

Nachhaltigkeit in der Energieversorgung - Relevante Stromerzeugungstechniken auf dem Prüfstand

**Prof. Dr.-Ing. Alfred Voß, Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung
(IER), Universität Stuttgart**

1. Einleitung

Das Leitbild einer "Nachhaltigen Entwicklung" (sustainable development) hat in den letzten Jahren eine erstaunliche Karriere gemacht. Seit der Konferenz der Vereinten Nationen über Umwelt und Entwicklung (UNCED) in Rio de Janeiro 1992 ist das Ziel einer nachhaltigen Entwicklung das zentrale Leitbild der internationalen umwelt-, wirtschafts- und entwicklungspolitischen Diskussion, das wirtschaftliche Entwicklung zur Überwindung von Hunger und Armut, und die Schaffung humaner Lebensbedingungen sowie den Erhalt der natürlichen Lebensgrundlagen miteinander verbinden will. Fünf Jahre zuvor hatte die „Weltkommission für Umwelt und Entwicklung“ (WCED), nach ihrer Vorsitzenden auch Brundtland-Kommission genannt, mit ihrem Bericht „Unsere gemeinsame Zukunft“ den Weg hierfür bereitet. Sie stellte den Begriff „sustainable development“ ins Zentrum ihrer Aussagen für einen Entwicklungspfad, der weitere wirtschaftliche Entwicklung und die Nutzung der natürlichen Ressourcen so verknüpft, daß den kommenden Generationen keine Lebens- und Entfaltungschancen vorenthalten werden.

Auch in die energiepolitische und energiewirtschaftliche Diskussion hat das Leitbild einer nachhaltigen Entwicklung mittlerweile verstärkt Eingang gefunden. Die Thematisierung von Nachhaltigkeit im Zusammenhang mit der Energieversorgung ist dabei keineswegs neu. Lassen Sie mich nur erwähnen, daß bereits im Jahr 1981 das International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA) einen umfassenden Bericht mit dem Titel „Energy in a finite World - Paths to a Sustainable Future“ vorgelegt hat.

Obwohl festzustellen ist, daß das Leitbild einer nachhaltigen Entwicklung auch über die verschiedenen gesellschaftlichen Gruppen hinweg eine breite prinzipielle Zustimmung findet, so spannen doch die Vorstellungen und Interpretationen des Leitbildes, sowohl hinsichtlich ihrer normativen bzw. theoretisch-naturwissenschaftlichen Fundierung als auch hinsichtlich ihrer abgeleiteten Handlungsziele bzw. Handlungsanweisungen - dies gilt gerade für den Energiebereich - eine große Bandbreite auf. Dies birgt nicht nur die Gefahr, daß dieses Leitbild von verschiedenen Interessengruppen instrumentalisiert wird, sondern auch, daß falsche Weichenstellungen vorgenommen werden. Aus diesem Grund erscheint es notwendig, auch wegen der essentiellen Bedeutung, die der Energieversorgung für eine nachhaltige Entwicklung zukommt, sich über die Konkretisierung des Leitbildes zu

verständigen, um die Energieversorgungsoptionen, aber auch die energiepolitischen Vorstellungen, diesbezüglich einordnen zu können.

2. Nachhaltigkeitskonzepte - eine kritische Würdigung

Im Verständnis der Brundtland-Kommission wie der Rio-Deklarationen beinhaltet das Leitbild „Nachhaltige Entwicklung“ die beiden sich intuitiv scheinbar widersprechenden Forderungen nach schonender Umweltnutzung und nach weiterer wirtschaftlicher Entwicklung. Die Brundtland-Kommission charakterisiert als nachhaltige Entwicklung eine Entwicklung, die die Bedürfnisse der Gegenwart befriedigt, ohne zu riskieren, daß künftige Generationen ihre eigenen Bedürfnisse nicht befriedigen können. Auch wenn diese Definition vor dem Hintergrund der Umwelt- und Armutprobleme entstanden ist, so stellt sie doch eine ethisch motivierte Norm dar, die sich aus Gerechtigkeitsüberlegungen gegenüber künftigen Generationen ableitet.

Ziel einer nachhaltigen Entwicklung ist es also, den nachkommenden Generationen einen Bestand an natürlichen Ressourcen zu hinterlassen, der ihnen die Befriedigung ihrer Bedürfnisse entsprechend unserem heutigen Niveau erlaubt. Diese allgemeine Definition von Nachhaltigkeit, die für viele zustimmungsfähig ist, sagt aber noch wenig darüber aus, worauf es bei der Gewährleistung der Befriedigung der Bedürfnisse künftiger Generationen konkret, z. B. in Bezug auf die Energieversorgung, ankommt. Diese Offenheit und Unbestimmtheit läßt Spielraum für unterschiedliche Konkretisierungen und Interpretationen.

So ist derzeit eine Einengung der Nachhaltigkeitsdiskussion auf die Ressourcen- und Umweltproblematik zu beobachten. Mit Hinweis auf das Leitbild Nachhaltigkeit werden Änderungen der Lebensstile und substantielle Verzichte beim Konsum in den reichen Industrieländern gefordert. Die Nutzung erschöpfbarer Rohstoffreserven sei gegenüber den künftigen Generationen nicht verantwortbar, deshalb müsse so schnell wie möglich auf die Nutzung erneuerbarer Ressourcen umgestellt werden. Für die Energieversorgung bedeute dies den Umstieg auf die Nutzung der regenerativen Energiequellen.

Die Fragen der Nachhaltigkeit sind von verschiedenen Wissenschaftsdisziplinen in den letzten Jahren aufgegriffen worden. Insbesondere im Bereich der Wirtschaftswissenschaften sind verschiedene Konzepte der intergenerationalen Nachhaltigkeit entwickelt worden, die unterschiedliche theoretische Fundierungen und Problemsichtweisen zur Grundlage haben.

Ein wesentliches Element des neoklassischen Ansatzes, der sogenannten „weak sustainability“, ist das Substitutionsparadigma, demgemäß die Elemente des natürlichen Kapitalstocks (erneuerbare und erschöpfliche Ressourcen, assimilative und lebenserhaltende Funktionen der Natur) weitestgehend durch künstliches Kapital (man-made capital) ersetzt werden können. Um ein intergenerational

nicht sinkendes Wohlfahrtsniveau zu gewährleisten, muß deshalb der gesamte produktive Kapitalstock über die Zeit mindestens konstant bleiben, d. h. eine Abnahme des Naturkapitals muß durch eine entsprechende Zunahme des Sachkapitalstocks kompensiert werden. Dies, so die Auffassung, kann dadurch erreicht werden, daß der Markt die relative Knappheit der Umweltgüter widerspiegelt. Tut er dies nicht, so sind die auftretenden externen Effekte durch geeignete marktkonforme Instrumente zu internalisieren.

Nachhaltigkeitskonzepte, die der Schule der ökologischen Ökonomie zuzurechnen sind und als „strong sustainability“ bezeichnet werden, räumen den ökologisch als notwendig angesehenen Begrenzungen Vorrang vor den Präferenzen der Wirtschaftssubjekte ein. Sie postulieren eine weitgehende Komplementarität von Natur- und Sachkapital, d. h. eine Substituierbarkeit von Naturkapital durch künstliches Kapital wird in weiten Bereichen ausgeschlossen. Als Argumente werden die Begrenztheit der natürlichen Ressourcen, die nicht substituierbaren Funktionen der Natur und die Unsicherheit und die Irreversibilität von Auswirkungen auf ökologische Systeme angeführt. Wenn also der natürliche Kapitalstock für den Produktionsprozeß nur begrenzt substituierbar ist, folgt daraus, daß das Naturkapital erhalten werden muß (Konstanz des Naturkapitals) und es erst gar nicht den Nutzungsregeln des Marktes ausgesetzt werden darf.

Diese von einigen Vertretern der ökologischen Ökonomie propagierte strenge Nachhaltigkeit erscheint bei näherer Betrachtung ebenso wenig realitätsbezogen wie die Annahme einer unbeschränkten Substitutionsmöglichkeit der Funktionen von Umwelt und Natur. Beiden Konzepten ist aber gemein, daß die verwendeten Begriffskategorien Naturkapital und künstliches bzw. Sachkapital so abstrakt und undifferenziert sind, daß sie für eine sachgerechte Operationalisierung wenig geeignet sind. Dabei suggeriert insbesondere der Begriff des Naturkapitals eine Homogenität, die den unterschiedlichen Funktionen von Natur - ihrer Ressourcenfunktion für den Wirtschaftsprozeß, ihrer Assimilations- und Depositionsfunktion, ihren lebenserhaltenden Funktionen (z. B. Atemluft) und ihren immateriellen Werten - nicht Rechnung trägt.

Beschränken sich die zuvor angesprochenen ökonomischen Nachhaltigkeitskonzepte auf die ökonomische und ökologische Dimension unserer Nachweltverantwortung, so fordern andere Konzepte, wie z. B. das „Drei-Säulen-Modell“ der Enquête-Kommission „Schutz des Menschen und der Umwelt“ auch die Integration von sozialen Zielen in die Überlegungen zur Nachhaltigkeit. Dabei geht es vor allem um die Frage der gerechten Verteilung von Wohlstand (intragenerationale Gerechtigkeit) sowie um die Partizipation an entwicklungspolitischen Entscheidungen.

Die Diskussion verschiedener Konzepte zur inhaltlichen Bestimmung dessen, was unter Nachhaltigkeit zu verstehen ist, sollte deutlich machen, daß noch viele Fragen offen sind. Offen ist auch, ob es angesichts der unterschiedlichen Vorstellungen über anzustrebende Lebensformen und der Werte-

vielfalt je zur Verständigung über allgemein akzeptierte Ziel-Mittel-Schemata zur Erreichung einer nachhaltigen Entwicklung kommen kann. Denkbar müßte es aber sein, die verschiedenen Konzepte von Nachhaltigkeit bezüglich ihrer naturwissenschaftlichen Grundlagen, der materiell-energetischen Wirkungszusammenhänge, auf eine belastbare Basis zu stellen. Deshalb soll im folgenden Abschnitt Nachhaltigkeit aus der Sicht der Naturwissenschaften diskutiert werden.

3. Nachhaltige Energieversorgung - Versuch einer naturwissenschaftlichen Fundierung

Klaus Knizia hat immer wieder auf die fundamentale Bedeutung der Hauptsätze der Thermodynamik hingewiesen, um gerade die Energiedebatte wieder vom „Kopf auf die Füße“ zu stellen. In der Tat ist es insbesondere der zweite Hauptsatz der Thermodynamik, den der Chemiker und Philosoph Wilhelm Ostwald, „Das Gesetz des Geschehens“ nannte und die Erfahrung der Stoffdissipation, die uns wichtige Orientierungen für die Ausgestaltung eines nachhaltigen Entwicklungsprozesses liefern.

Wesentliche Aussage des zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik ist, daß Leben, der Aufbau und die Nutzung lebenserhaltender und lebensfördernder Ordnungen und Strukturen unumgänglich mit der Entwertung von Energie, d.h. dem Verbrauch von Arbeitsfähigkeit verbunden ist. Dabei wird die Entropie erhöht, die Unordnung nimmt zu. Georgescu-Roegen hat nun darauf hingewiesen, daß auch die Zerstreung von Stoffen und Materie untrennbar mit dem Leben und Wirtschaften verbunden ist. Auch diese Stoffdissipation bzw. Stoffvermischung wird durch das Entropieprinzip des zweiten Hauptsatzes beschrieben.

Materie und Stoffe werden im Rahmen unserer Nutzungsprozesse so fein zerstreut, daß ein Einsammeln und Aufkonzentrieren praktisch unmöglich ist. Rost und der Verschleiß von Automotoren und Autoreifen mögen das verdeutlichen. Materie wird also wie die Energie entwertet, d. h. von einem verfügbaren in einen nicht mehr verfügbaren Zustand überführt. Recycling und andere technische Maßnahmen beeinflussen diese Entwertung, aber sie läßt sich nicht gänzlich vermeiden.

Umweltbelastungen, auch die im Zusammenhang mit unserer heutigen Energieversorgung, werden vorrangig durch anthropogen hervorgerufene Stoffströme, durch Stoffzerstreuung, d. h. Stofffreisetzung in die Umwelt, verursacht. 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 der bei weitem größte Entropiegenerator, 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 Arbeitsfähigkeit (Energie) und sinkende Umwelt- und Klimabelastungen sind somit kein Widerspruch. Die Stofffreisetzung, nicht die Energieströme, müssen begrenzt werden.

Die angesprochenen Hauptsätze zeigen, daß in allen Systemen der Entropievermehrung und Stoffentwertung nur durch Zufuhr von Arbeitsfähigkeit und verfügbarer Materie entgegengewirkt werden kann. Lebewesen erhalten oder erhöhen ihren Ordnungszustand durch Arbeitsfähigkeit aus ihrer Umgebung, z. B. durch die Aufnahme von Nahrung. 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.

Verfügbare Materie und Verfügung über Arbeitsfähigkeit sind aber nur notwendige und noch keine hinreichenden Bedingungen für den Aufbau lebensnotwendiger bzw. lebensfördernder Ordnungszustände und damit für Leben überhaupt. Hinzukommen muß noch Information oder Wissen, um dem Leben dienende Ordnungen zu schaffen. Bei allen Lebewesen 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 keine nützlichen, dem Leben dienenden Ordnungszustände. 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 sollen hier unter dem Begriff Gestaltungsfähigkeit subsumiert werden. Sie ist neben der Arbeitsfähigkeit und der verfügbaren Materie die dritte notwendige Komponente zur Schaffung nützlicher, dem Leben dienender Ordnungszustände.

Die Gestaltungsfähigkeit stellt dabei eine besondere Ressource dar. Sie ist zwar zu jedem Zeitpunkt begrenzt, wird aber nicht verbraucht, sondern sie ist sogar vermehrbar. Wissen wächst. Dies gibt der Ressource Gestaltungsfähigkeit eine besondere Bedeutung für die Lösung unserer Probleme und die Erreichung einer nachhaltigen Entwicklung.

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, also die Energie- und Materialintensität unseres Wirtschaftens zu verringern,
- die verfügbare Energiebasis durch die Nutzbarmachung neuer Energiequellen und weiterer Energievorräte zu erweitern,
- die verfügbare Materie durch die Nutzbarmachung von neuen Rohstofflagerstätten und neuen Materialien zu erhöhen,
- die Stoffentwertung verfügbarer Materie durch Recycling zu reduzieren und
- die Umweltbelastungen durch Zerstreung von Materie und die Produktion von Stoffabfällen auch bei steigender Produktion von Gütern und Dienstleistungen zu reduzieren.

Die Nichtbeachtung der besonderen Bedeutung der Ressource Gestaltungsfähigkeit hat historisch gesehen eine gewisse Tradition und führte immer zu einer völligen Fehleinschätzung der zukünftigen Entwicklung. Erinnerung sei hier nur an Robert Malthus und seine Prophezeiung einer nahen Ernährungskatastrophe sowie an die Prognosen des Club of Rome zu den bevorstehenden Grenzen des Wachstums. Wenn wir uns vergegenwärtigen, daß Leben notwendigerweise mit dem Verbrauch von Arbeitsfähigkeit und verfügbarer Materie verbunden ist, und wir uns bewußt machen, daß die in der Erdkruste gespeicherten Vorräte und die Quellen von Arbeitsfähigkeit und von verfügbarer Materie zwar groß, aber dennoch endlich sind - auch der Energiestrom der Sonne wird in einigen Milliarden Jahren erlöschen - so ist eine nachhaltige Entwicklung zeitlich unbegrenzt nicht möglich, da irgendwann der "Wärmetod" oder die "Materiezerstreuung" dem Leben auf diesem Planeten ein Ende setzen werden.

Vor diesem Hintergrund ist eine nachhaltige Entwicklung richtiger zu charakterisieren als eine Entwicklung, die zwar aufgrund äußerer, nichtanthropogener Gegebenheiten zeitlich begrenzt ist, nicht aber durch ihre selbst bewirkten Folgen, und die zumindest die Erreichung vergleichbarer Wohlfahrtsniveaus der nachfolgenden Generationen gewährleistet. Es kommt also darauf an, die Kontinuität bezüglich der verfügbaren Arbeitsfähigkeit und Materie zu sichern und die Regenerations- und Assimilationsfähigkeit der natürlichen Stoffkreisläufe sowie den immateriellen Wert von Umwelt und Natur auf Dauer zu erhalten.

Eine so verstandene nachhaltige Entwicklung bedeutet nicht den Verzicht auf zunehmenden Wohlstand, und auch die Nutzung erschöpfbarer Energie- und Rohstoffvorräte ist mit nachhaltiger Entwicklung vereinbar, wenn die verfügbare Ressourcenbasis bzw. der aus ihr gewinnbare Nutzen durch technischen Fortschritt, durch die Verfügbarmachung neuer Energiebereitstellungsmöglichkeiten (Arbeitsfähigkeit) und Rohstoffe (verfügbare Materie) für die folgenden Generationen erweitert werden kann und die Inanspruchnahme von Umwelt und Natur auf ein verträgliches Maß begrenzt bleibt.

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, also nicht wirtschaftlich genutzt werden können, können keinen Beitrag zur Sicherung der Lebensqualität leisten. Bezogen auf die Ressourcenfunktion 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 Reserven, 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.

Unter dem Gesichtspunkt der Nachhaltigkeit zu fordern, nur noch erneuerbare Ressourcen zu nutzen, erscheint jedoch aus zwei weiteren Gründen nicht tragfähig bzw. schlicht unmöglich: Zum einen würde dies bedeuten, daß nicht-erneuerbare Ressourcen überhaupt nicht, auch nicht von den zukünftigen Generationen genutzt werden dürften. Ein noch gravierenderer Einwand ist jedoch, daß auch die Nutzung erneuerbarer Ressourcen, z.B. von solarer Energie, immer auch mit einer Inanspruchnahme von nicht-erneuerbaren Ressourcen, z.B. nicht energetischen Rohstoffen und Materialien mit begrenzten Vorräten, verbunden ist. Eine unveränderte Weitergabe der nicht erneuerbaren Ressourcenbasis, d. h. eine Konstanz des Naturkapitals, ist also offensichtlich unmöglich und mit Leben nicht vereinbar.

Unter dem Leitbild einer nachhaltigen Entwicklung kommt jedoch dem haushälterischen Umgang mit allen knappen Ressourcen eine besondere Bedeutung zu. Effiziente Ressourcennutzung im Zusammenhang mit der Energieversorgung betrifft hierbei nicht nur die Ressource Energie, da die Bereitstellung von Energiedienstleistungen immer auch den Einsatz anderer knapper Ressourcen - verfügbare Materie (nicht energetische Rohstoffe), Arbeitsfähigkeit, Gestaltungsfähigkeit und Umwelt - erfordern. Die effiziente Nutzung aller Ressourcen, die sich aus dem Leitbild Nachhaltigkeit ableitet, entspricht aber auch dem allgemeinen ökonomischen Prinzip. Aus beiden folgt, daß ein Energiesystem oder eine Energiewandlungskette zur Bereitstellung von Energiedienstleistungen dann effizienter als eine andere ist, wenn sie 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. Gegen Kosten als Bewertungskriterium von Energiesystemen mag man ein-

wenden, daß gegenwärtig die externen Effekte, z.B. von Umweltschäden, in den Kostenkalkülen noch nicht erfaßt werden. Diesem Umstand kann durch die Internalisierung externer Kosten abgeholfen werden. Hieraus läßt sich die Folgerung ziehen, daß Kosten - und zwar im Sinne von Vollkosten, die externe Effekte mit erfassen und berücksichtigen, - das beste, das geeignete Maß für die Inanspruchnahme knapper Ressourcen sind. Somit sind sie auch ein geeignetes Maß für die Beurteilung von Energietechniken im Hinblick auf das Leitbild der Nachhaltigkeit, und es wäre angebracht, daß ihnen in dieser Funktion wieder ein größerer Stellenwert in der energiepolitischen Diskussion zuteil wird.

Bevölkerungsentwicklung und Nachhaltigkeit

Global gesehen, und darüber besteht Einigkeit, kommt der Bevölkerungsentwicklung eine zentrale Rolle zu, wenn es um die Realisierungschancen einer weltweiten auf Dauer angelegten Entwicklung geht. Eine nachhaltige Entwicklung erscheint überhaupt nur, mindestens aber leichter erreichbar, wenn das Wachstum der Bevölkerung begrenzt und die Zahl der Menschen auf der Erde stabilisiert werden kann. Die Bevölkerungsprognosen gehen von einem weiteren Anstieg der Weltbevölkerung von derzeit 6 Mrd. Menschen auf 10 bis 14 Mrd. Menschen in der zweiten Hälfte 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 die meisten 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. über einen angemessenen materiellen Lebensstandard zu stabilisieren ist, dann gilt aber auch, daß eine Stabilisierung um so eher erreicht wird, je eher die Bedürfnisse der Menschen befriedigt werden können. Die dazu notwendige Ausweitung der Nahrungsmittel- und Güterproduktion, sowie des Angebots an Energiedienstleistungen wird um so eher möglich sein, je geringer der Aufwand für die Bereitstellung der dazu notwendigen Materie und Arbeitsfähigkeit ist. Aus diesem Grund gewinnen effiziente oder anders ausgedrückt, kostengünstige Energiesysteme ihre besondere Bedeutung für die Überwindung von Hunger und Armut als einzig humanen Weg zur Begrenzung der Weltbevölkerung und damit für die Realisierung einer nachhaltigen Entwicklung.

4. Energiesysteme - Ein erster Vergleich mit Blick auf die Nachhaltigkeit

Mit Bezug auf die zuvor erläuterten Konkretisierungen des Leitbildes „nachhaltige Entwicklung“, werden im folgenden einige Stromerzeugungstechniken bezüglich ihrer Nachhaltigkeit, d. h. Ressourceninanspruchnahme verglichen. Angesichts des derzeitigen Kenntnisstandes handelt es sich nicht um einen vollständigen und umfassenden Vergleich der aus Sicht der Nachhaltigkeit wichtigen Ressourcenintensitäten, sondern um einen ersten, in seinen Aussagen begrenzten Vergleich ausgewählter Ressourcennutzungsaspekte. Es werden erste Ergebnisse von Material-, Energie- und Stoffbilanzen erläutert, die alle Stufen und Prozesse, die für die Energiebereitstellung notwendig sind, erfassen. 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 Kraftwerke. Die exemplarischen Betrachtungen beschränken sich auf Stromerzeugungssysteme, die dem derzeitigen Stand der Technik entsprechen und mit den heutigen Produktionsstrukturen hergestellt werden. Die Zahlen gelten für Deutschland, sind aber in Grenzen übertragbar auf die Situation in anderen Ländern.

Energieaufwand (Aufwand an Arbeitsfähigkeit)

Die Bereitstellung von Strom 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 Tabelle 1 für verschiedene Stromerzeugungssysteme dargestellt ist, erfaßt den Aufwand an Primärenergie für die Herstellung und Entsorgung des Kraftwerks und die Gewinnung und Bereitstellung des Brennstoffs, um eine kWh Elektrizität bereitzustellen. Für die Windenergie liegt er im Bereich von 10 bis 16 %. Bei der Steinkohle und beim Erdgas ist er deutlich höher und wird 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 5 bis 9 %, und für die Photovoltaik liegt er derzeit noch um einen Faktor 10 höher. Dies schlägt sich dann auch in der energetischen Amortisationszeit nieder, die derzeit bei der Photovoltaik etwa 5 bis 7 Jahre beträgt, und damit deutlich größer als bei allen anderen Systemen ist.

Rohstoffaufwand (Aufwand an verfügbarer Materie)

Tabelle 2 zeigt für ausgewählte Materialien die Ressourcenintensität der hier betrachteten Stromerzeugungssysteme. Erfasst ist der jeweilige Rohstoffaufwand für den Bau des Kraftwerks sowie für alle Prozeßschritte zur Bereitstellung des Brennstoffs. Die Tabelle erfaßt nur einen kleinen Teil der mineralischen Rohstoffe, 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. Diesem hohen Materialaufwand bei Wind und Photovoltaik steht andererseits gegenüber, daß die Stromerzeugung nicht an die Umsetzung eines stofflichen 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 Herstellung und Entsorgung des Kraftwerks entstehen.

Emissionen (Stofffreisetzungen)

In Tabelle 3 sind die kumulierten, über den gesamten Lebensweg aufsummierten Emissionen ausgewählter Schadstoffe der hier betrachteten Stromerzeugungssysteme gegenübergestellt. Bei den hier erfaßten gasförmigen Schadstoffen 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 35 - 45 % 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.

Kosten: Stromgestehungskosten

Es wurde bereits darauf hingewiesen, daß Kosten ein adäquates Maß für die Inanspruchnahme knapper Ressourcen sind. Vor diesem Hintergrund ist dann auch verständlich, daß ein hoher Rohstoff- und Energieaufwand sich in hohen Kosten niederschlägt. Die in Tabelle 4 aufgeführten Stromerzeugungskosten weisen aus, daß die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien mit höheren, im Falle der Photovoltaik sogar deutlich höheren Kosten verbunden ist als die aus fossilen oder nuklearen Kraftwerken. Allerdings enthalten diese derzeitigen Stromgestehungskosten noch nicht die sogenannten externen Kosten. Hierunter sind diejenigen Kosten zu verstehen, mit denen nicht der Verursacher, sondern unbeteiligte Dritte belastet werden. Die externen Kosten sind aber im Rahmen eines hier angestrebten Vergleichs der Ressourceninanspruchnahme verschiedener Energiesysteme notwendigerweise mit einzubeziehen.

Externe Kosten

Die in Tabelle 4 aufgeführten, aus heutiger Sicht quantifizierbaren, externen Kosten erfassen die Gesundheitsauswirkungen, die Schäden an Feldpflanzen sowie Materialschäden und lärmbedingte Belastungen für den Normalbetrieb wie auch für Unfälle. Nicht erfaßt sind die externen Kosten einer möglichen Klimaveränderung durch die Anreicherung von Spurengasen (vor allem CO₂) in der

Atmosphäre, die derzeit kaum quantifizierbar sind. Diese nach derzeitigem Wissensstand quantifizierbaren externen Kosten sind deutlich geringer als die Werte, die vor einigen Jahren in die Diskussion gebracht wurden und Aufmerksamkeit erregten. Sie 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 nachhaltig zugunsten der erneuerbaren Energien.

Die hier erläuterten Ergebnisse ganzheitlicher Bilanzen des Energie- und Rohstoffaufwandes und der Stofffreisetzungen bei der Stromerzeugung gelten wie die Kostenangaben für den derzeit erreichten Stand der Technik. Es ist davon auszugehen, daß sich mit Fortschreiten der technischen Entwicklung deutliche Verbesserungen realisieren lassen. Dies gilt aber für alle der hier betrachteten Stromerzeugungstechniken.

5. Schlußbemerkung

Eine auf Nachhaltigkeit abzielende Entwicklung heißt im Kern, den kommenden Generationen keine Lebens- und Entwicklungschancen vorzuenthalten. Die Hauptsätze der Naturwissenschaften und das ökonomische Effizienzprinzip des sorgsamem Umgangs mit allen Ressourcen weisen uns den Weg zur Realisierung einer nachhaltigen Entwicklung. Dem durch Wissenszuwachs möglichen technischen Fortschritt, der einerseits zur Erweiterung der technisch-wirtschaftlich verfügbaren Rohstoff- und Energiebasis beiträgt und andererseits eine zunehmende Entkopplung von wirtschaftlicher Entwicklung, Ressourcenverbrauch und Umweltinanspruchnahme ermöglicht, kommt dabei eine Schlüsselfunktion zu. Die von den naturwissenschaftlichen Hauptsätzen ausgehende inhaltliche Konkretisierung des Leitbildes Nachhaltigkeit ermöglicht uns eine quantitativ untermauerte Orientierung und Einordnung der sich im Zeitablauf sicher verändernden Bedeutung einzelner Energiesysteme für die Realisierung einer nachhaltigen Entwicklung.

Die wesentlichen Folgerungen für die Realisierung einer dem Leitbild der nachhaltigen Entwicklung entsprechenden Energieversorgung lauten:

1. Die Nutzung begrenzter Energievorräte ist mit dem Leitbild der Nachhaltigkeit solange vereinbar, wie es gelingt, den nachfolgenden Generationen eine mindestens gleich große technisch-wirtschaftliche nutzbare Energiebasis verfügbar zu machen.
2. Die Inanspruchnahme von knappen Ressourcen einschließlich der Ressource Umwelt ist entscheidend für die Beurteilung der Nachhaltigkeit von Energiesystemen. Ein geeignetes Maß für die Nachhaltigkeit sind die Vollkosten.

3. Auf dem Weg zu einer nachhaltigen Entwicklung, insbesondere im Hinblick auf die Begrenzung des weltweiten Bevölkerungswachstums und die Schaffung und Erhaltung von Wohlstand, die Sicherung des Wirtschaftsstandortes und von Beschäftigung in Deutschland, kommt den Energiesystemen eine besondere Bedeutung zu, die die notwendige Arbeitsfähigkeit ökonomisch effizient, d. h. zu möglichst geringen Vollkosten bereitstellen können.

Das energiepolitische Dilemma in unserem Land besteht zu einem Gutteil darin, daß wesentliche naturwissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Grundtatbestände zur Fundierung einer auf Nachhaltigkeit ausgerichteten Energiepolitik nicht genutzt, sondern ignoriert werden.

Der berühmte britische 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“. Ich habe den Eindruck, 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.

Trotz der unverkennbaren Tendenz, daß in der energiepolitischen öffentlichen Diskussion Betroffenheit immer häufiger an die Stelle von Kompetenz und Urteilsfähigkeit tritt und daß die Bereitschaft, Sachfragen zu politisieren, statt sie sachverständig zu durchdringen, eher zu- als abnimmt, sollten wir in unseren Bemühungen nicht nachlassen, die wirklich tragfähigen Lösungen zur Bewältigung der vor uns liegenden Herausforderungen auf dem Weg zu einer nachhaltigen Entwicklung auch öffentlich zu vertreten.

Die Schaffung und Erhaltung humaner Lebensbedingungen und der Erhalt der natürlichen Lebensgrundlagen wird nur dann gelingen, wenn wir der Erkenntnis zum Durchbruch verhelfen, daß, wie es Carl Friedrich von Weizsäcker einmal ausgedrückt hat „alle Gefahren, die wir vor uns sehen, keine technischen Ausweglosigkeiten (sind), sondern eher umgekehrt, die Unfähigkeit unserer Kultur mit den Geschenken ihrer eigenen Erfindungskraft vernünftig umzugehen“.