

Günter Flach

## **Das Energieproblem der menschlichen Gesellschaft – Sicht eines Physikers auf Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft**

*Plenarsitzung*

### **1 Einleitung**

In der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts verstärkt sich die ursprünglich nur in Wissenschaftskreisen geführte Diskussion über die Endlichkeit der fossilen Energieträger.

Erinnert sei an die Erdölkrise 1972/73 und die Aussagen des *Club of Rom zu den Grenzen des Wachstums*.

Die Diskussion weitet sich aus, wissenschaftliche Räte verschiedenster Colour, internationale Organisationen und ihre Institute befassen sich mit Prognosen, politische Parteien und nicht zuletzt eine aufgeschreckte Öffentlichkeit nehmen sich der Thematik an.

Zum Ende des Jahrhunderts wird deutlich: Die vorwiegend genutzten fossilen Energieträger rufen durch ihre Verbrennung Veränderungen in der Zusammensetzung der Treibhausgase hervor und könnten daher einen wesentlichen Beitrag zu einem abrupten Klimawandel leisten.

Ein hocheffektives Energiesystem ist jedoch *auch* Basis der Stabilität und Weiterentwicklung der Menschheit und ihrer sozialen Strukturen.

Durch die enge Kopplung von Klima- und Energieproblem sowie dem Problem der nachhaltigen Sicherung einer menschenwürdigen Entwicklung in den Ländern der dritten Welt, steht die Menschheit zweifellos vor einer der größten Herausforderungen ihrer bisherigen Geschichte.

Dieser Beitrag ist ein Versuch, aus physikalischer Sicht die Situation zu analysieren.

## 2 Die physikalische Seite des Energieproblems

### 2.1 Energie und Prinzipien der Selbstorganisation

Wie wir heute wissen, ist die menschliche Gesellschaft – wie auch alle anderen natürlichen Systeme – ein Produkt der Evolutionsprozesse auf unserem Planeten. Ihre biologischen, sozialen, ökonomischen und kulturellen Komponenten unterliegen den Grundprinzipien der Selbstorganisation [1, 2].

Dies bedeutet, daß neben der Kernaussage

„Die fundamentalen Gesetze der Physik können niemals verletzt werden“, insbesondere die folgenden, die fundamentale physikalische Größe Energie betreffenden Aussagen von prinzipieller Bedeutung für das Energieproblem sind:

- Die Grundgröße Energie charakterisiert neben anderen den Zustand eines *jeden* physikalischen Systems.  
Mit der zweiten Grundgröße, der Masse, ist die Energie durch die *Einsteinsche Beziehung*  $E = m \cdot c^2$  verbunden. Die Maßeinheit der Energie ist das Joule (= 1 Ws – Wattsekunde). Leistung ist die in der Zeiteinheit aufgewendete Energie.<sup>1</sup>
- Energie kann nicht erzeugt und nicht vernichtet werden. In abgeschlossenen Systemen ist die Energie eine Erhaltungsgröße (*erster Hauptsatz*)<sup>2</sup>.
- Energie tritt in verschiedenen Formen auf (kinetische Energie, potentielle Energie, Elektroenergie, chemische Bindungsenergie, Wärme usw.), welche unter bestimmten Bedingungen ineinander umgewandelt werden können.
- Energieaustausch zwischen Systemen und Wandlung verschiedener Formen ineinander werden durch die Zustandsgröße *Entropie* geregelt. Diese kann niemals abnehmen (*zweiter Hauptsatz*), insbesondere kann Wärme nicht von einem kälteren zu einem wärmeren Körper von allein fließen.
- Der zweite Hauptsatz führt zu einer *Bewertung* der Energieformen im Hinblick auf ihre Arbeitsfähigkeit. Derjenige Anteil einer Energieform, der

---

1 In diesem Beitrag wird durchgängig die Einheit Wh, bzw. kWh, MWh ... für die Energie und W, kW, ... für die Leistung benutzt.

2 Energie kann daher nicht *verbraucht* werden. Im täglichen Sprachgebrauch wird dieser Begriff oft als Synonym für Energieeinsatz, bzw. -entwertung usw. benutzt.

verlustfrei in Arbeit gewandelt werden kann, wird als *Exergie*<sup>3</sup> bezeichnet.

Die Qualität einer Energieform (auch als ihr Wert bezeichnet) drückt sich im Anteil von Exergie aus, den sie enthält. Elektroenergie und kinetische Energie sind hochwertig (fast reine Exergie) und deshalb verlustfrei ineinander wandelbar.

Alle im Verlaufe der Evolution auf unserer Erde entstandenen natürlichen Systeme unterliegen einigen Grundgesetzen, die ihre Existenz fernab vom Gleichgewicht charakterisieren. Dazu gehören:

- Existenz fernab vom Gleichgewicht verlangt stetige Zufuhr von arbeitfähiger Energie (Exergie), welche im System entwertet wird und mit zusätzlichem Entropieexport verbunden ist.
- Systeme fernab vom Gleichgewicht sind relativ stabil bezüglich kleiner Störungen. Große Störungen können zum Zusammenbruch des Systems führen.

Die Entwicklung menschlicher Gesellschaften mit ihren biologischen und sozialen Komponenten erfolgte und erfolgt im Rahmen dieser fundamentalen physikalischen Gesetze und den sich daraus ergebenden Konsequenzen. Solche Systeme müssen hochwertige Energie importieren, um

- die Systemstruktur zu erhalten und zu erweitern,
- die Funktionalität des Systems zu sichern
- neue Strukturen zu schaffen.

Aus diesen Gesetzmäßigkeiten ergibt sich die existentielle Bedeutung von Energie und Entropie für Stabilität und Weiterentwicklung der menschlichen Gesellschaft.

Die Sicherung der Energieversorgung ist deshalb ein *Schlüsselproblem* für die Zukunft der Menschheit.

Die dafür benötigte Nutzenergie, also Bewegungsenergie, Wärme und Licht wird heute über Wandlungsketten aus natürlichen primären Energiequellen

---

3 genauer gesprochen mißt die Exergie eines Systems die maximal freisetzbare arbeitsfähige Energie beim Übergang des Systems ins thermodynamische Gleichgewicht mit seiner Umgebung.

gewonnen und im jeweiligen System entwertet.

Ein bedeutungsvoller Aspekt des Energieproblems der menschlichen Gesellschaft ist deshalb die optimale Gestaltung der Wandlungskette

$$\text{Primärenergie} \rightarrow \text{Endenergie} \rightarrow \text{Nutzenergie}$$

## 2.2 Physikalische Energiequellen im Planetensystem

In der gegenwärtigen Phase der kosmischen Evolution speisen sich die Energiequellen unseres *Planetensystems* aus der im System verteilten Materie, der dazu äquivalenten Energie sowie den zwischen den Konstituenten des Systems wirkenden Kräften, mit den von der jeweiligen Wechselwirkung bestimmten Eigenschaften.

Eine *erste Quelle* ergibt sich aus der Tatsache, daß die Masse der im Verlaufe der kosmischen Evolution entstandenen und auch heute entstehenden Elemente, genauer deren Kerne, kleiner ist als die Summe der Massen der sie bildenden Nukleonen. Dieser *Massendefekt* führt zu Energiefreisetzungen bei der Kernfusion, dem Aufbau schwererer Kerne aus leichteren wie Wasserstoff, Deuterium usw. Im Verbund mit der Gravitation dient die Fusion als Energiequelle unserer Sonne. Dieser Prozess ist neben anderen begleitet von der Emission eines entropiearmen Photonenstroms.

Eine *zweite Energiequelle* stellt die im Inneren der Planeten als kosmisches Substrat gespeicherte Wärme dar. Ihre Ursache ist die bei der Entstehung erdähnlicher Planeten in Wärme gewandelte kinetische Energie, welche als Restwärme z.B. noch heute im Inneren der Erde mit Temperaturen bis zu 6000° vorhanden ist. Radioaktive Zerfallsprozesse tragen zur Aufrechterhaltung dieser Temperaturen bei.

Eine *dritte Quelle* ist die Gezeitenenergie. Ursache ist die Wirkung der Gravitation zwischen Erde und Mond auf die Wassermassen der Erde.

## 2.3 Physikalische Energiequellen der Erde

Die Lage der Erde im Sonnensystem, ihr spezifischer Aufbau, Zusammensetzung und Anteile der chemischen Elemente, Verteilung von Wassermassen und Land usw. bestimmen die auf der Erde nutzbaren physikalischen Energiequellen:

1. Ausgehend von der Sonne fällt ein Photonenstrom ein, der bei seiner Ankunft am Rande der Erdatmosphäre die Leistung von

$$s = 1367 \text{ W/m}^2 \quad (s : \text{Solarkonstante})$$

trägt wovon ca. 30% direkt reflektiert werden (Albedo).

Der Leistungseintrag hat die Größe von etwa  $1.2 \cdot 10^5$  TW, was zu einem mittleren Eintrag von  $236 \text{ W/m}^2$  führt, da der Photonenstrom zwar kontinuierlich auf die Erde trifft, jedoch durch ihre Eigenrotation sowie durch die Neigung ihrer Rotationsachse zur Erdumlaufbahn zu einer zeitlich oszillierenden Energiequelle für einen fixen Punkt der Erdoberfläche wird. Die Erde strahlt die annähernd gleiche Leistung als Infrarotstrahlung wieder ab. Die dabei erzeugte Entropie ist ein Maß für die Entnahme von hochwertiger Energie aus diesem Photonenstrom, welche alle Prozesse der Evolution auf der Erde treibt. Dieser Prozess wird sehr treffend als Photonenmühle [1, S. 86] bezeichnet.

Die lokale Strahlungsleistung hängt von Breitengrad, Tageszeit, Jahreszeit ab und beträgt maximal ca.  $1000 \text{ W/m}^2$  und minimal  $0 \text{ W/m}^2$ . Der globaler Mittelwert an der Erdoberfläche liegt bei  $167 \text{ W/m}^2$ .

Aus der Spezifik der Photonenmühle ergeben sich folgende technisch nutzbare Primärenergiequellen:

- unmittelbare Einstrahlung auf Erdoberfläche
- Wasser-, Wind-, Meereswellenenergien, gespeist aus kinetischer und potentieller Energie der Wasser- und Luftmassen, die durch die Solarstrahlung in den Kreisläufen des Klimasystems generiert werden.
- durch Einstrahlung auf die Erdoberfläche über Photosynthese erzeugte Biomasse

Die Photosynthese hat im Verbund mit geophysikalischen Prozessen vor einigen 100 Millionen Jahren über lange Zeiträume Vorräte chemisch gespeicherter Energie, die fossilen Brennstoffe, geschaffen.

2. Die Kurve der Bindungsenergie pro Nukleon für die auf der Erde vorhandenen Elemente zeigt gegen Ende des Stabilitätsbereiches einen Abfall, der bei den schwersten natürlichen Elementen (z.B.  $\text{U}^{235}$ ) durch Neutroneneinfang zur Spaltung und damit zur Freisetzung eines Teils der im Massendefekt gespeicherten Energie führen kann. Die technische Nutzung dieser *Kernspaltung* ist daher eine weitere primäre Energiequelle auf der Erde.

3. Das riesige Potential der Erdwärme (immerhin ein Wärmereservoir von etwa  $3 \cdot 10^{18}$  GWh) ist durch seinen Anteil in der Erdkruste unter den Landflächen nutzbar, wobei allerdings nur die oberflächennahen Potentiale von Bedeutung sind.
4. Eine weitere Quelle ist die Gezeitenenergie. Ursache ist die Wirkung der Gravitation zwischen Erde und Mond auf die Wassermassen der Erde.

### 3 Mensch, menschliche Zivilisation – Evolution – Energie

Die Entwicklung der Menschheit, ihrer Zivilisationen und Gesellschaften ist auf das engste mit der Fähigkeit verknüpft, arbeitsfähige Energie für die Verwirklichung ihrer Ziele einzusetzen. Dies beginnt bei Versorgung des Individuums mit hochwertiger gespeicherter chemischer Energie (Biomasse und deren Veredlungsstufen), setzt sich fort im Einsatz externer Energieformen, die neben der eigenen Arbeitsfähigkeit zur Herstellung von Artefakten genutzt werden und mündet in heutigen hochindustrialisierten Gesellschaften in die Nutzung eines hocheffektiven Energiesystems, welches praktisch zu beliebigen Zeiten entropiearme Endenergie bereitstellt.

Im folgenden wird der Zusammenhang zwischen Energieverfügbarkeit und Entwicklungsniveau der menschlichen Gesellschaft stichwortartig erläutert.

#### 3.1 Energiebedarf des Menschen

Der Mensch muß ständig hochwertige Energie aufnehmen, um seinen systemischen Zustand zu erhalten, bzw. weiterzuentwickeln und um den dafür notwendigen Einfluß auf die Umwelt auszuüben.

<b>Metabolische Leistung</b>	
Mensch in Ruhe	85 W (davon 20 W Gehirnleistung)
Dauerleistung Mensch	120 W (bei mittlerer körperlicher Arbeit)
<b>Mechanische Leistung (körperliche Arbeit)</b>	
Mensch	100 W maximal
Pferd	600 W

Im oberen Teil der Tabelle sind die hierfür charakteristischen energetischen Größen als Leistung dargestellt [3]:

Dies beinhaltet insbesondere folgende Funktionen:

Den Grundumsatz zur Erhaltung der Struktur, die Wärmeproduktion zur Sicherung der Körpertemperatur (etwa 10% der metabolischen Leistung) sowie

Energie für Aktivitäten, Wachstum und Reproduktion.

Im unteren Teil der Tabelle ist die vom Menschen aufbringbare mechanische Leistung im Vergleich zum Pferd angegeben.

### 3.2 Epoche der Jäger und Sammler

In der Frühzeit menschlicher Gemeinschaften ist die menschliche Arbeit die einzige Energiequelle. Mit der vor etwa 500 000 bis 700 000 Jahren erkannten Möglichkeit zur Nutzung des Feuers wird dieses zur ersten Energiequelle neben der menschlichen Arbeit.

Zunächst diente das Feuer zum Schutz vor wilden Tieren und zur Erwärmung der unmittelbaren Daseinsumgebung, danach wird es zur Essenbereitung eingesetzt und schließlich auch in die Erzeugung von Artefakten einbezogen (Härten von Holz). Dies führte zum Ende der Epoche zu einer Verdopplung des Energieverbrauchs auf etwa 6 kWh pro Tag (250 W) [4]. Biomasse (Holz) ist die erste Primärenergiequelle für die Bereitstellung von Nutzenergie.

Zweifellos führte die Verdopplung des täglichen Energieverbrauchs zu einem Anstieg der Bevölkerungszahlen, da sich mit der Nutzung des Feuers auch die Überlebenschancen des Menschen erhöhten. Gleichzeitig wird die Ausbreitung des Menschen in kältere Regionen möglich. Wahrscheinlich lebten um 10 000 v.Chr. schon ca. 3 Millionen Menschen auf der Erde.

### 3.3 Agrarzeitalter

Nach dem Ende der letzten Eiszeit (um 10 000 v.Chr.) setzt eine neue Etappe in der Evolution der Menschheit ein:

Es beginnt der schrittweise Übergang von der Sammler- und Järgesellschaft zur seßhaften Landwirtschafts- und Viehhaltungsgesellschaft. Neben das Feuer treten im Verlaufe der Ausprägung dieser Gesellschaft als weitere Energiequellen:

- Die Arbeitsfähigkeit der domestizierten Tiere (Esel, Rinder, Pferde).
- Die Nutzung kinetischer Energie von Strömen, zunächst passiv, später durch Bau von Kanalsystemen, Deichen, Wasserleitungen usw.
- Die Nutzung von Windenergie für die Schifffahrt.
- Die Nutzung von Thermalquellen sowie Öl für Licht und Wärme.

In dieser Zeit entstehen die ersten Hochkulturen, deren Blüte eng mit der Nutzung der Energien strömenden Wassers und dem Einsatz einfacher Maschinen zum Heben von Wasser (Umsatz von Tierkraft in potentielle Energie) verbunden ist. Der Einsatz des Feuers wird ausgeweitet auf die Herstellung von Keramik und zum Schmelzen von Erzen – zunächst Kupfer, später Eisen. In den Zentren des römischen Imperiums kann der tägliche Energieverbrauch durchaus schon bei 10 kWh (400 W) gelegen haben.

### **3.4 Mittelalter Europa**

Schon im frühen Mittelalter wird zunehmend menschliche Arbeitskraft und Tiereinsatz durch Wasser- und Windenergienutzung mit Hilfe einfacher Maschinen substituiert.

Beeindruckend ist insbesondere die massenhafte Anwendung von Wasser- und Windmühlen in Europa. Bereits gegen Ende des 11. Jahrhunderts existierten in England etwa 5000 Wassermühlen [5, S. 128], die später nicht nur zum Mahlen von Getreide sondern auch zum Walken von Stoffen, zum Heben und Ableiten von Wasser im Bergbau, zur Erzeugung von Windströmen bei der Verhüttung von Erzen und zum Betreiben von Großhammern eingesetzt wurden. Dabei nutzt man schon recht komplizierte Maschinen, was zweifellos schon als Vorstufe für die technische Seite der später einsetzenden industriellen Revolution anzusehen ist.

Der Energieeinsatz erhöht sich zum Ende des Mittelalters in Europa auf etwa 24 kWh pro Tag (1000 W).

In den bisher beschriebenen Epochen beruhte die Deckung des steigenden Energieeinsatzes ausschließlich auf der Nutzung von Ressourcen der umgebenden Natur. Die Menschheit lebt bis zu diesem Zeitpunkt energetisch gesehen in den natürlichen Kreisläufen (erstes Solarzeitalter).

### **3.5 Industrielle Revolution**

Industrielle Revolution ist ein Sammelbegriff für alle technischen und gesellschaftlichen Veränderungen, die sich seit Mitte des 18. Jahrhunderts zunächst in Europa durchgesetzt haben.

Während vorallem die Wasserenergie durchaus den Bedarf an kinetischer Energie für Maschinenantrieb befriedigen konnte, ergaben sich für die Bereitstellung von Hochtemperaturwärme (Schmelzen und Bearbeiten von Metal-



len) beträchtliche Engpässe (Holzmangel). Dies förderte den Einsatz reichlich vorhandener Kohle in England. Mit dem massenhaften Einsatz der Dampfmaschine, die nun wiederum Hochtemperaturwärme in kinetische Energie wandeln konnte und später dem Elektromotor beginnt die Substitution der bisherigen menschlichen, tierischen, Wasser- und Windenergien durch Kohle und später durch weitere fossile Energieträger.

Im Laufe des 19. Jahrhunderts stieg mit der zunehmenden Industrialisierung und Mechanisierung der Arbeit der durchschnittliche Energieverbrauch weiter an. Im 20. Jahrhundert schließlich erreicht der Energieeinsatz in hochentwickelten Ländern seinen heutigen Wert etwa zu Beginn der 1980-iger Jahre. Seither stagniert er in den Industrienationen, während er vor allem in den Schwellenländern rasant steigt.

*Mit der Entwicklung der Industriegesellschaft tritt der Mensch energetisch gesehen aus den natürlichen Kreisläufen heraus und der anthropogene Einfluß auf den Kohlenstoffkreislauf beginnt.*

#### **4 Das Energiesystem der Gegenwart und seine Probleme**

Die bisherige Entwicklung belegt eine sehr enge Beziehung zwischen Lebensstandard und Höhe des (Nutz-) Endenergieeinsatzes. Tiefergehende Betrachtungen sind an dieser Stelle nicht möglich (siehe dazu [6]), es sei jedoch festgehalten, daß mit der Erschließung neuer Energiequellen und der Nutzung neuer Technologien jeweils eine Beschleunigung der wirtschaftlichen und sozialen Entwicklung einhergeht.

Der Einsatz fossiler Energieträger leitet in der Entwicklung menschlicher Gesellschaften eine neue Phase ein. Der energetische Spielraum für eine beispiellose Entwicklung öffnet sich. Dies insbesondere durch:

- Beschleunigung der wirtschaftlichen Entwicklung durch die Möglichkeit bedeutende Energiepotentiale für die industrielle Produktion zu erschließen (Mechanisierung).
- Nutzung der Vorteile einer raum- und zeitlichen Unabhängigkeit des Einsatzes der Endenergien.
- Aufbau einer Infrastruktur für Übertragung und Nutzung der Endenergien zu beliebigen Zugriffszeiten.

- Freisetzung beträchtlicher (kreativer) Potentiale für die Entwicklung von Wissenschaft, Technik und Kultur.

Die Lebensweise hat sich diesen Möglichkeiten angepaßt.

Neben der industrieller Produktion verlangen heute Infrastruktur und Dienstleistungen zunehmend hochwertige Endenergie (Elektroenergie). Dies wird besonders durch die fast durchgängige Automatisierung und Computerisierung aller Lebenssphären beeinflusst. Die ständige Verfügbarkeit von hochwertiger Endenergie ist Voraussetzung für Überlebensfähigkeit von Industrie- und Dienstleistungsgesellschaften.

Die Schwellenländer und viele Entwicklungsländer gehen einen ähnlichen Entwicklungsweg wie die Industrieländer!

#### 4.1 Charakteristika des heutigen Energiesystems

Die Bereitstellung von Nutzenergie in der notwendigen Größenordnung erfolgt heute über ein komplexes *Energiesystem*, das neben regionalen und nationalen Besonderheiten zunehmend durch internationale Verflechtungen charakterisiert ist (Elektroenergieverbundsysteme, Erdöl- und Erdgasleitungen usw.).

Sein Kernstück sind Wandlungsketten zur Bereitstellung der jeweiligen End- und Nutzenergieformen. Die dabei genutzten Wandlungsprozesse und -anlagen bestimmen durch ihre physikalischen und physikalisch-technischen Parameter die Effektivität des Systems. Im Mittelpunkt stehen die Wandlungswirkungsgrade, die die energetische Qualität des jeweiligen Wandlungsprozesses bestimmen. Der energetische Wirkungsgrad  $\eta$  mißt das Verhältnis der gewandelten zur eingesetzten Energie. Bei mehrstufigen Wandlungsprozessen (z.B. im Steinkohlekraftwerk mit den Stufen chemische Energie  $\rightarrow$  Hochtemperaturwärme  $\rightarrow$  kinetische Energie  $\rightarrow$  elektrische Energie) setzt sich der Wirkungsgrad multiplikativ aus den Wirkungsgraden der einzelnen Stufen zusammen. In der Regel sind insbesondere solche Wandlungsprozesse ungünstig, bei denen Energieformen mit hohem Exergieanteil in Wärme und diese wiederum in Energieformen mit hohem Exergiegehalt gewandelt werden (Kohlekraftwerk, Ottomotor).

Die energetische Effektivität der gesamten Wandlungskette – als Nutzungsgrad  $\xi$  bezeichnet – berücksichtigt darüber hinaus weitere Verluste in der Kette, hervorgerufen durch Eigenverbrauch der Anlagen, Transportverluste usw.; der Nutzungsgrad mißt die verwertbare Nutzenergie bezogen auf die

eingesetzte Primärenergie. Auch hier ist zu beachten, daß die Koeffizienten der Stufen in der gesamten Kette *multiplikativ* zu verknüpfen sind:

$$\xi_{ges} = \prod_i \xi_i.$$

Die totale Wandlungskette hat gegenwärtig folgende Gestalt :

	Primärenergie	→	Endenergie	→	Nutzenergie
BRD	100%		69%		32%
Welt	100%		73%		30%

Dieses Verhältnis ist dem relativ hohen Anteil von Wärme und Treibstoffen in der Endenergiestruktur gestundet, der heute im wesentlichen durch chemisch gebundene Energie gedeckt wird.

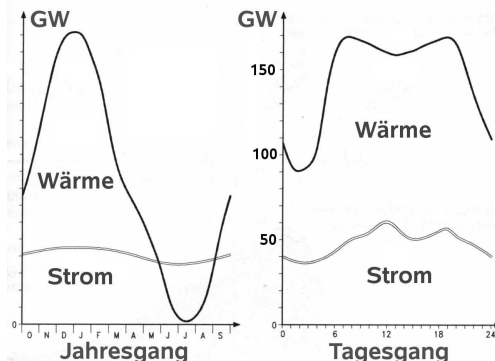
Die Wandlungsprozesse sind mit der Freisetzung von Abprodukten verknüpft, die natürliche Umweltsenken beanspruchen, teilweise überbeanspruchen, auf jeden Fall aber umweltschonend zu bewältigen sind.

*Wandlungsanlagen* verlangen den Einsatz von Materialien, welche aus anderen Rohstoffen herzustellen sind sowie Energie für ihre Errichtung.

*Das eigentliche Problem bei der Gestaltung des Energiesystems ist nicht die Bereitstellung von mehr Exergie sondern die Umwelt- und Ressourcenbelastung durch die jeweiligen Wandlungsketten.*

*Jede Primärenergieform beansprucht für Wandlungsprozesse Rohstoffressourcen und vorab Energieaufwand.*

Effektivität und Ökonomie des Energiesystems werden entscheidend von der Fähigkeit bestimmt, die jeweilige Endenergieform entsprechend dem Bedarf bereitzustellen. Im folgenden Bild [7, S. 400] sind Jahresgang- und Tagesganglinien (Dezember) für Strom und Wärme dargestellt:



Man erkennt zum Beispiel an der Elektroenergieganglinie, daß knapp die Hälfte des Leistungsangebots *immer* verfügbar sein muß.<sup>4</sup> Das Energiesystem muß diese Ganglinien kontinuierlich bedienen, notwendige Reserven für systeminterne Ausfälle vorhalten sowie auf externe Ereignisse stabilisierend reagieren.

## 4.2 Energiesystem und globale Probleme

### *Bevölkerungswachstum und Entwicklung:*

Im Verlaufe der Entwicklung der Menschheit von der Epoche der Jäger und Sammler zur heutigen Gesellschaft ist die Zahl der Menschen kontinuierlich gewachsen, einhergehend mit einem ständigen Wachstum des Energieverbrauchs pro Kopf der Bevölkerung. Die folgende Tabelle zeigt die Korrelation:

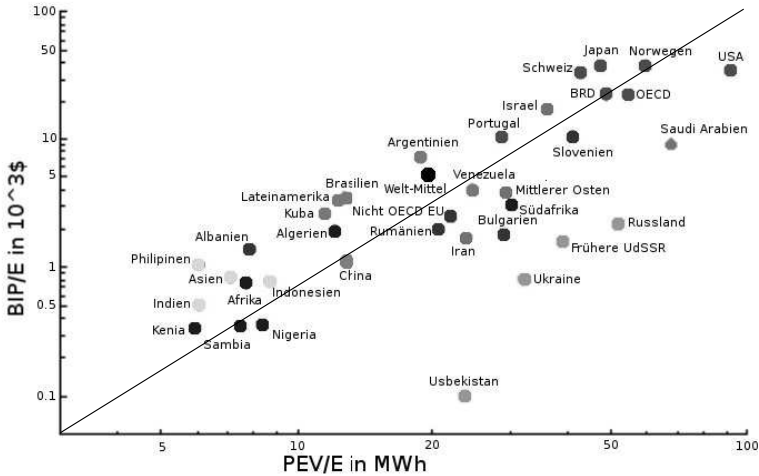
Epoche	Bevölkerung in Mio.	E-verbrauch pro Kopf
Jäger und Sammler	3	2.1 MWh/a ( 240 W)
Vorindustrielle Zeit	600	8.8 MWh/a (1000 W)
Industriezeitalter	6200	19.7 MWh/a (2250 W)
Um 2100	6000 – 10000	?

Dies sind jedoch nur die Mittelwerte. Entscheidend sind heute die gravierenden Unterschiede zwischen den Regionen, die in der folgenden Tabelle sichtbar werden [8].

Region	Einwohner	PE-Verbrauch	Leistung
OECD-Staaten	ca. $1.2 \cdot 10^9$	55 MWh/Einw.	6.3 kW
China	ca. $1.3 \cdot 10^9$	12 MWh/Einw.	1.4 kW
Asien	ca. $2.1 \cdot 10^9$	7 MWh/Einw.	0.8 kW
Afrika	ca. $0.8 \cdot 10^9$	7 MWh/Einw.	0.8 kW

Im folgenden Bild wird diese Aussage durch den Zusammenhang zwischen Bruttoinlandprodukt und Primärenergieverbrauch pro Einwohner für ausgewählte Länder erhärtet [8]:

<sup>4</sup> Dieser Anteil wird als *Grundlast* bezeichnet.



Charakteristisch sind die riesigen Unterschiede in Lebensniveau und Energieeinsatz. (Man beachte den doppeltlogarithmischen Maßstab!)

Etwa 1.8 Milliarden Menschen unserer Welt haben keinen Zugang zur Elektroenergie. Andererseits zeigt die Entwicklung der hochindustrialisierten Gesellschaften, daß Elektroenergie eine besondere Rolle spielt: Fast alle modernen Produktionstechnologien sind eng mit der Nutzung von Elektroenergie verknüpft, auch die Infrastruktur basiert auf der Nutzung von Elektroenergie. Dies widerspiegelt sich in der stetigen Zunahme des weltweiten Elektroenergieverbrauchs.

In der folgenden Tabelle [8] ist der Elektroenergieverbrauch nach Regionen (2003) dargestellt.

Region	Einwohner	E-verbrauch (kWh/Einw.)
OECD	$1154 \cdot 10^6$	8044
Mittlerer Osten	$177 \cdot 10^6$	2788
Frühere UdSSR	$286 \cdot 10^6$	4026
Nicht-OECD Europa	$55 \cdot 10^6$	2999
China	$1295 \cdot 10^6$	1401
Asien	$2018 \cdot 10^6$	585
Lateinamerika	$432 \cdot 10^6$	1601
Afrika	$851 \cdot 10^6$	518

*Das Problem Mensch – Umwelt:*

Mit zunehmender Veränderung der natürlichen Umwelt durch die globale Ausbreitung der Menschheit sowie durch die Entnahme natürlicher Ressourcen, deren technologische Verwertung und die Rückführung entwerteter Ressourcen in Form von Abprodukten in die natürliche Umgebung, ist eine Situation entstanden, die in eine irreversible Veränderung der natürlichen Umwelt mit fatalen Folgen für die gesamte Biosphäre münden kann.

Zweifellos spielt in diesem Zusammenhang die Bereitstellung von hochwertiger Energie für die menschliche Gesellschaft eine besondere Rolle. Die größten Probleme haben ihre Ursache in den Wandlungsketten des heutigen Energiesystems durch die wachsenden anthropogenen Einträge von  $\text{CO}_2$  in das Klimasystem.

Darüberhinaus entstehen in den Wandlungsketten weitere Abprodukte, die die natürliche Umwelt zusätzlich belasten, zum Teil überbelasten. Schließlich ist auf die zusätzliche Entropieproduktion zu verweisen, die heute etwa das  $10^{-4}$ -fache des natürlichen Entropieexports der Erde in den Weltraum ausmacht.

Ein weiteres Problem ergibt sich aus dem Rückgang der Waldflächen und die Zunahme urbanisierter und erodierter Flächen. Zusammen mit dem rasant wachsenden Anbau von Energiepflanzen kann dies das nicht gelöste Nahrungsproblem verschärfen.

## **5 Gedanken zur Zukunft**

Die hier nur stichwortartig geschilderten Probleme geben in der Tat Anlass zu ernsthaften Sorgen um die Zukunft der Menschheit in ihrer natürlichen Umgebung. Ohne die heute oft übliche Katastrophenbeschwörung zu strapazieren, muß doch mit aller Deutlichkeit der Ernst der Lage betont werden. Eine ausgewogene und realistische Darstellung zum Klimawandel findet man in einer zusammenfassenden Einschätzung von K.-H. Bernhardt [9].

Notwendig ist zweifellos eine wissenschaftlich fundierte, auf lange Zeiträume ausgerichtete Betrachtung von Bedingungen, die als Eckpunkte für die Gestaltung eines nachhaltigen Weges in die Zukunft dienen können. Wie dieser Weg in die Zukunft auch immer aussehen mag, sicher ist, daß die Gesetze der Physik nicht umgangen werden können. Diese müssen an den Anfang jeder Bewertung von Energiequellen gestellt werden, es ist nicht damit zu rechnen, daß in 100 oder auch 1000 Jahren eine andere Physik unsere Le-

bensvoraussetzungen bestimmt.

Im folgenden werden einige Gesichtspunkte erörtert, die beachtet werden sollten. Sie ergeben sich aus den im ersten Teil behandelten physikalischen Aspekten des Energieproblems und deren Wirkung in ökonomische und soziale Aspekte desselben.

## 5.1 Energie und zukünftige Gesellschaft

Der Endenergiebedarf wird zunächst weiter steigen. Ursachen sind im Bevölkerungswachstum und bei der Überwindung von Unterentwicklung sowie im Aufschluß der Schwellenländer zu den OECD-Staaten zu finden.

Umweltschutz einschließlich Rezyklierung von Rohstoffen sowie die Abwendung eventueller großer Schäden hervorgerufen durch Klimawandel werden das zukünftige Energiesystem belasten.

Man kann sich zwei Wege der weiteren Menschheitsentwicklung vorstellen:

*Variante 1: Übergang zur 2 kW-Gesellschaft (OECD heute 6.3 kW):*

Diese bedeutet eine drastische Senkung von Nutzenergieleistungen verbunden mit einer prinzipiellen Änderung des Lebensstils in den hochentwickelten Ländern wohl bei Verzicht auf Wirtschaftswachstum bei gleichzeitigem Anstieg der armen Länder dieser Welt an das 2 kW-Niveau.

Diese Variante, die seit einiger Zeit insbesondere in Schweizer Wissenschaftsinstitutionen diskutiert wird (siehe dazu [9]), wird hier nicht weiter verfolgt<sup>5</sup>.

*Variante 2: Annäherung der Welt an ein reduziertes Niveau OECD:*

Unter dieser Voraussetzung sollte ein zukünftiges Energiesystem die nachfolgenden Bedingungen erfüllen:

- Mehr (Nutz-) Endenergie bei weniger Umweltbelastung,
- speziell drastische Verminderung des anthropogenen CO<sub>2</sub>-Ausstoßes,
- Sicherung bedarfsgerechter Bereitstellung.

Gleichzeitig muß eine bedeutende Senkung der Energieintensität sowohl durch Optimierung der Wandlungsketten als auch der Nutzenergieleistungen erfolgen.

---

<sup>5</sup> Der Autor kann sich nicht vorstellen, daß eine solch drastische Reduktion ohne ernste soziale und politische Turbulenzen möglich ist.

Dabei ist allerdings zu beachten, daß physikalische Grenzen nicht durch Wunschvorstellungen eliminiert werden können.

## 5.2 Zukünftige Primärenergiequellen

*In der ferneren Zukunft (2100?) wird es aus heutiger Sicht nur vier CO<sub>2</sub>-freie Quellen geben:*

1. durch Solarstrahlung getriebene Quellen (unmittelbare Nutzung der Einstrahlung, Wasserkraft, Windkraft und Biomasse)
2. Kernenergie (hoffentlich mit Fusion)
3. Erdwärme
4. Gezeitenenergie

*Eine komplizierte Übergangsphase bis etwa 2050 - 2070 ist zu bewältigen:*

1. Der Einsatz fossiler Primärenergieträger – wenn CO<sub>2</sub>-Sequestrierung ökonomisch und ökologisch nicht erreichbar – muß deutlich zurückgehen, wird jedoch noch große Anteile aufweisen.
2. Wandlungstechnologien müssen durch Wirkungsgraderhöhung bis an die physikalisch-technischen möglichen Grenzen und durch Verringerung der energetischen und materialseitigen Vorleistungen effektiver gestaltet werden, die Minimierung von Belastungen natürlicher Senken ist notwendig.
3. Neue Wandlungstechnologien mit geringerer Belastung natürlicher Senken (speziell auch im Verkehr) müssen etabliert werden.
4. Die vertiefte Nutzung von Einsparpotentialen auf allen Ebenen der Wandlungs- und Transportprozesse muß ausgebaut werden.

Dies alles verlangt beträchtliche materielle, technische und ökonomische Ressourcen.

## 5.3 Physikalische Parameter CO<sub>2</sub>-freier Quellen und Wandlungstechnologien

Die Effektivität eines zukünftigen Energiesystems hängt entscheidend von den grundlegenden physikalischen Parametern der jeweiligen Primärenergiequelle und den großtechnisch möglichen Wandlungstechnologien ab.



Dazu zählen in erster Linie: Energiedichten, bzw. Leistungsdichten, Wirkungsgrade der Wandlungsanlagen, zeitliche Verfügbarkeit der Quelle.

Die folgende Tabelle zeigt physikalische Parameter von CO<sub>2</sub>-freien Primärenergiequellen:

Quelle	Energie/Leistungsdichte	Zugriff	Reichweite
unmittelbare Solar-einstrahlung	BRD 120 W/m <sup>2</sup> im Sonnengürtel 250 W/m <sup>2</sup>	diskont.	$t \approx \infty$
Wind	140 W/m <sup>2</sup>	diskont.	$t \approx \infty$
Wasser	30 kW/m <sup>2</sup>	kont.	$t \approx \infty$
Biomasse	5 kWh/kg	kont.	$t \approx \infty$
Kernspaltung	22 GWh/kg	kont.	> 10000 a
Erdwärme		kont.	> 10 <sup>6</sup> a

Die Reichweite der Spaltungskernenergie ist unter Berücksichtigung der Nutzung *aller* Uran- und Thoriumressourcen<sup>6</sup> bei Einsatz von Brütertechnologien angegeben, kommt die kommerzielle Nutzung der Kernfusion hinzu, so sind Reichweiten von > 10<sup>5</sup> a zu erwarten.

In der folgenden Tabelle sind die aus heutiger Sicht in großtechnisch einsetzbaren Technologien mit ihren wichtigsten Parametern dargestellt.

Quelle	Technologie	$\eta$ (Grenze)	Endenergie	Verfügbarkeit/a
direkte Solar-Strahlung	Photovoltaik	0.32	Elektroenergie	< 2000 h/a
	Aufkonzentr.	0.35	Elektroenergie	< 4000 h/a
	Solarwärme	0.80	Wärme	
Wind	Windmühle	0.59	Elektroenergie	≤ 4000 h/a
Wasser	Laufwasser-Fallwasser-Kraftwerk	0.85	Elektroenergie	7000 h/a
Biomasse	Biokraftwerk	0.40	Elektroenergie	7500 h/a
	Verbrennung	0.80	Wärme	8000 h/a
	Konversion	?	Treibstoffe	
Erdwärme	HDR-Verfahren	0.35	Elektroenergie	8000 h/a
	Wärmetauscher	0.90	Heizwärme	8000 h/a
Kernspaltung	KKW	0.50	Elektroenergie	8000 h/a

6 Hier sind die im *Red Book* [11] angegebenen Uranreserven mit Kosten < 130 US\$/kg Uran zugrundegelegt.

Die angegebenen Wirkungsgrade sind die physikalisch-technischen Grenzwerte von Wandlungsanlagen, die das Potential für großtechnische Einsätze versprechen. Sie sind heute bei weitem noch nicht erreicht.

Einer Einschätzung von K. Heinloth [7, S. 363] zufolge ist unter Berücksichtigung einer weiteren Annäherung an die theoretisch möglichen Wirkungs- und Nutzungsgrade um 2050 weltweit mit einem Beitrag von etwa 4 – 5 TW Primärenergieäquivalent zu rechnen. Dies wären etwa 30% gemessen am *heutigen* Primärenergieaufkommen. Dabei wird vorausgesetzt, daß erodierte Flächen aufwendig für den Anbau von Energiepflanzen erschlossen werden.

In den bisherigen Überlegungen sind die Aufwendungen an Material und Energie für die Errichtung der Wandlungsanlagen, die Versorgung mit Primärenergieträgern, den Transport der gewandelten Energieformen und schließlich die Entsorgung der Anlage nicht berücksichtigt. Die folgende Tabelle [12] zeigt dazu einige Daten<sup>7</sup>:

Anlage	Eisen kg/GWh	Kupfer kg/GWh	Bauxit kg/GWh	KEA kWh <sub>p</sub> /kWh <sub>el</sub>
Steinkohle-KW	1 700	8	30	0.27
Braunkohle-KW	2 134	8	19	0.16
Erdgas-GuD-KW	1 239	1	2	0.18
Druckwasserreaktor	457	6	27	0.08
Photovoltaik (5 kW, poly)	4 969	281	2 189	0.61
Windenergie 1.5 MW	4 471	75	51	0.08
Laufwasser 3.1 MW	2 057	5	7	0.04

#### 5.4 Bewertungen aus physikalischer Sicht

Berücksichtigt man die in Abschnitt 4.1 beschriebenen Charakteristika des heutigen Energiesystems, so folgt aus den eben dargelegten physikalischen Sachverhalten, daß ein Umbau des Systems auf CO<sub>2</sub>-freie Primärenergiequellen eine Jahrhundertaufgabe ist, die nur mit beträchtlichen wissenschaftlich-technischen, materiellen und ökonomischen Ressourcen zu bewältigen ist.

Das größte Zukunftspotential besitzt neben der Kernenergie zweifelsfrei die *direkte Umwandlung der einfallenden Solarstrahlung* in Elektroenergie und Hochtemperaturwärme, wobei der Sonnengürtel die besten Voraussetzungen aufweist.

Jedoch ist auf zwei Aspekte hinzuweisen:

<sup>7</sup> KEA bedeutet *kumulierter Energieaufwand* und ist das Inverse des Erntefaktors.

1. Die Leistungsdichte der Solarstrahlung ist äußerst gering. Ihre Wandlung in Elektroenergie bzw. Hochtemperaturwärme verlangt daher große Einfangflächen, die mit hochstrukturierten Materialien bestückt werden müssen. Dies bedeutet beträchtliche energetische Vorableistungen und hohen Materialeinsatz.
2. Auch im Sonnengürtel der Erde sind Zwischenspeicher für Hochtemperaturwärme und/oder Elektroenergie notwendig. Dies führt wegen der Multiplikativität der Wirkungsgrade zu einer Reduktion der Gesamtnutzungsgrade.
3. Das diskontinuierliche Angebot von direkter Solarstrahlung und auch der Windleistung in nördlichen Breiten verlangen bei massenhaftem Einsatz im Energiesystem zusätzliche Anlagen zur Langzeitspeicherung in angebotsarmen Zeiten sowie Vorhaltesysteme (schnell hochfahrbare Elektroenergieerzeuger). Damit verschlechtern sich die energetischen Wirkungsgrade im System, es wachsen die energetischen Vorabaufwendungen.

*Solarthermische Anlagen* besitzen wegen der erreichbaren hohen Wandlungswirkungsgrade ein hohes Entwicklungspotential. Wichtig ist in nördlichen Breiten wegen der geringeren Einstrahlung im Winter der Einsatz von effektiven Langzeit-Wärmespeichern und der Ausbau der Wärmedämmung.

*Wasserkraft* weist eine deutlich höhere Energiedichte auf und ist fast ständig verfügbar. Energetische und ökonomische Effektivitäten von Wasserkraftwerken sind hoch. Prinzipielle Begrenzungen ergeben sich aus den Niederschlagsmengen und den geographischen Bedingungen. Eine Verdopplung des heutigen Nutzungspotentials erscheint möglich. Damit könnte man maximal 20% des Elektroenergiebedarfs zukünftig decken.

Meereswellenenergie und Gezeitenströme können nur einen marginalen Beitrag zur Elektroenergieerzeugung leisten (weitflächige Anlagen, hohe Kosten).

*Biomasse* besitzt eine deutlich höhere Energiedichte und ist kontinuierlich abgreifbar; jedoch ist selbst mit sogenannten Energiepflanzen nicht mehr Energieinhalt als ca.  $20 \text{ kWh/a}\cdot\text{m}^2$  produzierbar. Die energetische Nutzung von Biomasse steht daher in Konkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion. Das Potential ist begrenzt, um 2050 werden die günstigen Nutzpotentiale wohl ausgeschöpft sein.

Müllverbrennung und Produktion von Biogas aus organischen Abfällen sind

deshalb von Interesse, weil diese Stoffe entsorgt werden müssen. Eine Koppelung mit Energiebereitstellung ist daher apriori wünschenswert. Die erschließbaren Potentiale liegen im Bereich von ca. 4% des weltweiten Primärenergieaufkommens.

*Geothermie (Erdwärme)* kann in Abhängigkeit von den geologischen Bedingungen sowohl zur Heizwärmebereitstellung als auch zur Elektroenergieerzeugung genutzt werden. Auf Grund der realen Bedingungen dominiert heute die Wärmeerzeugung für Heizzwecke. Auch in den nächsten Jahrzehnten wird der Anteil an der Primärenergiebereitstellung wohl im Bereich von 1% liegen.

*Kernenergie* ist eine CO<sub>2</sub>-freie Energiequelle mit großem energetischen Potential. Dies insbesondere wegen ihrer enormen Energiedichte, deshalb geringe Vorleistungen an Material, Energie, wenig Platzbedarf bei ständiger Verfügbarkeit der erzeugten Elektroenergie.

Die heutige Situation bei der Nutzung der Kernenergie ist geprägt durch eine mehr oder weniger intensive Debatte über Sicherheitsrisiken, Wirkung radioaktiver Strahlung, Endlagerung radioaktiver Abfälle usw.

Gegenwärtig spitzt sich diese Debatte in einigen hochentwickelten Ländern wieder zu, was im Zusammenhang mit der Suche nach Wegen in die CO<sub>2</sub>-freie Energetik steht.

Leider ist diese Debatte auch in Kreisen der Wissenschaft nicht immer frei von emotional überdeckten Argumentationen, was natürlich der Sache selbst nicht besonders dienlich ist.

Zum heutigen Entwicklungsstand der Kernenergie und den Tendenzen ihrer Entwicklung haben wir uns im Rahmen unseres Arbeitskreises SICHERE VERSORGUNG DER MENSCHHEIT MIT ENERGIE UND ROHSTOFFEN geäußert. [13, S. 85ff]

Aus Sicht des heutigen Entwicklungsniveaus der Kernenergie insbesondere der sogenannten Reaktoren der Generation III und der Prototypanlagen Generation IV einschließlich entsprechender Ver- und Entsorgungsprozesse zeigt sich, daß die Wirkung moderner Kernenergieanlagen auf die Umwelt minimal im Vergleich mit anderen Elektroenergieerzeugungsanlagen ist.

Die heutige *Endenergiestruktur*:

*Elektroenergie 20%, Treibstoffe 23%, Prozesswärme 30%,  
Niedertemperaturwärme 27%*

wird sich wohl in ihren Grundzügen zunächst wenig ändern.

Die zukünftigen CO<sub>2</sub>-freien Quellen erzeugen aber überwiegend Elektroenergie und Wärme, daher ergibt sich ein prinzipielles Problem:

Die Substitution von Treibstoffen aus Erdöl durch neue Endenergien zur Bereitstellung kinetischer Energie für Transport.

Folgende Varianten erscheinen aus heutiger Sicht physikalisch-technisch möglich:

- Wandlung von Biomasse in flüssige und gasförmige Treibstoffe. Nach bisherigen Erkenntnissen ist dies eine Lösung, die unter enormen Aufwand (Rekultivierung von etwa 2 Mio. km<sup>2</sup> erodierter Fläche) und in Konkurrenz zur Elektroenergie- und Wärmeerzeugung aus Biomasse einen Teil der benötigten Treibstoffe liefern kann, jedoch das Problem generell nicht löst.
- Einsatz von Wasserstoff aus Hochtemperaturprozessen (Hochtemperaturreaktor, Konzentration von Solarstrahlung im Sonnengürtel) direkt oder in Brennstoffzellen.
- Übergang zu Hybridantrieben, später zu reinem Elektroantrieb.

Die letzte Variante ist aus Sicht der Nutzungsgade wohl die effektivste. Ihre Realisierung verlangt jedoch die Weiterentwicklung von Hochleistungsbatterien, und nicht zuletzt einen aufwendigen Umbau industrieller Kapazitäten (Automobilindustrie).

## 6 Schlußbemerkungen

Die physikalischen Gesetze liefern, wie eingangs dargestellt, nur den *Rahmen, der die Realität eingrenzt*.

Jedoch zeigt diese Art der Betrachtung auch den *Spielraum*, der für eine energetisch gesicherte Entwicklung einer zunächst weiter wachsenden Menschheit vorhanden ist. Dieser Spielraum bewegt sich im Bereich:

*der solarstrahlungsgetriebenen Quellen und der Kernenergie!*

In diesem Rahmen kann sich die zukünftige Energetik der Menschheit bewegen.

Die heute oft euphorisch geforderte Einschränkung auf solarstrahlungsgetriebene Quellen heißt Rückkehr in die natürlichen Kreisläufe (zweites Solarzeitalter), allerdings mit einer Entnahme von etwa 20 – 25 TW, also 20 – 25-mal soviel wie zu Beginn des Industriezeitalters. Dies ist zwar nur der 10<sup>-4</sup> Teil

der eingestrahnten Solarenergie, eine großtechnische Entnahme würde jedoch auf bestimmte Gebiete der Erdoberfläche konzentriert sein – etwa auf Wüstengebiete im Sonnengürtel, auf Küstenregionen und auf landwirtschaftlich nutzbare Flächen. Wir wissen heute, daß kleine Änderungen von Parametern in hochkomplexen Systemen bedeutende Auswirkungen auf ihr Verhalten bedingen können. Wer sagt uns, daß energetische Eingriffe der genannten Größe in die natürlichen Kreisläufe harmlos sind?

Hinzu kommen hohe Material- und Energieaufwendungen sowie die Beherrschung der diskontinuierlichen Verfügbarkeit der Endenergien, was im Endeffekt durch eine notwendige Einschaltung von Energiespeichern wesentlichen Einfluß auf die physikalischen Wirkungsgrade nehmen wird.

Dies bedeutet natürlich überhaupt nicht, beträchtliche Anteile zukünftiger Endenergien nicht aus solarstrahlungsgetriebenen Quellen zu beziehen. Nur sollte dies unter Beachtung der physikalisch-technischen Potenzen, sowie der sozialen, geographischen und ökonomischen Bedingungen erfolgen.

Einseitige Beschränkungen auf solarstrahlungsgetriebene Quellen sind angesichts der Unwägbarkeiten zukünftiger Entwicklungen äußerst bedenklich. Der Autor hält deshalb eine kategorische Absage an die Kernenergie auch noch einschließlich möglicher Nutzung der Kernfusion für kontraproduktiv, zumal in der öffentlichen Diskussion uralte, längst durch die wissenschaftlich-technische Praxis überholte Argumente schlagwortartig strapaziert werden. Interessant wäre sicherlich der Versuch, dieses Phänomen in komplexer, disziplinübergreifender Art zu analysieren.

Wie die zukünftige Energetik der Menschheit aussehen wird, können wir nicht vorhersagen, welche Grenzen die Physik zumindest in Zeiträumen unseres irdischen Daseins zieht, sehr wohl.

## 7 Literatur

- [1] W. EBELING / R. FEISTEL, Chaos und Kosmos, *Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg Berlin Oxford, 1994*
- [2] K. MAINZER, Thinking in Complexity, The Complex Dynamics of Matter, Mind, and Mankind. (3rd enlarged edition), *Springer, Berlin Heidelberg New York Barcelona Budapest Hongkong London Milan Paris Santa Clara Singapore Tokyo, 1997*
- [3] L. NIEMANN in  
[http://www.buerger-fuer-technik.de/body\\_energie.html](http://www.buerger-fuer-technik.de/body_energie.html)
- [4] E. TELLER, Energie für ein neues Jahrtausend, *Ullstein Verlag, 1981*
- [5] K. SIMONY, Kulturgeschichte der Physik, *Urania-Verlag, Leipzig, Jena, Berlin, 1990*
- [6] F. REUSSWIG, K. GERLINGER, O. EDENHOFER Lebensstile und globaler Energieverbrauch – Analyse und Strategieansätze zu einer nachhaltigen Energiestruktur, in Externe Expertise für das WBGU-Hauptgutachten 2003 Welt im Wandel: Energiewende zur Nachhaltigkeit, *Berlin, Heidelberg 2003*
- [7] K. HEINLOTH, Die Energiefrage, 2. Auflage, *Vieweg, 2003*
- [8] INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, Keyworld Energy Statistics, *2005*
- [9] K.-H. BERNHARDT, Die Klimazukunft Europas, *Beitrag zur XV Europawissenschaftlichen Konferenz*
- [10] SPRENG, D. UND SEMADENI, M., Energie, Umwelt und die 2000 Watt Gesellschaft, Grundlage zu einem Beitrag an den Schlussbericht Schwerpunktsprogramm Umwelt (SPPU) des Schweizerischen National Fonds (SNF). *CEPE Working Paper No. 11, Zürich, Dezember 2001*
- [11] URAN 2005, Ressourcen, Gewinnung und Bedarf, *atw, 51. Jg Heft 7 2006*
- [12] A. VOSS, IER UNI STUTTGART Vortrag Regenerative Energien – Königsweg zu einer nachhaltigen Energieversorgung?, *VDI-Forum, Stuttgart, 31. Januar 2007*
- [13] G. FLACH, in Sichere Versorgung der Menschheit mit Energie und Rohstoffen, *Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät, Bd 82, 2005*