

## Physikalische Aspekte des globalen Energieproblems

Der Konflikt zwischen quantitativem und qualitativem Wachstum der menschlichen Gesellschaft und der dadurch bedingten Wechselwirkung mit der natürlichen Umgebung wächst zunehmend. Ein Kernpunkt dieser Wechselwirkung ist die enge Beziehung zwischen dem Entwicklungsniveau der menschlichen Zivilisation und ihrer Versorgung mit hochwertiger Energie.

Für die Aufrechterhaltung ihres Organisationsgrades benötigen sowohl der Mensch als biologisches Individuum als auch die menschliche Gesellschaft als hochentwickeltes soziales System Nutzenergie, welche als Wärme, Licht und Bewegungsenergie bereitgestellt werden muß. Insbesondere muß das durch technologische Prozesse geprägte Produktionssystem der menschlichen Gesellschaft als offenes, mit seiner Umwelt Energie und Stoff austauschendes System betrachtet werden. Dies bedeutet immer die Zufuhr höherwertiger (freier) Energie im Sinne Ostwalds und den Export niedrigwertiger Energie (gemessen durch die exportierte Entropie) in Form von Wärme und gebunden in Abprodukten.

Die Nutzenergie wird über eine Kette von Wandlungsprozessen aus natürlichen Energiequellen gewonnen.

Aus physikalischer Sicht ist das Energieproblem ein **Problem der Wandlung von Energie natürlicher Quellen in hochwertige Endenergie, welche schließlich über Nutzenergie entwertet wird.**

Die wissenschaftliche Analyse des Energieproblems muß eine Darstellung seiner physikalischen Basis beinhalten, da diese Randbedingungen vorgibt, denen alle Varianten der Entwicklung genügen müssen. Alle weiteren Bewertungskriterien (ökologische, ökonomische, soziale usw.) für diese oder jene Variante energetischer Entwicklungspfade sind den durch die Physik gegebenen Randbedingungen unterworfen. Die wichtigsten Gesetze sind in diesem Zusammenhang der **erste** und der **zweite Hauptsatz der Thermodynamik**.

Während der erste Hauptsatz (Gesetz von der Erhaltung der Energie) eine mengenmäßige Aussage darstellt und daher Bilanzaussagen liefert, ist der zweite Hauptsatz für die Energiewandlung von besonderer Bedeutung, weil er Richtung und Qualität energetischer Wandlungsprozesse bestimmt und dafür die Entropie als Maß benutzt.

Desweiteren sind die folgenden physikalischen Bewertungskriterien für die praktische Realisierung der entsprechenden Energiewandlungsprozesse von besonderer Bedeutung:

- Energiedichten der Quellen
- Physikalische Grenzen der jeweiligen Wirkungsgrade in der Wandlungskette
- Zeitliche Verfügbarkeit der Quellen und damit gekoppelte Speicherprobleme
- Energie- und Stoffaufwand für die Energiewandlungsanlagen
- Form, Menge und Eigenschaften der auftretenden Wandlungsabprodukte

## Energiequellen unseres Planetensystems

Die Energiequellen unseres **Planetensystems** speisen sich aus der im Sonnensystem verteilten Materie und der dazu äquivalenten Energie sowie den zwischen den Konstituenten des Systems wirkenden Kräften.

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 beim Aufbau schwererer Kerne aus leichteren (Kernfusion), dem Prozess, der im Verbund mit der Gravitation als Energiequelle unserer Sonne dient.

Die dem zugrundeliegenden Elementarprozesse sind also aus der Sicht der fundamentalen Wechselwirkungen durch die starke Wechselwirkung (in Kooperation mit der Gravitation) bedingt.

Eine zweite Energiequelle stellt die Erdwärme dar.

In der Frühzeit der Erde wurde diese beim Bombardement mit Materieclustern durch deren kinetische Energie so stark aufgeheizt, daß heute im Inneren der Erde Temperaturen von bis zu 6000° herrschen. 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.

Die Lage der **Erde** im Sonnensystem und die Verteilung der Elemente auf der Erde führt daher aus physikalischer Sicht auf vier primäre Energiequellen<sup>1</sup>:

1. Strahlungsenergie, Photonenstrom, der ausgehend von der Sonne mit dem Maximum der Energiedichte bei 5800 K (im sichtbaren Lichtbereich) auf die Erde etwa  $1.2 \cdot 10^5$  TW Strahlungsleistung einträgt, die Erde strahlt die annähernd gleiche Leistung mit einer Temperatur von ca. 260 K wieder ab. Die Temperaturdifferenz ist ein Maß für die Entnahme von hochwertiger Energie aus diesem Photonenstrom, welche die Prozesse der Evolution auf der Erde treibt.
2. Bindungsenergie von Atomkernen, d.h., das Energieäquivalent des Massendefektes. Die Verteilung der chemischen Elemente und die Unterschiede ihrer Bindungsenergie pro Nukleon gestatten die Realisierung von Kernspaltungsprozessen schwerer Kerne und wahrscheinlich in Zukunft auch die Fusion von Deuterium und Tritium zu Helium.
3. Erdwärme, wohl nur der Anteil an dem riesigen Gesamtpotential, der in der Erdkruste vorliegt und abhängig von den geologischen Gegebenheiten beträchtlich schwankt, ist prinzipiell nutzbar.
4. Gezeitenenergie, diese kann technisch durch Gezeitenkraftwerke nutzbar gemacht werden.

Man beachte den Unterschied zwischen diesen Quellen: Der Photonenstrom der Sonne trifft kontinuierlich auf die Erde, wird jedoch durch ihre Eigenrotation sowie durch die Neigung ihrer Rotationsachse zur Erdumlaufbahn zu einer zeitlich oszillierenden Energiequelle für einen fixen Punkt der Erdoberfläche, während Bindungsenergie der Kerne und Erdwärme gespeichert vorliegen, also defacto zu beliebigen Zeitpunkten (kontinuierlich) freigesetzt werden können.

Die folgende Tabelle zeigt einige wichtige Parameter dieser primären Energiequellen. Als Vergleichswert für die Reichweite der jeweiligen Quellen wird der heutige Primärenergieverbrauch von etwa 15 TW angenommen.

---

<sup>1</sup>hier wird der Begriff *primäre Energiequelle* im Unterschied zu *Primärenergieträger*, dem Begriff aus der Energiewirtschaft benutzt.

Quelle	spezifische Leistung (Energieinhalt)	Potential
Strahlungsenergie	Lokale Strahlungsleistung hängt von Breitengrad, Tageszeit, Jahreszeit ab. Max.: 1000 W/m <sup>2</sup> , min.: 0 W/m <sup>2</sup> , globaler Mittelwert: 236 W/m <sup>2</sup> .	Auf die Erde eingestrahlte Gesamtleistung: $1.2 \cdot 10^5$ TW., Reichweite: zeitlich nicht begrenzt.
Massendefekt	<b>Kernspaltung:</b> pro Spaltung <sup>235</sup> U Freisetzung 167 MeV kinetische Energie der Spaltprodukte (plus 25 MeV $\gamma$ -Strahlung, kinetische Energie von Neutronen und Elektronen), ergibt eine Energiedichte von 22 GWh/kg <sup>235</sup> U. <b>Fusion:</b> Pro Fusionsprozess D+T Freisetzung von 17.6 MeV, das bedeutet eine Energiedichte von 120 GWh/kg D-T-Gemisch.	<b>Kernspaltung:</b> Bei Nutzung aller bekannten Uran- und Thoriumreserven durch Brutprozesse $2.8 \cdot 10^8$ TWh. Reichweite > 1500 a <b>Fusion:</b> Deuterium ist zu 0.01% im Wasser vorhanden, das sind etwa $10^{16}$ t. Die Reichweite läge daher weit über $10^7$ a
Erdwärme	Wärmespeicher mit etwa $2 \cdot 10^{15}$ TWh Kapazität, Anteil Erdkruste (Festland): $5 \cdot 10^{10}$ TWh.	Reichweite wäre bei voller Erschließung > $10^5$ a.
Gezeitenenergie		Nutzbares Potential wird mit $2.2 \cdot 10^2$ TWh/a angegeben (< 0.1% des Endenergiebedarfs). Reichweite: zeitlich nicht begrenzt.

## Die menschliche Gesellschaft und die physikalischen Aspekte ihres Energieproblems

Die menschliche Gesellschaft ist ein Ergebnis der Evolutionsprozesse auf der Erde und insofern ein natürliches System unter vielen. Im Verlaufe ihrer Entwicklung hat sie sich zunehmend aus ihrer natürlichen Einbettung in die biologische und ökologische Umwelt gelöst. Sie stellt heute einen in bezug auf den Energie- und Stoffaustausch relevanten Faktor für die Gleichgewichte der sie einbettenden Systeme dar.

Wir beschränken uns hier vorwiegend auf die energetische Seite des Problems.

Während vor der neolithischen Revolution der Mensch etwa 2 kWh/d an höherwertiger Energie seiner Umgebung entnahm, waren es danach bis zum Beginn der industriellen Revolution etwa 7 kWh/d. Als primäre Quelle dienten Nahrungsmittel aus (veredelter) Biomasse, nachwachsende Biomasse (Holz usw.) sowie Wind- und Wasserenergie, also höherwertige Energieträger, die allesamt im Prozess der Entwertung von Strahlungsenergie in natürlichen Wandlungsprozessen auftreten.

Gegenwärtig entnimmt die menschliche Gesellschaft ihrer Umgebung Endenergie von 33 kWh/d, dem entspricht eine Primärenergiemenge von knapp 50 kWh/d. Daraus ergibt sich der heutige Primärenergieverbrauch von  $1.3 \cdot 10^5$  TWh/a dem eine Leistung von 15 TW entspricht. Zum Vergleich sei angeführt, daß der Anteil, der der Sonneneinstrahlung für die Photosynthese entnommen wird, etwa 100 TW beträgt.

Etwa 80% des Primärenergieverbrauchs werden heute aus fossilen Quellen gespeist, 10% aus brennbaren regenerativen Quellen, 6.7% aus Kernenergie und 2% aus Wasserkraft. Die fossilen Quellen sind energetisch hochwertige Kohlenstoffverbindungen bzw. Kohle, welche in früheren Erdperioden durch geophysikalische Prozesse aus Biomasse entstanden, dieser über Jahrmillionen aggregierte Kohlenstoff wurde und wird heute als CO<sub>2</sub> in relativ kleinen Zeiträumen wieder freigesetzt. Unabhängig von den sich daraus eventuell ergebenden Zwängen ist heute absehbar, daß die Vorräte dieses Speichers in überschaubarer Zeit erschöpft sein werden. Auch wenn die Kohlereserven nach manchen Einschätzungen noch über 300 Jahre reichen, so sollte doch ihre Bedeutung für die Stoffwirtschaft *nach* dem Erdöl nicht

unterschätzt werden. Gleichzeitig ist ein weiterer Anstieg des Energieverbrauchs der menschlichen Gesellschaft zu erwarten.

Will man die entstandene Situation und ihre voraussichtliche Entwicklung aus physikalischer Sicht bewerten, so ist zu berücksichtigen, daß die menschliche Gesellschaft als hochorganisiertes, hochwertige Energie dissipierendes System betrachtet werden muß. Die zunehmende Nutzung von Endenergien mit hohem **Exergieanteil** ist ein typisches Merkmal für hochentwickelte Gesellschaften (siehe die wachsende Rolle der Elektroenergie) und die Heranführung der Schwellen- und Entwicklungsländer an das Lebensniveau fortgeschrittener Gesellschaften wird diese Tendenz weiter ausprägen.

Die entwertete Energie wird in Form von Wärme auf Umgebungstemperatur und gebunden in Abprodukten an die Umgebung zurückgegeben. Ein Maß für die Enwertung ist die Entropie, die aus dem System exportiert wird. Der Entropieexport der Erde beträgt zur Zeit etwa  $0.5 \cdot 10^3$  TW/K. Grob geschätzt exportiert die menschliche Gesellschaft bei obigen Energieverbrauch 0.05 TW/K, das ist etwa ein Anteil von  $10^{-4}$  am Gesamtexport der Erde.

Zusammenfassend ergibt sich die Feststellung:

**In absehbarer Zeit ist das von der Natur gegebene (Energie-)Darlehen erschöpft, der Energiebedarf der Menschheit weiter angestiegen, es ist voraussichtlich mit gravierenden Umweltveränderungen zu rechnen, welche zu ihrer Beherrschung weitere hochwertige Energie verlangen.**

Sieht man von einer Zwischenphase mit mehr oder weniger intensiver Nutzung fossiler Energieträger ab (über Zeiträume soll hier nicht spekuliert werden), so stehen in Zukunft der Menschheit nur die in der obigen Tabelle genannten primären Energiequellen zur Verfügung. Folgende grundsätzliche Fragen bedürfen daher aus physikalischer Sicht einer Klärung:

1. Wie groß darf der Anteil werden, den die Menschheit für ihre Zwecke den durch die Strahlungsenergie eingetragenen Energieformen entnimmt?

Auf den ersten Blick scheint diese Frage nicht relevant zu sein. Die oben genannte Relation zwischen eingestrahelter Leistung und der von der Menschheit heute beanspruchten Leistung (Faktor  $10^4$ ) erweckt zunächst den Eindruck, daß selbst bei steigendem Energiebedarf hier kaum Probleme auftreten dürften.

Eine nähere Betrachtung muß jedoch berücksichtigen, daß die Entnahme von hochwertiger Energie für die menschliche Zivilisation gleichzeitig eine Verringerung des Anteils bedeutet, der den unterschiedlichen natürlichen Prozessen<sup>2</sup> zur Verfügung steht. Da wir heute wissen, daß in hochorganisierten Systemen auch kleine Veränderungen der wesentlichen Parameter Instabilitäten hervorrufen können, ist vorausschauender Umgang auch mit der Strahlungsenergie angebracht. Die gemeinhin vertretene Auffassung, Solarenergie stehe den menschlichen Zwecken in unbegrenzter Menge zur Verfügung ist daher zweifelhaft.

2. Wie stark darf der Entropieexport der menschlichen Zivilisation wachsen, wenn zusätzliche primäre Energiequellen in größeren Maßstäben erschlossen werden? Dies wird besonders dann wichtig, wenn z.B. massiv Kernenergie (Kernfusion) für die Deckung zukünftigen Bedarfs eingesetzt wird.

Schon heute führt die Zunahme des Bevölkerungsanteils, der in Großstädten lebt, zur Herausbildung von Wärmeinseln. Dieser Trend scheint sich in die Zukunft hinein fortzusetzen.

3. Welche Rolle spielt zukünftig das Speicherproblem für die kontinuierliche Versorgung der menschlichen Gesellschaft mit hochwertiger Endenergie.

Diese Frage ist von besonderer Relevanz, wenn stark oszillierende Quellen beträchtliche Anteile der Energiebereitstellung übernehmen müssen.

---

<sup>2</sup>Klimasystem, Biosphäre usw.

4. Jeder Energiewandlungsprozess ist an technische Systeme gebunden, die neben Rohstoffen auch Energie binden. Darüberhinaus fallen bei bestimmten Energiequellen im Wandlungsprozess Abprodukte (z.B. radioaktiver Abfall) an. Rezyklierung und umweltverträgliche Entsorgung sowohl der technischen Anlagen als auch der Abprodukte verlangen wiederum Energie.  
Eng verknüpft hiermit ist die Frage, ob ein größeres Angebot hochwertiger Energie die durch die menschliche Gesellschaft betriebene Stoffentropie umkehren kann, bzw. zumindest begrenzen kann.

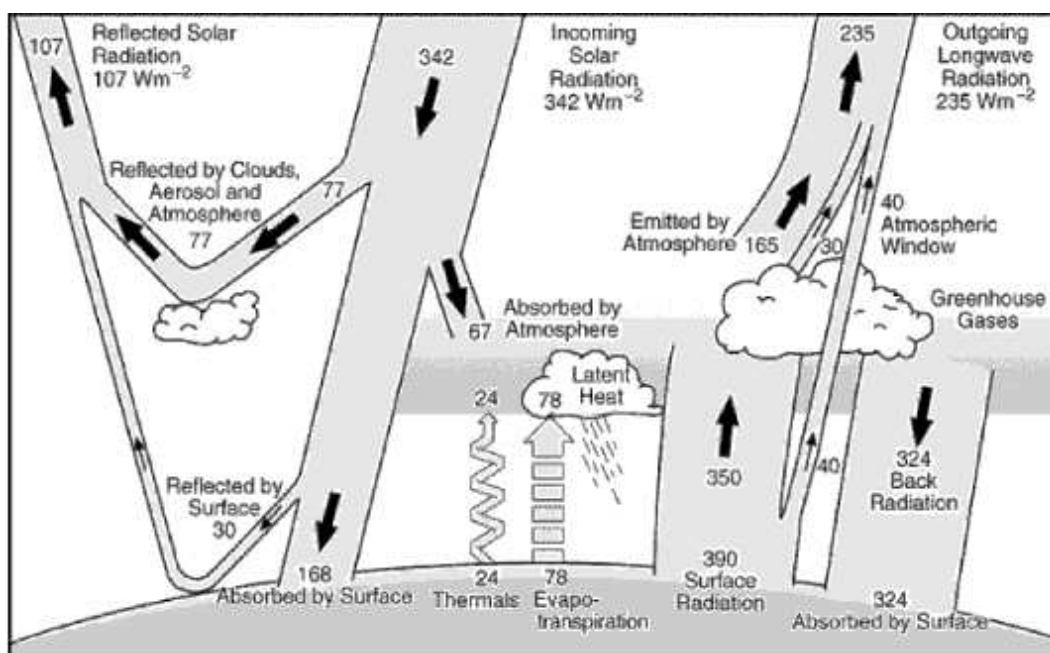
Auf einige dieser Fragen soll im folgenden eingegangen werden. In vielen Fällen findet man in der einschlägigen Literatur nur grobe Einschätzungen, die oft auch noch vom subjektiven Empfinden des jeweiligen Autors beeinflusst sind. Damit sind jedoch die Fragen nicht aus der Welt und wir sind gut beraten, ihnen gebührende Aufmerksamkeit zu widmen.

## Energiewandlungsprozesse zur Nutzung primärer Energiequellen der Erde

Der heutige technologische Entwicklungsstand in der menschlichen Zivilisation führt für die genannten primären Energiequellen zu den im folgenden beschriebenen Varianten der Energiebereitstellung über entsprechende Wandlungsprozesse.

### Strahlungsenergie

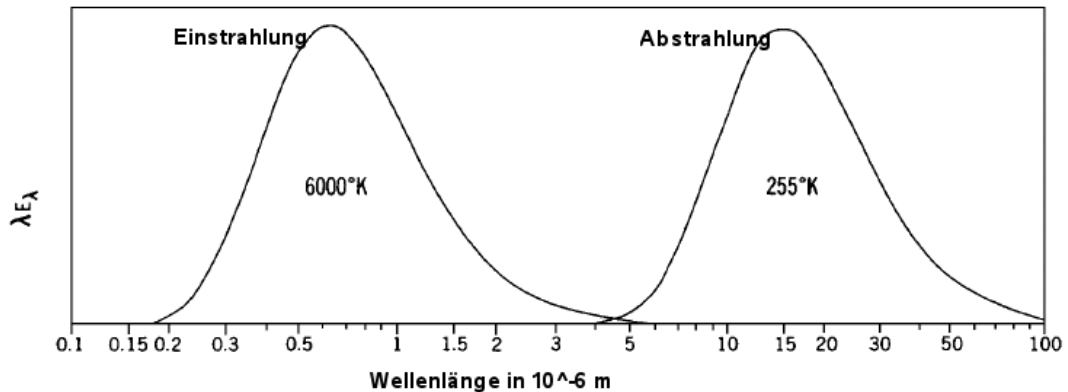
Das folgende Bild<sup>3</sup> verdeutlicht die Strahlungsenergieströme. Die Angaben sind alle als mittlere Flächen-dichten ( $\text{W}/\text{m}^2$ ) dargestellt. Man erkennt, daß der einfallende Strom aufgrund der komplexen Struktur der Erdatmosphäre nur zu etwa 50% die Erdoberfläche erreicht, hier absorbiert wird, vor allem die oberen Schichten des Meeresswassers erwärmt, Verdampfungen verursacht und über Reemission sowie weitere Wandlungsprozesse das Klimasystem energetisch konfiguriert. Ein Anteil der auf die Erdoberfläche auftreffenden Strahlungsenergie von 0.012% (100 TW) treibt die Photosynthese und ist somit die energetische Basis für die Biosphäre der Erde.



<sup>3</sup>IPCC 2001

Die Energie der einfallenden Photonen liegt im Bereich von einigen Hundertstel bis zu einigen Hundert eV. Alle Energiewandlungen, ausgelöst durch die einfallende Strahlung auf der Erde sind demzufolge elektromagnetische Wechselwirkungen mit Energieumsetzungen eben dieser Größenordnung.

Da die Erde mit ihrer Umgebung nur Strahlungsenergie austauscht (Stoffaustausch kann in unseren Betrachtungen vernachlässigt werden) und sich temperaturmäßig relativ stabil verhält, muß nach dem ersten Hauptsatz die abgestrahlte Energie gleich der eingestrahnten sein. Betrachtet man Sonne und Erde als schwarze Körper, so ergibt sich die im folgenden Bild dargestellte Verteilung über die Wellenlängen (Wiensches Verschiebungsgesetz):<sup>4</sup>



Die folgenden Angaben<sup>5</sup> zeigen einige wichtige Kenndaten der Solarstrahlung.

**Leistung der einfallenden Strahlung an der Atmosphären­grenze:**

$s = 1367 \text{ W/m}^2$  (Einfall auf eine Fläche senkrecht zur Strahlung,  $s$  - Solarkonstante)

31% der eingestrahnten Leistung werden wieder in den Weltraum reflektiert (planetarische Albedo)

Wegen der (annähernden) Kugelgestalt der Erde sind folgende Situationen zu unterscheiden:

**Globale Leistungsbilanz:** Der Gesamteintrag beträgt:

$P_{in} = 0.69 \cdot \pi R^2 \cdot s$  mit  $R = 6.37 \cdot 10^6 \text{ m}$  als Erdradius.

Diese Leistung verteilt sich über die gesamte Erdoberfläche  $4\pi \cdot R^2$ . Somit ergeben sich für die globale Leistungsbilanz folgende Eckdaten:

<sup>4</sup>entnommen aus Peixoto und Oort, 1993.

<sup>5</sup>Entnommen aus: *Bernhardt, K. und E.A. Lauter*, Globale physikalische Prozesse und Umwelt, Zeitschrift für Meteorologie, Band 27, Heft1, 1977 sowie aus eigenen Berechnungen.

<b>Gesamtleistungseintrag:</b>	$1.21 \cdot 10^5$ TW.
<b>Absorption in Atmosphäre:</b>	$0.35 \cdot 10^5$ TW
<b>Einstrahlung auf Erdoberfläche:</b>	$0.85 \cdot 10^5$ TW
<b>Einstrahlung auf Festland:</b>	$0.25 \cdot 10^5$ TW
<b>Mittlere absorbierte Leistung:</b>	236 W/m <sup>2</sup> .
<b>Mittlere von Erdoberfläche absorbierte Leistung:</b>	167 W/m <sup>2</sup>
<b>Mittlere in der Atmosphäre absorbierte Leistung:</b>	69 W/m <sup>2</sup> .
<b>Potentielle Energie der Atmosphäre:</b>	ca. $4 \cdot 10^3$ TW.
<b>Kinetische Energie des Windes:</b>	ca. $3.5 \cdot 10^2$ TW
<b>Mittlere Einstrahlung in Deutschland:</b>	114 W/m <sup>2</sup>
<b>Mittlere Einstrahlung Sahara:</b>	251 W/m <sup>2</sup>
<b>Rückstrahlung aus Atmosphäre im Infraroten:</b>	324 W/m <sup>2</sup>
<b>Photosynthese gesamt:</b>	100 TW
<b>Flächendichte Photosynthese gesamt:</b>	0.2 W/m <sup>2</sup> (bez. auf Gesamtfläche)
<b>Flächendichte Photosynthese Festland:</b>	0.5 W/m <sup>2</sup> (bez. auf Festland ohne Antarktis)
<b>Flächendichte Photosynthese Meer:</b>	0.1 W/m <sup>2</sup> (bez. auf Meeresfläche)
<b>Primärenergieeinsatz 2004 gesamt:</b>	15 TW
<b>Flächendichte Primärenergieeinsatz 2004:</b>	0.11 W/m <sup>2</sup> (bez. auf Festland ohne Antarktis)
<b>Nahrungsbedarf der <math>6.3 \cdot 10^9</math> Menschen gesamt:</b>	1.38 TW
<b>Flächendichte Nahrungsbedarf:</b>	0.06 W/m <sup>2</sup> (bez. auf landwirtsch. nutzbar. Fläche)

Die mittlere Temperatur an der Erdoberfläche wird durch die Rückstrahlung aus der Atmosphäre beeinflusst. Diese wiederum hängt nach heutigen Vorstellungen ganz wesentlich von der Konzentration und der Verweildauer sogenannter Treibhausgase (H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O usw.) insbesondere auch von den steigenden Anteilen des anthropogenen CO<sub>2</sub> ab. Auch externe Faktoren wie z.B. die Fluktuation der Solarkonstanten über größere Zeiträume spielen in der Beurteilung von Schwankungen der globalen Temperatur eine Rolle. Wegen der außerordentlichen Komplexität des Klimasystems sind wissenschaftlich belegbare Aussagen heute noch äußerst schwierig<sup>6</sup>. Um jedoch einen Eindruck von der Größenordnung zu bekommen über die in diesem Zusammenhang diskutiert wird, sei festgehalten, daß nach gegenwärtigem Erkenntnisstand eine Veränderung des Strahlungsflusses durch die Tropopause von 1 W/m<sup>2</sup> eine Temperaturänderung von 0.85°C verursacht<sup>7</sup>.

Man erkennt, daß der Energieverbrauch der menschlichen Gesellschaft (zumal dieser zunächst weiter steigen wird), durchaus bei vollständiger Deckung durch Strahlungsenergie in den Bereich sensibler Größenordnungen natürlicher Prozesse geraten kann. Welche Konsequenzen das hat, wissen wir heute noch nicht<sup>8</sup>.

$1 \cdot 10^2$  TW dienen der Photosynthese, davon  $0.65 \cdot 10^2$  TW der Photosynthese auf dem Festland. Zum Vergleich sei angegeben, daß der Energiebedarf des Menschen (Nahrung) etwa 0.23 kW (erweiterter Grundumsatz) beträgt. Dem entsprechen etwa 1.38 TW Biomasse bei der heutigen Bevölkerungszahl weltweit. Auch hier stellt sich die Frage nach den Grenzen einer energetischen Nutzung von Biomasse. Schon aus diesen allgemeinen energetischen Kennziffern folgt, daß neben dem heute favorisierten anthropogenen CO<sub>2</sub>-Problem weitere offene Fragen stehen, deren Beantwortung durchaus entscheidenden Einfluß auf Weichenstellungen für die Zukunft der Menschheit haben können.

Prinzipiell kann man folgende Arten der Umwandlung von Strahlungsenergie in andere Energieformen unterscheiden:

<sup>6</sup>Siehe dazu auch den Bericht von Wolfgang Böhme in den Sitzungsberichten Band 82.

<sup>7</sup>das ist ein Mittelwert der mir zugänglichen Angaben mit Streubereich von 60%, siehe dazu auch Climate Change, *Andrea Stocker, Andreas Türk* Universität Graz 2002,

<sup>8</sup>siehe dazu *Ebeling und Feistel*, Chaos und Kosmos, Seite 227, Spektrum Akademischer Verlag 1994

### 1. **Direkte Umwandlung der Strahlungsenergie in chemische Bindungsenergie (Photosynthese, natürlicher Prozess).**

Die hier ablaufenden physikalischen Prozesse der Energieumwandlung beinhalten die Anregung von Elektronen des Chlorophylls durch die Absorption von Photonen (im wesentlichen nur durch solche aus dem Wellenlängenbereichen  $0.4 - 0.5 \mu\text{m}$  und  $0.65 - 0.7 \mu\text{m}$ ). In nachfolgenden chemischen Prozessen wird dann durch Elektronenabgabe ein energiereiches Molekül, z.B. ATP (Adenosintriphosphat) gebildet, welches als Energiequelle für die nachfolgende Bildung von Glukose dient. Dabei wird  $\text{CO}_2$  aus der Umwelt aufgenommen und Sauerstoff abgegeben.

Dieser Primärprozess benötigt bei einem Wirkungsgrad von ca. 25 % den Energieeintrag von einigen 10 eV durch die Photonen der Strahlung.

Eine Pflanze setzt die auf sie einfallende Strahlung mit einem Wirkungsgrad unterhalb von 3 % um, da sie nur bestimmte spektrale Anteile der Einstrahlung nutzt von denen noch weitere Anteile durch Reflexion verloren gehen. Das Resultat dieses Umwandlungsprozesses ist in Biomasse gespeicherte (chemische) Energie.

In der Praxis liegen die Wirkungsgrade jedoch noch niedriger. Durch intensive Landwirtschaft lässt sich etwa 1% erreichen.

Die energetische Nutzung von Biomasse verlangt deshalb beträchtliche Flächen und steht damit in Konkurrenz zur Produktion von Nahrungsmitteln, liefert andererseits gespeicherte Primärnergiequellen (z.B. Holztrockenmasse) und ist daher eine zeitlich stets verfügbare Primärenergiequelle mit Leistungsdichten bis zu  $0.5 \text{ kWh/kg}$ . Die  $\text{CO}_2$ -Bilanz ist ausgeglichen (zumindest gemittelt über einige Jahre).

### 2. **Direkte Umwandlung der Strahlungsenergie in Elektroenergie (Photovoltaik, technologischer Prozess).**

Der sogenannte innere Photoeffekt, konkret der photovoltaische Effekt, wird genutzt, um in Halbleitern Elektronen-Loch-Paare zu erzeugen und diese durch entsprechende Strukturierung und Dotierung des Materials zu trennen. Für den Elementarprozess in Silizium muss die Energie von etwa 0.6 eV aufgewendet werden. Daher sind schon im Infrarotbereich Umwandlungen möglich. Ist die Energie der Photonen höher (das Einstrahlungsmaximum liegt im grünen Bereich) so wird die überschüssige Photonenenergie in Wärme umgesetzt, welche das Abprodukt des Wandlungsprozesses ist, bzw. reflektiert. Darüberhinaus treten Rekombinationseffekte auf.

Aus diesem und weiteren Gründen liegt der Wirkungsgrad (theoretisch, Si) bei 33 % (Shockley-Queisser-Limit).

Das Resultat dieses Umwandlungsprozesses ist Elektroenergie.

In Deutschland beträgt die mittlere Einstrahlungsdichte  $120 \text{ W/m}^2$ , bei Realisierung eines Wirkungsgrades von 30% erreicht man daher theoretisch eine Jahresproduktion von etwa  $350 \text{ kWh/m}^2$ . Wegen der täglichen und jahreszeitlichen Schwankungen (zwischen Null und einem breitenbedingten Maximum) hängt die großtechnische Nutzung von der Lösung des Speicherproblems ab. Nur wenn die Langzeitspeicherung großer Mengen von Elektroenergie technisch möglich wird (Faktor 20-30 gegenüber heutigen Ladekapazitäten), kann die Solarzellentechnik in großem Maßstab zur Elektroenergieerzeugung beitragen. Darüberhinaus darf wegen der geringen Energiedichte das Problem der Flächenbereitstellung nicht unterschätzt werden.

### 3. **Direkte Umwandlung von Strahlungsenergie in Wärme durch Absorption (technologischer Prozess) und Speicherung der Wärme bzw. Umwandlung in andere Energiearten in nachfolgenden technologischen Prozessen.**

Hier sind zwei Möglichkeiten zu unterscheiden:

a) Die Absorption von Strahlungsenergie in einem Kollektor und Umwandlung in Wärme bei gleichzeitiger Reflexion der vom Kollektor emittierten Wärmestrahlung (ca. 400 K) an Abdeck-



scheiben (selektiv, Treibhauseffekt). Die Wirkungsgrade hängen stark von der im Mittel einstrahlten Energie und der Temperaturdifferenz zwischen Kollektor und Umgebung ab. Sie liegen zwischen 0.6 und 0.9. Die Leistungsdichte bewegt sich im Bereich um  $500 \text{ W/m}^2$ . Im Verbund mit effektiven Wärmespeichern bietet sich hier ein großes Potential für die Bereitstellung von Niedertemperaturwärme (Heizung, Warmwasser).

b) Absorption mit Aufkonzentration der einfallenden Strahlung durch optische Geräte. Dadurch können hohe Temperaturen im Absorber erreicht werden, so daß mit nachfolgenden Wandlungsprozessen Elektroenergie erzeugt werden kann oder auch direkte Umwandlung der Wärme in chemische Energie erfolgen kann. Bisher erreichte Wirkungsgrade liegen bei 0.1, das Potential für ihre Erhöhung scheint groß zu sein. Die Leistungsdichten (im Absorber) bewegen sich im Bereich von einigen zehn  $\text{kW/m}^2$  bis zu über  $800 \text{ kW/m}^2$ .

Auch hier sind die tageszeitlichen Schwankungen zu beachten, hinzu kommt, daß Aufkonzentration nur bei direkter Einstrahlung möglich ist (daher Bevorzugung von Standorten mit wenig Bewölkung im jahreszeitlichen Durchschnitt). Insbesondere in südlichen Breiten hat der großtechnische Einsatz zweifellos eine Perspektive, zumal bei einer zukünftigen Wasserstoffproduktion das Speicherproblem in den Hintergrund treten würde.

4. **Wasserkraft**, Umwandlung von Strahlungsenergie über atmosphärische Prozesse, begleitet von Gravitationseffekten in Fallenergie von Wasser. Direkte Umwandlung in Elektroenergie.

Die Leistungsdichte liegt bei  $2.5 \cdot 10^5 \text{ kWh/a} \cdot \text{m}^2$ .

Von Vorteil ist das kontinuierliche Angebot und damit die hohe zeitliche Verfügbarkeit. Das vorhandene Potential ist vor allem in Entwicklungsländern noch wenig genutzt, jedoch insgesamt begrenzt. Großanlagen können beträchtliche Umweltprobleme nach sich ziehen.

5. **Windkraft**, Strömungsenergie von Luft, direkte Umwandlung in Elektroenergie durch Windkraftanlagen.

Die Leistungsdichte des Windes beträgt etwa  $200 \text{ W/m}^2$  bei Windgeschwindigkeiten von  $5.5 \text{ m/s}$ . Die maximal nutzbare kinetische Energie liegt bei etwa 59% (Betz'sches Gesetz) dieses Wertes. Daneben tritt wegen des schwankenden Angebots auch hier das Speicherproblem in den Vordergrund. Bei sehr großen installierten Leistungen sind Maßnahmen zur kurzfristigen Leistungsregelung im Netz notwendig, darüberhinaus sind sehr große Reserveleistungen (bis zu 90% der installierten Windkraftleistung) nötig, um windfreie (und Orkan-) Zeiten zu überbrücken.

6. **Meereswellenenergie**: Energiedichten schwanken je nach Gewässer, Entfernung von den Küsten, Windströmungen und anderen Parametern sehr stark. Für küstennahe Abschnitte der Nordsee kann man von Mittelwerten um  $14 \text{ kW/m}$  ausgehen.

## Bindungsenergie der Atomkerne

Die heute auf der Erde vorhandenen Atomkerne sind vorwiegend vor der Entstehung unseres Planetensystems gebildet worden. Leichte und mittelschwere Kerne (bis zum Fe) entstanden durch Kernfusionsprozesse im Inneren von Sternen, spezielle wie Wasserstoff und seine schweren Isotope schon in Frühphasen des Universums, die schwereren aus den leichteren durch Neutroneneinfang und nachfolgende radioaktive Zerfälle wahrscheinlich im Gefolge einer Supernova.

Die Bindungsenergie pro Nukleon wächst mit der Massenzahl bis zum Eisen und nimmt danach wieder ab ( ${}^4\text{He} - 7.1 \text{ MeV/A} \dots {}^{56}\text{Fe} - 8.8 \text{ MeV/A} \dots {}^{235}\text{U} - 7.6 \text{ MeV/A}$ ).

Hieraus und aus der Verteilung der auf der Erde vorhandenen Elemente ergeben sich zwei Arten der Umwandlung von Bindungsenergie der Kerne in andere Energieformen durch technologische Prozesse.

1. Kernspaltung: die Spaltung schwerer Kerne (etwa  $U^{235}$ ) in zwei mittelschwere.  
Elementarprozess: Bei der Spaltung von  $^{235}U$  durch ein thermisches Neutron wird Bindungsenergie von etwa 200 MeV freigesetzt, davon ca. 180 MeV als kinetische Energie der beiden mittelschweren Spaltproduktkerne und ca. 20 MeV beim nachfolgenden radioaktivem Zerfall der stark neutronenüberschüssigen Spaltproduktkerne. Diese selbst und ihre Tochterkerne sind das Abfallprodukt des Prozesses.  
Bei der vollständigen Spaltung von 1 g  $^{235}U$  werden 25 MWh zu 98 % als kinetische Energie der Spaltprodukte freigesetzt.

Im eigentlichen Energiewandlungsprozess und in nachfolgenden Brennstoffzyklusprozessen entstehen Abprodukte in Form von radioaktiven Spaltprodukten sowie Plutonium und sogenannte minore Actinide. Diese müssen umweltverträglich von der Bio- und Ökosphäre ferngehalten werden. Die gegenwärtige technologische Entwicklung hat das Ziel, in Kernanlagen der Generation IV den gesamten verfügbaren Kernbrennstoff (Uran, Thorium) über Brutprozesse einer Verwertung zuzuführen, die übrigbleibenden Actiniden in kürzerlebige radioaktive Kerne zu transmutieren und damit den sicheren Einschluß auf etwa 500 Jahre zu begrenzen.

Die Umsetzung der inzwischen technisch möglichen Lösungen in großtechnische Anlagen mit akzeptablen<sup>9</sup> Sicherheitseigenschaften kann über einen Zeitraum von mehr als 1500 Jahren beträchtliche Beiträge zur Energieversorgung der menschlichen Gesellschaft beitragen.

2. Kernfusion: die Fusion von auf der Erde reichlich vorhandenem Wasserstoff und Deuterium in mehrstufigen Prozessen zu Helium.  
Elementarprozess: Bei der Fusion von Deuterium und Tritium (welches in einem begleitenden Prozess aus Lithium gewonnen werden muß) wird die Energie von 17.6 MeV freigesetzt, davon 14.1 MeV als kinetische Energie des bei der Reaktion emittierten Neutrons.  
Die Verbrennung von 1 g Deuterium-Tritium-Gemisch setzt etwa  $1.7 \cdot 10^2$  MWh frei (davon ca. 80% als kinetische Energie schneller Neutronen).  
Die Entscheidung über die technische Machbarkeit mit akzeptabler Stabilität von großtechnischen Fusionsanlagen ist mit der Realisierung der internationalen Anlage in Frankreich zu erwarten.  
Ein positiver Ausgang würde bedeuten, daß diese Quelle der Menschheit über Jahrtausende zur Verfügung steht.

## **Erdwärme**

Das riesige Potential der Erdwärme (ein Wärmereservoir von etwa  $3 \cdot 10^{18}$  GWh) ist wohl nur bedingt durch seinen Anteil in der Erdkruste unter den Landflächen nutzbar, wobei auch nur die oberflächennahen Potentiale von Bedeutung sind.

Bei Temperaturen des Gesteins (oder des Wassers) ab 400 K ist die Wandlung in Elektroenergie möglich, liegt sie darunter ist nur die Nutzung zur Wärmebereitstellung sinnvoll.

Abschätzungen gehen von einem Potential von etwa  $3 \cdot 10^6$  GWh/a mit Wirkungsgraden von 0.35 bei der Elektroenergieerzeugung aus.

## **Gezeitenenergie**

Abschätzungen des Potentials und der erreichbaren Wirkungsgrade bei der Wandlung in Elektroenergie zeigen, daß der Beitrag gering bleiben wird.

---

<sup>9</sup>dies ist aus meiner Sicht eher ein gesellschaftliches denn ein wissenschaftlich-technisches Problem

Damit ergibt sich folgendes Schema für die Klassifizierung von Primärenergieträgern<sup>10</sup>

<b>Primäre Energiequellen</b>			
<b>Quelle</b>	<b>Umwandlungsprozess</b>	<b>Energieumsatz Wirkungsgrad</b>	<b>erzeugter Energie-träger</b>
Strahlungsenergie	Elektronenanregung in Chlorophyll	primär 23% – 33% insgesamt < 3%	Biomasse
Strahlungsenergie	photoelektrischer Effekt	theoretisch ca. 30%	Elektroenergie
Strahlungsenergie	Absorption von Strahlung in Materie	maximal 90% bei passiven Kollektoren, > 10% bei Aufkonzentration	Nieder- und Hochtemperaturwärme
Strahlungsenergie + Gravitation → Wasserkraft	potentielle Energie (kinetische Energie) → Elektroenergie	abhängig von Fallhöhe und Wasserdurchsatz $\eta = 75\% - 90\%$	überwiegend Elektroenergie
Strahlungsenergie → Windströmungen	kinetische Energie → Elektroenergie	maximal 59% bei Minderung der Windgeschwindigkeit auf 1/3	Elektroenergie
Strahlungsenergie → Meereswellen	kinetische Energie → Elektroenergie	max. $\eta = 24\%$	Elektroenergie
Bindungsenergie schwerer Kerne	Kernspaltung → kinetische Energie	heute 30% – 35%, in Zukunft bis 50%	Wärme, Hochtemperaturwärme → Elektroenergie
Bindungsenergie leichter Kerne	Kernfusion kinetische Energie	?	Wärme, Hochtemperaturwärme → Elektroenergie
Erdwärme	Wärme hoher Temperatur	Wirkungsgrad um 35%	Elektroenergie

Aus den dargestellten physikalischen Sachverhalten ergeben sich zunächst folgende Schlußfolgerungen:

- Für die Bereitstellung auch wachsender Mengen hochwertiger Endenergie stehen der menschlichen Gesellschaft auf lange Sicht ausreichende natürliche Energiequellen zur Verfügung. Dies gilt auch für Zeiten nach der Erschöpfung fossiler Quellen.  
Zu beachten ist dabei jedoch, daß massive energetische Eingriffe des Menschen in den natürlichen Strahlungshaushalt (manchmal mit dem Begriff *Solarzeitalter* verknüpft) durchaus Auswirkungen mit heute noch schwer bewertbaren Folgen auf die von der Strahlungsenergie getriebenen natürlichen Prozesse haben kann.
- Die Menge der von der menschlichen Gesellschaft an die Umwelt zurückgegebenen entwerteten Energie bleibt auch bei noch wachsendem Energieverbrauch im globalen Maßstab um ein bis zwei Größenordnungen unterhalb des globalen Entropieexports<sup>11</sup>.
- Ganz wesentlich für die Bereitstellung der benötigten Endenergien und der dabei auftretenden Wechselwirkung mit der natürlichen Umwelt werden die mit der Umwandlung und ihren Techno-

<sup>10</sup>Eine ausführliche Zusammenstellung der wichtigsten physikalischen Daten findet man in der Vorlesung von D. Pelte, *Die Zukunft unsere Energieversorgung* unter der Web-Adresse: <http://energie1.physik.uni-heidelberg.de/vrlsg/start.htm>.

<sup>11</sup>Allerdings können lokal durchaus beträchtliche Störungen auftreten. Siehe hierzu auch K. Bernhardt und E.A. Lauter in *Globale physikalische Prozesse und Umwelt*, in Zeitschrift für Meteorologie, Band 27, Heft 1.

logien verbundenen **Stoffwandlungsprozesse**. Dabei muß die gesamte Kette des jeweiligen technologischen Wandlungsprozesses von der Errichtung der Anlagen über den Betrieb einschließlich der Zuführung von Brennstoffen, der mit ihnen verbundenen Vorstufen und/oder anderen Betriebsmedien, deren Abprodukte und schließlich die Entsorgung der stillgelegten Anlagen bewertet werden. Zu berücksichtigen ist, daß die auftretenden Stoffströme Energie binden und daher neben Stoffbilanzen und Stoffentropien auch Einflüsse auf die Energierücklaufzeiten (Erntefaktoren) der gesamten Wandlungskette eine Rolle spielen.

Letztendlich bleiben aus der Sicht des bisher Gesagten nur zwei langfristige Optionen: Die direkte Nutzung der Solarstrahlung und die Kernenergie. Alle anderen Varianten (Wasserkraft, Windenergie, Biomasse, Geothermie usw.) können die entstandene Situation entspannen, lokale Lösungen bereitstellen und sicher den anthropogenen CO<sub>2</sub>-Ausstoß vermindern, das Energieproblem der menschlichen Zivilisation lösen können sie nicht.

Der grundsätzliche Unterschied beider Optionen aus physikalischer Sicht liegt in der Darbietungsart: Kernenergie (Spaltung und Fusion) ist **gespeicherte Energie** mit sehr großen Energiedichten (physikalische Grundlage ist die starke Wechselwirkung), kann also entsprechend dem Bedarf verwertet werden, Solarstrahlung ist ein **Energiestrom** mit fluktuierender Stärke und sehr geringer Energiedichte (Basiswandlungsprozesse werden durch die elektroschwache Wechselwirkung gesteuert), die diesem Strom entnommene Endenergie muß zwischengespeichert werden.

Solarstrahlung liegt ständig in großer Menge an, ist jedoch in äußerst komplexer Art mit dem Energiehaushalt von Atmosphäre und Biosphäre gekoppelt, wieviel man diesem Haushalt für andere Zwecke (der Weiterentwicklung der menschlichen Zivilisation) entnehmen darf ist nicht bekannt. Kernenergie ist aus der Sicht der bekannten und entstehenden Technologien eine langfristige Quelle, ihre umfassende Nutzung verlangt jedoch die **globale Lösung** der Sicherheits- und Akzeptanzprobleme.

Diese und weitere physikalisch bedingte Unterschiede widerspiegeln sich in der gegenwärtigen Energie-debatte. Oft werden sie als Argument für oder gegen die jeweilige Quelle benutzt. Speziell in Deutschland artete die Debatte streckenweise in einen Glaubenskampf aus, der die physikalischen Sachverhalte verkürzt, manchmal sogar verdreht nutzt, um die öffentliche Meinung für diese oder jene Variante zu beeinflussen.

Die heutigen physikalischen Kenntnisse und der auf ihnen basierende technologische Entwicklungsstand sowie die Vielzahl der offenen Fragen, die einer Antwort bedürfen, verbieten meiner Meinung nach einseitige Entscheidungen.

Die einzige Quelle, die der menschlichen Zivilisation für die Bewältigung ihrer globalen Probleme zur Verfügung steht und die **keinem Entropiegesetz** unterliegt, ist die Vermehrung des menschlichen Wissens und die Umsetzung dieses Wissens in neue und weiterentwickelte Technologien. Welche Technologien uns in 50 Jahren zur Verfügung stehen, können wir heute nicht wissen. Jedoch nur die werden zulässig sein, die den Widerspruch zwischen der weiteren Entwicklung der menschlichen Zivilisation, ihrer damit verbundenen Rückwirkung auf die natürliche Umgebung und deren Gleichgewichte in für beide Seiten erträglichen Grenzen halten. Das gilt nicht zuletzt für die langfristige Sicherung der energetischen Basis einer sich entwickelnden Menschheit.