

- ENERGIE UND UMWELT -
eine technische, ökonomische,
ökologische und gesellschaftliche
Herausforderung

Stoffströme, Risiken und externe Kosten von Energiesystemen

Prof. A. Voß
*Institut für Energiewirtschaft und Rationelle
Energieanwendung,
Universität Stuttgart*

Stoffströme, Risiken und externe Kosten von Energiesystemen A. Voß

1 Einleitung

Im Energie- und Umweltbereich stehen wir an der Schwelle zum dritten Jahrtausend in der Tat gewaltigen Herausforderungen gegenüber. Die zentralen Herausforderungen sind:

- die Schaffung humaner Lebensbedingungen für eine weiter wachsende Weltbevölkerung
- die Vermeidung nicht tolerierbarer Klimaveränderungen
- sowie die Sicherung des Wirtschaftsstandortes Deutschland

bei einem gleichzeitigen Übergang auf ein Wirtschafts- und Produktionssystem, daß eine nachhaltige Entwicklung ermöglicht und die natürlichen Lebensgrundlagen nicht zerstört.

Alle diese Herausforderungen haben einen direkten Bezug zur Energieversorgung,

- da die Verfügbarmachung von mehr Energie der einzig humane Weg zur Überwindung von Hunger und Armut sowie zur Begrenzung des Wachstums der Weltbevölkerung ist,
- da 50 % der anthropogenen Emissionen von Treibhausgasen aus der Energieversorgung stammen,
- da die Sicherung des Wirtschaftsstandortes Deutschland ohne wettbewerbsfähige Energiepreise nicht gelingen wird.

In der Diagnose der vor uns liegenden Herausforderungen stimmen die verschiedenen gesellschaftlichen Gruppen in unserem Land noch weitgehend überein. Gänzlich anders sieht dies bei der Therapie zur Lösung der Probleme aus. Hier gibt es konträre Auffassungen, die in den letzten Jahren zu einer Energiepolitik geführt haben, die mutlos nur verwaltet, aber keine Weichen zur Bewältigung der Probleme gestellt hat.

Ich will im folgenden deutlich machen, daß eine ganzheitliche Bilanzierung der Energie- und Stoffumsätze, sowie der Risiken und externen Kosten der verschiedenen uns zur Verfügung stehenden Energiesysteme, Orientierungen für die Bewältigung der vor uns liegenden Herausforderungen liefern können.

Zuvor will ich aber noch einige grundlegende Ausführungen zur Bedeutung der Hauptsätze der Thermodynamik für das ökonomische Geschehen und die Bewältigung der Umweltprobleme machen.

2. Die thermodynamischen (naturwissenschaftlichen) Hauptsätze als Gesetze allen Geschehens

Die Hauptsätze der Thermodynamik und der analog dazu formulierte Hauptsatz der Stoffdissipation haben als Naturgesetze eine grundlegende Bedeutung für das Leben und alles menschliche Handeln, also auch für die Wirtschaft. In einem äußerst lesenswerten Buch "Kreativität, Energie und Entropie" hat Klaus Knizia die Zusammenhänge anschaulich dargelegt /1/.

Wesentlich für das Verständnis der Hauptsätze der Thermodynamik ist die Unterscheidung zwischen verfügbarer und nicht verfügbarer Energie. Verfügbare Energie, auch Exergie genannt, läßt sich in Arbeit umwandeln, ich nenne sie deshalb hier "Arbeitsfähigkeit". Nicht verfügbare Energie ist Anergie, sie ist die Energie der ungeordneten Bewegung von Atomen und Molekülen bei Umgebungstemperatur. Sie läßt sich nicht in andere Energieformen und insbesondere nicht in Arbeitsfähigkeit umwandeln, um nützliche Dinge zu bewirken.

Der erste Hauptsatz der Thermodynamik, der Energieerhaltungssatz, lautet in einer alle Energieformen umfassenden Formulierung: "Die Gesamtenergie eines abgeschlossenen Systems ändert sich nicht". Oder anders ausgedrückt, Energie geht niemals verloren, sie kann immer nur von einer in eine andere Form umgewandelt werden. Nach der von Einstein 1905 formulierten Äquivalenz von Masse und Energie, ist damit auch der Satz von der Erhaltung der Masse nur ein Sonderfall des ersten Hauptsatzes der Thermodynamik.

Der für unsere Überlegungen wichtigere zweite Hauptsatz der Thermodynamik beschreibt das Entropieprinzip. Rudolf Clausius hat ihn 1865 wie folgt formuliert: "Die Entropie eines isolierten Systems kann nicht abnehmen, sie bleibt konstant bei reversiblen Prozessen und wächst bei irreversiblen Prozessen in diesem System." Oder anders ausgedrückt, die in einem isolierten System vorhandene Energie strebt einer Dissipation oder Entwertung, dem Übergang in gleichmäßig verteilte Wärmeenergie, also einen Zustand geringerer Ordnung zu.

Der zweite Hauptsatz zeigt uns damit zwei Begrenzungen auf, nämlich zum einen, daß alle natürlichen und technischen Prozesse der Nutzbarmachung von Exergie, die immer mit Irreversibilitäten z. B. Reibung verbunden sind, gleichzeitig einen Teil der Exergie des Systems entwerten, d. h. in Anergie überführen, die Entropie erhöht sich. Die zweite Begrenzung betrifft die Umwandlung von Wärme in Exergie oder Arbeitsfähigkeit, die nur teilweise möglich ist, weil jedes Temperaturgefälle nur bis zur Umgebungstemperatur abgearbeitet werden kann, so daß ein Teil als Anergie übrigbleibt.

Wir sollten nun aber beachten, daß die genannten Formulierungen der Hauptsätze für isolierte Systeme gelten und daß genau genommen nur ein abgeschlossenes System, nämlich das Universum existiert. In offenen d. h. nicht abgeschlossenen Systemen, die durch einen Stoff- und/oder Energieaustausch mit ihrer Umgebung verbunden sind - und es sei hier angemerkt, daß alle lebenden wie auch technische Systeme und somit auch unser Wirtschaftssystem eben nicht abgeschlossen sind, sondern in einem ständigen Austausch mit ihrer Umgebung stehen -, in diesen Systemen kann die Entropie, durch die Zufuhr von Arbeitsfähigkeit sehr wohl abnehmen, allerdings nur auf Kosten einer entsprechenden Energieentwertung an anderer Stelle.

In neuerer Zeit hat nun der rumänisch-amerikanische Mathematiker und Ökonom Georgescu-Roegen das Entropieprinzip des zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik auf die Dissipation von Materie ausgedehnt. Er schreibt: "Ich möchte zu bedenken geben, daß es eine elementare Tatsache ist, daß

Materie ebenso in zwei Zuständen existiert, nämlich verfügbar und unverfügbar und daß sie genau wie Energie ständig und unwiderruflich von dem einen in den anderen Zustand übergeht. Materie löst sich ebenso wie Energie in Staub auf; dies läßt sich am besten durch Rost und durch Verschleiß von Automotoren und Autoreifen veranschaulichen". Alle stofflichen Prozesse sind nach diesen manchmal als 4. Hauptsatz bezeichneten Gesetz mit einem Zuwachs an Stoffentropie, einer Stoffzerstreuung bis zu einem Zustand verbunden, für den ein Einsammeln und Aufkonzentrieren unmöglich wird. Natürlich sieht auch Georgescu-Roegen, daß die Stoffentropiezunahme durch Wiederverwertung und Recycling reduziert werden kann, aber sie läßt sich nicht gänzlich vermeiden.

An dieser Stelle scheint mir der Hinweis wichtig, daß Umweltbelastungen, auch die im Zusammenhang mit unserer heutigen Energieversorgung, vorrangig durch anthropogen hervorgerufenen Stoffströme, durch Stoffdissipation verursacht werden. Es ist also nicht die mit der Energieversorgung gemäß dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik verbundene Entropievermehrung der Energie die die Umwelt schädigt, sondern es sind die mit dem jeweiligen Energiesystem verbundenen stofflichen Belastungen, wie z. B. das SO_2 oder das Kohlendioxid, die zu Umweltbelastungen führen.¹ Dies wird deutlich an der Sonnenenergie, die mit ihrer zur Verfügung gestellten Arbeitsfähigkeit, einerseits Hauptquelle allen Lebens auf der Erde ist, andererseits aber der bei weitem größte Entropiegenerator. Da ihre Energie aber nicht an einen stofflichen Energieträger gebunden ist, resultieren daraus aber keine Umweltbelastungen im heutigen Sinn. Was natürlich Stoffdissipationen und damit verbundene Umweltbelastungen im Zusammenhang mit der Anlagenerichtung nicht ausschließt.

3. Arbeitsfähigkeit, verfügbare Materie und Gestaltungsfähigkeit: Grundlagen allen Lebens

Kommen wir zurück auf die zuvor erläuterten Hauptsätze, die uns lehren, daß in offenen oder nicht abgeschlossenen Systemen der Entropievermehrung und Stoffentwertung nur durch Zufuhr von Arbeitsfähigkeit und verfügbarer Materie entgegengewirkt werden kann.

Dies gilt in gleichem Maße für lebende Organismen, wie auch für alle technischen und wirtschaftlichen Systeme, die Leben fördern und unterstützen sollen. Der Nobelpreisträger Erwin Schrödinger hat darauf in seinem Werk "Was ist Leben?" wie folgt Bezug genommen. "Das, wovon ein Organismus sich ernährt, ist negative Entropie. Oder um es etwas weniger paradox auszudrücken, das Wesentliche am Stoffwechsel ist, daß es dem Organismus gelingt, sich von der Entropie zu befreien, die er solange er lebt, erzeugen muß".

Lebewesen erhalten oder erhöhen also ihren Ordnungszustand durch Arbeitsfähigkeit aus ihrer Umgebung. In ihrer Umgebung erzeugen sie dabei eine größere Unordnung, sie vermehren die Entropie. Das gilt analog auch für alle Ordnungszustände die durch den Menschen geschaffen werden. Dabei sind mit Ordnungszuständen alle materiellen und energetischen Güter, wie auch immaterielle Güter und Dienstleistungen gemeint. Das Entwertungs- bzw. das Entropieprinzip und das Entwicklungsprinzip d. h. der Aufbau von Ordnungen, sind also miteinander untrennbar verknüpft und sie werden durch die Hauptsätze beschrieben.

¹ Hier ist unterstellt, daß die Entropieerzeugung durch die Nutzung von Energievorräten und die zeitverzögerte Entropieerzeugung bei Nutzung der Sonnenenergie unbedeutend für den Energiehaushalt der Erde sind.

Verfügbare Materie und Verfügung über Arbeitsfähigkeit sind aber nur eine notwendige und noch keine hinreichende Bedingung für den Aufbau lebensnotwendiger bzw. lebensfördernder Ordnungszustände. Hinzukommen muß noch Information oder Wissen, um dem Leben dienende Ordnungen zu schaffen. Bei lebenden Organismen ist diese Information im genetischen Code der Zelle angelegt.

Die Nützlichkeit und den Zweck anthropogener Ordnungszustände bestimmt der Mensch. Nur Steine aufeinander zu schichten verbraucht zwar Arbeitsfähigkeit, schafft aber noch keinen nützlichen, dem Leben dienenden Ordnungszustand. Zusammengefügt zu einem Haus dienen sie aber dem Leben, schützen vor Wind und Kälte und können als Schule oder Krankenhaus verwendet werden. Wissen, Information und Kreativität bezeichnet Knizia als Gestaltungsfähigkeit. Sie ist neben der Arbeitsfähigkeit und verfügbare Materie die dritte notwendige Komponente zur Schaffung nützlicher Ordnungszustände.

Wissen, Information und Kreativität, hier zusammengefaßt unter dem Begriff Gestaltungsfähigkeit, stellen dabei eine besondere Ressource dar. Sie ist zwar zu jedem Zeitpunkt begrenzt, wird aber nicht verbraucht, sondern sie ist sogar vermehrbar. Wissen wächst. Dies zeichnet die Ressource Gestaltungsfähigkeit gegenüber den erschöpfbaren Energie- und Rohstoffvorräten und auch dem großen, aber begrenzten Energiestrom von der Sonne aus und gibt ihr gegebenenfalls eine besondere Bedeutung für die Lösung der vor uns liegenden Probleme.

Die durch Wissenszuwachs steigende Gestaltungsfähigkeit und die damit mögliche Weiterentwicklung von Technik ermöglichen es uns

- lebensnotwendige Ordnungszustände mit weniger Arbeitsfähigkeit und weniger verfügbarer Materie bereitzustellen,
- die Entropieerzeugung bei der Energiewandlung zu reduzieren, d. h. die Exergieausbeute zu erhöhen,
- höher entropische Energievorräte und neue Energiequellen zu erschließen,
- die Stoffentwertung verfügbarer Materie durch Recycling zu reduzieren,
- die verfügbare Materie durch die Nutzbarmachung neuer Materialien zu erhöhen (Beispiel: Keramik),
- die notwendige Arbeitsfähigkeit für den Aufbau gleichwertiger Ordnungszustände zu reduzieren, anders nennen wir das rationellere Energienutzung, und
- Umweltbelastungen durch die Dissipation von Materie und Produktion von Stoffabfällen zu reduzieren, gegebenenfalls durch Mehreinsatz an Arbeitsfähigkeit.

Die bisher gemachten Ausführungen sollten die Bedeutung der Hauptsätze der Thermodynamik und des Entropieprinzip für alles Geschehen und das Leben sowie den Aufbau lebensnützlicher Ordnungszustände verdeutlichen. Die Hauptsätze als Naturgesetze können wir nicht außer Kraft setzen oder umgehen. Was wir vermögen ist, das diesen Gesetzen folgende Geschehen mit den Interessen des Lebens und der Menschen in Einklang zu bringen.

4. Nachhaltige Entwicklung und Nachweltverantwortung

In den letzten Jahren hat der Begriff der "nachhaltigen Entwicklung" (sustainable development) verstärkt Eingang in die öffentliche Diskussion gefunden. Eine allgemein anerkannte Definition, was unter nachhaltiger Entwicklung zu verstehen ist, gibt es noch nicht. Die Brundland-Kommission formuliert: "Sustainable Development is development, that meets the needs of the present without compromising the ability of future generations to meet their own needs".

Die Bedürfnisse der gegenwärtig lebenden Menschen zu befriedigen, ohne die Befriedigung ähnlicher Bedürfnisse in Zukunft lebender Menschen zu beeinträchtigen, ist auch der Kern der Definition von Goodland: "Sustainable development is a pattern of social and structural economic development which optimizes the economic and societal benefits available in the present without jeopardizing the likely potential of similar benefits in the future."

Erinnern wir uns daran, daß Leben entsprechend den Hauptsätzen mit dem Verbrauch von Arbeitsfähigkeit und verfügbarer Materie verbunden ist und machen wir uns bewußt, daß die den Menschen verfügbaren Quellen an Arbeitsfähigkeit und an verfügbarer Materie zwar groß, aber dennoch endlich sind (auch der Energiestrom der Sonne wird in einigen Milliarden Jahren erlöschen), so ist auch eine nachhaltige Entwicklung zeitlich nicht unbegrenzt möglich, da irgendwann der "Wärmemetod" oder die "Materiedissipation" dem Leben auf diesem Planeten ein Ende setzen werden. Dieses unvermeidliche Ende liegt aber soweit in der Zukunft, quasi außerhalb des menschlichen Zeitmaßes, daß es heute ohne Handlungsrelevanz ist.

Vor diesem Hintergrund läßt sich ergänzend zu den zuvor genannten Definitionen, eine nachhaltige Entwicklung beschreiben, als eine Entwicklung, die zwar aufgrund äußerer, nicht-anthropogener Gegebenheiten im Prinzip begrenzt wird, nicht jedoch durch ihre selbst bewirkten Folgen. Die Erhaltung der natürlichen Lebensgrundlagen, oder anders ausgedrückt, die Nichtüberschreitung der Regenerations- und Assimilationsfähigkeit der natürlichen Stoffkreisläufe ist somit eine wesentliche Bedingung für eine nachhaltige Entwicklung.

Andererseits bedeutet eine nachhaltige Entwicklung nicht den Verzicht auf Wachstum und auch die Nutzung begrenzter Energie- und Rohstoffvorräte ist mit einer nachhaltigen Entwicklung vereinbar, wenn die Ressourcenbasis, genauer gesagt, die verfügbare Ressourcenbasis durch technischen Fortschritt, durch die Verfügbarmachung neuer Energiequellen und Rohstoffe für die folgenden Generationen erweitert werden kann und die Inanspruchnahme von Umwelt und Natur auf ein verträgliches Maß begrenzt bleibt. Eine in diesem Sinne nachhaltige Entwicklung läßt sich aber wohl nur erreichen, wenn die Zahl der Menschen auf der Erde begrenzt werden kann.

Die Bevölkerungsprognosen gehen von einem weiteren Anstieg der Weltbevölkerung von derzeit 5,5 Mrd. Menschen auf 10 bis 12 Mrd. Menschen in der Mitte des nächsten Jahrhunderts aus. Dieser Bevölkerungszuwachs wird dabei nahezu ausnahmslos in den sogenannten Ländern der Dritten Welt stattfinden. Das Wachstum der Weltbevölkerung stellt eine gewaltige Herausforderung in Bezug auf die Nahrungsmittelproduktion und die Güterproduktion zur Schaffung humaner Lebensumstände dar. Ein Rückblick zeigt uns, daß alle Anstrengungen zur Geburtenkontrolle nicht die erwünschte Wirkung erzielt haben und daß eine Stabilisierung der Bevölkerung nur dort erreicht worden ist, wo die materiellen und sozialen Lebensumstände der Menschen verbessert werden konnte. Folgen wir der Überlegung, daß die Weltbevölkerung nur bei Überwindung von Hunger und Armut, d. h. durch ein ausreichendes Güterangebot zu stabilisieren ist, dann gilt aber auch, daß eine Stabilisierung umso eher erreicht wird, je eher die Bedürfnisse der Menschen befriedigt werden können. Die dazu

notwendige Ausweitung der Nahrungsmittel- und Güterproduktion, sowie des Angebots an Dienstleistungen erfordert, auch bei Ausschöpfung der Möglichkeiten der rationelleren Energienutzung, die Verfügbarmachung von mehr Energie, oder präziser gesagt, von mehr Arbeitsfähigkeit zu vertretbaren Kosten. Hieraus gewinnen effiziente, oder kostengünstige Energiewandlungssysteme ihre besondere Bedeutung für die Überwindung von Hunger und Armut als einzig humanen Weg zur Begrenzung der Weltbevölkerung.

Kosteneffizienz ist aber auch der Schlüssel zur Lösung der Umweltprobleme und zur Vermeidung nicht tolerierbarer Klimaveränderungen. Eine klimaverträgliche Begrenzung der Treibhausgasemissionen wird wohl nur erreicht werden, wenn, soweit es die Energieseite betrifft, kosteneffiziente Alternativen zu der Gewinnung von Arbeitsfähigkeit aus fossilen Energieträgern verfügbar sind.

5. Energiesysteme im Vergleich

Wollen wir nun aus den uns von der Natur gegebenen Energievorräten und dem Energiestrom der Sonne Arbeitsfähigkeit zum Aufbau von Ordnungszuständen, d. h. zur Produktion von Gütern und Dienstleistungen gewinnen, so bedarf dies geeigneter Energiewandlungs- und -nutzungsanlagen. Der Aufbau von Energiewandlungs- und -nutzungsanlagen sowie die gegebenenfalls notwendige Gewinnung von Primärenergieträgern erfordert zunächst die Investition von Arbeitsfähigkeit, verfügbarer Materie und Gestaltungsfähigkeit.

Die notwendige Investition an Arbeitsfähigkeit, Rohstoffen und Gestaltungsfähigkeit für die Bereitstellung von Exergie in der entsprechenden zweckmäßigen Form für den Aufbau von Ordnungszuständen, d. h. die Produktion von Gütern und Dienstleistungen, sowie die erzielbare Exergieausbeute aus den uns im Prinzip zur Verfügung stehenden fossilen und nuklearen Energievorräten sowie den regenerativen Energiequellen, ist dabei keineswegs gleich, sondern insbesondere von der genutzten Primärenergiequelle und der eingesetzten Technik abhängig.

Zur Bewältigung des Übergangs auf eine nachhaltige Entwicklung und die dazu notwendige Begrenzung des Bevölkerungswachstums wird es darauf ankommen, diejenigen Energiesysteme zur Bereitstellung von Arbeitsfähigkeit zu nutzen, die effizient mit den knappen Ressourcen Arbeitsfähigkeit, verfügbarer Materie und Gestaltungsfähigkeit umgehen.

Trotz der grundlegenden Bedeutung der Hauptsätze für das phänomenologische Verständnis aller natürlichen, technischen und ökonomischen Vorgänge, lassen sie zwei Aspekte, zwei Fragen offen. Der erste betrifft die Quantität der den Menschen im Prinzip zugänglichen Mengen an Energie und verfügbarer Materie. Ohne dies hier im einzelnen genauer auszuführen, denke ich, daß die Feststellung gerechtfertigt ist, daß mit den fossilen Energievorräten, den Vorräten für die Erzeugung von Energie aus Kernspaltung und Kernfusion, sowie dem Energiestrom der Sonne, von dem wir annehmen dürfen, daß er noch viele Milliarden Jahre aus dem Fusionsofen der Sonne gespeist werden wird, uns für die der menschlichen Vorsorge bedürftigen Zeiträume ressourcenseitig praktisch nicht limitierte Energiemengen für die Gewinnung von Arbeitsfähigkeit zur Verfügung stehen. Ich denke auch, daß die Erschöpfung verfügbarer Materie weit in der Zukunft, außerhalb unseres menschlichen Zeitmaßes liegt, wenn wir die Möglichkeiten der Rückführung und Materialsubstitution nutzen und die Nutzung hoch-entropier Rohstofflagerstätten für möglich erachten.

Wichtiger für die heute anstehenden energiepolitischen Weichenstellungen ist es, daß aus den Hauptsätzen eine Bewertungsgröße, eine Maßzahl bisher nicht abgeleitet werden könnte, die es uns erlauben würde, die verschiedenen Energiesysteme zur Gewinnung von Arbeitsfähigkeit aus den fossilen und nuklearen Energievorräten sowie dem Energiestrom der Sonne, in eine Rangfolge einzuordnen, entsprechend dem für das jeweilige Energiesystem notwendigen Aufwand an Arbeitsfähigkeit, Gestaltungsfähigkeit, verfügbarer Materie sowie der durch die Stoffdissipation verursachten Umweltbelastungen.

Der Erntefaktor, als das Verhältnis der über die gesamte Lebensdauer einer Energiewandlungsanlage bereitgestellten Arbeitsfähigkeit zu der für die Errichtung der notwendigen Anlagen und die Brennstoffbereitstellung aufgewandten Arbeitsfähigkeit, trägt zwar dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik, aber eben nur diesem Rechnung. Er erfaßt und bewertet nicht die Inanspruchnahme der anderen knappen Faktoren, wie die nicht energetischen Rohstoffe, die Umwelt und die Gestaltungsfähigkeit. Er ist von daher für eine Bewertung nur begrenzt aussagefähig.

Allgemein läßt sich formulieren, das ein Energiewandlungssystem bei gleicher Bereitstellung von Arbeitsfähigkeit dann effizienter als ein anderes ist, wenn es weniger Arbeitsfähigkeit, Gestaltungsfähigkeit und Rohstoffe bedarf und geringere Umweltschäden zur Folge hat.

In der Ökonomie dienen Kosten und Preise als Maß für die Inanspruchnahme knapper Ressourcen. Geringere Kosten bei gleichen Nutzen bedeuten eine ökonomisch effizientere Lösung. Gegen Kosten als Bewertungskriterium von Energiewandlungssystemen mag man einwenden, das gegenwärtig die Kosten externer Effekte in den Kostenkalkülen von Energiewandlungssystemen nicht erfaßt werden. Diesem Umstand kann natürlich durch die Internalisierung externer Kosten abgeholfen werden, ohne die Schwierigkeiten und Probleme der Ermittlung externer Kosten hier zu verkennen.

Ich denke dennoch, daß Kosten, die externe Effekte so weit wie möglich mitberücksichtigen, gegebenenfalls ergänzt durch weitere Kenngrößen, der heute brauchbarste Maßstab sind, die Effizienz von Umwandlungssystemen anzugeben, und sie damit bezüglich ihres Verbrauchs an knappen Ressourcen zu bewerten.

Im folgenden sei nun der Versuch gemacht, die Effizienz der verschiedenen uns zur Verfügung stehenden Quellen von Arbeitsfähigkeit (die fossilen und nuklearen Energievorräte und der Energiestrom der Sonne) anhand verschiedener Kriterien aus heutiger Sicht zu beschreiben. Als Kriterien werden dabei benutzt

- die Kosten,
- der kumulierte Energieaufwand,
- der Materialaufwand,
- die kumulierten Emissionen,
- die Risiken für das menschliche Leben und die Gesundheit und
- die spez. CO₂-Minderungskosten.

Ich habe bisher sehr allgemein von der Nutzung der Sonnenenergie oder den erneuerbaren Energiequellen gesprochen. Natürlich ist mir bewußt, daß dies eine Simplifizierung ist, die nicht zwischen den verschiedenen technischen Wegen der Nutzung der solaren Strahlung und von ihr abgeleiteter erneuerbarer Energieströme differenziert. Für quantitative Aussagen ist eine Differenzierung notwendig. Angesichts der Vielfalt der Wege zur Gewinnung von Arbeitsfähigkeit aus regenerativen Energiequellen ist hier aber nicht der Raum für Vollständigkeit, sondern es muß bei exemplarischen Betrachtungen ausgewählter Techniken, hier zur Stromerzeugung bleiben. Die im

folgenden genannten Zahlen sind dabei in ihren Relationen bedeutsamer als in ihrem absoluten Werten. Sie gelten für die Situation in Deutschland.

Stromerzeugungskosten

In Tab. 1 sind die Stromerzeugungskosten aus Wind, mittels Photovoltaik, aus Steinkohle und aus Kernenergie dargestellt. Die Kosten aus betriebswirtschaftlicher Sicht, die im Falle der Windenergie und Photovoltaik anteilige Kosten für ein back-up-System enthalten, stützen die Aussage, daß eine Stromerzeugung aus Wind und Sonne derzeit nicht wirtschaftlich ist. Der Kostenabstand zur Stromerzeugung aus Steinkohle und Kernenergie beträgt im Falle der Windenergie 50 bis 100 % und für die photovoltaische Stromerzeugung liegen die Kosten um einen Faktor 10 bis 20 höher. Zusätzlich sind in Tab. 1 auch Abschätzungen der externen Kosten der Stromerzeugung angegeben.

Tabelle 1: Kosten unterschiedlicher Stromerzeugungsoptionen

	Windenergie ³	Photovoltaik	Steinkohle	Kernenergie
	in Pf/kWh			
Kosten aus Investition und Betrieb	11,0-20,0	100 - 230 ³	9,7 - 11,1 ¹ (14,4 - 15,7 ²)	8,6 - 9,6
zusätzliche Kosten aus Back-up	~3,3	~4	-	-
betriebswirtschaftliche Kosten	14,3 - 23,3	104 - 234	9,7 - 11,1	8,6 - 9,6
externe Kosten	0,02 - 0,42	0,06 - 1,44	0,46 - 2,49 ⁴	0,03 - 0,73

¹ Importkohle.

² heimische Steinkohle.

³ Bandbreite für monokristalline, polykristalline oder amorphe Zellen; Einstrahlung 1 045 bis 1 265 kWh/(m a), jährliche Einstrahlung auf die geneigte ausgerichtete Fläche.

⁴ Ohne Kosten einer Klimaveränderung.

⁵ Jahresmittlere Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe über Grund: 5,5 m/s.

Die hier aufgeführten externen Kosten erfassen die Gesundheitsauswirkungen, die Schäden durch Umweltbelastung und Unfälle, den Ressourcenverzehr und die Subventionen. Nicht erfaßt sind die externen Kosten einer möglichen Klimaveränderung durch die Anreicherung von Spurengasen in der Atmosphäre, die derzeit nicht quantifizierbar sind. Diese quantifizierten externen Kosten machen nur einen Bruchteil der Kosten aus Investition und Betrieb der Stromerzeugungssysteme aus. Ihre Berücksichtigung verschiebt die Kostenrelationen zwischen den erneuerbaren und konventionellen Stromerzeugungssystemen nicht nennenswert. Die höheren Kosten der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energiequellen deuten darauf hin, daß sie volkswirtschaftlich knappe Ressourcen stärker in Anspruch nehmen.

Kumulierter Energieaufwand

Die Gewinnung von für den Menschen nutzbare Arbeitsfähigkeit über Energiewandlungsanlagen ist immer mit einem investiven Energieaufwand für die Errichtung der Anlagen und im Falle der nuklearen und fossilen Energieträger auch für die Bereitstellung des Brennstoffs verbunden. Der Verbrauch von Arbeitsfähigkeit zur Bereitstellung von nutzbarer Energie, in unserem Fall von Strom, läßt sich durch Kenngrößen wie der kumulierte Energieaufwand, den Erntefaktor oder die energetische Amortisationszeit beschreiben.

Tabelle 2: Kumulierter Primärenergieaufwand, Erntefaktoren und Amortisationszeiten für Herstellung und Betrieb

	<i>KEA</i>	<i>EF_{Prim}</i>	<i>AZ_{Prim}</i>
	in kWh/MWh _d ³		in Monaten
Windenergie			
4,5 m/s	65 - 218	13 - 44	5 - 18
5,5 m/s	44 - 142	20 - 65	4 - 12
6,5 m/s	33 - 106	27 - 86	3 - 9
Photovoltaik			
Monokristallin	800 - 1 030	2,8 - 4,3	84 - 108
Polykristallin	650 - 840	3,4 - 5,3	68 - 88
Amorph	570 - 730	3,9 - 6,1	60 - 77
Steinkohle			
Durch Materialaufwand (<i>KEA_H</i>)	11 - 23		
In vorgelagerter Prozeßkette ¹ (<i>KEA_N</i>)	163		
Summe	173 - 185	15 - 16	2 - 4
Kernenergie			
Durch Materialaufwand (<i>KEA_H</i>)	6		
In vorgelagerter Prozeßkette ² (<i>KEA_N</i>)	57 - 91		
Summe	63 - 97	29 - 45	0,8

¹ *KEA* der Brennstoffbereitstellung für Mix aus Importkohle und heimischer Steinkohle.

² *KEA* der Brennstoffbereitstellung für Mix bei Anreicherung, 70 % Zentrifuge und 30 % Diffusion.

³ Bezogen auf die während der gesamten Lebensdauer erzeugte Energie.

Der kumulierte Energieaufwand (Tab. 2) bezeichnet den Aufwand an Primärenergie (an Arbeitsfähigkeit) für die Herstellung des Kraftwerks und der Gewinnung und Bereitstellung des Brennstoffs um eine kWh Elektrizität herzustellen. Für die Windenergie liegt er in einem Bereich von 3,3 bis 22 %. Bei der Steinkohle (etwa 18 %) und der Kernenergie (6 bis 10 %) wird er wesentlich durch den Energieaufwand für die Gewinnung, Aufbereitung und den Transport des Brennstoffs bestimmt.

Die Photovoltaik ist derzeit noch durch einen hohen kumulierten Energieaufwand und hohe energetische Amortisationszeiten gekennzeichnet und im Sinne der Hauptsätze damit ein wenig effizienter Energiewandler. Da der kumulierte Energieaufwand eines Energiewandlungssystems in die Erzeugungskosten eingeht, gibt es einen Zusammenhang zwischen den Kosten der Energieerzeugung und dem kumulierten Energieaufwand.

Materialaufwand

Tab. 3 zeigt für ausgewählte Materialien die Materialintensität der hier betrachteten Stromerzeugungssysteme. Erfasst ist der jeweilige Materialaufwand für den Bau des Kraftwerks und der Anlagen zur Bereitstellung des Brennstoffs. In der Tabelle ist dabei nur ein kleiner Teil aller Materialien erfasst; sie stellt also keine vollständige Materialbilanz dar. Sie läßt aber erkennen, daß die geringe Energiedichte der solaren Strahlung und des Windes über die notwendigen großen Energiesammelungsflächen zu einem vergleichsweise hohen Materialaufwand führt.

Dem hohen Materialaufwand für die Umwandlungsanlage bei Wind und Photovoltaik steht andererseits gegenüber, daß die Stromerzeugung nicht an eine stoffliche Umsetzung eines

Tabelle 3: Gesamtmaterialaufwand

	Stahl	NE-Metalle	Zement	Kunststoff	Glas und Quarz
	in kg/GWh _e ¹				
Windenergie ²					
4,5 m/s	2 910 - 6 640	90 - 130 ⁵	1 050 - 2 420	380 - 570	-
5,5 m/s	1 940 - 4 470	60 - 90 ⁵	710 - 1 630	250 - 370	-
6,5 m/s	1 460 - 3 370	50 - 70 ⁵	530 - 1 230	180 - 280	-
Photovoltaik					
Monokristallin	8 900 - 11 400	1 290 - 1 660	3 560 - 4 580	90 - 120 ⁸	13 710 - 17 630
Polykristallin	10 600 - 13 600	1 510 - 1 940	4 310 - 5 540	90 - 120 ⁸	18 120 - 23 300
Amorph	16 700 - 21 500	2 510 - 3 220	6 930 - 8 910	90 - 120 ⁸	5 650 - 7 250
Steinkohle ³	1 200 - 2 550 ⁴	15 ⁶	360 - 520 ⁷	8	-
Kernenergie	530	-	1 280	-	-

¹ Bezogen auf die während der gesamten Lebensdauer erzeugt elektrische Energie.

² Alle Anlagen mit horizontaler Achse, Zwei- oder Dreiblattrotor aus Kunststoff, Stahlurm.

³ Materialaufwand für das Kraftwerk, die Förderung und den Transport.

⁴ Unterer Wert: Förderung im Tagebau, Transport mit dem LKW.

Oberer Wert: Förderung im Tiefbau, Transport mit dem Schiff.

⁵ Kupfer.

⁶ Kupfer und Aluminium.

⁷ Unterer Wert: Förderung im Tagebau.

Oberer Wert: Förderung im Tiefbau.

⁸ Kunststoff einschließlich Propylen.

Energieträgers gebunden ist. Diesbezügliche Stofffreisetzungen, die zu Umweltbelastungen führen, treten somit nicht auf. Umweltbelastungen, die aus Stoffemissionen resultieren, können demnach nur im Zusammenhang mit der Erstellung des Kraftwerks entstehen.

Kumulierte Emissionen

In Tab. 4 sind die kumulierten Emissionen ausgewählter Schadstoffe für die hier betrachteten Stromerzeugungssysteme gegenübergestellt. Erfasst sind die Emissionen, die direkt bei der Stromerzeugung im Kraftwerk entstehen sowie die indirekten Emissionen bei der Herstellung der Anlage sowie der Förderung und Bereitstellung des Brennstoffs.

Die Emissionen der Steinkohleverstromung resultieren hauptsächlich aus der Verbrennung der Kohle. Bei den regenerativen Energiesystemen treten Emissionen nur bei der Herstellung der Anlagen auf.

Bei den hier betrachteten Schadgasen liegen die kumulierten Emissionen der Kernenergie- und der Windstromerzeugung in der gleichen Größenordnung. Verglichen mit der Steinkohle sind die kumulierten Emissionen der Photovoltaik durchaus beachtlich. Hier drückt sich der Umstand aus, daß ein hoher kumulierter Energieaufwand, d. h. ein kleiner Erntefaktor, bei energierohstofflosen Wandlungssystemen mit hohen indirekten Schadstoffemissionen verbunden sein kann.

Risiken für das menschliche Leben und die Gesundheit

In Tab. 5 sind die den einzelnen Stromerzeugungskosten zuzurechnenden Risiken für das menschliche Leben und die Gesundheit vergleichend gegenübergestellt. Erfasst sind die heute

Tabelle 4: Kumulierte Emissionen für Herstellung und Betrieb

	SO ₂	NO _x	Staub	CO ₂
	in kg/GWh _{el}			
Windenergie				
4,5 m/s	16,3 - 34,9	24,1 - 50,7	3,0 - 6,3	16 300 - 35 700
5,5 m/s	10,9 - 23,5	16,0 - 34,2	2,0 - 4,3	10 800 - 24 000
6,5 m/s	8,1 - 17,7	12,0 - 25,8	1,5 - 3,2	8 100 - 18 100
Photovoltaik				
Monokristallin	270 - 340	320 - 410	100 - 120	247 000 - 318 000
Polykristallin	300 - 380	300 - 380	60 - 80	232 000 - 298 000
Amorph	170 - 220	210 - 270	20 - 30	206 000 - 265 000
Steinkohle				
Durch Materialaufwand	6 - 11	10 - 14	1 - 2	4 400 - 7 300
In vorgelagerter Prozeßkette	128	137	9	93 000
Emissionen Kraftwerk	570	570	140	781 000
Summe	704 - 709	717 - 721	150	878 400 - 881 300
Kernenergie				
Durch Materialaufwand	5	9	1	5 400
In vorgelagerter Prozeßkette ¹	28 - 45	55 - 87	5 - 7	13 000 - 20 000
Emissionen Kraftwerk	0	0	0	0
Summe	33 - 50	64 - 96	6 - 8	18 400 - 25 400

¹ Die Bandbreite ergibt sich aus den unterschiedlichen Annahmen bezüglich der Verluste in der vorgelagerten Prozeßkette.

² Bezogen auf die während der gesamten Lebensdauer erzeugte elektrische Energie.

quantifizierbaren Gesundheitsrisiken im Zusammenhang mit der Material- und Anlagenherstellung, dem Transport von Material und Energieträgern sowie die Risiken, die durch Schadstoffemissionen und durch Stör- und Unfälle verursacht werden. Bei den Risiken wird zwischen beruflichen und öffentlichen Risiken unterschieden.

Tabelle 5: Berufliche und öffentliche Risiken

	Berufliche Risiken		Öffentliche Risiken	
	Todesfälle	Verletzungen/ Erkrankungen	Todesfälle	Verletzungen/ Erkrankungen
	Anzahl/TWh _{el} ³	WDL/TWh _{el} ³	Anzahl/TWh _{el} ³	WDL/TWh _{el} ³
Windenergie				
4,5 m/s	0,02 - 0,08	120 - 300	0,008	0,35 - 0,38
5,5 m/s	0,02 - 0,05	80 - 200	0,005	0,23 - 0,25
6,5 m/s	0,01 - 0,04	60 - 150	0,004	0,18
Photovoltaik ¹	0,10 - 0,19	600 - 1 100	0,009 - 0,011	0,44 - 0,54
Steinkohle	0,22	2 300	0,21 - 0,74	0,80 - 12,0
Kernenergie ²	0,04 - 0,11	209 - 218	0,002 - 0,1	0,06 - 0,31

¹ Keine Differenzierung nach der Art der Solarzellen.

² Die Zahlen zu den öffentlichen Risiken beinhalten unter anderem die Ergebnisse der Deutschen Risikostudie Kernkraftwerke (Phase A) zu hypothetischen Unfällen.

³ Bezogen auf die gesamte während der Lebensdauer der Anlage erzeugte elektrische Energie.

In der großen Bandbreite der Zahlenangaben kommen die Unsicherheiten bei der Quantifizierung von Risiken zum Ausdruck, die im Einzelnen hier nicht erläutert werden können. Eine qualitative

Interpretation der Zahlenangaben läßt die folgenden Aussagen zu

- eine risikofreie Option gibt es nicht,
- die Risiken der Stromerzeugung aus Kohle sind vergleichsweise hoch,
- die Risiken der Kernenergie liegen zahlenmäßig in der gleichen Größenordnung wie die der Windenergie und Photovoltaik.

Spezifische CO₂-Minderungskosten

Als letztes Bewertungskriterium sei auf die spezifischen CO₂-Minderungskosten eingegangen. Unter den spezifischen CO₂-Minderungskosten wird hier der Aufwand ausgedrückt in DM verstanden, der bei einer CO₂-Minderungsmaßnahme notwendig ist, um die Emission einer t CO₂ zu vermeiden. Die Angaben in Tab. 6 beziehen sich auf das Jahr 2005. Negative CO₂-Minderungskosten bedeuten, daß die Maßnahme, unter den hier getroffenen Preisannahmen, auch wirtschaftlich günstiger ist. Von Nischenanwendungen einmal abgesehen, weisen die erneuerbaren Energiequellen vergleichsweise hohe CO₂-Minderungskosten auf. Es gibt andere Maßnahmen (rationelle Energienutzung, Erdgas, Kernenergie) die mittelfristig CO₂-Emissionen mit geringeren volkswirtschaftlichen Kosten reduzieren können.

Tabelle 6: Spezifische CO₂-Minderungskosten verschiedener Maßnahmen

	Kosten der vermiedenen Kraftwerksemissionen DM/t CO ₂ ⁴
Braunkohle durch Erdgas	+23
Steinkohle (Import) durch Erdgas	+11
Braunkohle durch Kernenergie	-5
Steinkohle (Import) durch Kernenergie	-30 bis -1
Steinkohle (heimisch) durch Kernenergie	-90 bis -60
Steinkohle (Import) durch Windenergie ^{1,3}	0 bis +300
Steinkohle (heimisch) durch Windenergie ^{1,3}	-60 bis +240
Steinkohle (Import) durch Photovoltaik ^{2,3}	+1 190 bis +2 880
Steinkohle (heimisch) durch Photovoltaik ^{2,3}	+1 130 bis +2 810

¹ Jahresmittlere Windgeschwindigkeiten zwischen 4,5 und 6,5 m/s in 10 m Höhe über Grund.

² Solare Einstrahlung auf die geneigte Fläche 1 045 bis 1 265 kWh/(m² a) (Standort Deutschland), Solarzellenwirkungsgrad 12 (polykristallin) bis 14 % (monokristallin).

³ Unter Berücksichtigung der Back-up-Kosten.

⁴ Gesamtwirtschaftliche Kosten, realer Zinssatz 4 %, Abschreibungsdauer entspricht technischer Lebensdauer.

6. Schlußbetrachtungen

Die Hauptsätze der Thermodynamik lehren uns, daß der Aufbau und die Erhaltung lebensnotwendiger und lebensfördernder Ordnungszustände unvermeidlich mit der Entstehung von Energie- und Stoffentropie verbunden ist. Die fossilen und nuklearen Energievorräte und der Energiestrom der Sonne sind die Mitgift der Natur, die wir zur Gewinnung lebensnotwendiger Arbeitsfähigkeit, verfügbarer Energie, nutzen können. Dies erfordert den Einsatz von Energiewandlungsanlagen, deren Aufbau ebenso wie die Gewinnung von stofflichen Energieträgern, wiederum die Investition von Arbeitsfähigkeit, Gestaltungsfähigkeit und verfügbare Materie notwendig macht. Sie und die begrenzte Belastbarkeit der Umwelt sind die eigentlichen knappen Produktionsfaktoren. Fossile, nukleare und solare Energiewandlungssysteme sind durch einen sehr unterschiedlichen Material- und Energieaufwand gekennzeichnet, der sich unter anderem in den Kosten der bereitgestellten Energie widerspiegelt.

Effiziente Energiewandlungssysteme, die die knappen Ressourcen möglichst wenig beanspruchen, sind eine notwendige Bedingung für eine humane Begrenzung des weltweiten Bevölkerungswachstums, die nur über die Brücke eines ausreichenden materiellen Wohlstandes der Menschen erreichbar erscheint. Eine Stabilisierung der Weltbevölkerung ist aber eine notwendige Bedingung für eine nachhaltige und dauerhafte Entwicklung auf der Erde. Kosteneffizienz ist wohl auch der Schlüssel zur Vermeidung gravierender Klimaveränderungen.

Macht man den Versuch, die Techniken zur Nutzbarmachung erneuerbarer Energiequellen mit den Systemen zur Umwandlung fossiler oder nuklearer Brennstoffe zu vergleichen, so sind, von Ausnahmen abgesehen, ihre Kosten der Energiebereitstellung deutlich höher. Neben den Kosten deuten auch andere Kenngrößen darauf hin, daß beim gegenwärtigen und dem in der nahen Zukunft erreichbaren Entwicklungsstand, die Bereitstellung von Energie aus erneuerbaren Energiequellen einen vergleichsweise hohen Einsatz knapper Ressourcen und Produktionsfaktoren erfordert.

Ein effizienter und tragfähiger Beitrag zur Lösung der vor uns liegenden Herausforderungen ist daher in der nahen Zukunft nur in Nischenanwendungen zu erwarten. Angesichts der Entwicklungs- und Fortschrittspotentiale, die bei einigen Techniken zur Nutzung erneuerbarer Energiequellen vorhanden sind, kann sich dies in der weiteren Zukunft durchaus verändern.

Literatur

- /1/ Knizia, K.
Kreativität, Energie und Entropie ECON-Verlag, Düsseldorf, 1992
- /2/ Voss, A.; Stelzer, Th.; Wiese, A.
Vergleichende Bilanzierung verschiedener Stromerzeugungsoptionen.
2. Deutscher Fachkongreß "Die ganzheitliche Bilanzierung von Industrie-Produkten",
Frankfurt, 6.-7. Dezember 1993