

Günter Flach

## Physikalische Grundlagen des Energieproblems

### 1. Einleitung

Zu Beginn der zweiten Hälfte des 20. Jahrhundert wird deutlich, dass fossile Primärenergieträger und andere Rohstoffe endlich sind; die Grenzen der Belastbarkeit unserer natürlichen Umwelt werden als prinzipielles Problem erkannt (Club of Rome, erste Ölkrise ...). Zum Ende des 20. Jahrhunderts bahnt sich eine Veränderung des Klimasystems an, deren Ursache zumindest partiell in wachsenden anthropogenen CO<sub>2</sub>-Emissionen zu suchen ist. Damit steht die Menschheit vor drei globalen miteinander verwobenen Problemen:

- Klimaänderung,
- menschenwürdige Entwicklung bei zunächst wachsender Bevölkerung und
- sichere Versorgung mit Energie.

Die heutige Energetik ist Quelle anthropogener Einflüsse auf das Klimasystem aber auch gleichzeitig Basis jedweder Stabilität und Weiterentwicklung der Menschheit und ihrer sozialen Strukturen.

Am Anfang der Analyse des globalen Energieproblems muss die Rolle der Energie als fundamentale physikalische Grösse stehen. Menschliche Gesellschaften mit ihren biologischen, sozialen und kulturellen Komponenten unterliegen den Prinzipien der Evolution und Selbstorganisation. In unserem Zusammenhang sind insbesondere die folgenden von besonderer Bedeutung:

1. Die fundamentalen Gesetze der Physik können niemals verletzt werden, sie sind auch für komplexe Systeme uneingeschränkt gültig.
2. Existenz fernab vom Gleichgewicht verlangt stetige Zufuhr arbeitsfähiger Energie und realisiert sich über zusätzlichen Entropieexport.
3. Mit steigender Komplexität wächst die Menge der gesetzmäßigen Einschränkungen.
4. Komplexe Systeme und die Gesetzmäßigkeiten, denen sie unterliegen, sind im Evolutionsprozeß entstanden. Ihre Historizität ist ihr zentrales Merkmal.

Die physikalischen Gesetze, die den Energieaustausch zwischen Systemen beschreiben, liefern den Rahmen für die Gestaltung heutiger und zukünftiger Energiesysteme menschlicher Gesellschaften.

## 2. Wichtige Gesetze des Energieaustausches

*Energie* ist eine fundamentale physikalische Größe, die neben anderen *jedes* physikalischen System (jeden Körper) charakterisiert.

- Sie kann einem System von außen zugeführt oder entnommen werden,
- ist nach Einstein mit der Masse verbunden:  $E = mc^2$

Die Maßeinheit der Energie ist das Joule<sup>1</sup>:  $J = \text{Joule} = \text{N} \cdot \text{m} = \frac{\text{kg m}^2}{\text{s}^2}$

1 Joule =  $2.7778 \cdot 10^{-7}$  kWh (= 1 Ws)

*Leistung* ist die in der Zeiteinheit aufgewendete Energie mit der Maßeinheit: J/s = W (Watt).

Die folgenden Hauptsätze<sup>2</sup> bestimmen das Verhalten aller Systeme beim Austausch von Energie.

*Erster Hauptsatz:* Energie kann weder erzeugt noch vernichtet werden.

Dies bedeutet unter anderem:

- Energie ist in abgeschlossenen Systemen eine Erhaltungsgröße,
- Energie kann nur zwischen Systemen ausgetauscht werden.

Energie tritt in unterschiedlichen Formen auf: Bewegungsenergie (kinetische Energie), potentielle Energie, Elektroenergie, chemische Bindungsenergie, Wärme usw. Sie kann von einer Form in eine andere gewandelt werden. *Der erste Hauptsatz spielt bei Energiewandlungen die Rolle einer Bilanzbeziehung.*

Die zweite Grundgröße aller Systeme ist die *Entropie*. Sie wurde ursprünglich von Clausius zur Bewertung der Umwandlung von Wärme in arbeitsfähige Energie eingeführt. Heute wissen wir, dass sie auch von fundamentaler Bedeutung für Prozesse fernab vom Gleichgewicht ist. Vereinfacht gesprochen misst sie den *Wert* der Energie eines Körpers (Systems) in Bezug auf ihre Arbeitsfähigkeit. Der sogenannte zweite Hauptsatz ist ein fundamentaler Satz, der alle natürlich ablaufenden Prozesse regelt und der verlangt, dass bei der (anthropogenen) Erzeugung von höheren Ordnungszuständen immer arbeitsfähige Energie zugeführt werden muss wobei gleichzeitig zusätzlich Entropie über die Systemgrenzen exportiert wird. In seiner ursprünglichen Formulierung lautet der :

*Zweite Hauptsatz:* Entropie kann niemals vernichtet werden. Speziell verboten: Das Strömen von Wärme von einem kälteren zu einem wärmeren Körper von allein.

Der zweite Hauptsatz bewertet:

- Energie- und Entropieaustausch zwischen offenem System und Umgebung,
- Wandlung von Energieformen ineinander in Bezug auf ihre Arbeitsfähigkeit.

1 Im folgenden werden durchgängig die Maßeinheiten kWh, MWh, GWh ... benutzt, um eine bessere Vergleichbarkeit zu garantieren.

2 ursprünglich im Zusammenhang mit der sich entwickelnden Thermodynamik formuliert.

Bewegungsenergie (kinetische Energie), Elektroenergie und Hochtemperaturwärme sind entropiearm, Umgebungswärme ist entropiereich (wertlos).

Die qualitative Bewertung technologischer Systeme der Energie- und Stoffwandlung – die sich letztendlich im materiellen Aufwand für die erzeugte Energiedienstleistung niederschlägt – erfordert die Quantifizierung von Umwandelbarkeit und der Verluste durch Irreversibilität mit Hilfe entropischer Betrachtungen. Dies sollte für technische Systeme durch die Einbeziehung der Größe Exergie erfolgen. Die *Exergie* eines Systems ist der Anteil seiner Energie, der beim Übergang in das thermodynamische Gleichgewicht mit seiner Umgebung vollständig in arbeitsfähige Energie gewandelt werden kann.

Neben dem thermodynamischen Wirkungsgrad

$$\eta^E = \frac{\text{gewandelte Energie}}{\text{zugeführte Energie}}$$

gibt der exergetische Wirkungsgrad

$$\eta^X = \frac{\text{entnommene Exergie}}{\text{zugeführte Exergie}}$$

Auskunft über Verluste, die durch die Irreversibilität der benutzten Wandlungsprozesse bedingt sind. Wirkungsgrade sind *multiplikative Größen* ( $\eta_{ges} = \prod_i \eta_i$ ), dies kann bei mehrstufigen Wandlungsprozessen leicht zu sehr kleinen Gesamtwirkungsgraden führen.

### 3. Natürliche Energiequellen auf der Erde

In der gegenwärtigen Phase der kosmischen Evolution ergeben sich die natürlichen Energiequellen in unserem Planetensystem aus der Materieverteilung und der darin enthaltenen Energie sowie dem kosmischen Hintergrund. Die physikalischen Eigenschaften dieser Quellen sind wesentlich bestimmt durch die vier fundamentalen Wechselwirkungen (starke, elektromagnetische, schwache Wechselwirkung und Gravitation). Die für die Erde relevanten Quellen ergeben sich aus

1. dem *Massendefekt der Kerne (starke Wechselwirkung)*, welcher in der Sonne durch Fusion von H (kosmisches Substrat), D, T ... zum Aufbau schwererer Kerne führt und in Kooperation mit der Gravitation die Stabilität Sonne über Milliarden von Jahren sichert. Diese Prozesse werden begleitet von der Emission entropiearmer Strahlung – der *Solarstrahlung (elektromagnetische Wechselwirkung)* – welche als energetischer Antrieb für die Evolution auf der Erde dient.
2. der *planetaren Wärme in Gesteinsplaneten*, die in der Frühzeit durch die kinetische Energie von aufprallenden Materieclustern zur Aufheizung führte. Durch den radioaktiven Zerfall schwerer Elemente nimmt dieser riesige Energieinhalt äußerst langsam ab.
3. der *Gezeitenenergie*, hervorgerufen durch die Wirkung der Gravitationskräfte zwischen Erde und Mond auf Wassermassen der Erde.

Bedingt durch diese Quellen lassen sich die der Menschheit (technologisch) erschließbaren sogenannten Primärenergiequellen – wie im folgenden Bild dargestellt – charakterisieren:

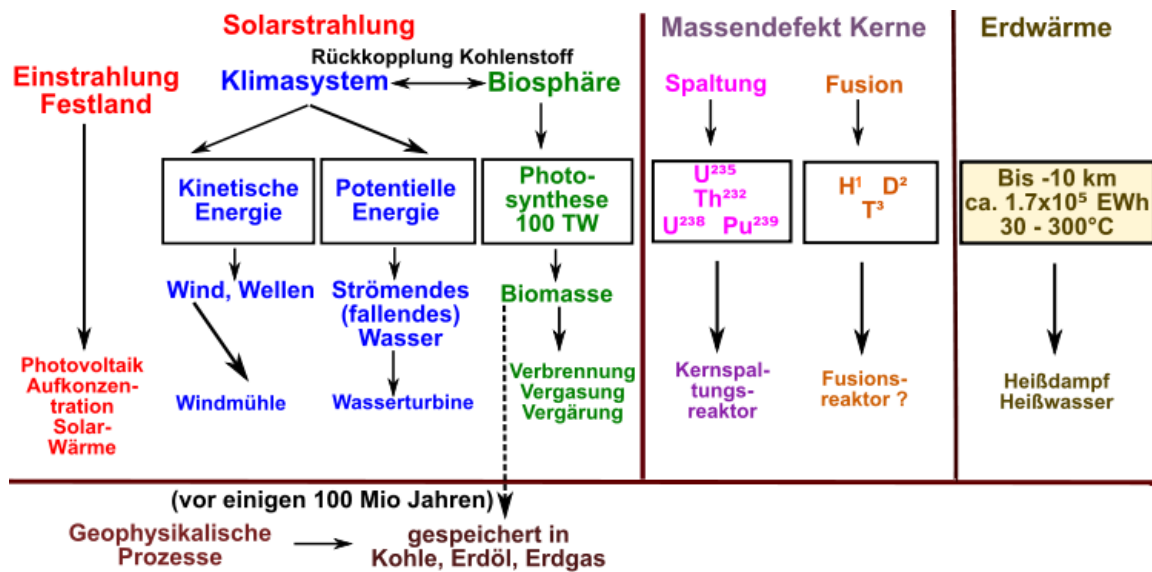


Abbildung 1: Primärenergiequellen auf der Erde

#### 4. Mensch, menschliche Zivilisation – Evolution – Energie

Neben anderen Unterschieden von natürlichen Populationen kann der Mensch Arbeit (im körperlichen Sinne) mit geistigen Fähigkeiten verknüpfen, um gezielt zweckbestimmte, in der Natur nicht vorkommende Strukturen zu schaffen. Der Natur entnommene Stoffe werden mittels Zufuhr hochwertiger Energie und Wissen (Kreativität, Erfahrung) zu Artefakten strukturiert. *Hochwertige bzw. arbeitsfähige* Energie in entsprechender Quantität ist deshalb die entscheidende physikalische Größe, die die Evolution menschlicher Gesellschaften determiniert. Damit ist diese eng mit dem zweiten Hauptsatz korreliert. *Zitat Klaus Fuchs* [1]: „Unter Zahlung des erforderlichen Preises an die Entropie in der Währung der Arbeit, hat der Mensch Artefakten geschaffen, deren Ordnungsstruktur durch seine Absichten bestimmt wird. . . “ Einzig Wissen und Kreativität unterliegen nicht der Entwertung durch die Entropie!

Die hier genannte Korrelation widerspiegelt sich in der Entwicklung des Energiebedarfes der Menschheit in den bisherigen Epochen ihrer Evolution. Bei etwa gleichbleibendem biologischen Energiebedarf des Menschen (leistungsmäßig ca. 120 W) wächst der Gesamtenergiebedarf ständig. Die Tabelle 1 zeigt dies für die bedeutenden Epochen der Evolution unter Angabe globaler Mittelwerte:

Epoche	Bevölkerung (Mio.)	externe Ressourcen	Bedarf
Jäger/Sammler	3	Holz (Feuer)	240 W
Agrarzeitalter	1000	Biomasse, Tierkraft, Wasser, Wind	1000 W
heute	6200	überwiegend fossile	2250 W
2100	6000 – 10000	CO <sub>2</sub> -freie Quellen	?

Tabelle 1: Energiebedarf in den Menschheitsepochen

Man erkennt, dass der Mensch vor der industriellen Revolution (fast) ausschließlich *solarstrahlungsgetriebene Energiequellen* nutzt. Bis dahin lebte die Menschheit energetisch gesehen in einem *Solarzeitalter*. Dieses wurde fast vollständig abgelöst durch die Nutzung von gespeicherte Energie, die die Photonenmühle vor Hunderten Millionen Jahren schuf. Dieser Wechsel führte im Verbund mit der Entwicklung von Wissenschaft und Technik zu einem sprunghaftigen Anstieg der Produktivität. Die bisherige Entwicklung belegt die enge Beziehung zwischen Lebensstil, Lebensweise und (Nutz-) Endenergieeinsatz. Die grosse Energiedichte fossiler Energieträger und ihre gespeicherte Form begünstigte:

- die wirtschaftliche Entwicklung durch Mechanisierung,
- den Aufbau einer Infrastruktur für Übertragung und Nutzung der Endenergien zu beliebigen Zugriffszeiten,
- die Freisetzung kreativer Potentiale für Wissenschaft, Technik und Kultur.

Die Lebensweise in den Industriegesellschaften passte sich diesen Möglichkeiten an. Gleichzeitig aber begann ein stetig wachsender anthropogener Eingriff in den Kohlenstoffkreislauf.

Die heutige menschliche Gesellschaft ist geprägt durch beträchtliche Unterschiede im Lebensniveau, das, wie die Abbildung 2 zeigt, eng korreliert ist mit der jeweils zur Verfügung stehenden Primärenergie.[2]

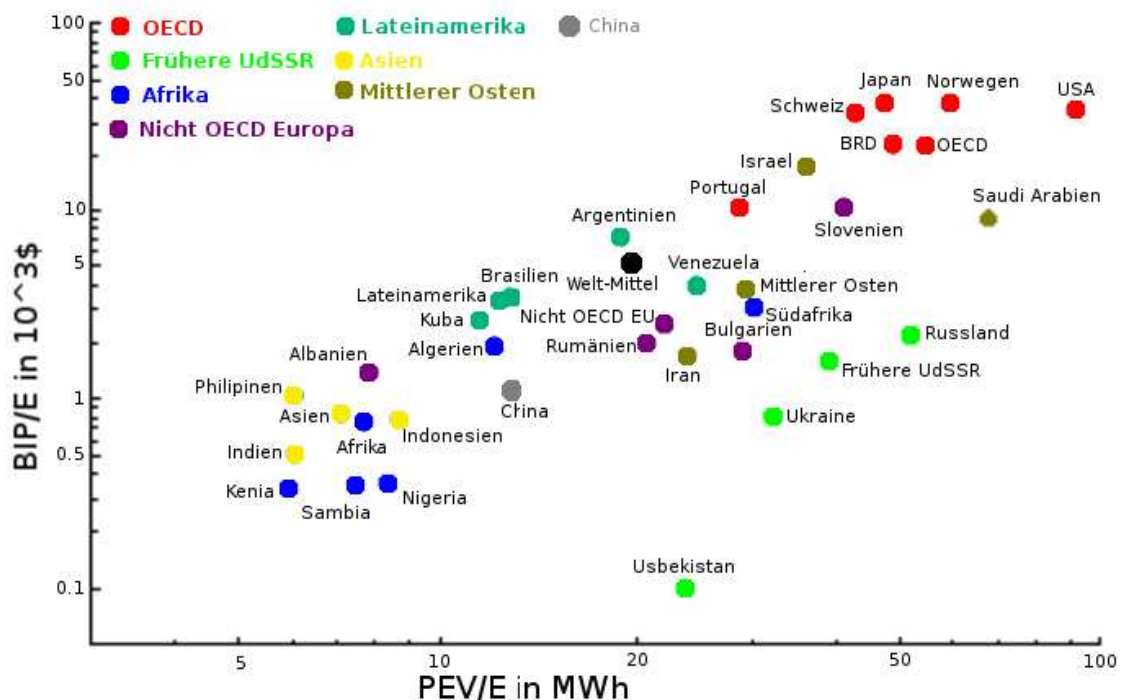


Abbildung 2: Korrelation von Primärenergiebedarf und Bruttoinlandprodukt

Bedingt durch das Bevölkerungswachstum und die Notwendigkeit, Unterentwicklung, Hunger und Krankheiten im grösseren Teil der Menschheit rasch zu überwinden, wächst der Druck auf die Bereitstellung hochwertiger Energie. In den entwickelten Ländern verlangen neben der industriellen Produktion (Automatisierung) Infrastruktur und Dienstleistungen zunehmend hochwertige

Endenergie (Elektroenergie). Ihre ständige Verfügbarkeit ist Voraussetzung für Überlebensfähigkeit von Industrie- und Dienstleistungsgesellschaften. Die letzten Jahre zeigen, dass insbesondere die Schwellenländer einen ähnlichen Entwicklungspfad wie die Industrieländer eingeschlagen haben.

Dies alles bedeutet, dass das heutige Energiesystem bei zunächst noch wachsender Bereitstellung hochwertiger Endenergie in eine neue Primärenergiebasis zu transformieren ist, die einerseits CO<sub>2</sub>-frei sein, andererseits jedoch auch ressourcenseitig und ökonomisch beherrschbar bleiben muss.

## 5. Das Energiesystem der Gegenwart

Das heutige Energiesystem stellt dem Nutzer die benötigte Nutzenergie über eine Kette von Wandlungsprozessen ausgehend von der jeweiligen Primärenergiequelle bereit. Diese Kette hat vereinfacht die prinzipielle Struktur:

Primärenergie → Endenergie → Nutzenergie

Die jeweiligen Wandlungsprozesse sind charakterisiert durch

- ihre Wirkungsgrade, die nach dem 2. Hauptsatz die Effektivität bestimmen,
- Abprodukte, die natürliche Senken belasten.

Die entsprechenden Wandlungsanlagen verlangen

- den Einsatz von Materialien und Energie,
- die Zuführung der Energieträger,
- Entsorgung nach Lebensdauer.

Der sogenannte *Nutzungsgrad*  $\xi$  misst das Verhältnis von Nutzenergie zu Primärenergie bei Einschluß aller Wandlungsprozesse mit ihren Wirkungsgraden sowie den Eigenverbrauch der Anlagen, Verluste beim Transport usw.  $\xi$  bestimmt letztendlich die Effektivität der jeweiligen Kette. Heutige totale Wandlungskette:

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

*Alle Wandlungsketten* beinhalten Wandlungsanlagen, eventuell Speichersysteme sowie Energie-transport- und Verteilungsanlagen. Diese beanspruchen Rohstoffressourcen und vorab Energieaufwand, Faktoren, die beträchtlichen Umfang annehmen können. Zu ihrer Bewertung nutzt man den Erntefaktor als Maß für energetische Effizienz Wandlungskette:

$$\epsilon = \frac{E_n}{E_a} = \frac{\text{Erzeugte Endenergie}}{\text{Energieaufwand gesamte Kette}}$$

sowie die Energierückholzeit

$$T_r = \frac{T_l}{\epsilon} = T_l \cdot \frac{E_a}{E_n} \text{ mit } T_l \text{ als Lebensdauer der Anlage.}$$

Schliesslich muss das Energiesystem die benötigte Endenergie zum Zeitpunkt ihrer Nutzung bereitstellen, also die sogenannten Tages- und Jahresganglinien der jeweiligen Endenergieform kontinuierlich bedienen. In Abbildung 3 sind Jahres- und Tagesganglinien für Strom und Wärme dargestellt [3].

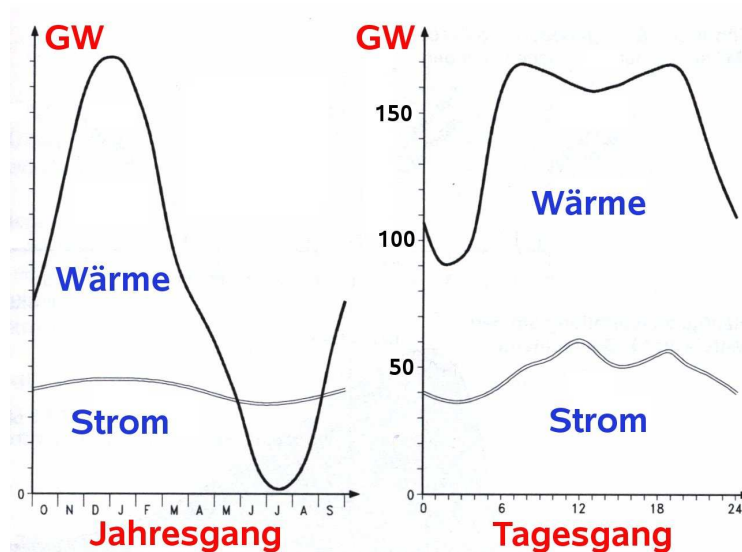


Abbildung 3: Tages- und Jahresganglinien für Wärme und Strom

Hieraus erkennt man die Notwendigkeit, Endenergie nach *Bedarf* den Nutzern bereitzustellen und für spezielle Situationen Reserven vorzuhalten. Darüber hinaus muss das System auf externe Ereignisse stabilisierend reagieren. Alle Anforderungen, die das Energiesystem erfüllen muss, zeigen, dass neben der *Bereitstellung von mehr hochwertiger Endenergie* die *Umwelt- und Ressourcenbelastung durch Wandlungsketten* das eigentliche Problem ausmachen.

## 6. Physikalische Randbedingungen für ein zukünftiges Energiesystem

Einige Bemerkungen zu den Anforderungen an ein zukünftiges Energiesystem:

Der Endenergiebedarf der menschlichen Gesellschaft wird zunächst weiter steigen. Die Gründe sind im Bevölkerungswachstum, in der Beseitigung der Unterentwicklung und im Umweltschutz zu suchen. Prinzipiell kann man zwei Wege zur Erreichung dieser Zielstellung anführen:

1. Ein grundsätzlicher gesellschaftlicher Umbau in den hochentwickelten Ländern mit Übergang zur *2 kW-Gesellschaft* (OECD heute 6.3 kW), was eine drastische Senkung der Nutzenergiekosten (prinzipielle Änderung des Lebensstils) bedeutet.
2. Die Annäherung der Welt an ein *reduziertes Niveau* (um 1 bis 2 kW) der OECD-Länder.

Die weiteren Ausführungen befassen sich mit der zweiten Variante, die sich wohl durchsetzen wird. Unter ihren Bedingungen verlangt ein zukünftiges Energiesystem:

- Mehr (Nutz-) Endenergie bei weniger Umweltbelastung, insbesondere eine drastische Senkung der anthropogenen CO<sub>2</sub>-Belastung der Atmosphäre.
- Die Sicherung bedarfsgerechter Bereitstellung bei volkswirtschaftlich beherschaem Aufwand.
- Eine Minimierung durch bedeutende Senkung der Energieintensitäten.

Im Folgenden werden die wichtigsten physikalischen und physikalisch-technischen Bewertungskriterien für eine zukünftige CO<sub>2</sub>-freie Energetik diskutiert.

Tabelle 2 listet wichtige physikalische Kriterien auf, die *nicht änderbar* sind:

Physikalische Kriterien (nicht änderbar)	
Energie-, Leistungsdichten	bestimmt von Wechselwirkungskonstanten und planetaren Bedingungen
Darbietungsform	Energiestrom (kontinuierlich/fluktuierend) oder gespeichert
Wandlungsanlage	System fernab vom Gleichgewicht bedeutet nach dem 2. Hauptsatz: Exergieverlust wegen Unumkehrbarkeit.

Tabelle 2: Physikalische Kriterien für CO<sub>2</sub>-freie Quellen

Tabelle 3 zeigt physikalische Parameter die heute bekannte CO<sub>2</sub>-freien Quellen charakterisieren:

Quelle	Energie- Leistungsdichte (Mittelwerte)	Darbietungsform
Solarstrahlung	Nördliche Breiten (NB) 120 W/m <sup>2</sup> Sonnengürtel (SG) 250 W/m <sup>2</sup>	(fast) periodisch fluktuierend
Wind	140 W/m <sup>2</sup>	unregelmäßig fluktuierend
Wasser	30 kW/m <sup>2</sup>	kontinuierlich/gespeichert
Biomasse	5 kWh/kg	gespeichert
Kernspaltung	22 GWh/kg <sup>235</sup> U	gespeichert
Kernfusion	100 GWh/kg D+T	gespeichert
Erdwärme	0.06 W/m <sup>2</sup> (Tiefenstrom)	kontinuierlich
Vergleichswerte fossiler Quellen		
Steinkohle	8 kWh/kg	gespeichert
Erdgas	11 kWh/kg	gespeichert

[Sonnengürtel der Erde zwischen 35° nördlicher und südlicher Breite. Nördliche Breiten (etwa Deutschland).]

Tabelle 3: Physikalische Parameter bekannter CO<sub>2</sub>-freier Quellen

Die folgenden physikalisch-technischen Kriterien – dargestellt in Tabelle 4 – sind unter bestimmten Bedingungen beeinflussbar:



Physikalisch-technische Kriterien	
Wirkungsgrade	multiplikative Größen, bedingt beeinflussbar
Verbesserung exergetischer Kennziffern	Verringerung der Verluste durch Unumkehrbarkeiten. Konsequenz: Wachstum von Anlage und/oder materiellem Aufwand
Volllaststunden (E-Erzeuger)	Jahresproduktion/installierte Leistung, beeinflussbar durch zugeschaltete Energiespeicher

Tabelle 4: Physikalisch-technische Kriterien

Es folgt eine kurze Bewertung von CO<sub>2</sub>-freien Primärenergiequellen aus der Sicht der oben genannten Parameter und unter Berücksichtigung zu erwartender Weiterentwicklung der jeweiligen Wandlungsanlagen.

*Direkte Solarstrahlung:* Wandlung durch den inneren Photoeffekt in Elektroenergie mit Photovoltaikanlagen. Wirkungsgrad in Grossanlagen heute etwa  $\eta = 0.08 - 0.10$ . Die Grenze für Si-Einschichtzellen liegt bei  $\eta = 0.33$ . In Grossanlagen sind zukünftig Wirkungsgrade von  $\eta = 15$  zu erwarten (Dünnschichttechnik).

Die Verfügbarkeit in nördlichen Breiten beträgt 1000 h/a Volllaststunden. Deshalb sind zur Anpassung an das Elektroenergiesystem effektive Kurz- und Langzeit-Elektroenergiespeicher notwendig. Dies führt zur Verringerung der Gesamtwirkungsgrade. Wegen der geringen Leistungsdichten bleibt das Hauptproblem der hohe Material- und Energieaufwand.

*Direkte Solarstrahlung:* Wandlung durch Aufkonzentration im Sonnengürtel in Elektroenergie und Hochtemperaturwärme. Heute betragen die Wirkungsgrade (z.B. in grösseren Parabolrinnenanlagen)  $\eta = 0.15$  für die Elektroenergieerzeugung und  $\eta = 0.7$  für Hochtemperaturwärme. Wirkungsgraderhöhungen auf  $\eta = 0.2$  sind zu erwarten. Die Verfügbarkeit liegt bei 3000 h/a Volllaststunden. Auch hier sind effektive Elektroenergie- bzw. Wärmespeicher notwendig, die Einfluss auf die Wirkungsgrade nehmen.

*Solarstrahlung:* Nutzung des (künstlichen) Treibhauseffekts zur Erzeugung von Niedertemperaturwärme (Heizung, Warmwasser). Die Wirkungsgrade liegen bei  $\eta \leq 0.9$ , sind daher günstig auch für nördliche Breiten. Notwendig sind (saisonale) Wärmespeicher und effektive Wärmedämmungen.

*Windenergie:* Nutzung mit Windkraftanlagen zur Erzeugung von Elektroenergie. Der Wirkungsgrad ist physikalisch begrenzt und liegt unterhalb von  $\eta \leq 0.52$ . Das Hauptproblem liegt im unregelmässigen Windangebot und unterschiedlichen Windgeschwindigkeiten. Die Verfügbarkeit beträgt 2000 h/a Volllaststunden im Binnenland und 3000 h/a offshore. Besondere Probleme: Eine schnell zuschaltbare Vorhalteleistung muss installiert sein. Auch hier sind effektive Elektroenergiespeicher notwendig. Bei grossem Einsatz von offshore-Anlagen sind bedeutende Umgestaltungen des Elektroenergieübertragungssystems notwendig.

*Wasserenergie:* Nutzung in Speicher- und Laufwasserkraftwerken zur Erzeugung von Elektroenergie. Die Wirkungsgrade erreichen Werte um  $\eta = 0.8$ . Die Verfügbarkeit beträgt im Mittel 6000 h/a Volllaststunden. Allerdings ist das erschliessbare Potential begrenzt durch die jeweiligen geographischen Bedingungen, der einmalige Aufwand ist hoch.

*Biomasse:* Technische Nutzung zur Erzeugung von Treibstoffen, Elektroenergie und Wärme. Da Biomasse in gespeicherter Form vorliegt, sind Volllaststunden bis zu 7000 h/a möglich. Teilweise besitzen die bekannten Wandlungsprozesse kleine Wirkungsgrade bzw. verlangen selbst Energiezufuhr. Hauptproblem ist jedoch die Konkurrenz zur Nahrungsmittelerzeugung, daher sind die Potentiale begrenzt. Von besonderer Bedeutung ist die Nutzung von organischen Neben- und Reststoffen und organischen Abfällen für energetische Zwecke.

*Massendefekt der Kerne:* Nutzung durch Spaltung schwerer Atomkerne in Kernreaktoren zur Erzeugung von Elektroenergie und Hochtemperaturwärme. Die extrem hohe Energiedichte bedingt geringe spezifische Material- und Energieaufwendungen. Die Wirkungsgrade betragen heute  $\eta \approx 0.33$ , die Zeitverfügbarkeit (Volllaststunden) liegt über 7000 h/a, damit sind sie ideale Grundlastkraftwerke. Notwendig ist die Weiterentwicklung von Kernreaktoren mit weiter verbesserten Sicherheitseigenschaften und höherer Brennstoffausnutzung, von Brennstoffkreisläufen und die Realisierung der Transmutation in fortgeschrittenen Systemen.

*Massendefekt der Kerne:* Entwicklung von Kernfusionsanlagen. Bei erfolgreicher Entwicklung eine langfristige stabile Energiequelle. Vor 2050 – 2060 ist allerdings kaum mit ihrem Einsatz zu rechnen.

An dieser Stelle sei vermerkt, dass gegenwärtig beträchtliche Anstrengungen zur Weiterentwicklung von Technologien zur Erzeugung von Elektroenergie, Wärme und Bewegungsenergie aus fossilen Brennstoffen unternommen werden. Dabei steht neben Wirkungsgradverbesserungen die CO<sub>2</sub>-Sequestrierung im Zentrum. Bei Erfolg könnte damit eine Zwischenlösung über längere Zeit gefunden werden.

Die heutige Praxis einschliesslich der bekannten Entwicklungstendenzen zeigt, dass die Transition zu einer CO<sub>2</sub>-freien Energetik einer längeren Übergangsphase (50 – 100 Jahre) bedarf. Dabei begrenzen die physikalischen Gesetze den Spielraum für technologische Lösungen einschliesslich der von ihnen benötigten Ressourcen. Insbesondere sind Grenzen dieses Spielraumes durch folgende Parameter gegeben:

*Energiedichten:* Sie bestimmen maßgeblich den Aufwand an Raum (Fläche), Material und Energie für die entsprechende Anlage. Nach diesem Kriterium ergibt sich die nachstehende Qualitätsreihenfolge der entsprechenden Quellen:

(Fusion) → Kernspaltung → Wasser → Biomasse → Solarstrahlung → Wind.

*Darbietung:*

*Gespeichert:* Zugriff auf die Quelle ist zu beliebigen Zeiten möglich. Aufwand zur Gewinnung, die Zufuhr zur Anlage und Entsorgung von Abprodukten verlangen zusätzliche materielle Aufwendungen. Die Begrenztheit der Vorräte ist zu berücksichtigen. Dies betrifft:

(Fusion) → Kernspaltung → Biomasse.

*Kontinuierlicher Strom:* Die jeweilige Wandlungsanlage ist ortsabhängig; das kann zu erhöhten materiellen Aufwendungen führen. Dies betrifft:

Wasser → Erdwärme.

*Diskontinuierlicher Strom:* Angebot und Leistungsdichten sind abhängig von geographischen und klimatischen Bedingungen. In jedem Fall sind zusätzlich Energiespeicher notwendig, was zu erhöhten materiellen Aufwendungen und niedrigeren Gesamtwirkungsgraden führt. Zu beachten ist auch die Notwendigkeit des Umbaus von Energieverteilungs- und Übertagungssystemen bei umfassenden Einsatz solcher Quellen. Dies betrifft:

[Solarwärme](#) → [Aufkonzentration von Solarstrahlung](#) → [Photovoltaik](#) → [Wind](#).

Spezielle Bedeutung hat im Zusammenhang mit dem Übergang zu CO<sub>2</sub>-freien Quellen die Endenergiestruktur. Während heute beträchtliche Mengen von flüssigen Energieträgern (Treibstoffe, Heizöle) zur Wandlung in kinetische Energie und Hochtemperaturwärme bereitgestellt werden müssen, liefern die ergiebigsten CO<sub>2</sub>-freien Quellen hauptsächlich Elektroenergie und – heute noch zweitrangig – Hochtemperaturwärme. Daraus erwächst ein Kernproblem:

Die Bereitstellung von kinetischer Energie für Transportprozesse beliebiger Art (mit Ausnahme vom Luftverkehr) muss auf lange Sicht von Elektroenergie und Wasserstoff (erzeugt durch Wasserzerlegung) übernommen werden. Dies bedeutet neben der Entwicklung hocheffektiver Elektroenergiespeicher und Brennstoffzellen den Umbau von ganzen Industriezweigen auf neue Antriebssysteme und die Schaffung einer völlig neuen Verteilungsstruktur. Sicher können Biokraftstoffe und Erdgas die riesigen Probleme dieses Übergangsprozesses zunächst mildern, lösen können sie das generelle Problem nicht.

Abschliessend einige Bemerkungen zur Energieeinsparung. Schaut man auf die schon erwähnte Wandlungskette, so ergeben sich drei prinzipielle Gebiete für Maßnahmen zum rationellen Umgang mit Energie:

- *Wandlung von Primärenergie in Endenergie:* Global betragen die Verluste hier etwa 32 %. Dies hat seine Ursache in der Endenergiestruktur, die dominiert wird durch flüssige und gasförmige Energieträger (Erzeugung von kinetischer Energie für Transport und Wärme). Die hier notwendigen Substitutionsprozesse vor allem durch Elektroenergie und Hochtemperaturwärme werden auch wegen der Zwischenschaltung von Energiespeichern zu einem deutlichen Anwachsen dieser Grösse führen. Das ist insbesondere bei regenerativen Energieträgern mit erhöhten materiellen und energetischen Vorleistungen verbunden.
- *Wandlung von Endenergie in Nutzenergie:* Heute liegen die Verluste ebenfalls im Bereich von etwa 30 - 33 %. Hier ist zweifellos ein weites Feld für die Einsparung von Endenergie durch neue Technologien vorhanden. Im Bereich der Raumwärme- und Warmwasserbereitstellung, bei der Wandlung von Elektroenergie in Licht, Wärme für Kochprozesse usw. sind beträchtliche Einsparpotentiale erschliessbar. Dabei ist jedoch zu beachten, dass die Umrüstung ganzer Generationen von Wandlungsgeräten wegen der damit verbundenen Aufwendungen ein Prozess mit längeren Laufzeiten ist.
- *Einsparung von Nutzenergie:* Dieses Gebiet reicht von „vernünftigem“ Umgang mit Nutzenergien bis hin zum freiwilligen oder auch durch höhere Kosten erzwungenen Verzicht auf Energiedienstleistungen. Welche Konsequenzen dies auf soziale Prozesse hat, ist Feld vielschichtiger Untersuchungen und kann nicht Gegenstand einer physikalischen Analyse sein.

Die hier in gedrängter Form dargelegte physikalische Analyse des Energieproblems zeigt den Spielraum, den die Physik für den Weg zu einer CO<sub>2</sub>-freien Energetik öffnet. Die Brisanz des

Energieproblems fordert, diesen Spielraum nicht einzuengen und dazu die notwendigen wissenschaftlichen Diskussionen auf einer sachlichen und emotionsfreien Basis zu führen.

### Literatur

- [1] K.FUCHS, Zur Physik der Artefakten, Spektrum 1980 9, S. 22
- [2] Daten für das Jahr 2004 sind entnommen aus *Keyworld Energy Statistics*, IEA, 2005.
- [3] entnommen aus K. HEINLOTH, Die Energiefrage, 2. Auflage, Vieweg, 2002, S. 700

[30.06.08]

Anschrift des Autors:

Prof. Dr. Günter Flach  
Leibniz-Sozietät der Wissenschaften zu Berlin  
Schrammsteinstr. 3  
D - 01309 Dresden