

Hardy Seliger hardy@autozynik.de

Energie, Stoffströme und Bilanzierungen in Ökologie und Technik

Gliederung

Einleitung

Energie- und Stoffströme

- in der Natur
 - Sonnenstrahlung
 - Thermodynamik
 - Nahrungskette
 - Bilanz
 - Reine Solarstrahlung
 - Biomasse
- anthropogen
 - Fossile Brennstoffe
 - Energieverbrauch
 - Auswirkungen auf die Umwelt
 - Treibhauseffekt
 - Versauerung
 - Eutrophierung
 - Regenerative Energien
 - Photovoltaik
 - Biomasse
 - Vergärung
 - Wasserstoffgewinnung
 - Wirkungsgradevergleich

Stoffstrom des Eisens

Schluss

Einleitung

In der Evolutionsgeschichte der Erde ist über 4,5 Milliarden Jahre aus einer lebensfeindlichen Uratmosphäre, die größtenteils aus Kohlendioxid und kaum aus Sauerstoff bestand, eine Atmosphäre gediehen, die optimale Lebensbedingungen für die Biosphäre schuf. Stets unterlag diese Entwicklung des Lebens einem Fließgleichgewicht mit der Atmosphäre. Der Mensch, der bisher relativ kurz diesen Planeten besiedelt, ist seit der Industrialisierung eifrig dabei, dieses Fließgleichgewicht auszuhebeln. Heute passiert das bei vollem Bewusstsein der Folgen.

In dieser Studienarbeit werden die natürlichen und anthropogenen Energie- und Stoffströme behandelt, die zu einem ökologischen Verständnis beitragen sollen.

Energie- und Stoffströme in der Natur

Sonnenstrahlung

Die Sonne versorgt die Erde mit einer Strahlungsleistung von rund 178.000 TW (1 Terawatt = 10^{12} W), wovon knapp 80% ungenutzt wieder ins Weltall abgestrahlt wird. Von den restlichen 20% sind der größere Teil (40.000 TW) an der Verdunstung von Oberflächenwasser und ein kleinerer Teil (350 TW) an der Entstehung von Winden beteiligt. Lediglich 100 TW nutzen die Pflanzen zur Photosynthese. Das wäre ein Wirkungsgrad von 0,01 %, den man aber so nicht erheben kann, denn im Zusammenspiel der Natur gehören auch klimatische Verhältnisse zu den Rahmenbedingungen der Biosphäre. Weiterhin sind die Geothermik mit 30 TW und der Mond mit 3 TW noch an der Bilanz beteiligt, die aber vergleichsweise wenig dazu beitragen. (Daten: G. R. Davis, 1990, Energy for Planet Earth, in Scientific American 263 – bzw. aus Chr. Sartorius)

Thermodynamik

Nimmt man nun die beiden thermodynamische Hauptsätze zur Hilfe, um Bilanzen zu beschreiben, kann man folgendes sagen: Es kann keine Energie erzeugt werden oder verloren gehen, nur umgewandelt werden (1. Hauptsatz der Thermodynamik– Energieerhaltungssatz). Die Strahlungsenergie, die von der Sonne durch Kernfusion ausgeht, wird dort durch Umwandlung der Atome von energiereicherem einwertigen Wasserstoff in energieärmeres

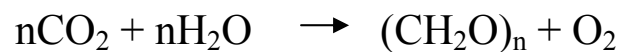
zweiwertiges Helium erzeugt. Das Helium hat zwei Valenzelektronen in der ersten Schale und besitzt somit die Edelgaskonfiguration, was es nicht weiter reaktiv macht. Streng genommen sind regenerative Energien doch endlich, die auf Solarenergie basieren, denn auch das Potential der Sonne ist in einigen Milliarden Jahren erschöpft, aber aufgrund dieser langen Zeitspanne kann die Sonne als relativ unbegrenzte Energiequelle angesehen werden.

$$E_{\text{solar}} = W_{\text{nutz}} + W_{\text{diss}}$$

Zur Nutzenergie gehören die 20%, die nicht wieder in den Weltraum reflektiert werden. Der Rest ist Dissipationsenergie (wieder abgestrahlte Wärme). Die 20% Nutzenergie bilden die Energiequelle terrestrischen Lebens. Jedoch wird auch davon nur ein geringer Teil wirklich genutzt (zum Wachstum der Pflanzen beispielsweise). Bei jedem Umwandlungsprozess muss zusätzlich von einem Verlust eines Teils der Energie ausgegangen werden, der aus abgestrahlter Wärme besteht. Wenn wir Menschen einen Schokoriegel konsumieren, welcher eine Art von Energieträger mit hohem Ordnungsgrad darstellt, werden wir diesen kaum komplett in kinetische Energie umwandeln können nach der Formel Arbeit (Energie) = Kraft * Weg. Neben dem herkömmlichen Energiebedarf für den „Unterhalt“ des Körpers geben wir ständig Wärme ab, da wir uns auf 37°C halten und eigentlich unsere Körpertemperatur stets auf einen Ausgleich mit der Umgebungstemperatur bedacht wäre. Das führt uns zum 2. Hauptsatz der Thermodynamik (Entropiesatz, 1865 Rudolf Clausius; Entropie (griechisch): wenden, eine bestimmte Richtung geben). Ausgegangen wird hier von einem geschlossenem System, d.h. im Falle unseres Planeten müssten wir das ganze Weltall miteinbeziehen, um nicht dem 1. HS zu widersprechen (nach der Formulierung von Clausius: Die Energie des Weltalls ist konstant). *„Jede Energie und Materie streben von selbst nach der wahrscheinlichsten Verteilungsform.“* Das soll heißen, dass sich alles möglichst gleichmäßig verteilen will, was dann einen Zustand mit niedrigem Ordnungsgrad und hoher Entropie darstellt. Als Beispiel könnte man Luft (in einem geschlossenem Gefäß/System) anführen, die überall die gleiche Konzentration von Stickstoff, Sauerstoff und den übrigen Bestandteilen besitzt. Jedoch verteilen wir Menschen uns nicht in Einzelteilen im ganzen Weltall, sondern weisen einen deutlich höheren Ordnungsgrad im Gegensatz zur Entropie auf. Dazu ist allerdings eine externe Energiezuführung nötig. Vielleicht ein Schokoriegel. Genauso verhält es sich mit der Biosphäre. Sie kann durch die stetige Solarstrahlung eine Ordnung erreichen, die eigentlich fern dem thermodynamischen Gleichgewicht ist. Es ist sogar durch die entstandene Komplexität der Moleküle auf der Erde eine Evolution geschaffen worden.

Nahrungskette

Nach 4,5 Milliarden Jahren der Existenz der Erde hat sich ein Stoffkreislauf gebildet, der ohne die Sonne unmöglich wäre. Photoautotrophen Primärproduzenten, also grüne Pflanzen, stehen heute am Anfang dieses Kreislaufs. Sie beziehen ihre Wachstumsgrundlage neben Sonnenlicht (photo-) aus energiearmen anorganischen (autotroph; Fixierung von CO₂) Verbindungen wie Kohlendioxid und Wasser. Bei der Photosynthese wird Sauerstoff freigesetzt, das die lebensnotwendige Basis der Atmung darstellt.



An zweiter Position stehen herbivore Lebewesen (Pflanzenfresser z.B. Mäuse). Diese sogenannten Konsumenten 1. Ordnung können dann wiederum den Konsumenten 2. oder 3. Ordnung als Nahrung dienen. Konsumenten 2. Ordnung sind Karnivore (Fleischfresser, z.B. Bussard), während Konsumenten 3. Ordnung das Ende der Nahrungskette darstellen (Gipfelraubtiere, z.B. Braunbär als Karnivore und Elefant als Herbivore, wenn man den Menschen mal außer Acht lässt). Alle Konsumenten und die nichtgrünen oder zur Chemosynthese fähigen Pflanzen ernähren sich heterotroph, d.h. sie wandeln organische Materie zu Energie oder körpereigener Substanz um. Die Nahrungspyramide gliedert sich wie folgt:



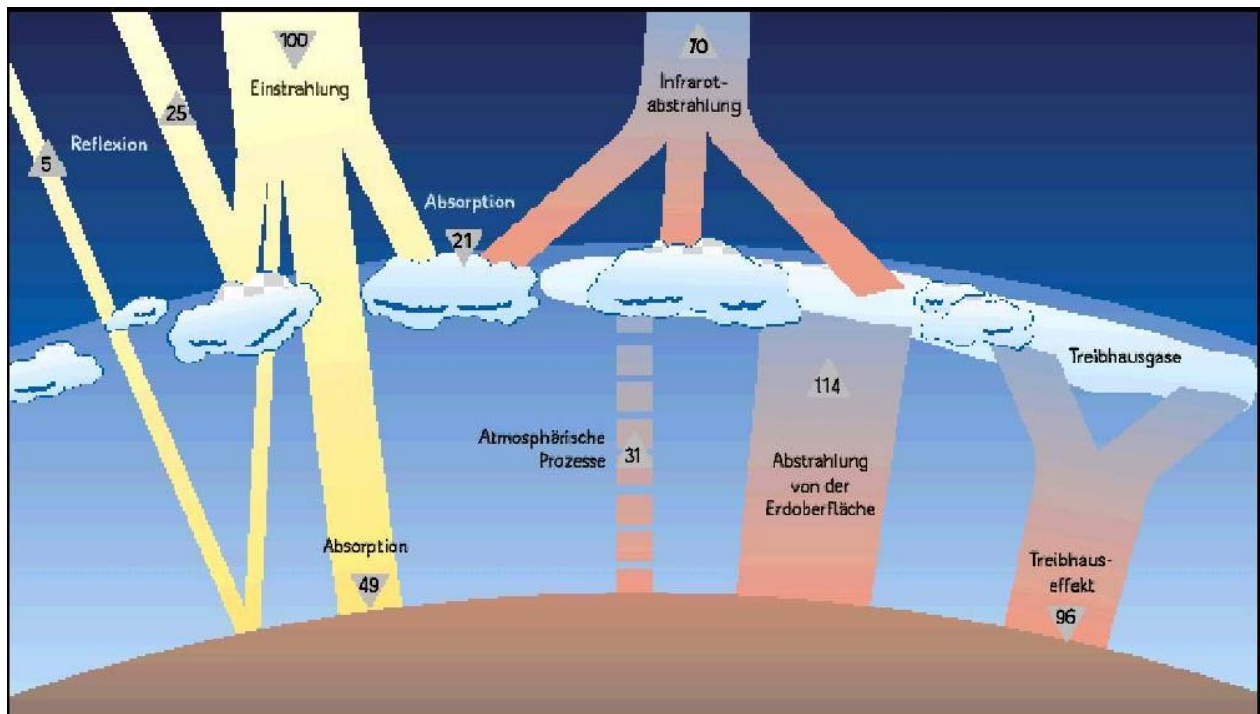
Es gibt Ausnahmen, in denen sich die Pyramide umdreht, wie z.B. in der Tiefsee, wohin kein Sonnenlicht dringt oder in vereinzelt Ökosystemen im Winter, wo lebendige Tiere häufiger als Pflanzen sind. Am Ende des Kreislaufs organischer Materie stehen die Destruenten. Sie bauen tote Materie z.B. zu Humus (organisch) ab oder mineralisieren sie zu energiearmen anorganischen Substanzen (Reduzenten machen nur letzteres). Damit stehen die Substanzen wieder den Produzenten zur Verfügung. Vertreter dieser Gruppe sind Pilze, Flechten und Bakterien.

Bei jeder Stufe der Nahrungskette gehen 80 – 90% der zugeführten Energie als Wärme verloren, was eine Steigerung der Entropie bedeutet. Es ist ein verzweigtes System, das die Nahrungskette innerhalb bildet. In einem Ökosystem besteht ein Wirkungsgefüge von Lebewesen und deren anorganischer Umwelt, das einander sich selbst reguliert. Freigesetzte Stoffe dienen wieder als Nahrung.

In einem Fall ist diese Kette durchbrochen: Kohle und Erdöl sind Ablagerungen aus der Biomasse von Primärproduzenten. Vielleicht zur Entfernung von CO₂ aus der Atmosphäre, so spekuliert J. Lovelock (Gaia: Die Erde ist ein Lebewesen, 1991).

Bilanz

- Reine Solarstrahlung



Bilanz der Sonneneinstrahlung	spezifische Energie	
gesamt	342 W/m ²	100%
Biomasse an Land	genutzt	0,3%
Biomasse im Wasser	genutzt	0,07%
gesamte genutzte E für Biomasse		0,12%

- Biomasse

Zwischen den einzelnen Stufen der Nahrungskette ist der Wirkungsgrad zur Erhaltung höher geordneter Zustände 10 - 20%. Bei der Photosynthese alleine werden rund 40% umgesetzt.

Im der gesamten Natur lässt sich da nur schwerlich eine Wirkungsgradbetrachtung durchführen, da diese ein stetiger Kreislauf ist und dieser im Endeffekt alle aufgenommene

Energie als Wärme wieder abstrahlt (hier wird nur der natürliche Prozess berücksichtigt in einem kleineren temporären Rahmen. Eingriffe des Menschen in die Natur werden vernachlässigt, obwohl diese schon deutlich zu bemerken sind: Treibhauseffekt, Artensterben etc.). Man kann aber sagen, dass ein Gleichgewicht zwischen Entropie und Syntropie (negative Entropie oder Zustand höherer Ordnung) theoretisch herrscht, das heißt, dass jegliche Solarenergie, die zum Erhalt und zum Aufbau neuer Syntropie verhilft, in gleichem Maße als Wärme sich verflüchtigt und damit die Entropie steigert. In naturbelassenen Ökosystemen ist das noch nachzuvollziehen: Es wächst nicht mehr aber auch nicht weniger, es hält sich insgesamt die Waage und reguliert sich selbst (s.o.).

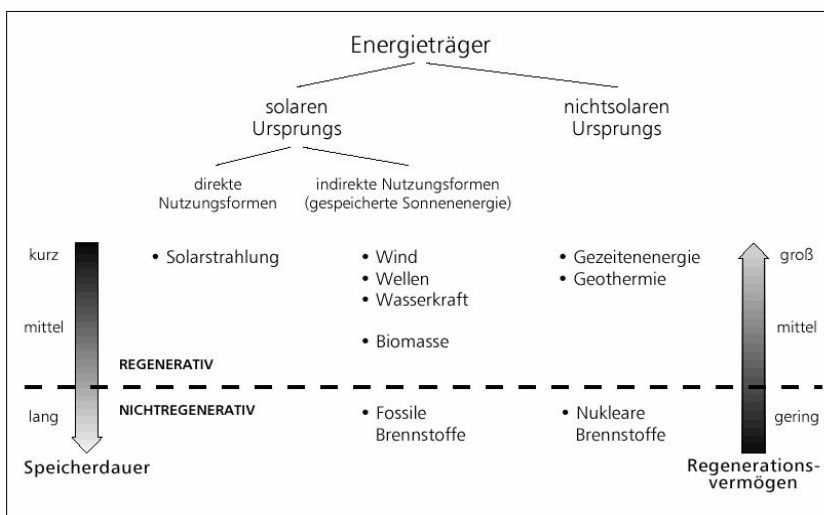
Betrachtet man den Syntropiezuwachs auf der Erde von Anbeginn deren Entstehung, so ist durchaus ein Wirkungsgrad erkennbar, wenngleich dieser sicherlich sehr klein ist. Aber sobald die wichtigste Energiequelle, die Sonne, versiegt, wird auf der Erde die totale Entropie herrschen und dieses Universum den sogenannten „Wärmetod“ erleiden. Hermann von Helmholtz stellt dieses von Kelvin 1852 zuerst beschriebenes Ereignis folgendermaßen dar: *„Alle Energie wird schließlich in Wärme bei gleichförmiger Temperatur umgewandelt sein, und alle natürlichen Prozesse müssen aufhören, kurz, das Weltall wird von da an zur ewigen Ruhe verurteilt sein.“*

Anthropogene Energie- und Stoffströme

Es ist ja dem Menschen eigen, Wünsche zu besitzen, die mit dem „im Einklang mit der Natur zu sein“ nicht viel gemein haben. Denn dann wäre er wohl kein Mensch mehr und die Unterscheidung zum Tier hielte sich an Oberflächlichkeiten auf.

Thermodynamisch betrachtet ist der Mensch erst einmal nichts außergewöhnliches sondern lediglich ein offenes System, wie vieles andere auch. Er ist seiner Umwelt gegenüber offen.

Er nimmt und er gibt.



Systematik der Energieträger

Fossile Brennstoffe

Zu den fossilen Brennstoffen gehören sämtliche im Erdinneren eingelagerten Energieträger, wie Kohle, Erdöl und Erdgas. Ursprünglich aus Biomasse über Jahrtausende entstanden, zählen diese Substanzen heute zu den meist verwendeten Energielieferanten zur Wärme- und Stromgewinnung. Kernenergie gehört nicht zu den fossilen Brennstoffen, ihr gebührt ein eigenes Kapitel, das hier nicht behandelt wird.

Fossile Brennstoffe werden als nichtregenerativ bezeichnet, ihre Nutzung wird also endlich sein. Die Prognosen über die Reserven sind verschieden, aber sicher ist, dass auf der Erde stetig mehr Energie gebraucht wird, um Lebensstandards zu halten oder zu verbessern. Die Folgen des massiven Energiekonsums sind zweitrangig, solange das Geld und einflussreiche Lobbys diese Szenerie beherrschen. Es wird auf Kosten der Natur gewirtschaftet und das wird sich mittel- und unmittelbar ebenfalls auf die menschliche Gesundheit auswirken.

Energieverbrauch

Zeit	Bevölkerung in Mio.	Pro-Kopf-Verbrauch in kW	Energiequellen
vor 1750	5 - 10	0,1	Biomasse (Holz)
um 1750	700	0,3	Biomasse + Wasserkraft
ab 1900		+ 5% / Jahr mit Ausnahmen	natürliche + fossile
1989	5000	2 + ~1,5% / Jahr bis heute	natürliche + fossile + nukleare

Primärenergiebedarf der Welt 2001			Potential der fossilen Energieträger	
Energieträger	Bedarf in Mio. toe	in %	Bis Ende 2003 gefördert in Mrd. toe	Reserven
Kohle	2349	23,4	100	3243
Kernenergie	693	6,9		3.107.000 tons Uran
Erdöl	3513	35,0	135	552
Erdgas	2128	21,2	57	1450
Erneuerbare	1355	13,5		
gesamt	10038	100		

toe: Tonnen-Öl-Äquivalent bzw. Rohöleinheiten; 1 toe = 41,869 MJ = 11,63 kWh

Quellen: International Energy Agency (IEA) | Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)

Der Begriff Primärenergie zeigt den Inhalt der Energie vor seiner Umwandlung an, also die Leistung der reinen Energieträger ohne Wirkungsgrade. Zu Sekundärenergien zählen z.B.: Braukohlebriketts oder Raffinate. Die nächste Stufe ist die Endenergie (z.B. Strom, Fernwärme, Kraftstoffe), danach Nutzenergie (Heizwärme, Licht etc.) und zum Schluss die Energiedienstleistung (warmer Raum, Transport, Beleuchtung etc.). Zwischen all diesen Stufen müssen bei der Umwandlung Verluste in Kauf genommen werden. Dabei sind die

Wirkungsgrade sehr verschieden und abhängig von energierelevanter Infrastruktur, physikalischen Verlusten und am Ende natürlich dem Verbraucher.

Durch Multiplikation der Teileffizienzen erhält man die Gesamteffizienz:

$$\eta_{\text{ges}} = \eta_{\text{EE}} * \eta_{\text{NE}} * \eta_{\text{EDL}}$$

EE: Endenergieeffizienz; NE: Nutzenergieeffizienz; EDL: Energiedienstleistungseffizienz

Die Verluste sind so immens, dass der Gesamtwirkungsgrad auf unter 10% geschätzt wird.

Beispielrechnung von Dr. Thomas Göllinger, Uni Siegen, 2004 aus ermittelten und angenommenen Werten:

$$\eta_{\text{EE}} * \eta_{\text{NE}} * \eta_{\text{EDL}} = \eta_{\text{ges}} \quad 0,72 * 0,5 * 0,2 = 0,072$$

Auswirkungen auf die Umwelt

- Treibhauseffekt



Kohlendioxid ist das Produkt bei allen Verbrennungen fossiler Brennstoffe und auch der größte Faktor, der uns Sorgen bereitet.

Energiebedingte CO2 Emissionen in Mio. t; pro Kopf in t								
Jahr	Deutschl.	pro Kopf	Europa	pro Kopf	USA	pro Kopf	Welt	Pro Kopf
1990	969		4364		4852		21278	
2000	820	10	4170	7,2	5718	20,2	23901	3,9

Quelle: International Energy Agency (IEA)

Der anthropogene Einfluss auf den globalen Kohlenstoffkreislauf mag vielleicht im Verhältnis zum natürlichen gering sein, zeigt sich aber in der Wirkung alles andere als bescheiden.

Kohlenstoff(kreis)lauf in Mrd. t / Jahr				
	in die Atmosphäre	in die Biosphäre	Austrag in %	gesamt-C-Gehalt
Biomasse	110	110	49,5	3000
Ozeane	105	105	47,3	40.000
aus fossiler Verbrennung	5,5	0	2,5	
durch Entwaldung	1,5	0	0,7	
gesamt	222	215		
Boden				66.000.000
Atmosphäre				750

Quelle: Ökologieskript, Wildner

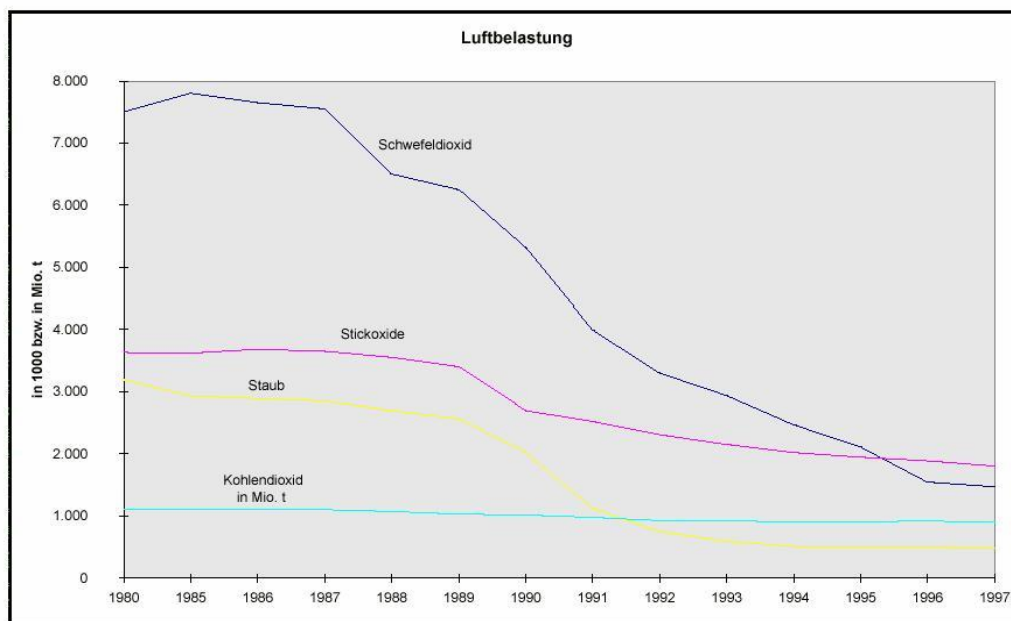
Verantwortlich für den CO₂-Anstieg in der Atmosphäre sind nicht allein die Verbrennungsprozesse, sondern auch das schrumpfende Potential, Kohlendioxid zu binden. Das ist hauptsächlich auf großflächige Rodungen im tropischen Regenwald zurückzuführen.

Der Treibhauseffekt resultiert aus der Strahlungsbilanz. 1/3 geht ohne Wirkung direkt wieder in den Weltraum zurück und 2/3 werden am Boden bzw. in der Atmosphäre absorbiert (siehe auch obige Grafik). Die von der Erdoberfläche reflektierte Sonnenstrahlung wird als Infrarotstrahlung wieder abgegeben und die Treibhausgase, zu denen neben CO₂ auch Methan (CH₄), Lachgas (N₂O), Schwefelhexafluorid (SF₆), Ozon (O₃) und einige FCKWs gehören, können diese absorbieren und als Wärme freisetzen. Der originäre „natürliche“ Treibhauseffekt sorgt für ein thermodynamisches Gleichgewicht im Wärme- und Energieaustausch, ohne den es auf der Erde 36°C kälter wäre (Jean-Baptiste Fourier, 1827). Die Folge dieses zusätzlichen anthropogenen Rückhalteeffekts ist eine weitere Erderwärmung, welche katastrophale Konsequenzen hat. Die Ozeane können diese drohende Erwärmung (um 3 – 9 °C bis zum Jahr 2100) zwar noch 3-4 Jahrzehnte puffern, dennoch bergen dergleichen Klimaveränderungen in einem für die Erdevolution viel zu kurzen Zeitintervall enorme Risiken für globale Ökosysteme. Es wird mit einer Verschiebung der Vegetationszonen in den mittleren Breiten, Versteppungen und Ausweitungen von Wüsten gerechnet. Gletscher und Polkappen schmelzen jetzt bereits in beängstigenden Ausmaßen und führen letztlich zum Anstieg der Meeresspiegel. Konsekutiv könnten in Zukunft ganze Landstriche (Bangladesh, Hamburg etc.) untergehen. Außerdem sind schon bemerkbar die Anzahl und Stärke der Unwetter und Naturkatastrophen gestiegen. Blicke in die Zukunft sind sehr gewagt bei einer derartigen Komplexität der Zusammenhänge zwischen Bio- und Atmosphäre, aber es gibt Stimmen, die behaupten, dass agrarwirtschaftlich der Düngereffekt des atmosphärischen Kohlendioxids sich positiv auf die Erträge auswirken kann. Hinzu kommt, dass durch die Verschiebung der Vegetationszonen auch die Anbaugelände von Nutzpflanzen in bisher unfruchtbare Regionen sich ausweiten können. Diesen Optimismus teilen allerdings die wenigsten Wissenschaftler. Die Natur macht zwar keinen Unterschied zwischen arm und reich, aber auch hier ist dennoch zu befürchten, dass die sogenannte dritte Welt am meisten unter den Klimaveränderungen zu leiden hat. Das wiederum könnte politische und sozioökonomische Konsequenzen haben, deren Dimensionen noch schwieriger abzuschätzen sind.

Die Versuche, dem CO₂-Ausstoß Herr zu werden (Kyoto-Protokoll, Sequestrierung, Förderung der regenerativen Energien etc.) sind hoffentlich ein Anfang für ein erfolgreiches Umdenken und Handeln. Sogar in den USA regt sich schon einiger ernstzunehmender Widerstand gegen George Bushs abwegige Ansicht der angeblichen wirtschaftlichen Nachteile (aktuelle Nachrichten zum G8 – Gipfel, Juli 05).

- Versauerung

Dank mittlerweile wirkungsvollen Technologien haben sich Stick- und Schwefeloxide (NO_x und SO_2) in Emissionen weitgehend eindämmen lassen, denn sie tragen erheblich zur Versauerung von terrestrischen und aquatischen Ökosystemen bei. Sie reagieren mit Wasser zu Säuren, was zu saurem Regen und das wiederum zum Absterben von Seen und Wäldern führt. Ursprünglich wurden Schornsteine nur erhöht, um die Konzentration der Schadstoffe zu minimieren, was die Folgen lediglich verlagerte (z.B. tote Seen in Skandinavien durch englische Industrieemissionen). Der additive Umweltschutz, wie Filteranlagen und andere Rückhaltetechnologien (auch End-of-Pipe-Technologien genannt), hat zwar das Problem des Schadstoffaustrags größtenteils gelöst, kostet aber zusätzlichen Energiebedarf und hinterlässt kontaminierte Schlämme und Filter, die deponiert werden müssen. Die Schadstofffracht ist damit auch nur verschoben, hochkonzentriert auf Deponien, aber noch nicht vernichtet. Da hier im Gegensatz zum CO_2 -Ausstoß die Folgen offensichtlicher und für jedermann erkennbar waren, bekam das Umweltverständnis in den 70er und 80er Jahren einen deutlichen Schub.



Entwicklung der klassischen Luftschadstoffe (in 1000 t) und CO_2 -Emissionen (in Mio. t) in Deutschland während der letzten beiden Jahrzehnte

- Eutrophierung

Hierbei handelt es sich um den Eintrag von mineralischen Nährstoffen in Böden und Gewässern. Dadurch steigt die Biomasseproduktion, die einen so hohen Sauerstoffbedarf zur Folge hat, dass dieser knapp wird und die Gewässer absterben bzw. die darin lebenden Organismen ersticken können. (Referenzvertreter PO_4^{3-} / siehe Phosphor-Kreislauf in der Fachliteratur)

Regenerative Energien

- Photovoltaik

Bei der direkten Nutzung der Solarenergie durch Photovoltaikanlagen kommt man dem Schritt der totalen Schadstoffvermeidung schon deutlich näher. Aber der Strom, der gar nicht erst erzeugt werden muss, ist noch der umweltfreundlichste. Was heißen soll, dass es dem Verbraucher obliegt, bei seiner Nutzung rationell zu haushalten. Er ist in der Energieumwandlungskette das schwächste Glied.

Die Funktionsweise einer Solarzelle basiert auf der Verwendung von hauptsächlich Silizium, einem Halbleiterelement. Mit Lichteinfall oder Wärmezufuhr wird es elektrisch leitend (lichtelektrischer Effekt). Silizium bietet den Vorteil, dass es als zweithäufigstes Element der Erdkruste in ausreichenden Mengen vorhanden und die Verarbeitung des Materials umweltverträglich ist. Bei der Solarzellenherstellung wird das Silizium definiert mit chemischen Elementen verunreinigt (dotiert). Dabei wird eine p-leitende Halbleiterschicht mit positiven Ladungsträgerüberschuss und analog eine n-leitende Halbleiterschicht (negativ) erzeugt. An der Grenzschicht, dem sogenannten p-n-Übergang, entsteht ein elektrisches Feld, wo Spannung abgegriffen werden kann. Der Wirkungsgrad beträgt durchschnittlich 12 – 14% der solaren Strahlungsleistung.

$$\eta_{PV} = 12 - 14\% \quad (\text{detailliertere Angaben siehe unten})$$

Eine Anlage in unseren Breiten mit rund 8m² Solarzellen liefert etwa 800 kWh pro Jahr, was ungefähr dem Verbrauch einer Person im Privathaushalt entspricht. Die Lebensdauer beträgt um die 25 Jahre.

Die Bilanz der verwendeten Stoffe sowie der Energiebedarf zur Herstellung von Photovoltaikanlagen ist gegenüber anderen regenerativen Energietechnologien wie Wind- und Wasserkraftanlagen schlechter. Auf letztere beiden werde ich nicht weiter eingehen.

- Biomasse

Mit der Photosynthese beginnt die Nahrungskette und damit die Bildung von Biomasse. Für die energetische Nutzung sind nur einige Pflanzen von größerem Nutzen:

Energiepflanzen	Rohstoffe	Produkte
Zuckerrüben, Kartoffeln, Mais, Getreide	Zucker, Stärke	Bioethanol (Kraftstoff)
Raps	Rapsöl	Biodiesel (RME), Naturdiesel, Rapsöl
Holz, Miscanthus, Getreideganzpflanzen, Stroh	Stückholz, Hackschnitzel, Ganzpflanze, Stroh, Biogas	Energie, Wärme
Quelle: Skript Urban		

Der Vorteil der Nutzung von Biomasse liegt in der Bilanzneutralität. Biomasse entstammt einem aktiven Kreislauf im Gegensatz zu fossilen Brennstoffen (zeitlich relativ betrachtet).

Nach wie vor wird viel mit Holz geheizt, aber es lassen sich auch diffizilere Brennstoffe aus Biomasse herstellen. Rapsölmethylester (RME) ist ein Produkt aus Rapsöl, dessen Glycerinanteil durch Methanol ersetzt wird, damit es besser verbrennt. Dieser Kraftstoff findet bereits breite Verwendung im PKW-Bereich. Auch Ethanol, der hauptsächlich aus Biomasse erzeugt wird, kann problemlos mit etwa 10 % dem Benzin zugemischt werden und dabei die Oktanzahl verbessern.

- Vergärung

Bei der anaeroben bakteriellen Zersetzung organischen Materials kann zu 60 – 70% Methan gewonnen werden (mit Wasser, Kohlendioxid und Rest), welches auch Hauptbestandteil des Erdgases ist. Wichtig dabei ist ein hoher Feuchtigkeitsgehalt der Biomasse (z.B. Gülle). Genutzt wird das z.B. in Kläranlagen bei der Schlammausfäulung (in den Faultürmen) oder in einigen landwirtschaftlichen Betrieben die Fermenter betreiben. Durch das biologische Methan wird über Blockheizkraftwerke (BHKW) Strom und Wärme erzeugt.

- Wasserstoffgewinnung

Eine Weiterverarbeitung des Methans zu Wasserstoff ist dann mittels Dampfreformierung analog zur herkömmlichen Wasserstoffherstellung aus fossilem Erdgas möglich. Die Reaktion des Verfahrens läuft endotherm ab, d.h. es muss Energie hinzugefügt werden. Sie katalysiert das Methan bei 800 – 900°C und mindestens 2,5 bar Druck mit Wasserdampf zu Kohlenmonoxid und Wasserstoff im ersten Schritt:



Der zweite Schritt (Shiftreaktion) erfolgt exotherm (mit Freisetzung von Energie). Es wird weiterer Wasserstoff gewonnen bei der Reduktion des Wasserdampfes.



CO₂ wird durch Absorption oder über eine Membran abgetrennt und das brennbare Restgas (ca. 60%) dient dem Reformier zur Befeuerung.

Eine andere verbreitete Variante ist die Pyrolyse und Vergasung von Biomasse. Dieses Verfahren soll in den nächsten 2 – 3 Jahren kommerziell verfügbar sein. Hier wird nicht weiter darauf eingegangen.

Eine völlig biologische Möglichkeit der Wasserstoffgewinnung besteht in der Nutzung von Grünalgen, woran aber noch geforscht wird. Grünalgen besitzen das Enzym „Hydrogenase“, welches mittels der Energie aus der Photosynthese Wasser zu Wasserstoff und Sauerstoff spaltet. Die Ausbeute ist höher, wenn der Stoffwechsel der Algen aufgrund einer „Schwefeldiät“ reduziert ist und sie die für sich nicht mehr verwertbare Energie in Form von Wasserstoff an die Umwelt abgeben.

Wasserstoff ist ein sekundärer Energieträger, denn er muss erst endotherm erzeugt werden. Die Ausbeute und der Wirkungsgrad verschiedener alternativer Verfahren sind heute noch sehr gering, daher nutzt man das wirtschaftlichere Erdgas zur Produktion. Solarenergie oder Wasserkraft zur direkten Elektrolyse von Wasser zu H₂ und O₂ wird außer in Versuchsanlagen noch nicht angewendet. Der Wasserstoff wird dennoch als Energieträger und Speichermedium zukünftig immer bedeutsamer. Über die Brennstoffzellentechnologie ist er in einer effizienten und sauberen Nutzung eingebunden. Als Abgas entsteht lediglich Wasser.

Wirkungsgradevergleich

Der Wirkungsgrad ist nur ein Instrument der Messung der Energieeffizienz und darf nicht als einziges Kriterium zum Vergleich der Energieerzeugungstechnologien interpretiert werden.

Die Bilanz ist entscheidend. Wirkungsgrad η = Nutzenergie / Energieaufwand

Energie	Technologie	η elektrisch %	
Solare	Photovoltaik - Dünnschichtzellen (20% Marktanteil)	aus amorphem Silizium	7 - 11
		aus Kupfer-Indium-Diselenid (CIS)	10 - 13
	Photovoltaik - Dickschichtzellen	aus monokristalline Silizium	14 - 18
		aus polykristallinen Silizium	13 - 16
Biomasse - feste Bioenergieträger	Kraft-Wärme-Kopplung KWK	Dampfturbinenprozess	12 - 20
		Dampfkolbenmotorprozess	10 - 20
Biomasse - flüssige/gasförmige Bioenergieträger	Stirlingmotorprozess		8 - 22
	Dieselmotor		30 - 43
	Gasmotor		25 - 42
	Gasturbine		25 - 30
	Brennstoffzelle		30 - 55
Fossile Kraftwerke	durchschnittlich weltweit		30
	durchschnittlich Deutschland		38
	neue KW in Deutschland		40 - 45
	Gas- und Dampfturbine GuD	Erdgas	58
	Blockheizkraftwerke/Kraftwärmekopplung	Auch Biogas	70 - 80
	Benzinmotor		25
	Dieselmotor		30
Stromnetz		85	
Quellen: IBS Anlagentechnik, BINE Informationsdienst, Landesinstitut für Schule und Weiterbildung u.a.			

Stoffstrom des Eisens

Als kleines Attribut zu den energetisch relevanten Stoffströmen wird hier noch der Fluss des Eisens dargestellt. Die wichtigen Stoffströme Sauerstoff, Stickstoff, Phosphor, Schwefel, Mineralstoffe und der hydrologische sind in der Fachliteratur verbreitet und werden hier nicht behandelt.

Das Eisenvorkommen in der Natur ist nie elementar, da es ein unedles Metall ist. Zumeist sind es Eisenoxidverbindungen, die in Gesteinen wie dem Magnet Eisenstein (Fe_3O_4), auch Magnetit genannt, und dem Roteisenstein (Fe_2O_3) gebunden sind. Das häufigste Eisenerz (enthalten $>20\%$ Fe) ist der Brauneisenstein und das Pyrit. In der Erdkruste ist Eisen mit $6,2\%$ das vierthäufigste Element und nach Aluminium das zweithäufigste Metall.

Es gibt einen natürlichen Kreislauf des Eisens, der bakteriell gesteuert wird. Der *Thiobacillus ferrooxidans* oxidiert bei saurer Reaktion Eisen(II)- zu Eisen (III)-Verbindungen, wodurch er seine Energie gewinnt und diese zur Reduktion von CO_2 nutzt. Daneben existieren noch weitere chemoautotrophe Organismen, die Eisen oder andere Metalle oxidieren.

Die anthropogene Nutzung des Eisen stellt keinen richtigen Kreislauf dar, aber Alteisen oder Schrott wird vielfach wiederverwendet. Die Eisen- und Stahlindustrie erlebt derzeit besonders in China einen regelrechten Boom. Deren Bedarf hat sich in den letzten 10 Jahren fast verdreifacht. Obwohl China weltweit das meiste Eisenerz fördert, importiert es zusätzlich große Mengen hauptsächlich aus den USA und Russland. Auch die EU exportiert sehr viel, hat aber zugleich einen noch höheren Bedarf, der durch Importe wieder gedeckt wird, nachdem in Westeuropa mit Ausnahme Schwedens kaum nennenswerte Erzvorkommen zu verzeichnen sind. Die Bilanz von Schrott weist einige positive Aspekte auf:

- Energieeinsparung bei der Erzeugung von Stahlprodukten mit Schrott beträgt 90%
- CO_2 -Einsparung bei der Erzeugung von Stahlprodukten mit Schrott beträgt 86%
- Eisen und Nichteisen-Metallschrotte sind beliebig oft und ohne Qualitätsverlust einsetzbar. (Quelle: BDSV)

In Deutschland wurden im Jahr 2000 42% der Stahlproduktion mit Schrott versorgt.

Mittlerweile wird auch versucht, Eisenbestandteile aus den Schlacken von Verbrennungsanlagen mit Hilfe von Magnetabscheidern heraus zu sortieren um sie der Wiederverwertung zuzuführen.

Ein Versuch, dessen Erprobungsphase noch läuft und dessen Nutzen zugleich umstritten ist, behandelt die Einbringung von Eisen in nährstoffarme Teile von Gewässern (Eutrophierung). Damit sollen Algen (Phytoplankton) zum Wachstum angeregt werden, die CO_2 fixieren

können und dieses beim Absterben in die Tiefe mitnehmen. Das könnte zur Reduzierung des Treibhauseffekts beitragen.

Die weltweiten Vorkommen an Eisenerz sind zwar breit gestreut, werden aber in nennenswerten Maße nur in wenigen Ländern gefördert. Dagegen ist die Nachfrage auf der ganzen Welt recht beträchtlich. Folglich kann man hier den Begriff Entropie wieder anwenden, denn neben der Verteilung gibt es auch beim Eisen einen Schwund im Kreislauf, der auf Deponien endet.

Schluss

Man kann sagen, dass uns in Zukunft große Veränderungen erwarten, denn wir haben keine Alternative. Wir sägen am Ast, auf dem wir sitzen; die Säge ist schwer und der Mensch ist träge. Entweder wir ändern einige Gepflogenheiten oder hinterlassen nicht nur den nachfolgenden Generationen einen Planeten, über den sie sich kaum freuen werden. Der Mensch säht mit der globalen Energiepolitik jetzt schon einiges Unheil (aktuell: Ölkrieg). Bei einer ganzheitlichen Bilanzierung wären daher noch zusätzliche Aspekte einzufügen. Monetär betrachtet wären neben den noch günstigeren Förderungskosten von fossilen Brennstoffen auch die folgenreiche Zerstörung der Natur und unseres Lebensraumes, reziprok deren Zerstörungspotential (Stürme, Fluten etc. – siehe hierzu Studie von Allianz und WWF, SZ 29.06.05, S.19) und auch die Absicherung der Rohstoffversorgung (Militär) mit einzubeziehen. Nach unseren heutigen Rahmenbedingungen der Wirtschaft (Kapitalismus) sollte eigentlich längst schon der Schalter umgelegt worden sein. Aber nicht nur der Konsument achtet eher auf die Kosten, die unmittelbar entstehen, Politiker, Unternehmer und Lobbyisten denken oft genauso kurzfristig. Deutschlands Energiepolitik befindet sich da eigentlich auf einem kompromissbereiten zukunftsträchtigen Weg, der hoffentlich bei der nächsten Wahl nicht nachhaltig ausgebremst wird.

Hier ließe sich durchaus noch mehr ausführen, aber sowohl für den Epilog wie für die Themenstellung ist der Rahmen einer Studienarbeit begrenzt. Daher ist manches leider nur sehr oberflächlich vorgestellt worden.

Quellenverzeichnis:

Biologieskript, **Schnuch**

Biotechnologieskript, **Urban**

Ökologieskript, **Wildner**

Dr. Felix Christian Matthes, Dr. Hans-Joachim Ziesing: Sicherheit der Rohstoffversorgung - eine politische Herausforderung?! Kurzstudie für die Bundestagsfraktion Bündnis 90/Die Grünen; Berlin, im Februar 2005

Geschäftsstelle des **Wissenschaftsrates Köln**, Stellungnahme zur Energieforschung, 1999

Christian Sartorius: Energie- und Stoffflüsse im ökologischen und ökonomischen Zusammenhang; Max-Planck-Institut zur Erforschung von Wirtschaftssystemen Abteilung für Evolutionsökonomik

Karl-Heinz Tetzlaff, diverse Artikel, www.bio-wasserstoff.de

Dr. Thomas Göllinger; Skript der Vorlesung „Nachhaltige Energiewirtschaft“ SS 2004

Universität Stuttgart Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung; **T. Marheineke, W. Krewitt, J. Neubarth, R. Friedrich, A. Voß:** Ganzheitliche Bilanzierung der Energie- und Stoffströme von Energieversorgungstechniken; August 2000

Dr. Werner Edelmann, Umweltaspekte der Verwertung von biogenen Abfällen in Vergärungsanlagen; www.arbi.ch

BDSV: Stahlschrott, ein „grüner“ Rohstoff

RWE: Weltenergiereport, 2003

BINE Informationsdienst, Basis Energie 17 – 04, www.bine.info

Weiterbildungszentrum Brennstoffzelle Ulm WbzU, Wasserstoff - Möglichkeiten der Herstellung

Eike Roth, www.energie-fakten.de

Wolfgang Oest: Kraftstofferzeugung aus Biomasse

IBS Anlagentechnik / Heizungssysteme / erneuerbare Energien,

<http://energieberatung.ibs-hlk.de>

Peter Rauch: Stoffkreisläufe bei der Einwirkung von Mikroorganismen, 2005, www.ib-rauch.de

Silvia Bachinger Pädagogische Akademie der Diözese Linz Fachbereich Geographie und Wirtschaftskunde, Energiewirtschaft: Geothermische Energie, Biomasse, Windenergie 1999

Peter v. Sengbusch, Energiefluß in Ökosystemen - Produktivität, Nahrungsketten, Trophieebenen, <http://www.biologie.uni-hamburg.de/>

<http://www.learn-line.nrw.de/angebote/agenda21/lexikon/energieeffizienz.htm>

Greenpeace, <http://gruppen.greenpeace.de/aachen/klima-erwaermung.html>

Bruni Kobbe: Eisen gegen den Klimakollaps,

Matthias Ritter und Ewa Losowski, Universität Bayreuth: Eisen, Stahl und Edelstahl, <http://www.uni-bayreuth.de/departments/didaktikchemie/umat/eisen/eisen.html>