle D	0,28 - 0,30	3,2 - 3,6
Braunkohle	0,16 - 0,17	2,7 - 3,3
Erdgas GuD	0,17	0,8
Nuklear	0,07 - 0,08	2,9 - 3,4
Photovoltaik	0,62 - 1,24	71 - 141
Wind	0,05 - 0,15	4,6 - 13,7
Wasser	0,03 - 0,05	8,2 - 13,7

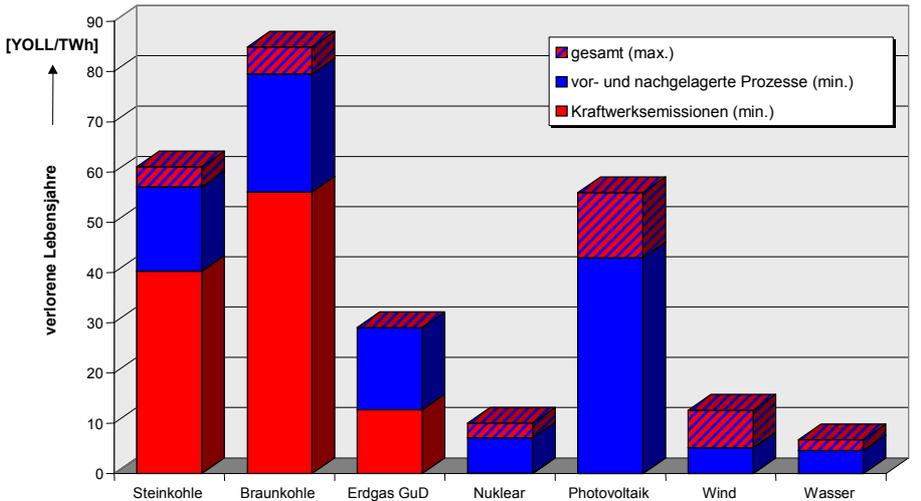
Gesamter Rohstoff- und Materialaufwand

	Eisen [kg / GWh _{ei}]	Kupfer [kg / GWh _{ei}]	Bauxit [kg / GWh _{ei}]
Steinkohle D	1.750 - 2310	2	16 - 20
Braunkohle	2.100 - 2.170	7 - 8	18 - 19
Erdgas GuD	1.207	3	28
Nuklear	420 - 490	6 - 7	27 - 30
Photovoltaik	3.690 - 24.250	210 - 510	240 - 4.620
Wind	3.700 - 11.140	47 - 140	32 - 95
Wasser	1.560 - 2.680	5 - 14	4 - 11

Kumulierte Emissionen



Gesundheitsrisiken *)



*) durchschnittliche spezifische Gesundheitsrisiken für das Gebiet der Bundesrepublik Deutschland

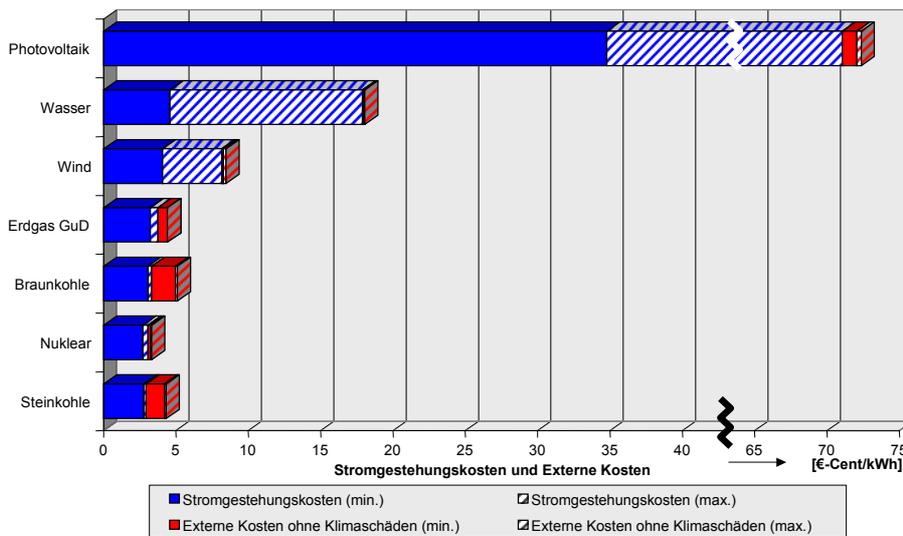
Externe Kosten ^{*)}

[€-Cent/kWh]	Steinkohle	Braun- kohle	Erdgas GuD	Nuklear	Photo- voltaik	Wind	Wasser
Schadenskosten¹⁾							
Gesundheit	0,81 - 0,87	1,13 - 1,20	0,41	0,10 - 0,11	0,61 - 0,79	0,07 - 0,18	0,06 - 0,10
Getreide	0,01 - 0,02	-0,002	0,031	0,000	-0,003	-0,001	0,000
Material	0,01	0,01 - 0,02	0,006	0,002	0,01	0,002	0,001
Treibhauseffekt	0,19 - 0,20	0,24 - 0,25	0,09	0,004	0,05 - 0,08	0,01	0,007
Vermeidungskosten²⁾							
Vers., Eutroph.	0,44 - 0,47	0,52 - 0,55	0,20	0,06	0,39 - 0,48	0,04 - 0,11	0,04 - 0,06
Treibhauseffekt	1,50 - 1,59	1,86 - 2,00	0,73	0,03	0,37 - 0,63	0,06 - 0,11	0,05 - 0,06
Gesamt	1,45 - 2,96	1,89 - 3,77	0,74 - 1,38	0,16 - 0,29	1,05 - 1,92	0,13 - 0,40	0,11 - 0,21

¹⁾ durchschnittliche spezifische Schadenskosten für das Gebiet der Bundesrepublik Deutschland
²⁾ nach Standard-Preis-Ansatz

^{*)} durchschnittliche spezifische Externe Kosten für das Gebiet der Bundesrepublik Deutschland

Gestehungskosten und Externe Kosten der Stromerzeugung



Vergleich der CO₂-Minderungskosten von ausgewählten technischen Maßnahmen

