

Nachgerechnet: Klima und Energie

Dipl.-Ing. Jürgen K. Fischer, Elsteraue

Inhalt

	Seite
Einleitung	
1. Sonne	1
2. Atmosphäre	2
3. Energieträger und -Quellen	14
4. Energiespeicherung	24
5. Menschliche Vergehen an der Umwelt	26
6. Stellschrauben	30
7. Das dicke Ende	32
Abkürzungen und Formelzeichen	35
Quellen	37

25.08.2019; Kapitel 7 03/2021

Einleitung

Heiße und trockene Monate haben den Klimawandel ins Blickfeld aller Menschen gerückt. Natürlich gibt es auch gegenteilige Meinungen. Hier wird versucht, die Größenordnungen darzustellen, von denen die Rede ist, welche Möglichkeiten bestehen, darauf einzuwirken und welche Irrtümer sich verbreitet haben.

Von Politikern werden rasche Lösungen verlangt, die diese allein nicht leisten können - nicht nur aus Gründen des naturwissenschaftlichen Hintergrundes, wo Nebenwirkungen und Folgen oft schwer abschätzbar sind, sondern auch wegen demokratischer, sozialer und internationaler Hemmnisse, zumal auch die Darstellung durch die Wissenschaftler - lobbygesteuert - nicht homogen ist. Nun sind die komplexen Probleme global so angewachsen, dass sie auch nur global angefasst werden müssen. Dabei ist auch zu fragen, ob das gegenwärtige Weltwirtschaftssystem die Fragen lösen kann.

Wie wurden früher schon globale Auswirkungen sichtbar?

Die Industrialisierung war nach schnellen Erfolgen bald von Belästigungen und Gefahren begleitet, die nach Abhilfe schrien. Das veranlasste schon 1896 den Physikochemiker Svante Arrhenius, einen Treibhauseffekt der Atmosphäre zu berechnen - damals noch wenig Aufsehen erregend.

Angefangen hatte es mit dem massenhaften Verbrennen von Kohle, wobei Asche, Rauchgase mit CO_2 , C_nH_x und SO_x ausgestoßen wurden. Asche und Schmutz waren am ärgerlichsten, deshalb erfolgte zuerst eine Entstaubung. Übrig blieb saurer Regen durch SO_x , der Wälder schädigte, weil die neutralisierende Wirkung der Asche entfiel. Nun mussten baldigst die Rauchgase gewaschen werden. Zwar konnten sich die Wälder ein bisschen erholen, es klagten aber Landwirte über schlechte Erträge bei Kreuzblütlern, und man musste mit sulfatbetonten Düngern nachhelfen. Was sich nun bemerkbar macht: Es fehlen S-Ionen zur Wolkenbildung, und damit verringerte sich die Albedo! In unerhörtem Ausmaß wurden fossile Brennstoffe wie Kohle, Öl, Gas und Kernenergie verheizt. Die Erde erwärmt sich. Was ist noch schuld? Liegt es an der Sonne, die ihre Strahlungsintensität in gewissen Zyklen ändert? Liegt es nur am Kohlendioxid? In den folgenden Seiten werden viele Faktoren intensiv betrachtet.

1. Sonne

Die Sonne bietet der Erde $S = 1,37 \text{ kJ/m}^2\text{s} = 1367 \text{ W/m}^2$ (Solarkonstante) an, diese Menge ist an der äußeren Grenze der Atmosphäre senkrecht zur Strahlungsrichtung zu messen.

Die Einstrahlung in die obere Atmosphäre beträgt **$1,74 * 10^{17} \text{ W}$** (= **174 PW langwellige Strahlung** (0,22 .. 3,3 μm)).

Auf eine horizontale Fläche in Mitteleuropa (50° n.B.) trifft eine mittlere Leistung von 1160 W/m^2 , pro Tag $2,76 \text{ kWh / m}^2$.

Die von der Sonne ausgehende Strahlung belegt eine Projektionsfläche von Erdgröße (eine "Scheibe" von

$$A_P = r_E^2 * \pi = (6371 \text{ km})^2 * 3,1415 = 127,5 * 10^6 \text{ km}^2$$

Die Energie auf diese Fläche $E_E = A_P * S = 174,3 * 10^{15} \text{ W (PW)}$, **im Jahr sind es $174,3 * 10^{15} * 8760 \text{ h} = 1,5269 * 10^{18} \text{ kWh}$.**

Um diese "Scheibe" auf die ganze Erdoberfläche zu beziehen, wurde die Solarkonstante S zu einer Quasisolarkonstante S' umgerechnet: [T1]

$$S' = A_P / A_E * S \\ = 127,5 * 10^6 \text{ km}^2 / 510100933 \text{ km}^2 * 1367 \text{ W/m}^2 = 342 \text{ W/m}^2$$

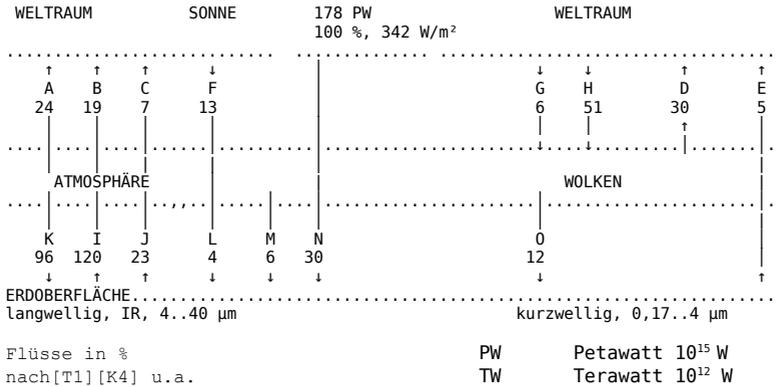
Die direkte Sonnenstrahlung und die diffuse Himmelsstrahlung werden zur Globalstrahlung zusammengefasst, die Beträge zwischen $250 \dots 420 \text{ kJ/cm}^2$ und Jahr erreicht. Im mittleren Deutschland sind für die Globalstrahlung auf eine ebene Fläche im Januar $210 \dots 250 \text{ J/cm}^2$ und Tag, im Juni $1500 \dots 1900 \text{ J/cm}^2$ und Tag anzusetzen, strahlungsreiche Sommertage kommen auf $2500 \dots 3000 \text{ J/cm}^2$.

Sonnenflecken charakterisieren die Sonnenaktivität, die in verschiedenen Zyklen schwankt. Der stärkste Zyklus währt rund 11 Jahre (9 .. 14 Jahre, Schwabe-Zyklus). Dabei variiert die von der Sonne abgestrahlte Energie gerade einmal um 0,1 % ($0,2 \text{ W/m}^2$). Um die beobachtete Weltklimaänderung zu begründen, hätten es aber $0,5 \text{ W/m}^2$ sein müssen. [M1] u.a. vermuten aber weitere Effekte:

1. Die UV-Strahlung erzeugt in der Stratosphäre Ozon, womit die Wärme besonders in den Tropen die Luftzirkulation und die Niederschläge beeinflusst.

2. Gesteigerte Sonnenaktivität sorgt für stärkere Verdunstung am Äquator mit verstärkten Niederschlägen. Der östliche Pazifik wird kühler, auf Grund verminderter Wolkenbildung kommt mehr Strahlung auf der Meeresoberfläche an.

Solarkonstante $S' = 342 \text{ W/m}^2$, auf Erdoberfläche verteilt.



- A effektive Ausstrahlung
- B Verluste durch Konvektion
- C Zerstreuung diffus
- D Reflexion, 77 W/m^2
- E Reflexion, 30 W/m^2
- F diffuse Strahlung
- G Absorption durch Wasserdampf, 67 W/m^2
- H direkte Strahlung
- I Ausstrahlung, 390 W/m^2
- J Verdunstung, 24 W/m^2
- K Gegenstrahlung, 324 W/m^2
- L Kondensation
- M diffuse Strahlung
- N direkte Strahlung, 178 PW
- O diffuses Licht
- P Photosynthese, 180 TW
- Q Speicherung in Eis und Wasser 27 TW
- R Vulkanismus, Konvektion 3 TW
- S Gezeiten, Ströme, kinetische Energie 3 TW
- T fossile Energie, Erdwärme, 32 TW

1.2 Einflussfaktoren auf die Sonnenstrahlung

Albedo

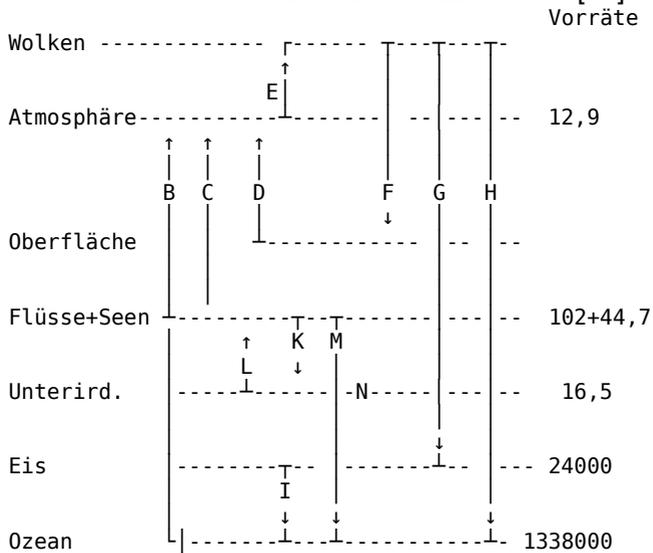
Die Globalstrahlung wird nach Art und Beschaffenheit der Erdoberfläche unterschiedlich in den Weltraum reflektiert, je niedriger der Wert ist, desto weniger wird reflektiert bzw. umso mehr wird absorbiert und in Wärme umgewandelt:

Frischer Schnee	0,8 .. 0,9	Stadt	0,1 .. 0,18
Alter Schnee	0,45 .. 0,9	Asphaltstraße	0,05 .. 0,1
Haufenwolken	0,7 .. 0,9	Betondecke	0,17 .. 0,27
Schichtwolken	0,4 .. 0,6	Siedlungen	0,15 .. 0,2
Wüste	0,3	Solarmodule	0,2
Savanne	0,2 .. 0,25	Winkel auf Wasser:	
Tundra	0,15 .. 0,2	>10 °	0,22
nasser Sand	0,2 .. 0,3	>20°	0,12
Tonboden	0,1 .. 0,35	>45°	0,05
unbestellte Felder	0,26	See und Eis	0,3 .. 0,4
Schwarzerde	0,05 .. 0,15		
Getreide	0,15 .. 0,25		
Rasen	0,18 .. 0,23		
Wald	0,05 .. 0,18		
Nadelwald	0,5 .. 0,15		
Laubwald	0,12 .. 0,20		
Regenwald	0,1 .. 0,12		

Die Erde erscheint aus dem Weltraum blau, weil sie etwa 30 % des Sonnenlichts (Albedo = 0,3) reflektiert. Wäre die Albedo geringer, erschiene sie fahl wie der Mond. Bei der Auswertung von Satellitendaten von 1995 bis 2009 ließ sich feststellen, dass besonders bei Hochgebirgen und Polen die Albedo um 0,1 % (etwa 5 TW) vermindert ist.

Da mit der Sonne die großen Zusammenhänge angedeutet wurden, wird hier auch noch der globale Wasserkreislauf als Energiefluss skizziert, wenngleich er in den folgenden Ausführungen nicht mehr ausführlich bearbeitet wird.

Globaler Wasserkreislauf [K1]



B	Verdunstung aus dem Ozean in die Atm.	505
C	Verdunstung aus Oberflächengewässern	1
D	Verdunstung aus Pflanzen	71
E	Wasserdampf zu Wolken	411
F	Niederschlag auf Landmasse	116
G	Niederschlag zu Eis	2,7
H	Niederschlag auf Ozean	458
I	Eisschmelzwasser zum Ozean	2,7
J	Flüsse	44,7
K	Versickerung ins Grundwasser	46
L	Quellwasser zu Seen, Flüssen	43,8
M	unterirdischer Abfluss Grundwasser	2,2
N	Grundwasser	10800

Alle Zahlenangaben in 1000 km³

2. Atmosphäre

2.1 Treibhauseffekt

In einem Treibhaus wird besonders die kurzwellige Sonnenstrahlung vom Boden und den Pflanzen absorbiert und dabei in langwellige Strahlung, also Wärme umgewandelt. Wärme kann durch die Glaswände eines Treibhauses nicht durch Konvektion entkommen.

Die von der Sonne ausgesandte langwellige Strahlung erwärmt zuerst die Erdoberfläche je nach Absorptionsvermögen, und diese erst erwärmt die Lufthülle. Auch deshalb wird die Atmosphäre von unten nach oben kälter. Der Treibhauseffekt der Atmosphäre wird durch die Anteile der Luft an Kohlendioxid, Wasserdampf, Methan und Ozon hervorgerufen, die einen Teil der langwelligen Abstrahlung in den Weltraum zurückhalten. Ohne THG wäre die Erdoberfläche -18 °C kalt. Wo THG gut absorbieren, strahlen sie auch gut ab.

Anteil anthropogener Emissionen: CO₂ (fossil) 56,6 %, CO₂ durch Abbau von Biomasse und Entwaldung 17,3 %, andere 2,8 %, Methan 14,3 %, N₂O 7,9 %, F-Gase 1,1 %.

Als Wärmespeicher treten hauptsächlich die Weltmeere auf, die sich beängstigenderweise schon in größere Tiefen erwärmt haben. Sie nehmen global etwa 0,5 .. 0,625 W/m² auf, geringer ist die Aufnahme durch die Landmasse (0,025 W/m²), erheblich durch Eis (0,28..0,47 W/m²) durch die Schmelzwärme.

Die Grundbestandteile der Luft, also Stickstoff N₂, Sauerstoff O₂ und die Edelgase werden in den Klimamodellen nicht beachtet.

2.2 Atmosphären-Bestandteile

2.2.1 Kohlendioxid (CO₂)

Gase wie Wasserdampf und CO₂ sind selektiv und strahlen nicht wie ein Festkörper kontinuierlich. Während CO₂ die Sonnenstrahlung (0,1..1,5 µm) fast ungehindert zur Erde durchlässt, hält es die Wärmestrahlung der Erde (5..50 µm) wegen einer starken Bande um 12 µm zurück, dieser Teil von rund 15 % wird also nicht wieder ins Weltall abgestrahlt. Wasserdampf verdoppelt den Treibhauseffekt.

Die Gesamtemissionen CO₂ betragen 38 Gt/a, davon stammen 3,3 Mt/a (2011) aus dem Abbrennen von Wäldern. Davon nehmen die Weltmeere jährlich 26 % auf (10 Gt/a), Landökosysteme (Pflanzen) 10,6 Gt (netto nur 7,3 Gt), es verbleiben 17,5 Gt in der Atmosphäre. CO₂ stieg von 280 ppm (vorindustriell) auf aktuell 392 ppm. Nach J. Hausen [H1] müsste die CO₂-Konzentration wieder auf wenigstens 350 ppm sinken, um die Dysbalance (*energy imbalance*) zu beheben. Die Halbwertszeit von CO₂ beziffert man auf 1000 Jahre. Übrigens kann man fossiles CO₂ von frischem durch die Isotope unterscheiden (siehe 2.2.11 Radioaktivität).

Eine interessante Statistik gibt die Pro-Kopf-Emissionen an CO₂ an.

USA	9 t CO ₂ /Einwohner
Großbritannien	8,5
Deutschland	8
Russland	5,5
Frankreich	4,5 ...
....Indien	0,5

Die Zahlen geben nur einen Grad der Industrialisierung und nicht etwa schlechte Effizienz an: Schließlich werden hier hochqualifizierte Produkte auch für die restliche Welt erzeugt.

Zur Veranschaulichung der Belastung durch CO₂ wurde ein "CO₂-Fußabdruck" popularisiert. Beispiele: 1 kg Rindfleisch hat einen Footprint von 13 kg CO₂-eq, 1 kg Butter 23,8 kg, eine Hauskatze von 2,2 t/a, ein Mensch in Deutschland 16,3 t/a, ein Mensch im Welt-durchschnitt 5,7 t/a, die Deutsche Bank im Jahr 2008 von 415269 t CO₂. [W1]

2.2.2 Wasserdampf

Wasserdampf (WD) ist das wichtigste Treibhausgas, es macht 0,3 % der Masse der Atmosphäre aus. Mit 90 % Volumen bzw. 80 % Masse bestreitet es die Hauptmenge der Treibhausgase. Die von der Erdoberfläche emittierte langwellige Strahlung - Wärme - wird hauptsächlich durch WD absorbiert. Es hat rund 14 Tage Verweilzeit in der Atmosphäre (Vergleich CO₂ Jahrzehnte und länger, Methan Jahrzehnte). Die relative Luftfeuchtigkeit bleibt etwa konstant, nur die absolute variiert mit der Lufttemperatur. Über Verdunstung und Kondensation erfolgt die Regulation. Steigt die Temperatur, reichert sich absolut mehr Wasserdampf an, dadurch erhöht sich die

Absorption der langwelligen Strahlung und es erfolgt eine weitere Temperaturerhöhung - solche positiv gerichtete Rückkopplung und sich damit steigend ist hier unerwünscht, aber unbeeinflussbar.

2.2.3 Ozon

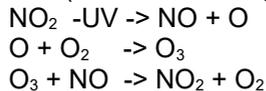
Ozon ist ein starkes Oxidationsmittel und reizt die Atemwege. Es entsteht durch UV-Strahlung um 240 nm



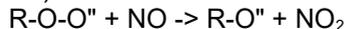
Die Sonnenenergie spaltet O_2 in der Stratosphäre in 2 O auf (Photodissoziation). Die höchste Konzentration bildet sich in der Stratosphäre (UV <242 nm). Seine Menge in der Atmosphäre wird in Dobson-Einheiten angegeben (100 DU = 1mm Ozonschichtdicke).

Ozon hat großen Einfluss auf die Temperatur der Stratosphäre durch die UV-Absorption, andererseits ist es als gewinkeltes Molekül (wie Wasser und CO_2 auch) Infrarot-(IR-)aktiv und strahlt damit Wärme ab. Das meiste Ozon entsteht am Äquator, es wird global transportiert und dabei auf 200..300 DU ausgedünnt vom Aufstrom aus der Troposphäre bis auf 30 km Höhe; in gemäßigten Breiten beträgt die Säulenhöhe 300 .. 400 DU, im Frühsommer über 500 DU. Im Ozonloch fällt der Wert bis unter 200 DU. In der oberen Atmosphäre wird Ozon durch Sulfat und Chlor aus FCKW zerstört.

In der bodennahen Schicht ist Ozon als starkes Reizgas unerwünscht. Stickoxide (z.B. aus Autoabgasen) wirken der Ozonbildung entgegen:



bei viel Verkehr wird Ozon noch schneller abgebaut wegen Kohlenwasserstoffen (KW) nach



Die Einführung von Katalysatoren in Autos hat Ozon in Bodennähe verringert.

Weiteres Ozon und NO_x entstehen bei Gewitter bzw. stillen Entladungen.

Sommersmog, Smog vom Los-Angeles-Typ, Photosmog, Ozon-smog: Dunstglocke durch UV-Strahlung in Schönwetterperioden,

Reaktionen mit NO_x aus Autoabgasen, Kohlenwasserstoffen, Wasserstoffperoxid, Kohlenmonoxid, flüchtigen organischen Verbindungen, Harzen, bei Brandrodungen, Naturkatastrophen.

2.2.4 Schwefel

In der Atmosphäre üben Schwefelverbindungen verschiedene Einflüsse aus. Es finden sich die Schwefeloxide SO₂ und SO₃, Sulfate und Dimethylsulfid (DMS). Während DMS aus marinem Plankton stammt (zu SO₂ oxidiert 24 Mt/a), kommen die anderen S-Verbindungen aus Vulkanen (durchschnittlich 6 ..20 Mt/a), und aus der Verbrennung fossiler Brennstoffe kommen 67 ..93 Mt/a, nach dem Jahr 2000 sank der Wert auf der Nordhalbkugel von 64 auf 43 Mt/a. Ab 1980 kamen 50 % aus Kohle und 30 % aus Erdölprodukten. Die Emissionen der Welt sind sehr von wirtschaftlichen Maßnahmen abhängig (z. B. SO₂: 1990 121 Mt /a, 2000 106 Mt/a, 2005 112 Mt/a).

Verweilzeiten in der Atmosphäre: DMS bleibt in der unteren Bodenschicht und wird schnell ausgewaschen; sonst SO₂ 0,6 .. 2,6 d, Sulfat-Aerosole 4..7 d, vulkanischer Schwefel und Flugzeugemissionen in der oberen Troposphäre verweilen bis 3 Monate, das Sulfat kommt erst nach 4 Jahren wieder ins Gleichgewicht. Der Pinatubo hat 1991 besonders viel Schwefel bis in 34 km Höhe geschossen, in den folgenden Monaten kühlte die Erdtemperatur um 0,5 K ab. Dieser Effekt hat Paul Crutzen 2006 [C2] zum Vorschlag bewogen, große Mengen Schwefel in der Stratosphäre zu verbrennen, um die Wolkenbildung durch Schwefelsäuretröpfchen zu erhöhen (Crutzen bekam übrigens den Nobelpreis für seine Entdeckung, dass FCKW die Ozonschicht zerstören.) [S1]

Aber der Pinatubo hat auch das Ozonloch über den Polen vergrößert - durch solche S-Emissionen kann das "Ausheilen" der Ozonlöcher 30 .. 70 Jahre länger dauern. Manipulationen dieser Art werden Geoengineering genannt. Hier wäre es sehr riskant: Die Auswirkungen versauern das Meer, lassen sich nicht beliebig stoppen und führen garantiert zu internationalen Verwicklungen.

2.2.5 Aerosole

sind ultraleichte Schwebstoffe und 0,01 ... 0,0001 mm kleine aus Asche, Ruß, Staub von Kraftwerken, Haushalten, Verkehr bzw. Motoren, aber auch aus Wüstenstaub, Meersalz, Vulkanen, Waldbränden bestehende Teilchen. Winde transportieren sie z.B. aus der Sahara über die Alpen oder Aerosole aus Mitteleuropa bis in die Arktis. Die Wirkung der Aerosole ist zwiespältig: Manche Schwebteilchen schlucken Strahlung, sie streuen die Sonnenstrahlung, womit die Atmosphäre gekühlt wird oder sie bilden Kondensationskeime für die Wolkenbildung. Bei starken Aerosolmengen haben aber haben die Wolken eine niedrige Albedo, Ruß und Flugasche verwandeln die Wolken in Strahlenfallen, die sich aufheizen, die an Staub kondensierten Wassertröpfchen verdampfen dadurch gleich wieder. Aerosole aus Sulfat und Nitrat kühlen die Atmosphäre, die aus Asche und Ruß wärmen sie dagegen. Mit Schwebteilchen überladene Wolken halten nur kleine Wassertröpfchen, sie regnen seltener ab und halten sich länger am Himmel.

Wenn mehr Wasser in den Wolken bleibt, wird beim Gefrieren mehr Wärme freigesetzt, wodurch wieder die Wolke wärmer wird, sie aufsteigt aber nicht abregnet.

Die praktizierten Maßnahmen zur Verminderung der Feinstaubbelastung wie Stilllegung von Kraftwerken, Ausrüstung der Kraftfahrzeuge mit Katalysatoren haben zwischen 1990 und 1998 in Deutschland NO_x auf die Hälfte, SO₂ auf 15 %, Staub auf 10 % gesenkt. Mit der Senkung der Aerosol-Pegel lichtete sich aber die Wolkendecke über Mitteleuropa, und die Albedo der Wolken sank um 2..3 %. Die Verringerung des Feinstaubes mag der Gesundheit dienen, aber saubere Luft könnte bis 2100 die Erdtemperatur um bis zu 8 K ansteigen lassen! Kurzformel aus dem fälschlich "Gorbatschow-Effekt" genannten Vorgang (Zerstörung der Ostwirtschaften): "Saubere Luft heizt die Erde auf!"

Was also gesenkt werden muss, sind die primären Feinstäube aus Straßenverkehr (Verbrennung, Abrieb, Aufwirbelung), Landwirtschaft (Bodenbearbeitung, Tiere), Vermeidung von Brandrodung, denn gegen biogene Aerosole aus Viren, Sporen von Bakterien und Pilzen oder Vulkane und Meereswinde bieten sich keine Möglichkeiten an. Kurzfristig mögen Fahrverbote helfen, weniger sinnvoll sind Geschwindigkeitsbeschränkungen auf etwa 30 km/h, wenn

dann die Motoren mehr Hübe auf die Strecke machen müssen, um noch rund zu laufen.

Inwieweit sich **Weltraumschrott** auswirkt, der in der Atmosphäre verglüht, ist noch nicht genügend untersucht und gleich gar nicht veröffentlicht worden. Die 80 t pro Jahr dürften weit untertrieben sein. Bis 2010 fanden etwa 5000 Raketenstarts statt für über 6000 Satelliten und 7000 geheime Objekte, die zum großen Teil in 800 km Höhe kreisen. Wenn diese verglühen, dürften die Partikel das ganze Periodensystem mit unüberschaubaren Reaktionen und Auswirkungen enthalten.

Beeinflussen die Partikel als Kondenskeime die Albedo? Ist die Absorption stärker? Wirken sich chemische Vorgänge aus?

Weitere Treibhausgase

2.2.6 Methan (CH₄)

hat ein hohes THG-Potential von 25 (a.O. 32) zu CO₂, es trägt weltweit mit 15 % zum Treibhauseffekt bei (Wiederkäuer, Nassreis-anbau, Mülldeponien, Auftauen von Dauerfrostböden). Mit der Industrialisierung hat Methan um 150 % zugenommen!

Methan reagiert in der Atmosphäre mit OH⁻ zu Radikalen, die langsam in 10..12 Jahren zu CO₂ und WD abgebaut werden. Es sinkt die Konzentration an kühlenden Aerosolen.

37 % der weltweit emittierten Menge stammt aus Viehhaltung. Mit anderen Quellen aus der Landwirtschaft kommen bei uns 53 % zusammen.

2.2.7 Lachgas (N₂O, Distickstoffoxid).

Es entsteht beim Abbau von Stickstoffdüngern, Leguminosen (Knöllchen), aus der Tierhaltung und Verbrennungsvorgängen. Es wurde daher festgelegt, den Stickstoffüberschuss auf 70 kg N/ ha zu begrenzen.[U1] Sein Treibhauspotential beträgt 310 (a.O. 150 zu CO₂), sein Anteil am TH-Effekt 8 %. Seit Beginn der Industrialisierung wurde er um 17 % erhöht. Da auch Kohlekraftwerke Stickoxide (NO_x) emittieren, sollten diese mit Katalysatoren ausgerüstet sein.

2.2.8 FCKW

haben ein TH-Potential von 10000 zu CO₂. FCKW wurden seit 1990 erheblich reduziert, als man den Einfluss auf das antarktische Ozonloch erkannte. Die auch produzierten FKW schädigen zwar die Ozonschicht nicht, sind aber dennoch Treibhausgase.

2.2.9 PFC

Perfluorierte Kohlenwasserstoffe kommen vorwiegend aus der Aluminiumindustrie.

2.2.10 SF₆: Schwefelhexafluorid kann aus Hochspannungsschaltern entweichen.

Quellen der anthropogenen THG sind

- 25,9 % Energieversorgung
- 13,1% Verkehr
- 7,9 % Wohn- und Betriebsgebäude
- 19,4 % Industrie
- 13,5 % Landwirtschaft
- 17,4 % Forstwirtschaft inkl. Entwaldung
- 2,8 % Abfall und Abwasser

2.2.11 Radioaktivität

An dieser Stelle sei auf die kosmische Strahlung aus dem Weltall, die Höhenstrahlung hingewiesen. Sie trifft hauptsächlich als sehr energiereicher Teilchenstrom (aus 87 % Protonen, 12 % Alphateilchen und 1 % schweren Atomkernen wie von Eisen) auf die oberste Schicht der Erdatmosphäre (1.. 10000 GeV) von Galaxien außerhalb unserer Milchstraße, aber auch von der Sonne nach etwa 3..4 Tagen Reisezeit. Das Magnetfeld der Erde schirmt die Strahlung am meisten am Äquator, am wenigsten an den Polen ab (sichtbar an Polarlichtern). Eine aktive Sonne mit vielen Sonnenflecken hat ein starkes Magnetfeld, das uns ebenfalls schützt. Eine ruhige Sonne gefährdet daher die Erde erheblich mehr. In etwa 20 km Höhe werden verschiedene andere Teilchen durch Wechselwirkung mit der Luft freigesetzt, unter anderem auch Neutronen. Mit denen bildet die

Höhenstrahlung ständig aus dem Stickstoff der Lufthülle radioaktiven Kohlenstoff $^{14}_6\text{C}$ mit der Halbwertszeit $T_{1/2} = 5568$ Jahre, so dass "unser" "frischer" Kohlenstoff immer etwas radioaktiv ist, das Verhältnis liegt bei $1 : 10^{13}$. Dieser Umstand gestattet nun die Altersbestimmung von Fossilien (Radio-Carbon-Methode), da nach dem Ableben kein weiterer radioaktiver Kohlenstoff aufgenommen wird. 1 Gramm frischer Kohlenstoff sendet in der Minute rund 15,6 β -Teilchen aus. - In Boden und Baumaterialien ist oft etwas Uran verteilt, aus dem das Edelgas Radon entsteht. In Kellern sammelt sich leicht Radon aus dem Untergrundgestein an (Granit, 50..100 kBq/m³ Boden sind durchaus normal). Radon zerfällt unter α - und β -Strahlung in andere radioaktive Elemente, die sich an Staub und Aerosole anheften können. Wenn die eingeatmet werden, strahlen sie im Körper weiter. Durch zu dichte Häuser (Energiesparen) kann eine bis zu 500-fach höhere Strahlendosis als von Kernkraftwerken gemessen werden. [F1]

3. Energieträger und Energiequellen

3.1 Braunkohle (BK)

Weltproduktion an Braunkohle betrug 2016 **990 * 10⁶ t/a**
Deutschland **172 * 10⁶ t/a**

Braunkohle enthält etwa 65 % Kohlenstoff und hat einen Heizwert 4275 kWh / m³ bzw. von 2000 kcal/kg = 2,3 kWh/kg (Weich-BK) bis 4000 kcal/kg = 4,5 kWh / kg (Hart-BK).

Daraus hätte Deutschland aus 172 * 10⁶ t/a * 2,3 kWh/kg =
= 0,396 * 10¹² kWh/a gewinnen können,

was von den offiziell erzeugten **146 TWh (2018) = 0,146 * 10¹² kWh** erheblich abweicht. Der Grund liegt im technisch nicht beeinflussbaren *thermischen Wirkungsgrad*, wenn in einem Kreisprozess über Wasserdampf Strom erzeugt wird:

$$\eta = 1 - |q_2| / q_1 \quad (\text{um } 36 \dots 40 \%)$$

Nach $C + O_2 \rightarrow CO_2$ liefert 1 t C \rightarrow 3,67 t CO₂
1 t BK = 0,65 t C \rightarrow 2,38 t CO₂

Von Deutschland kommen daher

$$172 * 10^6 \text{ t BK} * 2,38 = \mathbf{410 * 10^6 \text{ t CO}_2/\text{a}} \quad (2016).$$

Mit dem proklamierten Ausstieg aus der Kernenergie verbindet sich nun der Ausstieg aus der Braunkohleverbrennung, da sich engagierte Richtungen in Deutschland auf Braunkohle als Alleinschuldigem am Klimawandel kaprizieren und Kohlendioxideinsparung zum konkurrenzlosen Glaubensartikel gemacht haben. Dabei ist aber Kohle der einzig verfügbare Stoff, der auch bei Nacht und Windstille in Deutschland lückenlos Energie liefern kann. Zur Zeit könnte man Braunkohle durch Erdgas substituieren, wenn man politischen Pressionen ausweichen könnte, mit denen auch Pipelines und Gastanker behaftet sind.

Aber Erdgas enthält ja 75 % Kohlenstoff, und der endet als CO₂.

Wenn man die 400 * 10⁹ kWh/a aus Braunkohle durch Erdgas ersetzen möchte (genauer: noch müsste!), benötigt man

$400 * 10^9 \text{ kWh} * 0,091 \text{ Nm}^3 / \text{ kWh} = 35,9 * 10^9 \text{ Nm}^3 \text{ EG} / \text{ a}$,
bei "dünnem" Gas $45,8 * 10^9 \text{ Nm}^3 \text{ EG} / \text{ a}$,
also fast noch einmal halb soviel, wie jetzt ($101,5 * 10^9 \text{ Nm}^3$) bezogen
wird, und die schlagen mit **100,9 * 10⁶ t CO₂** zu Buche.

Wenn Erdgas zur Stromerzeugung verwendet wird, muss auch hier der thermische Wirkungsgrad berücksichtigt werden.

Wenn Nordstream2 die Menge nur für Deutschland bringen würde, begibt man sich in eine Abhängigkeit, die kein Politiker vertreten mag, allein darauf zu vertrauen ist mehr als germanische Blauäugigkeit.

Die Festlegung des Endes der Kohleverbrennung ist ein typisch politischer Aktionismus. Die Zahl 2038 liegt in dem Horizont, in dem der Kampf um das restliche Erdöl der Welt besonders heftig entbrennen wird, wie die Entwicklung der Förderzahlen ausweist (die Vorratsmeldungen sind aus verschiedenen Gründen frisiert: Entweder um gigantische Lieferquoten zu versprechen und bis zum Ende noch nationale Ziele zu erreichen oder andere zu verleiten, ihre Reserven anzugreifen).

Da sollte es gut sein, mit BK noch eine sichere Energiequelle zu besitzen, die den Übergang in eine Mangelgesellschaft glätten kann. Mindestens sind die angefangenen Braunkohlen-Lagerstätten erst noch auszukohlen und nicht für alle Zukunft zu versiegeln oder zu fluten. Selbstverständlich ist es schon sinnvoll, den Anteil der Braunkohle herunterzufahren, wenn andere Energiequellen die Lücke auffüllen können.

Eine Studie der DENA [W7] schätzt ein, dass 25 % des im Inland erzeugten Stromes aus erneuerbaren Quellen weder im In- wie auch im Ausland genutzt werden können. Trotzdem wird 2050 Deutschland 134 TWh (22 %) aus dem Ausland importieren müssen, wenn nicht Kraftwerke im Inland neu gebaut werden oder zusätzlichen Speicherkapazitäten entstehen oder die Einspeisung aus Kraftwerken nicht flexibler gelingt.

3.2 Steinkohle (SK)

2018 wurde zwar die Steinkohleförderung in Deutschland eingestellt (wegen Unwirtschaftlichkeit), deshalb ist SK noch lange nicht passé.

Weltförderung 2016: 6291 Mt/a.

Import Deutschland 2016: 53,1 Mt/a (4,2 % der Welt),

Verbrauch Deutschland 56,9 Mt/a. Hauptlieferant ist jetzt Polen.

Man kann von 88 % C in der wasserfreien SK ausgehen, 1 t SK liefert daher 3,23 t CO₂. In Deutschland werden dadurch aus 56,9 * 10⁶ SK = **183,8 * 10⁶ t CO₂ /a** emittiert. Lange gab man die Energiemengen in SKE (Steinkohleneinheiten) an:

1 kg SKE = 7000 kcal = 0,7 kgÖE (Öleinheit) = 8,141 kWh.

Der Heizwert ist H_o = 8000 .. 8600 kcal/kg = rund 13,5 kWh/kg,

damit ergeben 56,9 Mt SK **768 * 10⁹ kWh/a**, wovon der Betrag des thermischen Wirkungsgrades übrigbleibt (**83 TWh**, Rest Stahlproduktion).

Steinkohle deckte 2017 14 % des deutschen Strombedarfs.

3.3 Erdöl (Öl)

Rohölförderung Welt 2016 **4382 * 10⁶ t/a** (Saudi-Arabien 585 Mt, Russland 554 Mt, USA 543 Mt, Irak 218 Mt, Kanada 218 Mt).

Verbrauch Deutschland 2016 **113 * 10⁶ Erdöl**, davon kommt etwa ein Drittel aus Russland..

Für die 113 * 10⁶ t/a kann man mit 11,8 kWh/kg **1,333*10¹² kWh/a** als Höchstwert erwarten.

Verbrannt entstehen daraus **339 * 10⁶ t CO₂/a** .

VK-Menge 2015 17,9 Mt, DK-Menge 30,5 Mt/a.

Je nach Provenienz unterscheiden sich die Rohöle in der Zusammensetzung. In Raffinerien werden sie durch Destillationsanlagen in Fraktionen unterschiedlicher Siedelage und Dichte zerlegt. Für den Verkehr war anfänglich nur Benzin (Vergaserkraftstoff, VK) interessant. Um das zwangsweise anfallende Mitteldestillat als Dieselmotorkraftstoff (DK) loszuwerden, wurde es daher steuerlich weniger belastet als VK. Verbesserte Motoren bedurften hoher Qualitäten, der Siedeschnitt 140 ...180 °C hatte weder eine brauchbare Oktanzahl noch eine ausreichende Cetanzahl. Für diesen Schnitt - Kerosin - wurde mit Düsentriebwerken ein Nutzer gefunden, und wegen des

anfänglich geringen Absatzes ebenfalls steuerlich wenig belastet. Da sich die Verkehrsflotten für diese Komponenten in ein gewisses Gleichgewicht bewegt haben, ist jede Störung problematisch. Wenn man zu viel verketzertes DK hat, kann man es zwar ins Ausland quasi verschenken, löst aber damit die Weltenergie- und CO₂-Frage nicht. Heizöl für Haushalte hat etwa DK-Qualität.

3.4 Erdgas (EG)

Weltproduktion Erdgas 2017 **3680 * 10⁹ Nm³**, womit 24 % des Weltenergiebedarfes gedeckt werden

Deutschland Verbrauch: **101,5 * 10⁹ Nm³** (2,8 % der Welt).

Heizwert zwischen 32 MJ/kg (L-Gas) und 45 MJ/kg (H-Gas),

Heizwert = 8,6 .. 11,4 kWh / Nm³ bzw. 0,116 .. 0,091 Nm³ / kWh.

Der Brennwert liegt um 10 % höher als der Heizwert.

Dichte $\rho = 0,8 \text{ kg} / \text{Nm}^3 \text{ EG}$.

Erdgas besteht zu 75..99 % aus Methan (russisches EG 98 % CH₄).

In dieser Zusammensetzung enthält 1 t EG = 0,75 t C, das verbrennt nach $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 2 \text{H}_2\text{O}$ zu 2,75 t CO₂

Deutschland gewann aus 101 * 10⁹ Nm³/a EG = 81,2 * 10⁶ t EG/a
0,875 * 10¹² .. 1,015 * 10¹² kWh/a

und verbrannte es zu **223 * 10⁶ t CO₂ /a**

Mit dem Ausbau der Windkraft sank der Verbrauch ab 2010 auf 75 * 10⁹ Nm³.

So sauber wie behauptet, ist aber die Nutzung von EG keineswegs, wengleich der Transport über Pipelines und der Betrieb des GWK problemlos erscheint. Erdgas wird von Radioaktivität begleitet, wobei die Mengen ²²⁶Ra und ²¹⁰Po nicht erfasst oder bekannt gemacht wurden.

In Deutschland fallen ca. 1000 ..2000 t Abfälle mit 0,1 ..15000 Bq (Becquerel) jährlich an.

Und noch eine Tücke hat Erdgas: Die Erschöpfung eines Förderfeldes kündigt sich nicht lange vorher an. Je nach Provenienz fordert zudem die Durchleitung erhebliche diplomatische Bemühungen.

3.5 Kernenergie

2017 haben 31 Länder 390 GW elektrische Nettoleistung bereitgestellt: $390 \cdot 10^9 \text{ W} \cdot 8760 \text{ h/a} = 3,416 \cdot 10^{12} \text{ kWh/a}$.

Deutschlands Kernkraftwerke stellten $76 \text{ TWh/a} = 76 \cdot 10^9 \text{ kWh/a}$ bereit.

Kernkraft liefert Energie ohne wesentlichen CO_2 -Ausstoß.

3.6 Photovoltaik (PV)

Zuvor: **Erneuerbare Energien gibt es nicht.** Der Begriff suggeriert, man könne gebrauchte Energie wieder gewinnen, man kann sie aber nur umwandeln. Aus der Sonnenstrahlung kann aber lediglich eine Teilmenge abgezweigt werden. Und jede Umwandlung in eine andere Energieform ist mit Verlusten verbunden, letztendlich wird alles - gemäß dem 2. Hauptsatz der Thermodynamik - in Wärme umgesetzt. Ein Erzwingen von Ordnung wird auf der anderen Seite mit Unordnung, sprich einem Anwachsen der Entropie bezahlt.

PV-Module stellt man aus Silizium (Si) her, die Struktur des Halbleiters bestimmt den Wirkungsgrad (monokristallin 24 %, polykristallin 20 %, amorph 8 %). Die Nennleistung eines Moduls wird in Wp (Watt Peak, Spitzenleistung) bei maximaler Sonnenstrahlung in Deutschland angegeben, bei 1 kWp sind 1000 kWh/a (900 Norddeutschland, 1150 kWp in Süddeutschland) zu erwarten. Die energetische Amortisation ist in 2 .. 3,5 Jahren zu erreichen, für die Lebensdauer sind 20 ..30 Jahre zu erwarten.

Um 1 kWh installierte Leistung zu erzeugen, müssen bei Photovoltaikanlagen 45 g CO_2 aufgewendet werden (im Vergleich: 750..1200 g bei Kohlekraftwerken, Gaskraftwerke 400..550 g, Wind- und Wasserkraft 10..40 g, Kernenergie 10..30 g (ohne Endlagerung), Solarthermie in Afrika 10..14 g CO_2/kWh). 2018 lag der Ertrag bei $45,8 \cdot 10^9 \text{ kWh}$ (8,4 % des Strommix).

Aber: Die Photovoltaik ist janusköpfig!!! Zwar haben die Zellen einen Wirkungsgrad von 17 %, offiziell einen Albedo-Wert von 20 %, verstaubt aber vergleichbar mit einer Asphaltstraße, d.h. neben dem Stromgewinn wird ordentlich weitere Strahlung absorbiert und in Wärme umgewandelt. "Die PV verändert nachteilig die kosmische Energiebilanz der Erde, sie bindet Sonnenenergie, die sonst ins

Weltall entweichen könnte" [G1] .

Verteufelt dazu ist die Tatsache, dass die Module in Richtung des Maximalgewinns, senkrecht zur Mittagssonne, ausgerichtet werden. Überdies ist in der Mittagshitze der Wirkungsgrad abgesenkt. Ohne Speichermöglichkeiten ist die Mittagsspitze nicht entsprechend nutzbar. Man bedenke ferner, wozu der Strom verwendet wird, alle Anwendungen erzeugen am Ende nur Wärme. Letztendlich verschlechtert die PV die Abstrahlung der Wärme erheblich! Wenn es doch gelänge, die für den fotoelektrischen Effekt unnötigen Strahlenanteile zu reflektieren!

Solarthermie ist zweckmäßig für die Warmwassergewinnung im Sommerhalbjahr für Häuser.

3.7 Windkraft

Windkraft fällt im Inland unregelmäßig an, viele Windräder beeinträchtigen die Landschaft, Windräder gefährden fliegende Tiere (die Flügelspitzen können bis 360 km/h erreichen, die Druckdifferenzen können Tiere förmlich zerplatzen lassen), Missbrauch ausgewiesener Stellen zu immer höheren Windrädern, die dann zu nahe an Wohngebieten stehen; es gibt Schalldrücke über 45 dB. Im Winter besteht die Gefahr umhergeschleuderten Eises. [G2]

Unbefriedigt gelöst ist die Besteuerung, die Vergütung für die belästigten Nachbarn und die Beteiligung am Abtransport des Stromes.

Eine Entschädigung für nicht abgenommenem Strom bei Starkwind ist ebenfalls zu hinterfragen.

2018 gab es in Deutschland 30518 Windräder, davon 1305 auf dem Meer. Die installierte Leistung betrug rund **59000 MW**, 20,4 % Anteil an der deutschen Stromproduktion.[B1]

3.8 Wasserkraft

Ist in Deutschland weitgehend ausgereizt. Die Nutzbarkeit dürfte mit vermindertem Aufkommen an Gletscherwasser und Dürren weiter sinken. 2013 wurden in Deutschland **23 TWh /a = 23 * 10⁹ kWh /a** erzeugt, das sind 4,4 % der deutschen Stromproduktion. Frankreich nutzt 69 TWh.

Weltweit sind es 3700 TWh/a, das sind 17 % des Weltverbrauchs.

3.9 Erdwärme

Die Nutzung von Erdwärme bietet sich an, wo warmes Wasser aus dem Untergrund sowieso ansteht. Solche Thermalquellen sind oft schon als Kurbad bekannt.

Ergiebig sind vielleicht Neubrandenburg (10 MW), Erding (9 MW), Straubing (6 MW) und Unterschleißheim (12 MW). Selbst in In geologisch geeigneten Gebieten müssen meistens Bohrungen tiefer als 2000 m niedergebracht werden. Die Folgen sind oft unberechenbar, es hat schon Dörfer gegeben, deren Brunnen plötzlich versiegten nach einer Bohrung lediglich für einen Erdwärmespeicher. Die schlechten Erfahrungen bei Erdbohrungen (auch nach Gas und Öl) sollten zur Vorsicht mahnen. Die Nutzung löst die Probleme des Klimawandels nicht, es handelt sich ja um fossile Energie.

3.10 Pflanzen

Das für die Photosynthese entscheidende Chlorophyll absorbiert Blau und Rot zwischen 380 .. 780 nm, dagegen wird Grün nicht absorbiert, sondern reflektiert. Die Spektralbereiche 450 .. 450 nm (seegrün bis blaugrün) und 700 .. 750 nm (dunkelrot) sind ungünstig und inaktivieren sogar die Photosynthese.

Ein Quadratmeter Blattfläche kann in unseren Breiten im Jahr 200 .. 400 g Kohlenstoff binden. Bei ausreichend Licht ist Kohlendioxid mit 0,03 % als Wachstumsfaktor zu knapp. Günstig wäre ein Gehalt von 0,8 .. 1,0 % CO₂ bei viel Licht. Solche Konzentrationen sind nur für geschlossene Räume zu erzeugen. In Gewächshäusern muss man aber auf die darin arbeitenden Menschen Rücksicht nehmen, so dass im Gewächshaus eine Konzentration von 0,12 % CO₂ den optimalen Kompromiss zwischen Wachstum, Arbeitsschutz und Ausnutzung darstellt. Verstärktes CO₂-Angebot verstärkt nicht nur die Photosynthese, sondern bewirkt auch, dass sich die Spaltöffnungen der Blätter verkleinern, womit sich die Verdunstung und damit der Wasserverbrauch vermindern. (Beispiel: Bei Verdopplung des gegenwärtigen CO₂-Gehaltes der Luft würden Sojabohnen halbsoviel Wasser wie jetzt verbrauchen!)

Da seit Menschengedenken die Landwirtschaft auf hohen Ertrag orientiert ist, dürften entscheidende Veränderungen nicht zu erwar-

ten sein. Beängstigend sind aber Raubbau, Brandrodungen, Einbußen an Flächen durch Städtevergrößerungen, Zersiedlung, Straßenbau. Die Umsetzung von Biomasse in Biogas ist zwar bei nicht anders nutzbaren Pflanzenteilen und Abfällen eine gute Lösung, aber wenn Nahrungspflanzen nur angebaut werden, um Methan zu erzeugen, muss das nicht noch steuerlich unterstützt werden.

Baut man Pflanzen extra für Agro-Treibstoffe und Methan an, ist das ein schlechter Weg, weil zuviel Lachgas entsteht. 1 g N₂O entspricht 300 g CO₂, sogenannter Biodiesel erzeugt einen 1,7-fachen, Ethanol aus Mais einen 1,5-fachen Treibhauseffekt wie die herkömmlichen Treibstoffe, allenfalls Ethanol aus Zuckerrohr in den Tropen (und bei uns die Zuckerrübe, ebenfalls eine C4-Pflanze) kann positiv bewertet werden. 80 % der CO₂-Einsparungen werden also wieder aufgebraucht [K2] durch Emission von Stickoxiden (Paul Crutzen).

Vielleicht wäre die Rückverwandlung in Kohlenstoff und Speicherung (z. B. in Terra Preta) für das Weltklima ein gangbarer Weg.

Was zu beschränken ist, dass Deutschland Fleisch exportiert, vor allem, wenn es mit importierten Futtermitteln produziert wurde.

Auch wer glaubt, man könne mit gepflegten Rasenflächen das Weltklima retten, irrt: Rasenpflege mit Mähen, Düngen, Laubsaugen setzt mehr THG frei, als Gras binden kann. [D1]

Dennoch trägt Biomasse zum Strommix bei, 2017 wurde ein Anteil von 8,7 % angegeben. [B2]

Der Wald in Deutschland nimmt 11,4 Mio ha (= 114000 km²) ein und entlastet die Atmosphäre um etwa 52 Mt CO₂ /a (damit sind 14 % auszugleichen). Aber infolge der Trockenheit und Schädlingsbefall sind in den beiden letzten Jahre jeweils über 100 000 ha Wald verloren gegangen.

3.11 Stromex- und import

Deutschland hat 2018 649 TWh/a erzeugt, davon waren 229 TWh (rund 35 %) aus "Erneuerbaren". Importiert wurden dazu 28,4 TWh/a, exportiert dagegen 83,4 TWh.

Mit dem Stromexport verdienen die Konzerne 2017 1,4 Mrd Euro, aber das Braunkohlendilemma kann nicht durch Import von Strom aus dem Ausland gelöst werden, denn dort wird Strom kräftig mit

Braun- und Steinkohle erzeugt - das Weltklima lässt sich nicht mit solchen Tricks täuschen.

Die Bruttostromerzeugung Deutschlands betrug 2018 [B2]:

- Braunkohle	146 TWh	= 146 * 10 ⁹ kWh
- Kernenergie	76 TWh	
- Steinkohle	83 TWh	
- Erdgas	83 TWh	
- Mineralölprodukte	5 TWh	(nur für Strom)
- Erneuerbare	229 TWh	
- Übrige	27 TWh	

Übersicht (2018)

Quelle	Menge Welt 10 ⁹ t/a	Menge DE 10 ⁶ t/a	Energie DE 10 ¹² kWh/a	Menge CO ₂ 10 ⁶ t/a
BK	0,990	172	0,146	410
SK	6,291	56,9	0,083	183
Öl	4,382	113	1,333	339
				163 ¹⁾
EG	3680 * 10 ⁹ Nm ³	101,5 * 10 ⁶ Nm ³	1,015	223
KK			0,076	
PV			0,045	
Wind			0,132	
Wasser			0,023	

Sonne Welt 1,527 * 10¹⁸ kWh/a

Es handelt sich hierbei um Überschlagsrechnungen, nicht um statistisch gesicherte Werte.

¹⁾ Schätzwert nur Verkehr

4. Energiespeicherung

4.1 Wasserstoff

Die Idee ist bestechend: Überschüssiger Strom wird zur Elektrolyse von Wasser zu Wasserstoff (und Sauerstoff) verwendet, gespeichert und bei Bedarf entweder verbrannt oder in Brennstoffzellen zu Strom verwandelt. Aber es gibt jede Menge Einwände:

Der Wirkungsgrad der Elektrolyse erreicht nur 70 % (bestenfalls 80 %).

Das nächste Problem: Wasserstoff kann bei normaler Temperatur nicht verflüssigt, sondern nur hochkomprimiert werden. Dabei wird gutes Management verlangt: Bei der Kompression fällt Wärme an, bei der Entspannung zur Verwendung muss Wärme zugeführt werden, beide Vorgänge sind mit Verlusten behaftet. Man muss u.a. hohe Drücke beherrschen (Behälter, Pumpen, spezielle, wasserstoff-feste Werkstoffe).

Um gewissermaßen die Packung zu erhöhen und die Handhabung zu verbessern, kann man auch Wasserstoff in Methan verwandeln, das man ins Erdgas einspeichern oder verdichtet lagern kann. Mit Kohlenmonoxid (CO) kann H_2 zu Methanol synthetisiert werden. Aber bei beiden Wegen ist wieder Kohlenstoff im Spiel.

Es gibt auch Versuche, Wasserstoff in ein Lösungsmittel wie Dibenzyltoluol zu packen, analog zur Azetylen-Speicherung in Aceton.

Zu guter Letzt ist der Wasserstoff zu verwerten: Schlichte Verbrennung, Nutzung in Blockheizkraftwerken, Wirkungsgrad 65 %, oder Stromgewinnung durch Brennstoffzellen. Hat man Methan, muss durch Reformierung und partielle Oxidation erst wieder Wasserstoff für die Brennstoffzellen gewonnen werden, aber letztendlich wird wieder soviel CO_2 freigesetzt wie bei einer Verbrennung. Für Brennstoffzellen bis 100 °C ist $\eta < 60$ %. Neuere Entwicklungen arbeiten auch gleich mit Methanol und Methan an Katalysatoren bei sehr hohen Temperaturen. [W2] [W3]

4.2 Pumpspeicherwerke

Wo es die geologischen und politischen Verhältnisse zulassen, sind Pumpspeicherwerke (PSW) eine gute Lösung, schwankenden Strombedarf zu puffern. In Deutschland sind in etwa 20 PSW rund 6,7 GW installiert, die kurzzeitig bis 9,6 GW Nettoleistung aufbringen können, sonst aber 4..8 Stunden Dauerbetrieb fahren. Beispiel 2006: In das Hochpumpen wurden 5,8 TWh gesteckt, zu nutzen waren 4,0 TWh. Der Wirkungsgrad lag daher bei knapp 70 %. 2015 wurden 8 TWh gespeichert. [W5]

Ein Fehler des Systems muss in Deutschland behoben werden: Es wird zweimal besteuert - das erste Mal beim Speichern, das zweite Mal bei der Nutzung. Auch andere Hürden bedrohen die Wirtschaftlichkeit.

Ganz anders zu bedenken ist die Wasserspeicherung in alten Tagebauen, nicht nur als Erholungsfläche, sondern als Speicher für Hochwässer und zur Bewässerung von Landwirtschaft und Wald in Dürreperioden. Zum Pumpen könnten Windräder vor Ort stehen (Beispiel Holland).

4.3 Akkumulatoren

Von den rund 20 praktikablen Systemen seien nur genannt [W6]:

Der vom Auto bekannte Bleiakku hat eine Energiedichte von 30 Wh/kg, sein Ladewirkungsgrad beträgt $\eta = 60..70 \%$.

Ni-Fe-Akku 40 Wh/kg, $\eta = 65..70 \%$

Ni-Cd-Akku 40..60 Wh/kg, $\eta = 70 \%$. EU-weit verboten.

Li-Ion-Akku 120..210 Wh/kg, $\eta = 90 \%$.

Fast alle Akkus enthalten gefährliche, giftige oder/und brennbare Substanzen.

Akkus haben große Bedeutung für Kleingeräte, als Notstromversorgung in Krankenhäusern, für internetunabhängige Telefon- und Nachrichtendienste, Backupsysteme. Für die Größenordnung einer Volkswirtschaft fehlen (noch) Eignung und Potential.

5. Menschliche Vergehen an Energie und Umwelt

5.1 Abfall

Obwohl die reichsten Länder nur 16 % der Weltbevölkerung ausmachen, erzeugen sie mehr als ein Drittel der Abfälle. 2016 fielen mehr als $2 * 10^9$ t an, 12 % davon waren über $240 * 10^6$ t Kunststoff. Aus den Kunststoffen stammen 5 % der weltweiten Emissionen ($1,6 * 10^9$ t/a CO_2 -Äquivalent).

Spezifische Abfallmengen in Europa 167,3 kg/Kopf, Deutschland 220,5 kg/Kopf.

In Deutschland wird die knappe Hälfte recycelt (Glas 85 %, 87,9 % Aluminium, 88,7 % Papier, 92,1 % Stahl, 26 % Holz, Kunststoff nur 49,7 %, aber 38,8 % zu Wärme verbrannt).

Kunststoff ist durch seine Herstellung aus Erdöl besonders problematisch, 2016 wurden weltweit $335 * 10^6$ t/a erzeugt (Europa mit $60 * 10^6$ t weniger als 20 %, China 29 %, NAFTA-Länder 18 %).

25 % der erzeugten Kunststoffe verbraucht Deutschland (Italien 14 %, Frankreich 10 %). 40 % der Kunststoffe enden als Verpackung, 19,7 % im Baugewerbe, 10 % im Autobau.

An vermeidbaren Abfall hat auch die Modeindustrie Schuld: Eine Fülle von Billigkleidung wird nur einmal oder gar nicht getragen und kommt in den Müll. Wiederverwertung scheitert oft am Materialmix, der zwar Tragbarkeit und Pflege erleichtern sollte, aber nicht recycelbar ist. Folge: Verbrennung.

5.2 Zentralisierung und Urbanisierung

Bei allen Betrachtungen wird geflissentlich übergangen, dass die Menschheit auf 7 Milliarden angewachsen ist! Es ist legitim, dass alle Menschen den Wunsch haben, so komfortabel wie wir zu leben. Besichtigen wir die Geschichte: Eine Stadt bietet ihren Bewohnern viele Freiheiten, größere Wahrscheinlichkeit als auf dem Land, ohne Landbesitz einen Broterwerb zu finden. Nach einer Weile wird Arbeit und Handwerk in der Nähe als lästig empfunden, neue, größere Werksgelände werden in genügend Abstand auf dem Ackerland eingerichtet, das nun verloren ist. Relativ schnell werden anfangs weit gewählte Abstände zugesiedelt. Die Städte gewinnen legal und

illegal an Größe mit Nebenwirkungen: Erhöhte Wärme durch schlechte Reflexion (bis zu 6 K wärmer als das Umland), Nutzung von Heizung bzw. Klimaanlage (erhöhter Stromverbrauch) usw. Über den Städten entwickelte Thermik brennt gewissermaßen Löcher in Wolkenbedeckungen, durch die verstärkt die Sonnenstrahlung auf den Boden gelangt, aber nicht die Wärme in den Weltraum. Im Abwind von großen Städten regnet es mehr. In den USA hat man festgestellt, dass in Entfernungen von 30..60 km 28 % mehr Regen gemessen werden kann als an Orten gegen den Wind [F3]. Zu städtischen Gewohnheiten hat sich tägliches Duschen entwickelt. Dazu wird kostbares Wasser von weit her besorgt, aufwendig aufbereitet und erwärmt, aber nur sekundenlang über den Körper und an ihm vorbeigeführt. Luxus, den sich nicht einmal römische Patrizier leisteten.

5.3 Verkehr

5.3.1 Kraftverkehr

Durch die Entwicklung günstiger Transportmittel lohnt es sich, nicht mehr in kleinem Maßstab, sondern in riesigen Fabriken möglichst für die ganze Welt zu fertigen. Eine Folge ist, dass auch die Arbeitskräfte immer längere Wege in Kauf nehmen müssen. Aber dazu wollen sie schnell, bequem und individuell von A nach B kommen. Breitere Straßen mit vielen Fahrspuren müssen her, oft mit schwarzem Asphalt. Die "Entwicklung" führte zu immer größeren Pkw, c_w -Werte interessieren nicht mehr, im Stadtverkehr fallen Geländewagen auf -Hauptsache, der Fahrer kann imponieren (eigentlich: wem?). Die Zeiten, als man vom Dreiliterauto sprach, scheinen vorbei. Man muss ernsthaft überprüfen, wieviel Luft durch die Flotten sinnlos bewegt werden, wenn online-bestellte Pakete einfach zurückgeschickt werden können und Wünsche möglichst schneller erfüllt werden als sie ausgesprochen werden, wenn Produkte nicht mehr repariert werden können...

2018 stießen die Fahrzeuge schätzungsweise $163 \cdot 10^6$ t CO₂ aus. Sie verteilen sich wie folgt: [U2]

Pkw	61,0 %
Lkw	35,0 %
nationaler Luftverkehr	1,4 %

Küsten- und Binnenschifffahrt	1,1%
Dieselloks	0,6 %
übrige Emissionen	0,9 %

5.3.2 Luftverkehr

Als die Digitalisierung zeigte, dass Dienstreisen sich weitgehend erübrigen, da sie sich schneller und kostengünstiger am PC erledigen lassen könnten, war auf geringeren Luftverkehr zu hoffen. Nichts von alledem - es gehört zum Statussymbol, persönlich zu erscheinen, Meilen zu sammeln (und Vitamin B zu pflegen). Zumindestens Inlandflüge sollten obsolet werden.

Kostensparende Videokonferenzen werden wegen Industriespionage abgelehnt, da für Verschlüsselungen die Schlüssel den Geheimdiensten bekannt zu geben sind !

Was aber noch schwerer wiegt, sind Nachtflüge. Kondensstreifen in der Nacht sind das Dach des Treibhauses! Die übliche Nachtabstrahlung wird erheblich vermindert. Nachtflüge sind, obwohl sie nur ein Viertel ausmachen, zu bis zu 80 % an den Klimaauswirkungen des Luftverkehrs beteiligt [F2].

5.4 Digitalisierung

Die Digitalisierung ist neben der Lösung von Problemen ein Motor für Konsum und Verschwendung. Da werden Filme, Videos, Musik zusätzlich zu Radio und Fernsehen angeboten. Nicht nur Wissen, sondern auch törichte Belanglosigkeiten per Handy verplempern Energie. Die Entwickler suchen laufend nach Anwendungen wie z.B. nach dem Internet der Dinge, autonomes Fahren und soziale Netzwerke. Spiele absorbieren geistige Kapazität beispielsweise von Schülern - mit der Verdopplung des Wissens alle zwei Jahre verdoppelt sich eben auch die Dummheit der Menschheit.

Das Internet ist aber ein Riesen-Strom-Verbraucher! Allein der Betrieb und die Kühlung der Server benötigt (2008) 10^9 kWh/a! Nach einer amerikanischen Studie verbrät ein einziges Gigabyte 13,2 kWh, entsprechend 7 kg CO₂ ! [W4]

Eine Suchanfrage an Google benötigt 0,3 Wh. Die gesamte Netz-

infrastruktur Deutschlands verbraucht 55 TWh/a bzw. sind das $33 * 10^6$ tCO₂-eq - soviel wie der innerdeutsche Flugverkehr. [K3]
Da hilft auch keine Beteuerung, der Strom stamme aus "erneuerbaren" (s.o.) Energien.

Für Telefon- und Handynetze werden 3 % der weltweiten Kraftwerksleistung verbraucht. Cloud-Computing wird 2020 schon 10^{12} kW benötigen ("das ist laut Greenpeace das Dreifache des gegenwärtigen Verbrauchs und mehr, als Frankreich, Deutschland, Kanada und Brasilien zurzeit zusammen an Strom verbrauchen"). [C1]

Als ungeheurer Energiefresser gestaltet sich Blockchaining, wobei eine große Anzahl Rechner z.B. mit Bitcoins beschäftigt werden.

5.5 Wachstum

Börsengesteuerte Wirtschaft ist nicht in der Lage, die Probleme des Klimawandels zu lösen. Gier hat keine Schnittmenge mit Verantwortungsbewusstsein für die ganze Menschheit. Kapitalismus in einer aufnahmebereiten, "offenen" Welt war deshalb erfolgreich. In Wachstumsphasen lassen sich auch wirtschaftliche Dummheiten verkraften, vor allem, wenn man die Folgen auslagern kann. In der globalen Welt kann man nichts mehr auslagern, zumal die erdrückende Größe von Konzernen politisch nur noch feigenblattartig begrenzt werden kann.

Wirkt sich aus, dass die Menschheit mit derzeit sieben Milliarden eine schon eine nicht mehr beeinflussbare Größe hat? Es gibt keine höhere Macht außer der Natur, die Grenzen zu ziehen. Man kann es keiner Population verdenken, wenn sie ihr Trachten auf ausreichend Nahrung, Unterkunft und moderne Lebensweise ihrer Individuen richtet, und dieses Trachten ist systemimmanent. Aber notwendiges Handeln - oder Unterlassen - fordert Einsicht, Vernunft. Der Mangel an Einsicht wird seit Bestehen der Menschheit beklagt - aber Altruismus ist keiner biologischen Kategorie eigen.

Nun wird man versuchen, einen schwachen Faktor - z.B. die Braunkohle - zum alleinseligmachenden Kandidaten zu machen, aber angesichts der weiteren dürfte diese allein kaum einen Aufschub gewähren. Man wird feststellen, dass die eine Maßnahme nicht zum Ziel führt, dagegen hat man wertvolle Zeit verloren, und man wird zu alten Verhaltensweisen zurückkehren. Der wichtigste Ansatz wäre

eine Abkehr vom Wachstumswahn, um die Gegensätze in der Welt nicht zu verschärfen.

Justus v. Liebig an Carl Friedrich Mohr, 25.2.1849:

"Die Freiheit ist wie ein edler Wein, der allen preisgegeben wird. Nur der Vernünftige, der ihn mit Mäßigkeit trinkt, hat wahren Genuss davon, aber der Pöbel glaubt, das wahre Freisein bestehe darin, sich zu besaufen. Sie haben der Freiheiten und Grundrechte soviel, dass ihr Verstand sie nicht benutzen und bemeistern kann und denken nicht an den furchtbaren Katzenjammer..." [D2]

6. Stellschrauben

Die vorangegangenen Ausführungen skizzieren mehrere Möglichkeiten, die hier nur zusammengefasst werden. Selbstverständlich wird jeder Vorschlag von den Einen als einziger Lösungsansatz gepriesen, von den Anderen aus unterschiedlichen Gründen als Unmöglichkeit oder Unzumutbarkeit wütend diffamiert und bekämpft. Einzelmaßnahmen können nicht zum Ziel führen, nur ein ganzes Bündel, das allerdings die Freiheiten aller beschneiden muss, kann Erfolg versprechen.

Verbesserung der Albedo durch

- Verstärkung entsprechender Wolkendecken
- erhebliche Reduzierung von Nachtflügen
- Dächer, Wände, Straßen mindestens bei Neuanlage hell gestalten
- Reduzierung der Wärmeabstrahlung von Photovoltaik-Modulen

Veränderung der Atmosphäre

- Reduzierung der CO₂-Emissionen
- Reduzierung anderer Treibhausgase

Reduzierung des Energieverbrauchs

- Bessere Wärmedämmung der Gebäude
- Reduzierung des Stromverbrauchs zu Heizung und Klimatisierung
- Reduzierung der Lichtverschmutzung in der Nacht
- erhebliche Begrenzung des Luxusstromverbrauchs (Internet, Spielereien)

Verkehr

Rückkehr zu den früher schon angestrebten Zielen

- geringerer Verbrauch
- Beachtung Windwiderstand
- Höchstgeschwindigkeiten. Schnelle Fahrzeuge lichten den Fluginsektenbestand aus! Blühstreifen an den Straßenrändern konterkarieren eine gute Absicht!
- Verzicht auf Hochgeschwindigkeitszustellung von Alltagspost
- Dienstreisen weitgehend durch Fernkommunikation ersetzen
- Reduzierung der Lagerhaltung auf der Straße
- Dezentralisierung für kürzere Anfahrts- und Transportwege
- Reduzierung des Luft- und Straßenverkehrs zugunsten Eisenbahn
- Scheinheiligen Sozialtourismus straffer bewerten
- Tourismus lenken

Landwirtschaft

- Verringerte Tierhaltung
- Wissenschaftlich begleiteter Chemikalieneinsatz
- Haustierhaltung mehr den Bedingungen anpassen
- Waldumbau
- Flächenverbrauch durch nichtlandwirtschaftliche Nutzung einschränken
- Energiepflanzenanbau auf den Prüfstand.

7. Das dicke Ende

Es gibt keine erneuerbare Energie! Die gäbe es nur bei einem Perpetuum mobile. Und von der Sonnenstrahlung lässt sich nur ein Teil auf einen Umweg über Strom leiten - entweder über Photovoltaik oder mittelbar über Wind, Wasser und Pflanzen. Die Energieformen lassen sich ineinander umwandeln mit einen mehr oder weniger schlechten Wirkungsgrad.

Die letzte Energieform ist aber, vereinfacht gesagt, immer Wärme, wie uns der 2. Hauptsatz der Thermodynamik lehrt.

Nach der letzten Eiszeit hat sich das Klima der Erde nach und nach sozusagen in eine für uns komfortable Zone eingerichtet. Die Sonneneinstrahlung und die Abstrahlung der Erde in den Weltraum hatten sich auf ein Gleichgewicht eingependelt. Aber seit dem Beginn der Industrialisierung wird dieses Gleichgewicht gestört.

Dazu nehmen wir die Energieerzeugung der Menschheit aus fossilen Quellen pro Jahr in der vergangenen Epoche her:

BK	$0,99 * 10^9 \text{ t/a}$	$* 2,3 \text{ kWh/kg}$	=	$2,28 * 10^{12} \text{ kWh/a}$
SK	$6,29 * 10^9 \text{ t/a}$	$* 8,1 \text{ kWh/SKE}$	=	$51,0 * 10^{12} \text{ kWh/a}$
Erdöl	$4,38 * 10^9 \text{ t/a}$	$* 11,8 \text{ kWh/kg}$	=	$51,7 * 10^{12} \text{ kWh/a}$
Erdgas	$3680 * 10^9 \text{ Nm}^3/\text{a}$	$* 11 \text{ kWh/Nm}^3$	=	$40,5 * 10^{12} \text{ kWh/a}$
Kernenergie			=	$3,42 * 10^{12} \text{ kWh/a}$

Summe				$148,9 * 10^{12} \text{ kWh/a}$
	bzw.			= $0,1489 * 10^{15} \text{ kWh/a}$

Die Energiemengen beziehen sich auf die angegebenen Fördermengen, wie groß der Eigenverbrauch für die Förderung ist, geht daraus nicht hervor. Ausdrücklich wird auf den Anteil der Kernenergie hingewiesen. Bill Gates wird seinen Favoriten noch einmal überdenken müssen!

Bezogen auf die eingestrahelte Sonnenenergie im Jahr (= 100 %) sind $1527 * 10^{15} \text{ kWh/a} = 9,75 * 10^{-3} = 0,00975\%$.

Rund 0,01 % im Jahr sehen nicht sehr bedeutend aus, man muss aber das als Wärme, also langwellige Strahlung ansehen, für die es kein Fenster durch die Atmosphäre ins Weltall gibt. Diese Werte summieren sich auf, und in 10 Jahren sind es schon 0,1 % . Die

Industrialisierung dauert aber schon länger an, zugleich soll auch deutlich werden, wie empfindlich doch unsere Mutter Erde reagiert!

Betrachten wir nur den Einfluss der Energieerzeugung auf die Lufthülle der Erde. Die Lufthülle der Erde wiegt etwa $5,15 \cdot 10^{15}$ t. Die Erwärmung dieser Menge folgt der Formel

$$Q = m_L \cdot c_L \cdot \Delta T, \text{ darin bedeuten } \begin{array}{l} Q = \text{Energiemenge} \\ T = \text{Temperatur} \\ c_L = \text{spezifische Wärme} \\ m_L = \text{Masse der Luft} \end{array}$$

Für c wird vereinfachend konstanter Druck angenommen, für Luft ist $c_p = 0,240 \text{ kcal} / (\text{kg} \cdot \text{grad})$.

Nach

$$\Delta T = Q / m_L \cdot c_{pL}$$

$$\Delta T = \frac{0,1489 \cdot 10^{15} \text{ kWh/a} \cdot \text{kg} \cdot \text{grad} \cdot \text{t} \cdot 859,5 \text{ kcal}}{5,15 \cdot 10^{15} \text{ t} \cdot 0,24 \text{ kcal} \cdot 10^3 \text{ kg} \cdot \text{kWh}}$$

$$\Delta T = 0,1035 \text{ grad /a}$$

Das bedeutet, dass die laufende fossile Energieverwendung die reine Lufthülle der Erde jährlich um 0,1 °C erwärmt! Einen Großteil dieser Wärme haben bis jetzt die Ozeane, Gletscher- und Polareis beim Schmelzen geschluckt! Lange halten diese Puffer nicht mehr vor!

Die fossile Energie- und die Kernenergie-Menge von $148,9 \cdot 10^{12}$ kWh/a steht auch für eine mögliche Schmelzenergie von Eis. 1 g Eis benötigt zum Schmelzen 333,7 J oder 92,7 kWh / t. Mit

$$m_E = Q/c_{SE} = \frac{148,9 \cdot 10^{12} \text{ kWh} \cdot \text{t}}{\text{a} \cdot 92,7 \text{ kWh}}$$

$$m_E = 1,606 \cdot 10^{12} \text{ t / a} = 1,6 \text{ Billionen Tonnen Eis}$$

Einer britischen Studie [F4] zufolge verschwanden im Jahre 2017 1,2 Billionen Tonnen Eis. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Differenz zum hier errechneten Wert dazu die Ozeane aufgeheizt hat.

Aber schätzen wir grob ab, dass die Wärmemenge zu je einem Drittel auf Luft, Eis und Wasseroberfläche der Erde aufgeteilt würde. Ein Drittel für die Eisschmelze entspräche 0,53 Billionen Tonnen Eis pro Jahr. Die 1,2 Billionen Tonnen pro Jahr liegen in diesem Bereich, zumal wir den Effekt erhöhter Kohlendioxidwerte in der Atmosphäre nicht in die Rechnung einbezogen haben.

Für die Temperaturerhöhung der Weltmeere werden Vereinfachungen vorgenommen. So wird die Schichthöhe des um 1 Grad erwärmten Wassers abgeschätzt.

1 kg Wasser nimmt für 1 grad 1 kcal auf, $1 \text{ kcal} \approx 1,163 \cdot 10^{-3} \text{ kWh}$

$$c_w = 1,163 \text{ kWh} / (\text{t} \cdot \text{grad}), \quad 1 \text{ t} \approx 1 \text{ m}^3$$

$$\text{Aus } Q = m_w \cdot c_w \cdot \Delta T \quad \text{und} \quad m_w = V_w \quad \text{sowie} \quad V_w = A_w \cdot h_w$$

$$\text{folgt mit } A_w = 361,2 \cdot 10^6 \text{ km}^2 \quad \text{Wasseroberfläche der Erde}$$

$$h_w = \frac{Q}{A_w \cdot c_w \cdot \Delta T}$$

$$h_w = \frac{148,9 \cdot 10^{12} \text{ kWh} \cdot \text{m}^3 \cdot 1 \text{ grad}}{a \cdot 361,2 \cdot 10^{12} \text{ m}^2 \cdot 1,163 \text{ kWh} \cdot \text{grad}} = 0,35 \text{ m}$$

In unserem Gedankenexperiment könnte die volle Wärmemenge jährlich eine um 1 grad wärmere Wasserschicht von 0,35 m auf der Wasseroberfläche der Erde erzeugen. Nehmen wir wieder ein Drittel an, so ergibt das jährlich eine Schicht von 12 cm. Selbstverständlich gibt es auf der Wasserfläche und in die Tiefe erhebliche Unterschiede, es wurde ermittelt, dass die Erwärmung stellenweise bis in 30 m Tiefe reicht.

So hat der Wärmetransport aus der Luft keine Linearität aufzuweisen, sondern die Ströme verlaufen - beispielsweise von Stahl- und Zementproduktion (China liefert die halbe Weltproduktion) - anders als wenn nur weiter die reine Sonnenenergie die Ströme bestimmte. Das ist auch der Antrieb für extreme Wetterlagen, Wirbelstürme, Dürren und Überschwemmungen bei einer insgesamt ruhigen Sonne. Wie sich die Hotspots von Industrieanlagen und Großstädten auf das Wetter auswirken, wird weiterhin ein Hauptgegenstand von Untersuchungen sein.

Die Menschheit muss rigoros den Energieverbrauch einschränken, und einen Weg finden, die Abstrahlung der Wärme in den Weltraum zu regeln, wenn sie noch ein bisschen den Planeten bewohnen will. Eine zu warme Atmosphäre hat noch weiter reichende Konsequenzen: Es wird auch eine zunehmende Flucht der Luftmoleküle in den Weltraum eingeleitet!

Abkürzungen, Formelzeichen

a, /a	Jahr, pro Jahr
A_w	Wasseroberfläche der Erde
BK	Braunkohle
Bq	Becquerel
C	Kohlenstoff

c	spezifische Wärmen: c_L für Luft, c_E für Eis, c_W für Wasser
cp, cv	spezifische Wärme
CH ₄	Methan
CO ₂	Kohlendioxid
d	Tag
EG	Erdgas
FCKW	Fluor-Chlor-Kohlenwasserstoffe
G	Giga, Vorsatz für * 10 ⁹ ; 1 Milliarde (Europa. USA: Billion)
η	Wirkungsgrad
h	Stunde
hW	Höhe der erwärmten Wasserschicht in m
H ₂ O	Wasser
J	Joule = 1 Ws
k	kilo, Vorsatz für * 10 ³
kcal	Kilokalorie, 1 kcal = 1,1626 Wh
km ²	Quadratkilometer
KW	Kohlenwasserstoffe
kWh	Kilowattstunde, Wh = Wattstunde
M	Mega, Vorsatz für * 10 ⁶
m	Masse
m	Meter
Mt	Megatonne, eine Million Tonnen
m ²	Quadratmeter
nm	und μm : Maßeinheiten Wellenlängen
Nm ³	Normkubikmeter
NOx	Stickoxide
N ₂ O	Lachgas
O ₂	Sauerstoff, O ₃ Ozon
P	Peta, Vorsatz für *10 ¹⁵
PV	Photovoltaik
Q	durch fossile Brennstoffe und Kernkraft umgesetzte Energie
S	Schwefel
t	Tonne = 1000 kg, Wasser 1 m ³
T	Tera, Vorsatz für *10 ¹² . 1 Billion (Europa)
THG	Treibhausgas
W	Watt (= 1 J/s (Joule))
WD	Wasserdampf
ΔT	Temperaturdifferenz

Quellen

Das Material im Internet ist beträchtlich. Es konnte daher die Richtigkeit und die Genauigkeit der Zahlenangaben nicht in allen Fällen verifiziert werden, Zahlen dienen daher nur zur Illustration der Größenordnungen. Für viele Angaben wäre auch die Quellenangabe voluminöser als der Wert an sich.

- [B1] BWE: www.wind-energie.de/themen/ zahlen- und-fakten, 2019
- [B2] Breitkopf, A.: Statistik: de.statista.com/statistik/daten/studie/156695..., Stand 02.01.2019
- [C1] Clauß, Ulrich: www.welt.de/print/die_welt/wissen, 25.05.2011
- [C2] Crutzen, Paul: diverse Arbeiten (nuklearer Winter, Emission verschiedener Gasem)
- [D1] Holger Dambeck, www.spiegel.de, nach University of California 2009
- [D2] Dechend, Hertha v.: Justus von Liebig in eigenen Zeugnissen..., Verlag Chemie Weinheim/Bergstr. 1953
- [F1] Fischer, J. K.: CD: Meine Enzyklopädie der Nutzpflanzen, Schadstoffe I, JKF Selbstverlag Elsteraue 2004
- [F2] Piers Forster, Piers: University of Leeds/ U.of Reading, [www.weltderphysik.de...2006](http://www.weltderphysik.de...)
- [F3] Frankfurter Allgemeine 06.07.2002: "Großstädte sorgen für mehr Regen im Umland"
- [F4] Studie Leeds: Die Erde verliert Billionen Tonnen Eis, Frankfurter Rundschau 31.01.2021 und Mitteldeutsche Zeitung 06./07.02.2021
- [G1] Gooky, Vespa: Kerbely University Calif. 2009
- [G2] Günther, Albrecht: Kampf gegen das Windrad", MZ 31.07.2019]
- [H1] Hansen, J. et al.: Earth's energy imbalance and implications, Atmosph. Chem. Phys 11/2011
- [H2] Heesen, Henriq TE: www.pv-magazine.de/2019
- [K1] Kasang, Dieter: Der globale Wasserkreislauf, Hamburger Bildungsserver; Werte von 1997
- [K2] Stefan Kosch, www.kinofenster.de: "Biotreibstoff - Wunderwaffe gegen den Klimawandel?", taz 28.10.2007]
- [K3] Klumpp, Dietmar: www.swr.de/odyosso/oekobilanz-des-internets, Stand 13.07.2018

- [K4] Kasang, Dieter: Strahlungshaushalt der Atmosphäre, wiki.bildungsserver.de/klimawandel... Stand 05.02.2019
- [M1] G. Meehl, Boulder, Colorado
- [S1] Samiha Shafy: www.spiegel.de/a-25979.html, Giftkur fürs Weltklima, 10.07.2006
- [T1] Trenberth, K.E., Stepaniak, D. P: 2004
- [T2] Trenberth, H. E. et al.: Earth's global energy budget, Bull. Am. Met. Society 03/2009
- [U1] www.umweltbundesamt.de/themen/boden..., 19.06.2019
- [U2] UBA . Die Klima-Herausforderung" in ADAC-Motorwelt 5/19
- [W1] wiki/CO2-Bilanz, Stand 24.07.2019
- [W2] wiki/Wasserstoffherstellung, Stand 03.07.2019
- [W3] wiki/Brennstoffzelle, Stand 31.07.2019
- [W4] [www.webaffin.de/blog-details/ oekologischer-fussabdruck](http://www.webaffin.de/blog-details/oekologischer-fussabdruck)
- [W5] wiki/Liste_von_Pumpspeicherkraftwerken
- [W6] wiki/Akkumulator, Stand 07.07.2019
- [W7] Wirtschaftswoche: wiwo.de/unternehmen/energie/dena-studie..., "Fossile Kraftwerke auch 2050 unverzichtbar", 18.08.2019