

# Alfred Voß

## Energie: eine knappe Ressource?

Die Furcht vor einer Energieknappheit ist keineswegs neu. In der Geschichte des Industriezeitalters trat sie in mehr oder weniger regelmäßigen Abständen immer wieder hervor. Zuletzt wurde sie durch den Bericht des Club of Rome über »Die Grenzen des Wachstums« popularisiert und bei breiten Bevölkerungsschichten durch die Ölkrise im Jahre 1973 geschürt.

Die Verfügbarkeit ausreichender Mengen an Energie ist ohne Zweifel eine der notwendigen Voraussetzungen für das Überleben der Menschen und ihren Wohlstand. Deshalb ist die Frage »Wie lange reichen unsere Energievorräte noch?« mehr als legitim, ihr soll im folgenden nachgegangen werden.

Die Energiequellen und Energieträger, die der Menschheit grundsätzlich zur Verfügung stehen, sind in Tabelle 1 dargestellt. Die Energieträger lassen sich den erschöpfbaren Energievorräten und den quasi unerschöpflichen Energieströmen zuordnen, wobei letztere von der Energie aus den nuklearen Fusionsprozessen der Sonne, den radioaktiven Zerfallsvorgängen in der Erdkruste, der Restwärme des Erdkerns sowie aus der kinetischen und potentiellen Energie der Planeten gespeist werden.

Die unterschiedliche Natur der Energievorräte und der Energieströme, oft auch als erneuerbare oder regenerative Energieträger bezeichnet, erlaubt es nicht, ihre quantitativen Aspekte mit einheitlichen Begriffen wie Reserven und Ressourcen zu beschreiben. Wenden wir uns zunächst den erschöpfbaren Energievorräten zu.

### Fossile und nukleare Energieträger

Zu den Energievorräten zählen einmal die Kernbrennstoffe Uran, Thorium, Deuterium und Lithium (als Brutstoff für Tritium) und zum anderen die fossilen Energieträger Kohle, Erdöl und Erdgas, als gespeicherte Sonnenenergie. Die Frage nach dem Umfang der insgesamt vorhandenen und gewinnbaren fossilen und nuklearen Energievorräte ist nicht zuverlässig zu beantworten, da bisher nur an wenigen Stellen der Erde intensiv exploriert worden ist. Hinzu kommt, daß zur Klassifizierung der Vorräte keine einheitlichen Begriffe und Kriterien verwendet werden. Hier sei unter dem

	Energiequellen	Energieträger		
Energie nuklearen Ursprungs	Kernenergie	Uran Thorium Lithium Deuterium	»Unerschöpfliche« Energieträger   Erschöpfliche Energieträger (Energievorräte)	
	Gespeicherte Sonnenenergie	Kohle Erdöl Erdgas Biomasse Laufwasser		
	Solare Strahlungsenergie	Wind Wellen Umweltwärme Strahlung		
	Wärmeenergie des Erdkerns	Erdboden		
	Kinetische und potentielle Energie der Planeten	Gezeiten		

Tabelle 1: Energiequellen der Menschheit

Begriff der Ressourcen der Teil der gesamten Vorratsbasis an fossilen und nuklearen Energieträgern verstanden, der in absehbarer Zeit vermutlich gewinnbringend oder zumindest kostendeckend abgebaut werden kann, der also von mindestens vorausichtlichem ökonomischem Interesse ist. Nicht zu den Ressourcen zählen also Vorräte von Energieträgern, die, wie z. B. das Uran im Meerwasser, wegen der geringen Konzentration auf absehbare Zeit ökonomisch nicht gewinnbar sind.

Der Teil der Ressourcen, der sorgfältig untersucht und sicher verfügbar ist und der unter geltenden ökonomischen und technischen Bedingungen wirtschaftlich gewinnbar ist, wird als Reserven bezeichnet.

Diese Begriffsdefinitionen machen deutlich, daß Angaben zum Umfang von Reserven und Ressourcen von der zukünftigen Energiepreisentwicklung abhängen, die hochgradig unsicher ist, und daß Fortschritte in der Explorations- und Gewinnungstechnik die Ressourcenmenge erheblich steigern können. Hieraus resultieren nicht unerhebliche Abweichungen in der Einschätzung der Ressourcen der einzelnen Energieträger.

Einen Überblick über die Reserven- und Ressourcensituation der fossilen Energieträger gibt Tabelle 2. Anfang 1988 beliefen sich die gewinnbaren Reserven der fossilen Energieträger auf rd.  $32 \cdot 10^3$  EJ. Bei einer weltweiten Produktion von 293 EJ im Jahr 1987 bedeutet dies, daß mit den nachgewiesenen Reserven die Produktion des Jahres 1987 für rund 110 Jahre aufrecht erhalten werden könnte. Angaben über vermutlich

Tabelle 2: Reserven und Ressourcen fossiler Energieträger

	nachgewiesene Reserven Anfang 1988		gewinnbare Ressourcen	Produktion im Jahr 1987	statische Reichweite der Reserven in Jahren
	EJ	%	EJ	EJ	
Erdöl a)	5 115	16	20 678	123,4	42
b)			13 420		
Erdgas	4 090	13	17 724	70,1	58
Kohle	22 921	71	87 900–205 100	99,6	230
gesamte fossile Energieträger	32 126	100	139 722–256 922	293,1	110

a) Erdöl in herkömmlichen Lagerstätten

b) Ölschiefer, Ölsande und Schweröl

gewinnbare Ressourcen sind naturgemäß mit größeren Unsicherheiten behaftet. Für die fossilen Energieträger ist davon auszugehen, daß die gewinnbaren Ressourcen fünf- bis achtmal so groß wie die Reserven sind.

Den bei weitem größten Teil der Reserven und Ressourcen machen die Kohlevorräte aus. Bei einem Anteil von rund 33 Prozent am Verbrauch der fossilen Energieträger entfallen mehr als 70 Prozent der Reserven auf die Kohle.

Die Steinkohlelagerstätten finden sich zum großen Teil auf der nördlichen Erdhalbkugel. Die größten Kohlereserven sind in den USA, der Sowjetunion und China zu finden. Auf diese Länder entfallen allein ungefähr 60 Prozent der Reserven. Mit erheblichem Abstand folgen West- und Osteuropa, Südafrika und Australien. Die Förderkosten von Kohle hängen stark von der Beschaffenheit der Lagerstätte ab. In Deutschland wird die Steinkohle im Untertagebau in Tiefen von über 1000 m mit entsprechend hohen Kosten von ca. 260 DM/t abgebaut, während in Australien, Südafrika und auch in vielen Kohlegruben in den USA eine Gewinnung im Tagebau möglich ist. Es wird geschätzt, daß ein Großteil der Kohlereserven zu Gewinnungskosten von unter 25 \$/t SKE abgebaut werden kann.

Die Reserven an Erdöl haben sich seit 1973 um fast 50 Prozent erhöht. Mit rund 5000 EJ weisen sie heute eine rechnerische Reichweite von mehr als 40 Jahren auf. Die gewinnbaren Ressourcen aus konventionellen Lagerstätten werden rund fünfmal so groß eingeschätzt. Hinzu kommen die Vorräte an Ölsanden und Ölschiefen, die allerdings erst bei deutlich höheren Ölpreisen wirtschaftlich gewinnbar sind.

Die bedeutendsten Erdölvorkommen befinden sich im Nahen Osten in den Ländern um den Persischen Golf. Hier konzentrieren sich 63 Prozent der nachgewiesenen Reserven, während in den westlichen Industrieländern, die fast 60 Prozent des weltweit geförderten Erdöls verbrauchen, nur rund 7 Prozent der nachgewiesenen Reserven lokalisiert sind.

Die Erdgasreserven haben sich seit 1973 verdoppelt und machen heute mit rund 4000 EJ etwa 13 Prozent der gesamten Reserven der fossilen Energieträger aus. Die größ-

ten Lagerstätten befinden sich in der UdSSR (38 Prozent) und im Nahen Osten (28 Prozent). Westeuropa verfügt über knapp 6 Prozent der Reserven.

Die vermutlich gewinnbaren Erdgasressourcen werden etwas geringer eingeschätzt als die des Erdöls, sind aber mehr als viermal größer als die Erdgasreserven. Unklar ist gegenwärtig noch, ob es neben den Erdgaslagerstätten organischen Ursprungs in größeren Tiefen Erdgaslagerstätten gibt, in denen sich anorganisches Erdgas aus dem Erdinnern angesammelt hat.

Energieträger für die Nutzung der Kernenergie durch Kernspaltung sind Uran und Thorium, beides Elemente, die relativ häufig in der Erdkruste vorkommen. Gegenwärtig wird ausschließlich Uran als Kernbrennstoff verwendet, was dazu geführt hat, daß man über die Thoriumvorkommen und ihre Verteilung relativ wenig weiß. Die ergiebigste Quelle für Thorium ist das Mineral Monazit. Monazithaltige Sande gibt es vor allem in Brasilien, Südindien, der Türkei und den USA. Die Thoriumressourcen mit Gewinnungskosten unter 80 \$/kg Th werden auf 1,4 Millionen t geschätzt (Tabelle 3).

Tabelle 3: Uran- und Thoriumvorräte

	nachgewiesene Reserven	zusätzliche Ressourcen	Summe
<b>Thorium<sup>1</sup></b>			
Gewinnungskosten bis 80 \$/kg Th [10 <sup>3</sup> t]	495	905	1 400
<b>Uran</b>			
Gewinnungskosten bis 130 \$/kg U [10 <sup>3</sup> t]	3 233	3 316	6 549
<b>Primärenergieäquivalent [EJ]</b>			
Leichtwasserreaktor	1 617	1 658	3 275
Brutreaktor	161 700	165 800	327 500

1 ohne Staatshandelsländer

Uranvorräte werden in der Regel in Abhängigkeit von den Gewinnungskosten angegeben. Tabelle 3 enthält Angaben zu den Reserven und den zusätzlichen Ressourcen bis zu Gewinnungskosten von 130 \$/kg U. Die Uranmengen, die zu höheren Gewinnungskosten verfügbar gemacht werden können, oder die der Kategorie der spekulativen sowie den unkonventionellen (Nebenprodukte bei der Gewinnung anderer Rohstoffe) Ressourcen zugerechnet werden, sind um ein Vielfaches größer als die 6500 10<sup>3</sup> t, die in Tabelle 3 aufgeführt sind.

Da bei der Energieerzeugung durch Kernspaltung im Gegensatz zur Verbrennung fossiler Energieträger nicht nur Brennstoff verbraucht, sondern gleichzeitig auch neuer Spaltstoff erzeugt wird, hängt die Energiemenge, die aus einem kg Uran gewonnen werden kann, von der Art des Kernreaktors und der Rückführung des Spaltstoffes aus den abgebrannten Brennelementen ab.

Bei ausschließlicher Nutzung der  $6500 \cdot 10^3$  t Uran in Leichtwasserreaktoren ohne Recycling der Spaltstoffe liegt das Primärenergieäquivalent bei rund 3300 EJ, was 80 Prozent der nachgewiesenen Erdgasreserven entspricht. Durch den Einsatz von brütenden Reaktorsystemen kann aber aus derselben Uranmenge ein Energiepotential bereitgestellt werden, das größer als das der gesamten fossilen Energieträger ist.

Das Potential der zweiten nuklearen Energiequelle, der Kernfusion, ist noch größer anzusetzen als das der Kernspaltung. Betrachtet man nur die Deuterium-Tritium-Fusion, die nach gegenwärtigem Kenntnisstand am ehesten technisch realisierbar erscheint, so ist das Lithium, aus dem der Brennstoff Tritium erbrütet wird, der das Energiepotential bestimmende Faktor. Die Reserven und zusätzlichen Ressourcen der Landvorräte an Lithium stellen ein Energiepotential dar, das mindestens so groß ist wie das der fossilen Energieträger, wahrscheinlich aber um einen Faktor drei größer. Berücksichtigt man noch das im Meerwasser enthaltene Lithium, so ist das Energiepotential der Kernfusion praktisch nicht begrenzt.

### Erneuerbare Energieströme

Die erneuerbaren oder auch regenerativen Energiequellen stehen uns als unerschöpfliche dauerhafte Energieströme zur Verfügung. Wie bereits erwähnt, werden diese, zumindest in unseren Zeitmaßstäben unerschöpflichen Energieströme, gespeist durch die Strahlungsenergie der Sonne, die radioaktiven Zerfallsvorgänge in der Erdkruste, die Restwärme des Erdkerns sowie die Rotations- und Gravitationsenergie von Sonne, Mond und Erde.

Das Angebotspotential der regenerativen Energiequellen, worunter hier die gesamte natürlich dargebotene Energiemenge je Jahr verstanden wird, ist fast 10000 mal größer als der weltweite anthropogene Energieverbrauch (Tabelle 4).

Tabelle 4: Weltweite Potentiale der regenerativen Energiequellen

EJ/a	Angebotspotential	Technisch nutzbares Potential
Solarstrahlung	$2500 \cdot 10^3$	600
Wasserkraft	158	100
Wind	$100 \cdot 10^3$	100
Biomasse	3000	190
Geothermie	1000	64
Gezeiten	100	
Wellenenergie, Meeresströmung, Meereswärme	29–290 <sup>1</sup>	34
Gesamt	$\sim 2600 \cdot 10^3$	1088

<sup>1</sup> nur Wellenenergie

Auf die solare Strahlung entfällt dabei der bei weitem größte Anteil. Von dem Energiestrom der solaren Strahlung, der auf die Erdatmosphäre auftritt, in Höhe von  $5,6 \cdot 10^6$  EJ/a, werden etwa 30 Prozent von den äußeren Schichten der Lufthülle direkt reflektiert. Die Energiemengen, die von der Lufthülle, dem Land und dem Meer absorbiert werden, sind verantwortlich für den Wind, die Wellen, die Meeresströme, für Verdunstung und Niederschläge sowie die Erzeugung von Biomasse durch die Pflanzen, wobei der größte Teil von den Weltmeeren und Landflächen der Kontinente als Wärmestrahlung ins Weltall abgegeben wird. Im Vergleich zu der solaren Strahlungsenergie, die auf die Erdoberfläche auftritt, sind die Angebotspotentiale der anderen erneuerbaren Energieträger meist um einige Größenordnungen kleiner. Der gesamte geothermische Wärmestrom liegt bei  $1000$  EJ/a und Energie, die durch die Gezeiten dissipiert, ist mit  $100$  EJ/a um einen Faktor 10 kleiner.

Bis auf wenige Ausnahmen ist das natürliche Angebot der erneuerbaren Energieträger durch niedrige Leistungs- bzw. Energiedichten und eine periodisch bzw. unregelmäßig schwankende Verfügbarkeit gekennzeichnet. Daraus resultiert für die Nutzbarmachung dieser Energiequellen ein vergleichsweise hoher Flächenaufwand für die Sammlung und Konzentration der Energie und die Notwendigkeit einer Speicherung, um die Gegenläufigkeit von Energieangebot und -bedarf auszugleichen. Die Probleme der Nutzung regenerativer Energiequellen resultieren im wesentlichen aus diesen beiden Eigenarten ihres natürlichen Angebots.

Von dem teilweise sehr großen Angebotspotential der erneuerbaren Energiequellen läßt sich nur ein Teil technisch sinnvoll nutzen, da es einmal konkurrierende Verwendungszwecke, z. B. Landbedarf für die Nahrungsmittelproduktion, und zum anderen technische Randbedingungen, z. B. Mindestwindgeschwindigkeiten für den Betrieb von Windenergiekonvertern oder Mindestfallhöhen für Wasserkraftanlagen, gibt, die auch bei Vernachlässigung von ökonomischen und sonstigen Aspekten nur die Nutzung eines Teils des Angebotspotentials erlauben. Abschätzungen des technisch nutzbaren Potentials sind naturgemäß mit Unsicherheiten behaftet und demgemäß nicht als präzises Datum, sondern nur als größenordnungsmäßige Orientierung zu verstehen. Das in Tabelle 4 aufgeführte technisch nutzbare Potential von etwa  $1100$  EJ/a entspricht dem Dreifachen des gegenwärtigen weltweiten Energieverbrauchs. Mehr als die Hälfte dieses Potentials entfällt auf die direkte Nutzung der solaren Strahlungsenergie zur Strom- oder auch Wärmeezeugung. Aber auch die technischen Potentiale der Biomasse, der Wasserkraft und der Windenergie sind dergestalt, daß sie größere Beiträge zur Weltenergieversorgung leisten könnten.

Von den hier angeführten technischen Potentialen der Wasserkraft und Biomasse werden gegenwärtig bereits  $22$  EJ/a im Falle der Wasserkraft und  $42-50$  EJ/a im Falle der Biomasse, im wesentlichen in Form von Brennholz, genutzt.

Will man analog zu den Vorratsangaben bei den fossilen und nuklearen Energieträgern Aussagen zu den wirtschaftlich nutzbaren Potentialen der erneuerbaren Energiequellen machen, so sieht man sich gegenwärtig mit erheblichen Schwierigkeiten konfrontiert. Brauchbare Abschätzungen der weltweiten wirtschaftlichen Potentiale der erneuerbaren Energiequellen in Abhängigkeit zukünftiger Entwicklungen des allgemeinen Energiepreisniveaus und unter Berücksichtigung der Entwicklungsper-

spektiven der verschiedenen Techniken zur Nutzung erneuerbarer Energiequellen liegen nicht vor.

Für den gegenwärtigen Zeitpunkt gilt, daß über die derzeitige Nutzung erneuerbarer Energiequellen hinaus nur geringe wirtschaftlich konkurrenzfähige Nutzungsmöglichkeiten bestehen. In den meisten Fällen sind die Techniken zur Nutzung erneuerbarer Energiequellen noch weit davon entfernt, mit den fossilen und nuklearen Energietechniken auf wirtschaftlicher Basis konkurrieren zu können.

Es sei hier noch erwähnt, daß die Nutzung einiger erneuerbarer Energiequellen standortgebunden ist. Dies trifft für die Geothermie, die Gezeitenenergie und die Wasserkraft zu. Im Falle der Windenergie gilt, daß die windgünstigen Gebiete, die primär für die Windenergienutzung in Betracht kommen, im Küstenbereich bzw. in Mittel- und Hochgebirgen liegen.

Die Sonne scheint auf den gesamten Erdball, aber die mittlere jährliche Einstrahlung auf die Erdoberfläche ist abhängig von der geographischen Lage und den Verhältnissen in der Atmosphäre. In den Trockengebieten der Erde, z. B. in der Sahara, ist die jährlich auf eine horizontale Fläche auftreffende Globalstrahlung mit 2200 kWh/m<sup>2</sup>a mehr als doppelt so hoch wie im Mittel in unserem Land (~1000 kWh/m<sup>2</sup>a).

## Fazit

Mit den vorangegangenen Ausführungen wurde der Versuch gemacht, eine Übersicht über die Energievorräte und -quellen zu vermitteln, die uns zur Deckung unseres zukünftigen Energiebedarfs, nach heutigem Kenntnisstand, zur Verfügung stehen. Damit sollte der Rahmen für die Beantwortung der Frage abgesteckt werden, ob Energie knapp ist und zu einem begrenzenden Faktor für die weitere Entwicklung der Weltwirtschaft werden könnte.

Die Reserven und vermutlich gewinnbaren Ressourcen der erschöpfbaren Vorräte an fossilen Energieträgern und des Kernbrennstoffs Uran wären allein rein rechnerisch in der Lage, den gegenwärtigen Weltenergieverbrauch für rund 200 Jahre zu decken. Das Energiepotential der Kernfusion ist, selbst bei Beschränkung auf die Deuterium-Tritium-Fusion, von ähnlicher Größenordnung und das technisch nutzbare Potential der erneuerbaren unerschöpflichen Energieströme ist rund dreimal größer als der gegenwärtige weltweite Energieverbrauch.

Betrachtet man die Gesamtheit der uns zur Verfügung stehenden Energievorräte und -potentiale, so scheint die Feststellung gerechtfertigt, daß Energie im Prinzip nicht knapp ist. Mit den fossilen und nuklearen Energievorräten sowie mit den regenerativen Energieströmen stehen uns ressourcenseitig praktisch nicht limitierte Energiemengen zur Verfügung, die auch einen erheblich steigenden weltweiten Verbrauch decken können.

Das Ressourcenproblem resultiert also nicht aus einer prinzipiellen Begrenztheit der uns zur Verfügung stehenden Energiequellen, sondern aus den Problemen im Zusammenhang mit der Nutzarmachung dieser Vorräte und Quellen, den damit verbundenen Kosten, der regional ungleichen Verteilung der Energievorräte und -quellen sowie aus den Umwelteffekten, die mit der Nutzung der Energieträger verbunden sind.