

Möglichkeiten und Grenzen der Nutzung regenerativer Energieerzeugung

4. Referat

Prof. Dr. Alfred Voss, Stuttgart

1. Einleitung

Den regenerativen oder erneuerbaren Energiequellen wird in der energiepolitischen Diskussion eine immer größere Aufmerksamkeit zuteil, wobei die Bewertungen über ihre Möglichkeiten und Grenzen weit auseinandergehen. Großen Hoffnungen und Zukunftsvisionen von einer vornehmlich auf erneuerbaren Energiequellen beruhenden Energieversorgung steht die Auffassung gegenüber, daß ihr Beitrag bis zum Ende dieses Jahrhunderts günstigenfalls 4 % unseres Energieverbrauchs betragen wird.

Die Frage, welchen Beitrag die regenerativen oder erneuerbaren Energiequellen zu unserer Energieversorgung werden leisten können, ist nicht neu. Sie ist bereits 1974, also nach der ersten Ölpreiskrise gestellt und erörtert worden. Im Unterschied zu damals liegen heute aber zahlreiche Forschungsergebnisse, Demonstrationserfahrungen und in einigen Fällen auch bereits Ergebnisse von Markteinführungsversuchen vor, die Abschätzungen absichern und verlässlichere Antworten über die Bedeutung der regenerativen Energiequellen zur Sicherstellung einer wirtschaftlichen, ausreichenden, umwelt- und sozialverträglichen zukünftigen Energieversorgung erlauben sollten.

Die aus energiepolitischer und energiewirtschaftlicher Sicht zentrale Frage, die es in diesem Kontext zu beantworten gilt, ist dabei nicht die nach dem Beitrag der erneuerbaren Energiequellen im Jahr 2000 oder 2020, sondern die, ob die erneuerbaren Energiequellen, ausgehend von ihren heute erkennbaren Entwicklungspotentialen im Hinblick auf die langfristigen Energieversorgungsprobleme heute bereits als eine tragfähige Säule eines Energiesystems der Zukunft angesehen werden können, so daß es verantwortlich ist, heute bereits Schritte einzuleiten, um unsere Energieversorgung in diese Richtung umzustrukturieren.

Hier soll der Versuch gemacht werden, durch eine Darstellung des gegenwärtigen Entwicklungsstandes und der Entwicklungsperspektiven der verschiedenen Techniken zur Nutzung regenerativer Energiequellen, der Beantwortung dieser Frage näher zu kommen.

Dabei gilt es auch das Spannungsfeld zu beachten, das besteht, zwischen dem gegenwärtig reichlichen Primärenergieangebot zu niedrigen Preisen und der langfristigen Notwendigkeit, einen ggf. deutlich höheren Weltenergiebedarf mit

einem niedrigeren, klimaverträglichen Einsatz an fossilen Energieträgern zu decken.

In den nachfolgenden Ausführungen werden weniger die technischen Details der verschiedenen Nutzungssysteme regenerativer Energiequellen im Vordergrund stehen, als der Versuch die Perspektiven dieser Energiequellen zu umreißen. Der Schwerpunkt wird auf den Nutzungsmöglichkeiten dieser Energiequellen in unserem Land liegen. Dies soll nicht das Faktum verdecken, daß in vielen Ländern die klimatischen und geologischen Voraussetzungen zur Sonnenenergie-, Windenergie- oder Erdwärmennutzung erheblich günstiger sind als bei uns.

Mit dem Begriff »regenerative« oder »erneuerbare« Energiequellen werden eine Vielzahl von natürlich vorkommenden Energieströmen bezeichnet, die über verschiedene Techniken in nutzbare Energieformen, seien es Elektrizität, Wärme oder flüssige und gasförmige Energieträger, umgewandelt werden können (siehe Abb. 1). Von der Vielzahl der regenerativen Energiequellen und ihrer Nutzungstechniken sind aufgrund der klimatischen und sonstigen Gegebenheiten in unserem Land für eine Nutzung nur die folgenden von Bedeutung:

- Wasserkraft
- Windenergie
- solare Strahlung
- Biomasse
- Erdwärme
- Umgebungswärme.

Auf die passive Solarenergienutzung, worunter der gezielte Einbezug von Wärmegewinnen aus Sonneneinstrahlung über die Hülle eines Gebäudes zur Heizwärmeversorgung zu verstehen ist, soll hier ebenso wie auf die Nutzung der Umgebungswärme mittels Wärmepumpen und die Wasserkraftnutzung nicht näher eingegangen werden.

Bis auf wenige Ausnahmen sind die regenerativen Energiequellen gekennzeichnet durch niedrige Leistungs- bzw. Energiedichten und ihre Verfügbarkeit ist zudem periodischen oder unregelmäßigen Schwankungen unterworfen, was einen vergleichsweise hohen Flächenaufwand für die Sammlung und Konzentration der Energie bedingt und andererseits die Speicherung von Energie notwendig macht, um die Gegenläufigkeit von Energieangebot und -bedarf auszugleichen. Die Probleme der Nutzung regenerativer Energiequellen resultieren im wesentlichen aus diesen beiden Eigenarten ihres natürlichen Angebots.

Trotz des teilweise großen theoretischen Potentials einiger regenerativer Energiequellen, so z. B. ist die auf die Fläche der Bundesrepublik Deutschland eingestrahlte Sonnenenergie etwa 80 mal so groß wie der jährliche Energieverbrauch, ist ihr Beitrag zur Energieversorgung gegenwärtig mit nur 2,4 % gering (siehe Tab. 1). Der größte Beitrag stammt von der Wasserkraft gefolgt von der Abfallnutzung (Müll, Klärschlamm, Klärgas, Deponiegas) und dem Brennholz. Die Nutzung des Windes, der Strahlungsenergie mittels Kollektoren und der

Tabelle 1: Beitrag der erneuerbaren Energiequellen zur Energieversorgung der BRD im Jahr 1986

	Primärenergie		Elektrizität	
	Mio. t SKE	% ¹	Mio. kWh	% ²
Wasserkraft	5,4	1,39	18 544	4,54
Brennholz	1,4	0,36	327	0,08
Müll, Klärschlamm	2,0	0,52	5 171	1,27
Klärgas, Deponiegas	0,3	0,08	78	0,02
Wind	.	.	1	.
Strahlungs- und Umgebungswärme	0,3	0,08	.	.
	9,4	2,43	24 121	5,91

¹ In Prozent des Primärenergieverbrauchs (387 Mio. t SKE)

² In Prozent der Bruttostromerzeugung (408 Mrd. kWh)

Beitrag der Wärmepumpen sind gegenwärtig nur marginal. An der Stromerzeugung haben die erneuerbaren Energiequellen mit fast 6 % einen höheren Anteil.

2. Windenergie

Die Entwicklung moderner Windenergiekonverter hat seit 1973 deutliche Fortschritte gemacht. Hinsichtlich der technischen Konzeption überwiegt dabei die klassische Horizontalachsenbauweise. Kleine Windenergiekonverter mit einer Leistung bis 100 kW_{el} werden heute weltweit von zahlreichen Herstellern aus einer serienmäßigen Produktion angeboten. Viele dieser Anlagen haben einen für die kommerzielle Nutzung ausreichenden Reifegrad erreicht. Mittlere und große Windenergiekonverter (bis zu Leistungen von einigen MW_{el}) befinden sich noch im Stadium der Entwicklung und Prototypenprobung.

In der Bundesrepublik Deutschland waren Ende 1988 Windenergiekonverter mit einer Gesamtleistung von etwa 8,5 MW_{el} in Betrieb. Weltweit wird die Zahl der netzgekoppelten Windenergiekonverter auf rd. 20 000 entsprechend einer Leistung von 2000 MW_{el} geschätzt. Allein in Kalifornien sind heute mehr als 16 000 Windenergiekonverter im Einsatz, die bei einer durchschnittlichen Anlagenleistung von etwas weniger als 100 kW jährlich 3,8 TWh Strom erzeugen.

Die Frage nach der Wirtschaftlichkeit von Windenergieanlagen ist nicht einfach zu beantworten. Sie hängt neben den Kosten der Anlage stark von den jeweiligen Windverhältnissen am Standort ab. Die Kosten von kleinen und mittleren Windenergieconvertern konnten in den letzten Jahren deutlich gesenkt werden. Es wird heute davon ausgegangen, daß die gesamten Investitionskosten bei Anlagen mittlerer Leistung in Zukunft bei etwa 2000 DM/kW_{el} liegen werden.

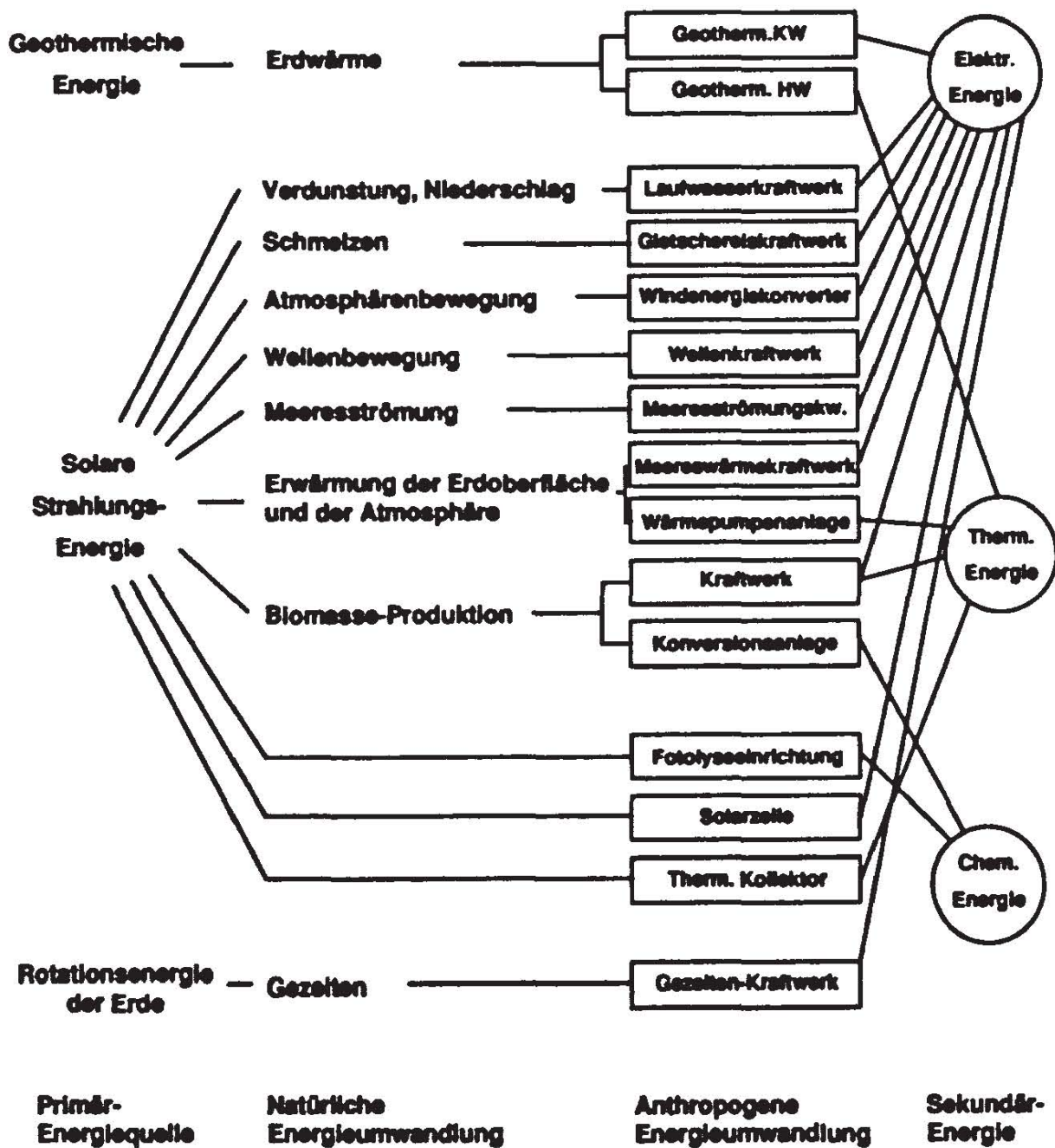


Abb. 1: Überblick über die regenerativen Energiequellen

Abhängig von den Windverhältnissen am Standort resultieren daraus Stromerzeugungskosten von etwa 13 Pf/kWh_{e1} bei windgünstigen Standorten ($\bar{v} \sim 6$ m/s) und 40 Pf/kWh_{e1} bei Standorten mit einer mittleren Windgeschwindigkeit von 3,5 m/s. Setzt man diese Kosten in Relation zu den bei Netzeinspeisung vermiedenen Kosten, die bei Substitution von Kohle- bzw. Kernenergiestrom bei etwa 10 bzw. 3 Pf/kWh_{e1} liegen (gleiches Kostenrechnungsverfahren unterstellt), so läßt sich erkennen, daß für eine breitere Markteinführung eine ausreichende Wirtschaftlichkeit noch nicht gegeben ist.

Die wesentlichen Anwendungsrestriktionen der Windenergie resultieren aus der starken Abhängigkeit der Leistung und Energiegewinnung von den Windverhältnissen. Sinnvolle Standorte für Windenergiekonverter sind deshalb auf die Gebiete mit hohen mittleren Windgeschwindigkeiten begrenzt, in unserem Land also auf die Norddeutsche Küste sowie die Hochlagen der Mittelgebirge. Es ist nicht auszuschließen, daß die Aufstellung einer Vielzahl von Windenergiekonvertern wegen der damit verbundenen Veränderungen des Landschaftsbildes auf Widerstand stoßen wird.

3. Niedertemperatur-Kollektoranlagen

Es sei nun auf die Nutzungsmöglichkeiten der solaren Strahlungsenergie eingegangen. Das Angebot an solarer Strahlung in der Bundesrepublik Deutschland ist regional durchaus verschieden. So schwankt die jährlich auf eine horizontale Fläche einfallende Globalstrahlung zwischen 800 und 1200 kWh/m²a. Durch eine entsprechende Positionierung und Nachführung der Empfängerfläche läßt sich die verfügbare Strahlungsenergie unter günstigen Bedingungen, z. B. im süddeutschen Raum, auf rd. 1600 kWh/m²a anheben.

In sonnengünstigen Gebieten ist die verfügbare Strahlungsenergie aber zwei- bis dreimal so groß wie bei uns. Zu erwähnen ist noch, daß wegen des hohen diffusen Strahlungsanteils in der Bundesrepublik Deutschland für konzentrierende Kollektorsysteme sehr ungünstige Anwendungsbedingungen herrschen, so daß ihr Einsatz auf die Gebiete mit hoher Direkteinstrahlung begrenzt ist.

Aufgrund dieser natürlichen Klimabedingungen ergibt sich, daß eine direkte thermische Nutzung der Strahlungsenergie in unserem Land wohl auf die Erzeugung von Niedertemperaturwärme bis rd. 120 °C beschränkt ist.

Als potentielle Einsatzgebiete für Niedertemperaturkollektoranlagen sind die Erwärmung von Schwimmbadwasser, die Warmwasserbereitung und die Raumheizung zu nennen.

Die Entwicklung des für Niedertemperaturanwendungszwecke fast ausschließlich verwendeten Flachkollektors kann bis auf die Frage der Langzeitbeständigkeit heute als abgeschlossen angesehen werden. Die für die praktischen Anwendungen von Niedertemperaturkollektoranlagen wichtige Frage der optimalen Auslegung und Anpassung des Systems an den Verbrauch und seine zeitlichen Schwankungen ist dagegen noch nicht immer zufriedenstellend gelöst. Viele Solaranlagen zur Brauchwassererwärmung konnten die in sie gesetzten Erwartungen in der Vergangenheit nicht erfüllen, weil sie falsch dimensioniert und dem Nutzungszweck nicht richtig angepaßt waren. Flachkollektorsysteme zur Brauchwassererwärmung mit selektiver Beschichtung und Einfachverglasung erzielen heute nutzbare Wärmeabgaben von 250 bis 350 kWh/m²a. Offen ist noch, ob die Flachkollektoren langfristig durch die leistungsfähigeren Vakuum-Röhrenkollektoren verdrängt werden. Ihre Energieausbeute liegt mit rd. 500 kWh/m²a fast doppelt so hoch, sie sind aber auch erheblich teurer.

Die Erwärmung von Schwimmbadwasser in Sommerfreibädern bietet besonders günstige Bedingungen für die Nutzung solarer Strahlung, da hier die erforderlichen Temperaturen und Aufheizspannen sehr niedrig sind und der Bedarf mit der Sonneneinstrahlung gleichzeitig anfällt. Die kostenintensive Speicherung entfällt, da das Beckenwasser selbst diese Funktion übernimmt. Heute verfügbare Flachkollektoren und Absorber für die direkte Erwärmung von Schwimmbadwasser sind sehr einfach aufgebaut und arbeiten zufriedenstellend.

Die Markteinführung von Flachkollektoranlagen ist nach einem anfänglichen Boom in den achtziger Jahren nicht weiter vorangekommen. Bis heute sind in der Bundesrepublik Deutschland etwa 250 000 m² Kollektorflächen installiert. Die stark geschrumpfte Nachfrage ist wohl vor allem auf die mangelnde Wirtschaftlichkeit zurückzuführen.

Die Kosten solarthermischer Systeme variieren stark (siehe Tab. 2), da die Systeme je nach Verwendungszweck unterschiedlich komplex, z. B. mit oder ohne Speicher, und die Kollektoren technisch mehr oder weniger aufwendig sind. Auch streuen die Installationskosten erheblich. Die Kostenangaben in Tab. 2 gelten für die heute günstigsten Systeme. Der äquivalente Brennstoffpreis gibt an, bei welchen Kosten für das leichte Heizöl die solare Anlage mit konventionellen Systemen wirtschaftlich konkurrieren könnte. Bis auf die Freibadwassererwärmung sind alle Systeme noch weit von der Wirtschaftlichkeitsschwelle entfernt.

Tabelle 2: Kosten ausgewählter solarthermischer Nutzungssysteme (Angaben im Geldwert 1986)

	Feldgröße (m ²)	Solarer Deckungsgrad (%)	Systempreis des solaren Teils (DM ₈₆ /m ²)	Äquivalenter Brennstoffpreis Pfg/kWh
Freibad	1200	100	130	3,2
Warmwasser- Groß-System	350	25	811	10,3
Warmwasser Ein-/Zwei- Familienhaus	7	60	1170	17,4
Nahwärmesystem (60/30 °C)	2500	25	475	10,4

4. Photovoltaik

Die wohl eleganteste Art, die Primärenergiequelle Sonne zu nutzen, stellt die Solarzelle dar. Nachdem sich in den sechziger Jahren Solarzellen in der Raumfahrt hervorragend bewährt hatten, wurden auch terrestrische Anwendungen ins Auge gefaßt. Seit 1973 sind die Anstrengungen zur Entwicklung von Solarzellen für terrestrische Nutzungen erheblich verstärkt worden. Vor allem in den USA, in Japan und in den Ländern der Europäischen Gemeinschaft sind beachtliche Forschungs- und Entwicklungsprogramme angelaufen. Die deutsche Industrie nimmt auf dem Gebiet der Photovoltaik-Entwicklungen auf Basis von kristallinem Silizium im internationalen Vergleich eine führende Stellung ein.

Im Bereich der Solarzellen aus kristallinem Silizium werden heute zuverlässig funktionierende Zellen im industriellen Maßstab hergestellt. Das Zellenmaterial wird in mono- oder multikristalliner Form eingesetzt. Die Wirkungsgrade, die in industriellen Produktionen erreicht wurden, liegen bei bis zu 16 bzw. 13%. Dünnschichtzellen aus amorphem Silizium erreichen heute einen Wirkungsgrad von 7% in der Produktion.

Hohe Wirkungsgrade können zwar zur Verbesserung der Wirtschaftlichkeit von Solarzellen beitragen, im Normalfall ist aber bei Fertigung terrestrischer Solarzellen immer ein Kompromiß zwischen dem erzielbaren Wirkungsgrad und den Herstellkosten zu schließen. Wichtig erscheint hier auch noch der Hinweis, daß der Gesamtnutzungsgrad photovoltaischer Systeme durch Abschattungs-, Reflexions-, Leitungs-, Umwandlungs- und gegebenenfalls Speicherverluste deutlich geringer ist, als die angegebenen Wirkungsgrade einer einzelnen Zelle.

Neben den Dünnschichtzellen auf Basis von amorphem Silizium wird an der Entwicklung andere Materialien für Dünnschichtzellen gearbeitet. Zu nennen sind hier Galliumarsenid, Cadmiumsulfid/Cadmiumselenid, Kupferindiumselenid und Siliziumgermanium. Inwieweit sich mit diesen Materialien neue Wege zur Herstellung kostengünstiger Zellen eröffnen, läßt sich heute noch nicht abschließend beurteilen.

Trotz des bereits erreichten hohen technologischen Standes und der erheblichen Fortschritte der letzten Jahre hat die Photovoltaik noch ein großes physikalisch-technisches Entwicklungspotential. Dies gilt sowohl für die Dünnschicht-Solarzellen wie auch für die kristallinen Siliziumzellen, so daß heute noch nicht absehbar ist, welche Zellmaterialien und Herstellungsprozesse zu den kostengünstigsten Solarzellen und damit zur Wirtschaftlichkeit auch bei größeren Photovoltaiksystemen führen können.

Man schätzt, daß der Markt für Solarzellen im Jahre 1987 bereits ein Volumen von etwa 25 MW erreicht hat, was einem Umsatzvolumen der Photovoltaik(PV)-Industrie von weltweit etwa 400 Mio. \$ entspricht. Dennoch war die Anwendung der Photovoltaik auf Kleinanwendungen in Marktnischen wie bei Uhren, Taschenrechnern oder kleinen dezentralen Stromerzeugungen beschränkt. Dies liegt in den hohen Kosten der Solarzellensysteme begründet.

Trotz erheblicher Kostensenkungen in den vergangenen zehn Jahren liegen die Kosten von Solarzellenmodulen für Anwendungen im größeren Leistungsbereich heute noch bei 10 bis 15 DM/W (peak). Dies ist erheblich mehr als die Kostenprognosen der späten siebziger Jahre vorausgesagt haben. Die Stromgestehungskosten von photovoltaischen Kraftwerken in der Bundesrepublik Deutschland liegen damit heute zwischen 2 und 3 DM/kWh (elektrisch), in den sonnenreichen Ländern sind sie um einen Faktor 2 bis 3 geringer. Erwähnt sei noch, daß die Kosten für eine eventuelle Speicherung zur Anpassung der Erzeugung an die Nachfrage noch hinzuzurechnen wären. Eine Kostensenkung um einen Faktor 10 oder mehr wird also erforderlich sein, wenn die Photovoltaik eine größere energiewirtschaftliche Bedeutung erlangen soll.

Ob und gegebenenfalls wann dies erreicht werden kann, ist trotz der bestehenden Kostenreduktionspotentiale heute nicht absehbar. Eine Fortführung der Forschungs- und Entwicklungsarbeiten ist notwendig, um den Kostenzielen näher zu kommen. Pilot- und Demonstrationsanlagen können in diesem Kontext dazu beitragen, die System- und Anlagentechnik zu verbessern und praktische Erfahrungen mit photovoltaischen Energieerzeugungsanlagen zu sammeln.

Auch in der Bundesrepublik Deutschland sind photovoltaische Demonstrationsanlagen mit Leistungen von 300 kW bereits in Betrieb. Einer Erzeugung photovoltaischer Elektrizität in größerem Umfang setzt in unserem Land der dazu notwendige Flächenbedarf enge Grenzen. Dieses Problem läßt sich mit folgendem Beispiel verdeutlichen: Ein Solarzellenkraftwerk, das jährlich 10 TWh an elektrischer Energie erzeugen soll, dies entspricht der jährlichen Erzeugung eines Kernkraftwerkes mit einer Leistung von 1300 MW (elektrisch), hätte einen Flächenbedarf von 100 bis 160 km².

In Gegenden, die näher am Äquator liegen, ist natürlich, aufgrund der höheren Solareinstrahlung, der für eine gleiche Energieerzeugung notwendige Flächenbedarf entsprechend geringer.

5. Biomasse

Über die Photosynthese von Pflanzen mit Hilfe solarer Strahlungsenergie erzeugte Kohlenwasserstoffe werden als Biomasse bezeichnet.

Unter dem Sammelbegriff Biomasse sind gewöhnlich eine Vielzahl unterschiedlicher Stoffe wie Holz, Stroh, Grünpflanzen aber auch tierische und landwirtschaftliche Abfälle subsummiert, die in einer Vielzahl von Verfahren mechanisch, thermisch oder auch biologisch veredelt werden können, um für energetische Zwecke zur Verfügung zu stehen. Die Gewinnung, Umwandlung und Nutzung von Biomasse ist ein weites und komplexes Feld, dessen umfassende Darstellung mehr als einen Aufsatz erfordern würde. Deshalb können hier nur einige wesentliche Punkte angesprochen werden.

Für eine Beurteilung der energiewirtschaftlichen Bedeutung der Biomasse ist es notwendig, zwischen der Rückstands- und Abfallbiomasse sowie der Produktion

von Biomasse allein für energetische Zwecke in Energieplantagen zu unterscheiden.

Der energetischen Verwertung von Rückstands- und Abfallbiomasse, worunter neben den land- und forstwirtschaftlichen Abfällen wie Stroh und Holz auch die Tierhaltungsabfälle sowie der Müll und Klärschlamm zu verstehen sind, kommt unter dem Gesichtspunkt der Abfallentsorgung eine besondere Bedeutung zu. Jährlich fallen in der Bundesrepublik Deutschland etwa 70 Mio. t organische Trockensubstanz in Form von Rückstands- und Abfallbiomasse an, was einem Energieäquivalent von rd. 46 Mio. t SKE entspricht.

Von diesem energetischen Potential der Rückstands- und Abfallbiomasse läßt sich wegen konkurrierender Verwendungszwecke, z. B. wird Stroh als Einstreu, Futter- und Düngemittel genutzt, und wegen des notwendigen Sammelaufwandes nur ein Teil sinnvoll einer energetischen Verwendung zuführen. In verschiedenen Untersuchungen ist das nutzbare Potential der Abfall- und Rückstandsbiomasse mit rd. 10 Mio. t SKE/a ermittelt worden, was etwa 3 % unseres heutigen Energieverbrauchs entspricht. Die Wirtschaftlichkeit einer energetischen Verwertung von Abfallbiomasse hängt natürlich von der jeweiligen Gegebenheit ab. Generell gilt, daß sie sich dann besonders günstig darstellt, wenn die Abfälle in konzentrierter Form anfallen oder wenn sie ohnehin entsorgt werden müssen.

Angesichts des in vielen Regionen der Welt herrschenden Hungers kann man durchaus die Erzeugung von Biomasse allein für energetische Zwecke in Frage stellen. Für eine Produktion von Biomasse mittels Energieplantagen kommen besonders stärke- und zuckerhaltige Pflanzen, wie die Zuckerrübe, schnellwachsende Hölzer, wie die Pappel, oder ölhaltige Pflanzen, wie der Raps, in Betracht.

Unterstellt man einmal, daß die landwirtschaftliche Überschußfläche in unserem Land mit einer Größe von 1,6 Mio. ha für den Energiepflanzenanbau genutzt werden könnte, so ließe sich mit dieser Fläche je nach angebauter Biomasse eine Energiemenge von 3 bis 12 Mio. t SKE bereitstellen, was 1 bis 3 % unseres gegenwärtigen Primärenergieverbrauchs entspricht.

Anders als bei der Nutzung der Abfallbiomasse sind die aus energetischem Pflanzenanbau gewonnenen Energieträger heute wirtschaftlich nicht konkurrenzfähig. So liegen die Kosten von Bio-Alkohol bei 3 DM/l Benzinäquivalent und die Gewinnung von Kraftstoff aus Raps führt zu Kosten von 1,5 DM/l Dieseläquivalent. Diese Kosten sind mit den heutigen Kraftstoffkosten ohne Mineralölsteuer von rd. 50 Pf/l zu vergleichen.

6. Geothermie

Die Gewinnung geothermischer Energie zielt darauf ab, den Wärmehalt der Erdkruste nutzbar zu machen. Mit zunehmender Tiefe steigt die Temperatur der Erdkruste normalerweise um 25 bis 30 °C je km an. Dieser geothermische Temperaturgradient ist in einigen Gebieten, den sog. geothermischen Anomalien

wesentlich größer, so daß eine energetische Nutzung ins Auge gefaßt werden kann. Man unterscheidet zwei Arten geothermischer Vorkommen, sog. hydrothermale Vorkommen mit wasserführenden Schichten und trockene Vorkommen, d. h. heiße Gesteinsschichten. Thermalwasserführende Schichten sind in der Bundesrepublik im Oberrheingraben und südöstlich der schwäbischen Alb zu finden. Die Temperaturen sind aber mit 40 bis 170 °C zu gering, so daß eine Nutzung mit vertretbaren Kosten nicht möglich ist. Die Nutzung trockener, heißer Gesteinsschichten mittels der sog. Hot-Dry-Rock Technik erscheint nach den vorliegenden Erfahrungen machbar. Die Wirtschaftlichkeit dieses Verfahrens ist noch nicht abschließend zu beurteilen.

7. Potentialabschätzung

Angaben über die Beiträge regenerativer Energiequellen zur Energieversorgung oder über ihre Potentiale sind wertlos, wenn nicht gleichzeitig die Randbedingungen und Annahmen deutlich gemacht werden, die den Abschätzungen zugrunde liegen. In der Vergangenheit sind eine Reihe von Untersuchungen durchgeführt worden mit dem Ziel, den zukünftigen Beitrag der regenerativen Energiequellen zur Energieversorgung abzuschätzen. Die Ergebnisse fallen nicht stark auseinander, so daß es ausreichend ist, die Ergebnisse der jüngsten Untersuchungen aus dem Jahr 1984 zu erläutern.

In der DIW/ISI-Studie wurde zunächst das wirtschaftliche Potential der erneuerbaren Energiequellen in der Bundesrepublik Deutschland, verstanden als die Bereiche, in denen die erneuerbaren Energiequellen bis zum Jahr 2000 konkurrenzfähig sein können, abgeschätzt. Die wesentlichen Annahmen, die der Ermittlung der wirtschaftlichen Potentiale zugrunde liegen, sind ein Anstieg des Heizöl- und des Erdgaspreises (reale Preise im Geldwert von 1983) auf rd. 10 bzw. 13 Pf/kWh sowie ein Ansteigen der Preise für elektrische Energie um durchschnittlich 2 bzw. 3,5 %/a. Unter diesen Annahmen ergibt sich im Jahr 2000 ein wirtschaftlich erschließbares Potential der regenerativen Energiequellen von 32 bzw. 37 Mio. t SKE/a (siehe Tab. 3). Dies entspricht 8,2 bzw. knapp 10 % unseres heutigen Primärenergieverbrauchs.

Von diesem wirtschaftlichen Potential läßt sich aber aufgrund der erforderlichen Markteinführungszeiten und der Ersatzinvestitionszyklen bis zum Jahr 2000 nur ein Teil ausschöpfen, der mit 15 bis 18 Mio. t SKE/a angegeben wird. Hiervon werden heute bereits durch bestehende Wasserkraftanlagen sowie Anlagen zur Verwertung von Müll und Abfallbiomasse etwa 9,4 Mio. t SKE/a genutzt, so daß sich ein zusätzlicher Beitrag der erneuerbaren Energiequellen bis zum Jahr 2000 von rd. 6 bis 9 Mio. t SKE/a ergibt. Dieser Beitrag ist vor dem Hintergrund der zugrundegelegten Annahmen zu bewerten.

Tabelle 3: Potentiale der erneuerbaren Energiequellen in der Bundesrepublik Deutschland in Mio. t SKE/a

Energiequellen	Wirtschaftliches Potential 2000	
	Günstige Variante	Ungünstige Variante
Solarenergie, gesamt	3,1	1,61
- NT-Wärme (aktiv)	2,0	0,91
- NT-Wärme (passiv)	1,0	0,7
- Photovoltaik	0,1	-
Windenergie	12,65	12,37
Wasserkraft	10,14	9,13
Biomasse	10,60	8,70
Geothermie	0,04	-
Insgesamt	36,53	31,81
davon ausschöpfbar	18,00	14,85

8. Importierter solarer Wasserstoff

Neben der Nutzung der erneuerbaren Energiequellen im Inland, besteht natürlich auch die Möglichkeit Energieträger, die aus erneuerbaren Energiequellen erzeugt wurden, zu importieren. Die Vision der »Solar-Wasserstoff-Wirtschaft« hat in diesem Zusammenhang in jüngster Zeit eine gewissen Popularität und viel öffentliches Interesse erlangt. Eine nüchterne und realistische Einschätzung der Möglichkeiten und Grenzen ist auch hier angebracht.

Bei der Solar-Wasserstoff-Technologie sind der solare und der Wasserstoffbereich zu unterscheiden. Wasserstoff ist ein sekundärer Energieträger, der wie Strom mittels Einsatz von Energie, sei es nun aus der Sonne, der Kernenergie oder der Kohle erst hergestellt werden muß. Er ist weitgehend universell anwendbar, gut transportierbar und relativ gut speicherbar sowie bei richtiger Anwendung umweltfreundlich, da als Endprodukt seiner energetischen Umsetzung Wasser entsteht. Er hat also viele Eigenschaften mit dem Sekundärenergieträger Strom gemeinsam, ist ihm heute in der Speicherbarkeit überlegen, in dem Herstellungsaufwand aber unterlegen. Die nach dem heutigen Kenntnisstand aussichtsreichste Methode der Herstellung von Wasserstoff ist die Elektrolyse mit Strom. Damit ist die Herstellung von Wasserstoff naturgemäß technisch aufwendiger und energetisch verlustreicher, was bisher eine wirtschaftliche Erzeugung von Wasserstoff als Energieträger nicht erlaubt.

Die einzelnen Komponenten eines Wasserstoff-Energiesystems sind technisch verfügbar, wenn auch noch nicht ausgereift. Und auch der Umgang mit Wasserstoff, z. B. in der Chemie, ist wohlvertraut. Die weiteren Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen müssen zum einen darauf ausgerichtet sein, die

bestehenden energetischen Nachteile gegenüber dem Konkurrenten Strom zu reduzieren sowie vor allem die Erzeugungskosten des Wasserstoffs zu senken.

Wie hoch die Barrieren sind, die der solarerzeugte Wasserstoff noch überwinden muß, um ein wirtschaftlich konkurrenzfähiger Energieträger zu werden, zeigen die Zahlen in Tab. 4.

Angegeben sind Schätzungen der künftigen Gestehungskosten von importier-

Tabelle 4: Kosten von importiertem Wasserstoff aus Sonnenenergie (Pf/kWh)

	1986	2000	2020
Solarzellenmodul (DM/W _p)	18,5	6,25	1,25
Elektrolyseur (DM/kW _{el})	1200	700	500
H ₂ -Gestehungskosten	130	50	15
Erdgaspreis (Einfuhr) (3 %/a Preissteigerung)	3	4,5	8,2
H ₂ aus Kernenergie		~ 10	~ 10

tem Wasserstoff aus Sonnenenergie frei Grenze der Bundesrepublik Deutschland. Die Kosten des solarerzeugten Wasserstoffs werden im wesentlichen bestimmt durch die Erzeugungskosten, d. h. die Kosten des Solarkraftwerks und der Elektrolyseanlage. Unterstellt man, daß die Kosten der Solarzellenmodule bis zum Jahr 2020 auf 1,25 DM/W (peak) und die des Elektrolyseurs von heute 1200 DM/kW_{el} auf 500 DM/kW_{el} gesenkt werden könnten, so würden die Kosten des Wasserstoffs frei Grenze bei etwa 15 Pf/kWh liegen. Zum Vergleich sind die Erdgaspreise angegeben, basierend auf der Annahme, daß diese real um 3 %/a ansteigen. Die Kosten des solaren Wasserstoffs wären dann im Jahr 2020 fast noch doppelt so hoch wie der Erdgaspreis. Wasserstoff erzeugt mittels Elektrizität aus Kernkraftwerken würde etwa 10 Pf/kWh kosten. Diese Zahlen sind nicht als verlässliche Prognose zu verstehen, sie sollen nur deutlich machen, wie groß die Herausforderung ist, importierten solaren Wasserstoff zu einem wirtschaftlich konkurrenzfähigen Energieträger zu machen. Aus heutiger Sicht ist solarerzeugter Wasserstoff eine technisch machbare Option für die zukünftige Energieversorgung, ob sie aber auch ökonomisch tragfähig wird, läßt sich heute nicht absehen.

9. Risiken

Abschließend soll noch kurz auf den Aspekt der Risiken und Gefährdungen eingegangen werden, die mit der Energiebereitstellung verbunden sind.

Von dem Betrieb einer energietechnischen Anlage, z. B. eines Kraftwerks, können Gefährdungen für die Gesundheit und das Leben der Bevölkerung ausgehen, z. B. durch die Emission von Schadstoffen. Zu diesen Risiken, die von dem Betrieb der Anlage ausgehen, sind aber noch die Risiken der gesamten Brennstoffversorgung, der Entsorgung, die Risiken, die mit dem Bau einer Anlage direkt und indirekt verbunden sind, sowie die Risiken aus Unfällen und Störfällen hinzuzurechnen, will man das Gesamtrisiko, das mit der Nutzung eines Energieträgers ursächlich verbunden ist, ermitteln.

Verfolgt man die energiepolitische Diskussion in unserem Lande, so könnte man den Eindruck gewinnen, daß die Nutzung der erneuerbaren Energiequellen ohne Risiken für die Gesundheit und das Leben der Menschen wäre.

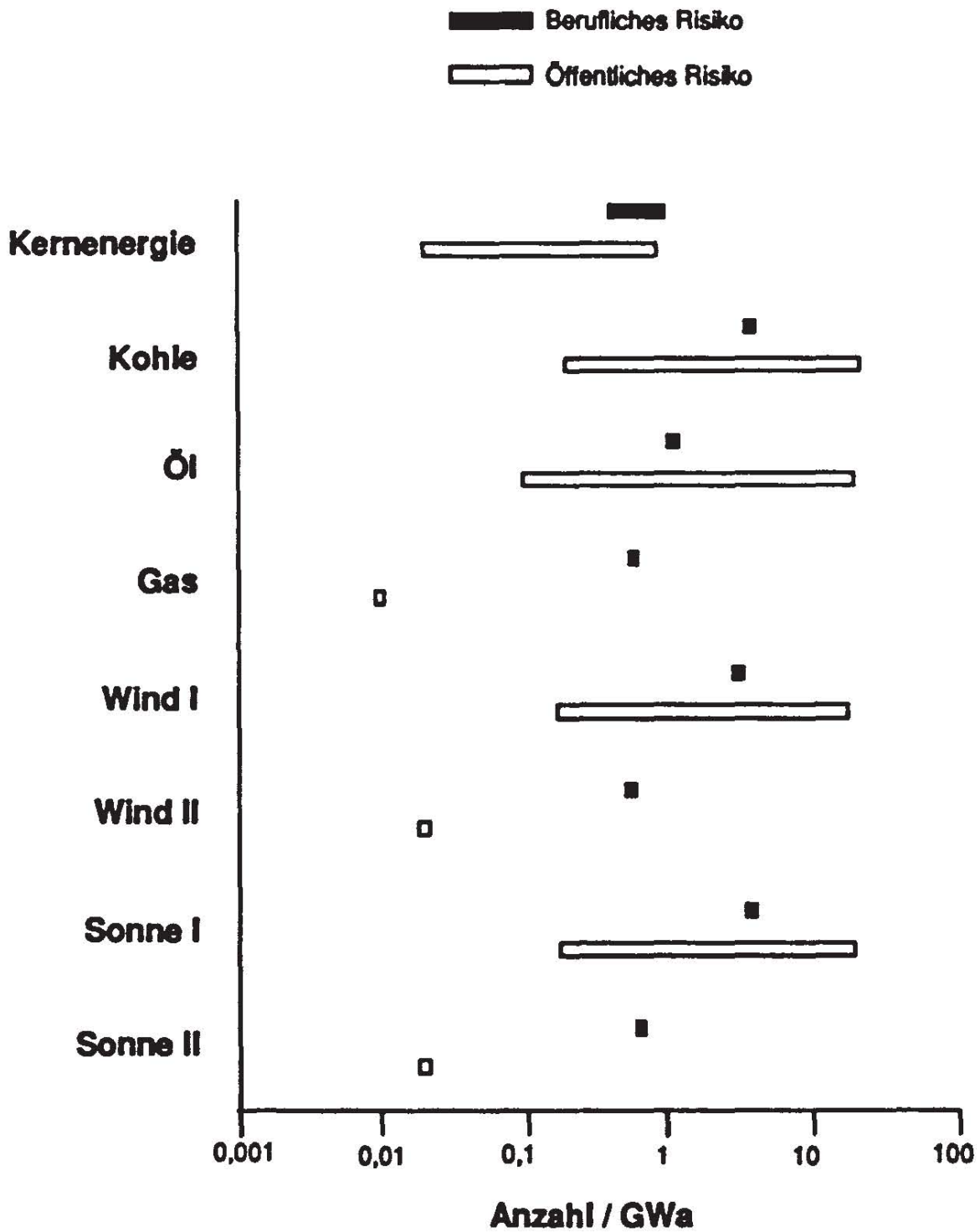
Die Risiken, die vom Betrieb einer Anlage zur Nutzung regenerativer Energiequellen ausgehen, sind sicher vergleichsweise gering. Da diese Anlagen aber im Vergleich zu anderen konventionellen Energietechniken einen hohen Materialbedarf haben, sind unter Umständen die bei der Herstellung dieser Materialien existierenden Risiken nicht zu vernachlässigen.

Ein umfassender Vergleich der Risiken verschiedener Energieversorgungssysteme wird dadurch erschwert, daß z. B. die Wirkung von Schadstoffen nicht immer bekannt ist und daß Dosis-Wirkungsangaben von Schadstoffen erheblich differieren. Trotz dieser Probleme lassen sich die Größenordnungen der Risiken, die mit der Energienutzung im Zusammenhang stehen, ermitteln. Abb. 2 zeigt die Ergebnisse eines Risikovergleichs verschiedener Stromerzeugungssysteme beispielhaft für die Abschätzungen der zuzuordnenden Todesfälle je $\text{GW}_{\text{a,el}}$ (= 8760 GWh_{el}). Jedes der dort aufgeführten Stromerzeugungssysteme hat die gleiche Versorgungsaufgabe zu erfüllen. Für die regenerativen Energieträger Sonne (Photovoltaik) und Wind wurden zwei Back-up-Systeme betrachtet, nämlich Kohle (I) und Erdgas (II).

In der teilweise sehr großen Bandbreite der Angaben spiegeln sich die bestehenden Unsicherheiten wider. Trotz dieser Unsicherheiten läßt sich feststellen, daß Systeme mit Nutzung von Kohle und Öl eher am oberen Ende der Bandbreite liegen, während der untere Bereich durch Systeme mit Nutzung von Gas, regenerativen Energieträgern (ohne Kohle-Back-up) und Kernenergie gebildet wird. Die wohl wichtigste Feststellung aber ist, daß jede Energietechnik mit Risiken, d. h. Gefahren für die Gesundheit und das Leben der Menschen verbunden ist, die bei einer Wertung, dem Nutzen, der aus dem Energieeinsatz resultiert, gegenüberzustellen ist. Eine Null-Risiko-Option gibt es nicht.

*10. **Schlusfolgerungen***

In den obigen Ausführungen wurde der Versuch gemacht, den Stand der Entwicklung, die Entwicklungsperspektiven sowie die noch bestehenden Probleme derjenigen Techniken zur Nutzung regenerativer Energiequellen aufzuzeigen, die für unser Land von Bedeutung sein können. Die heute vorliegenden Ergebnis-



Die ausgewiesenen Bandbreiten sind durch Unterschiede in den Modellannahmen begründet und stellen keine Abschätzung der Unsicherheiten dar.

Abb. 2: Anzahl der Todesfälle je GWa_{el}, aufgeteilt in berufliches und öffentliches Risiko

se einer mehr als fünfzehnjährigen Forschungs- und Entwicklungsphase erlauben die Aussagen, daß trotz großer technischer Fortschritte, gerade in Anbetracht der niedrigen Energiepreise, nur wenige Techniken zur Nutzung regenerativer Energiequellen heute schon wirtschaftlich konkurrenzfähig sind, wie die Wasserkraft und die Freibadwassererwärmung. Die energetische Nutzung von Müll und Biomassereststoffen kann zur Lösung des Abfallproblems beitragen. Einige Techniken bieten aber noch ein erhebliches Entwicklungspotential, das es durch langfristig kontinuierlich angelegte Entwicklungsanstrengungen auszuschöpfen gilt. Dies mag viele Jahre oder gar einige Jahrzehnte erfordern, eine Erfolgsgarantie gibt es nicht.

Zurückkommend auf die eingangs gestellte Frage, ist festzustellen, daß aus heutiger Sicht sich die erneuerbaren Energiequellen nicht als tragfähige Option für eine heute einzuleitende Umstrukturierung der Energieversorgung darstellen.

Aus diesem Grund stellt sich zumindest heute die Frage »Kernenergie oder Sonnenenergie« nicht. Die damit angesprochene Alternative ist heute nicht existent, und verantwortungsvolle Energiepolitik darf nicht nur auf dem Prinzip Hoffnung aufbauen. Gerade wenn uns die Förderung und Entwicklung der regenerativen Energiequellen und der rationellen Energienutzung am Herzen liegen, müssen wir Abschied nehmen von dem Entweder-Oder-Denken und dürfen Schlagworte und Ideologien, wie die der »dezentralen« Energieversorgung nicht zur Richtschnur unseres Handelns machen. Diese Kategorien sind keine geeigneten Maßstäbe, wenn es um die Verwirklichung einer Energieversorgung geht, die den Bedürfnissen und Lebensverhältnissen der Menschen in modernen Industrienationen angepaßt ist.

Es gibt auch keinen Grund, daß die Nutzung der Kernenergie, die rationelle Verwendung von Energie und die Nutzung der erneuerbaren Energiequellen sich nicht sinnvoll ergänzen können. Die oft postulierte Nichtverträglichkeit ist aus historischer Sicht falsch, technologisch gesehen nicht existent und aus wirtschaftlicher Sicht unvernünftig.

Die Förderung der regenerativen Energiequellen braucht einen langen Atem. Sie darf nicht von zufälligen Ereignissen und augenblicklichen Stimmungen abhängen oder gar auf kurzfristige Erfolge abgestellt sein. In diesem Sinne ist es dann auch ein Gebot der energiepolitischen Vernunft, den Techniken zur Nutzung regenerativer Energiequellen durch ausreichende Forschungsmittel und langfristig angelegte Entwicklungsprogramme – konzentriert auf die aussichtsreichen Technologien – und ggf. auch durch Markteinführungshilfen die gleichen Startchancen für einen auf dem freien Markt ausgetragenen Wettbewerb zu schaffen, wie dies bei anderen Versorgungsoptionen in der Vergangenheit auch der Fall war.