

## Treibhauseffekt und Physik

Die Einführung der EnEV wird auch mit der Notwendigkeit der Reduzierung der Treibhausgase begründet. Die Verringerung des Heizwärmeverbrauchs wird oft durch zusätzliche Dämmschichten erreicht. Nun gibt es Architekten, die ihre Ablehnung der EnEV u.a. mit der Leugnung des Treibhauseffektes begründen.

Es gibt Veröffentlichungen (z.B. [1]), in denen die Leugnung des Treibhauseffektes mit einem angeblichen Verstoß auf die Gesetze der Physik begründet wird. Solche Artikel sind eine Mischung von Wissen und falschen Schlussfolgerungen.

Als Vorbemerkung eine Zusammenstellung der Abkürzungen:

$\pi$ : Formelbuchstabe für das Verhältnis Kreisumfang / Kreisdurchmesser. = 3,14...

$\lambda$ : Formelbuchstaben für die Wellenlänge

$\mu\text{m}$ : hier Maßeinheit für die Wellenlänge  $\lambda$  einer elektromagnetischen Strahlung (diese hat je nach Wellenlänge auch die Namen Licht, Wärme usw.). Licht mit einer Wellenlänge von 0,4  $\mu\text{m}$  (blau) bis 0,8  $\mu\text{m}$  (rot) ist für das menschliche Auge sichtbar.

S: Solarkonstante: Leistung der Sonnenstrahlung, die bei senkrecht stehender Sonne auf eine Fläche fällt. = 1370  $\text{W}/\text{m}^2$ . Vor allen durch Reflexion (z.B. an Wolken) erreicht nur ein Teil davon die Erde, so dass in Deutschland der Wert zwischen ca. 950  $\text{W}/\text{m}^2$  und 1100  $\text{W}/\text{m}^2$  liegt. Aber auch die Erdoberfläche reflektiert einen Teil der Solarstrahlung, nur der Rest erwärmt die Erdoberfläche.

T: absolute Temperatur, d.h. die Temperatur über dem absoluten Nullpunkt, der kältest möglichen Temperatur.

K: Kelvin. Maßeinheit der Temperatur T, die sich auf die kältest mögliche Temperatur bezieht.  $0^\circ\text{C} = 273,16 \text{ K}$

R: Erdradius = 6370 km (variiert etwas, da die Erde nicht exakt kugelförmig ist)

h: Plancksches Wirkungsquantum =  $6,6256 \cdot 10^{-34} \text{ W s}$

k: Boltzmann-Konstante =  $1,38054 \cdot 10^{-23} \text{ W s/K}$

"Nebel": hier benutzt als Analogon für die Wirkung der Treibhausgase

Wenn man in der Dunkelheit mit dem Auto bei Nebel fährt, kann man gewisse Analogien zum Treibhauseffekt ziehen. Man kann nicht durch den Nebel sehen. Der Nebel verschluckt das Scheinwerferlicht. Aber der Nebel fängt praktisch an zu "leuchten", so dass der Autofahrer auch etwas von seinem Scheinwerferlicht abbekommt. Auch ist bekannt, dass z.B. rotes Licht den Nebel besser durchdringt als blaues (auch ein Grund für die rote Warnfarbe).

Ein wesentliches Argument gegen den Treibhauseffekt ist angeblich der 2. Hauptsatz der Thermodynamik. Dieser Satz besagt, dass Wärme nur von einem warmen zu einem kalten Körper strömen kann. Dazu wird beispielsweise Max Planck zitiert: „Wenn sich zwei unterschiedlich temperierte ‚schwarze Körper‘ in einem luftleeren Raum gegenüberstehen, wird der kältere einen Nettoenergiegewinn erfahren und sich erwärmen, während sich der wärmere unter Bruttoenergieverlust abkühlt.“

Der schwarze Körper muss noch erklärt werden. Landläufig versteht man unter einer schwarzen Oberfläche, dass auffallendes Licht fast nicht reflektiert, sondern verschluckt wird. In physikalischer Hinsicht versteht man darunter genau dasselbe - bloß ganz extrem, d.h. es wird alles Licht verschluckt. Aber nicht nur alles sichtbare Licht (d.h. Strahlung mit Wellenlängen von 0,4  $\mu\text{m}$  bis 0,8  $\mu\text{m}$ ), sondern Strahlung mit beliebigen Wellenlängen. Aber aus dem 2. Hauptsatz folgt auch noch eine Eigenschaft, die man kaum vermutet - der erwähnte schwarze Körper strahlt bei bestimmter Temperatur von allen Körpern am stärksten. Man denke z.B. an die erwärmte schwarze Herdplatte. Der 2. Hauptsatz verlangt, dass vom wärmeren zum kälteren Körper ein Nettowärmestrom fließt. Das schließt ein, dass bei Temperaturgleichheit der Nettowärmestrom = 0 sein muss. Denn bei einem Nettowärmestrom  $\neq 0$  kühlt oder erwärmt sich ein Körper, wenn nicht noch andere Prozesse eine Rolle spielen. Eine kleine Abweichung von der Temperaturgleichheit würde ja einen Nettowärmestrom hervorrufen, der genau so gerichtet ist, dass diese Ungleichheit wieder aufgehoben wird. Da nun ein schwarzer Körper alle auftreffende Strahlung verschluckt, muss er im Temperaturgleichgewicht genauso viel Energie abstrahlen, wie er verschluckt, sonst wäre ja der Nettowärmestrom nicht 0 - und das widerspräche dem 2. Hauptsatz.

Im weiteren wird davon ausgegangen, dass eine Art "Nebel" zwischen Erdoberfläche ( $15^\circ\text{C}$ ) und Weltraum liegt. Der Weltraum hat gar keine Temperatur - die kosmische Hintergrundstrahlung entspricht einer Temperatur von ca. 3 K. Der "Nebel" soll eine Temperatur von ca.  $-47^\circ\text{C}$  haben. Gibt es dann Widersprüche?

Wer die Formulierung von Max Planck als Gegenargument zitiert, hat die Formulierung nicht verstanden. Nettoenergiegewinn bedeutet, dass der wärmere Körper viel Wärme an den kälteren strahlt. Versteht man den Satz so, dass der kältere Körper keine Wärme an den wärmeren Körper strahlt, dann versteht man den Satz falsch. Nettoenergiegewinn heißt, dass das Geschehen so passiert, dass vom wärmeren Körper mehr Wärme zum kalten als vom kalten zum warmen kommt. Dafür, dass das so ist, gibt es eine ganz einfache Erklärung. Im Moment der Wärmeabstrah-

lung „weiß“ ja kein Körper, wo die ausgesandte Strahlung mal auftreffen wird. Die Strahlung kann in der Tiefe des Weltalls verschwinden, auf einen wärmeren Körper treffen oder auch auf einen kälteren. Das bedeutet die Ausstrahlung jedes Körpers geschieht unabhängig von der Umgebung. Aber ein schwarzer wärmerer Körper strahlt eben viel stärker, als ein schwarzer kühlerer Körper – und damit ist die Erfüllung des 2. Hauptsatzes gesichert. Noch ein Schankerl, wenn eine oder beide Körper nicht schwarz sind. Dann kann der kühlerer Körper ggf. mehr Energie abstrahlen als der wärmere, aber da ja jetzt die Körper die auftreffende Energie teilweise reflektieren, bleibt als Bilanz aller Vorgänge wieder übrig, das der kältere Körper mehr Wärme als der wärmere absorbiert. Abkühlen und Erwärmen geschehen aber nur, wenn nicht weitere Prozesse existieren, durch die z.B. die Körper ihre Temperatur behalten.

Widerspricht die Strahlung von diesem "Nebel" dem 2. Hauptsatz der Thermodynamik, dass Nettowärme nur vom warmen zum kalten Körper strömt? Nein, denn von den  $390 \text{ W/m}^2$ , die ein  $15^\circ\text{C}$  warmer Körper abstrahlt, bleiben zwar nur  $300 \text{ W/m}^2$  in dem "Nebel" und  $90 \text{ W/m}^2$  gehen im wesentlichen durch das „atmosphärischen Fenster“<sup>(1)</sup> von  $8 \mu\text{m}$  bis  $12 \mu\text{m}$ . Aber nur  $150 \text{ W/m}^2$  werden zur Erde rückgestrahlt. Damit bleibt ein Nettowärmestrom von  $150 \text{ W/m}^2$  (=  $300 \text{ W/m}^2 - 150 \text{ W/m}^2$ ) von der warmen Erde zum kalten "Nebel" übrig, d.h. der 2. Hauptsatz ist erfüllt. Der "Nebel" "weiß" natürlich nicht, das er zur Erde strahlt. Er strahlt selbstverständlich nach allen Richtungen. Aber da der "Nebel" als eine Art Schale um die ganze Erdkugel ist, bleibt die Strahlung zur Seite im "Nebel". Deshalb kann der "Nebel" nur nach oben und unten strahlen. Wenn er nach unten  $150 \text{ W/m}^2$  strahlt, muss er nach oben (Richtung Weltraum) natürlich auch  $150 \text{ W/m}^2$  abstrahlen. Das widerspricht auch wieder nicht dem 2. Hauptsatz, da der "Nebel" aus dem Weltall kaum Strahlung absorbiert. Mit den genannten  $150 \text{ W/m}^2$  aus dem "Nebel" in den Weltraum und den  $90 \text{ W/m}^2$ , die durch die atmosphärischen Fenster direkt in den Weltraum strahlen, strahlt die Erde  $240 \text{ W/m}^2$  (=  $150 \text{ W/m}^2 + 90 \text{ W/m}^2$ ) in den Weltraum ab. Da sich der "Nebel" weder erwärmt noch abkühlt, muss die Gesamtenergiebilanz ausgeglichen sein. Da  $300 \text{ W/m}^2$  (=  $150 \text{ W/m}^2$  nach unten +  $150 \text{ W/m}^2$  nach oben) abgestrahlt werden, müssen auch  $300 \text{ W/m}^2$  zugestrahlt werden. Aber genau dieser Wert war im 2. Satz dieses Absatzes als Zustrahlung von der Erde genannt. Theoretisch wird der "Nebel" auch noch von der Sonne erwärmt, aber in dem Wellenlängenbereich<sup>2)</sup>, in dem der "Nebel" absorbiert, liegt nur ganz wenig Sonnenstrahlung.

Auch eine weiteres Argument der Leugnung des Treibhauseffekts (z.B. in [ 3]) widerspricht dem 2. Hauptsatz. Teilweise strahlen Moleküle, die Strahlung absorbiert haben, die aufgenommene Energie selbst ab. Teilweise geschieht die Energieweitergabe bei Stoßprozessen usw.. Am Ende vieler Prozesse im "Nebel", muss der "Nebel" die aufgenommene Energie wieder abgeben, sonst würde sich der "Nebel" ja erwärmen. Aber die Aufklärung der Vorgänge im "Nebel" ist unabhängig davon, wie sich der "Nebel" als Ganzes verhält. Zu diesen uninteressanten Teilprozessen gehören auch gasdynamische Prozesse. Da die Erde  $390 \text{ W/m}^2$  abstrahlt und im Weltraum nur  $240 \text{ W/m}^2$  ankommen, müssen  $150 \text{ W/m}^2$  auf dem einen und/oder anderem Weg wieder zur Erdoberfläche zurückkehren. Auch die Vorgänge des Energietransports im "Nebel" sind in erster Näherung uninteressant, wichtig ist nur, dass der "Nebel" insgesamt überall auf der Erde die gleiche Temperatur hat. Einer der in erster Näherung uninteressanten Vorgänge ist z.B. die schon erwähnte seitliche Strahlung.

Nach dem Stefan-Boltzmannschen Gesetz hängt die Strahlung von der 4. Potenz der absoluten Temperatur ab. Wenn bei  $15^\circ\text{C}$  (=  $288 \text{ K}$ ) die Strahlung  $390 \text{ W/m}^2$  ist, dann ist also bei  $-47^\circ\text{C}$  (=  $226 \text{ K}$ ) die Strahlung gleich  $390 \text{ W/m}^2 \cdot (226 \text{ K} / 288 \text{ K})^4 = 148 \text{ W/m}^2$ . Das sind bis auf die Rundungsfehler genau die gesuchten  $150 \text{ W/m}^2$ . Zweckmäßig wird an dieser Stelle auch die Strahlung einer  $-18^\circ\text{C}$  (=  $253 \text{ K}$ ) kalten Erde ohne Atmosphäre betrachtet:  $390 \text{ W/m}^2 \cdot (253 \text{ K} / 288 \text{ K})^4 = 232 \text{ W/m}^2$ . Bis auf die Ungenauigkeiten sind das auch wieder die  $240 \text{ W/m}^2$ .

Weiterhin muss noch die Energiebilanz der Erde überprüft werden. Die Erde strahlt entsprechend dem vorher Geschriebenen von jedem  $\text{m}^2$  der Erdoberfläche  $240 \text{ W}$  Tag und Nacht in den Weltraum ab. Wegen der Größe der Erdoberfläche ( $4\pi R^2$ ) sind das  $4\pi R^2 \cdot 240 \text{ W/m}^2$ . Kleine Unterschiede in der Abstrahlung bestehen natürlich zwischen Tag und Nacht - aber die genaue Berücksichtigung zeigt, das im Mittel diese Unterschiede praktisch herausfallen. Jeden Tag (=  $24 \text{ h}$ ) wird dementsprechend eine Gesamtenergie von  $4\pi R^2 \cdot 240 \text{ W/m}^2 \cdot 24 \text{ h}$  abgestrahlt. Gleichzeitig wirft die Erde einen Schatten, d.h. hinter der Erde (von der Sonne aus gesehen) ist kein Sonnenlicht mehr. Dass das ein kreisförmiger Schatten ist, sieht man z.B. bei Mondfinsternissen. Wo ist nun die Sonnenstrahlung geblieben, die im Schatten fehlt? Natürlich auf der Erde, aber nur auf der beschienenen Seite. Der größte Teil der Solarstrahlung liegt wieder in einem atmosphärischen Fenster ( $0,4 \mu\text{m}$  bis  $1 \mu\text{m}$ ) und erreicht deshalb die Erdoberfläche. Das im Schatten die Sonnenstrahlen nicht mehr da sind, merkt man selber im Sommer, wenn man sich in den Schatten stellt, weil einem zu warm ist. Also wird aus den Sonnenstrahlen genau der Teil herausgeschnitten, der durch den Querschnitt ( $\pi R^2$ ) der Erde gefallen wäre. In  $24 \text{ h}$  sind das insgesamt  $\pi R^2 \cdot 24 \text{ h} \cdot S$ . Wenn sich die Erde weder erwärmt noch abkühlt, müssen die abgestrahlte und die zugestrahlt Energie gleich sein - also:  $4\pi R^2 \cdot 240 \text{ W/m}^2 \cdot 24 \text{ h} = \pi R^2$

<sup>1)</sup> entspricht etwa der besseren Durchsichtigkeit von roten Licht beim normalen wenig dichten Nebel.

<sup>2)</sup> entspricht im Bereich des sichtbaren Licht z.B. einer farbigen Glasscheibe

• 24 h • S. Daraus folgt für S: 960 W/m<sup>2</sup> (= 4 • 240 W/m<sup>2</sup>). Das ist etwas weniger als die wirkliche Solarkonstante. Der Unterschied erklärt sich dadurch, das z.B. an Wolken und der Erdoberfläche ein Teil des Sonnenlichts reflektiert wird.

Bleibt als letztes noch zu überprüfen, ob durch die Durchlässigkeitsfenster der Erdatmosphäre tatsächlich nur 90 W/m<sup>2</sup> fallen. Dazu ist das Plancksche Strahlungsgesetz auszuwerten:

$$\frac{dE}{d\lambda} = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{kT\lambda}} - 1} \quad \text{bzw.} \quad dE = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{d\lambda}{e^{\frac{hc}{kT\lambda}} - 1}$$

Da eine Integration nicht für jeden das Richtige ist, eine Excel-Auswertung, die jeder Excel-Nutzer machen kann. In Abhängigkeit von  $\lambda$  (in Spalte A) wird der Energieanteil dE in einem 0,1  $\mu\text{m}$  breiten Wellenlängenbereich (d.h.  $d\lambda = 0,1 \mu\text{m}$ ) berechnet.

	A	B	C	D	E	F
1	lambda\ T	288 K				
2	0,1 $\mu\text{m}$	0,0000 W/m <sup>2</sup>				
3	0,2 $\mu\text{m}$	0,0000 W/m <sup>2</sup>				
4	0,3 $\mu\text{m}$	0,0000 W/m <sup>2</sup>				
5	0,4 $\mu\text{m}$	0,0000 W/m <sup>2</sup>				
6	0,5 $\mu\text{m}$	0,0000 W/m <sup>2</sup>				
7	0,6 $\mu\text{m}$	0,0000 W/m <sup>2</sup>				
995	99,4 $\mu\text{m}$	0,0020 W/m <sup>2</sup>				
996	99,5 $\mu\text{m}$	0,0020 W/m <sup>2</sup>				
997	99,6 $\mu\text{m}$	0,0020 W/m <sup>2</sup>				
998	99,7 $\mu\text{m}$	0,0020 W/m <sup>2</sup>				
999	99,8 $\mu\text{m}$	0,0020 W/m <sup>2</sup>				
1000	99,9 $\mu\text{m}$	0,0020 W/m <sup>2</sup>				
1001	100,0 $\mu\text{m}$	0,0020 W/m <sup>2</sup>				
1002	100,1 $\mu\text{m}$	0,0020 W/m <sup>2</sup>				
1003	Summe:	311,3027 W/m <sup>2</sup>				
1004						
1005						

Bild 1: Screenshot der Excel-Tabelle

Die angepasste Zahlenformel in jeder Excel-Zelle lautet

$$=11910000*(1/(EXP(14387,9/(A2*B\$1)-1))/POTENZ(A2;5))$$

In der Zelle B\$1 steht die Temperatur in Kelvin (also hier 288 K). In der Spalte A stehen die Wellenlängen. In der Spalte B (Strahlung) wird bei 10  $\mu\text{m}$  (Zeile 101) der Maximalwert von 2,19 W/m<sup>2</sup> erreicht. Addiert man den gesamten Wellenlängenbereich von 0,1  $\mu\text{m}$  bis 100  $\mu\text{m}$ , so erhält man den Wert 311,3 W/m<sup>2</sup>. Angesichts der einfachen

Berechnung ein genügend guter Wert für die  $390 \text{ W/m}^2$ . Addiert man von  $8 \mu\text{m}$  bis  $12 \mu\text{m}$  (die Zeilen 81 bis 121) - also das Fenster, wo der "Nebel" nicht wirkt, so ergeben sich  $86 \text{ W/m}^2$  - also wieder ausreichend genau die  $90 \text{ W/m}^2$ .

Bis jetzt war noch nichts über die Art des "Nebels" gesagt worden. Es sind dies die Treibhausgase  $\text{CO}_2$ , Wasserdampf usw.. Über den Höhenbereich, in dem sich der Nebel befindet, ist damit nichts gesagt. Wenn man so will, reicht er z.B. als Ozon (ist wenig energierelevant) vom Erdboden und so hoch, wie die Atmosphäre reicht. Mit dem Satelliten ist man außerhalb der Atmosphäre und kann dort messen. Es wird genau das gemessen, was zu erwarten ist. Das zeigt z.B. Bild 2:

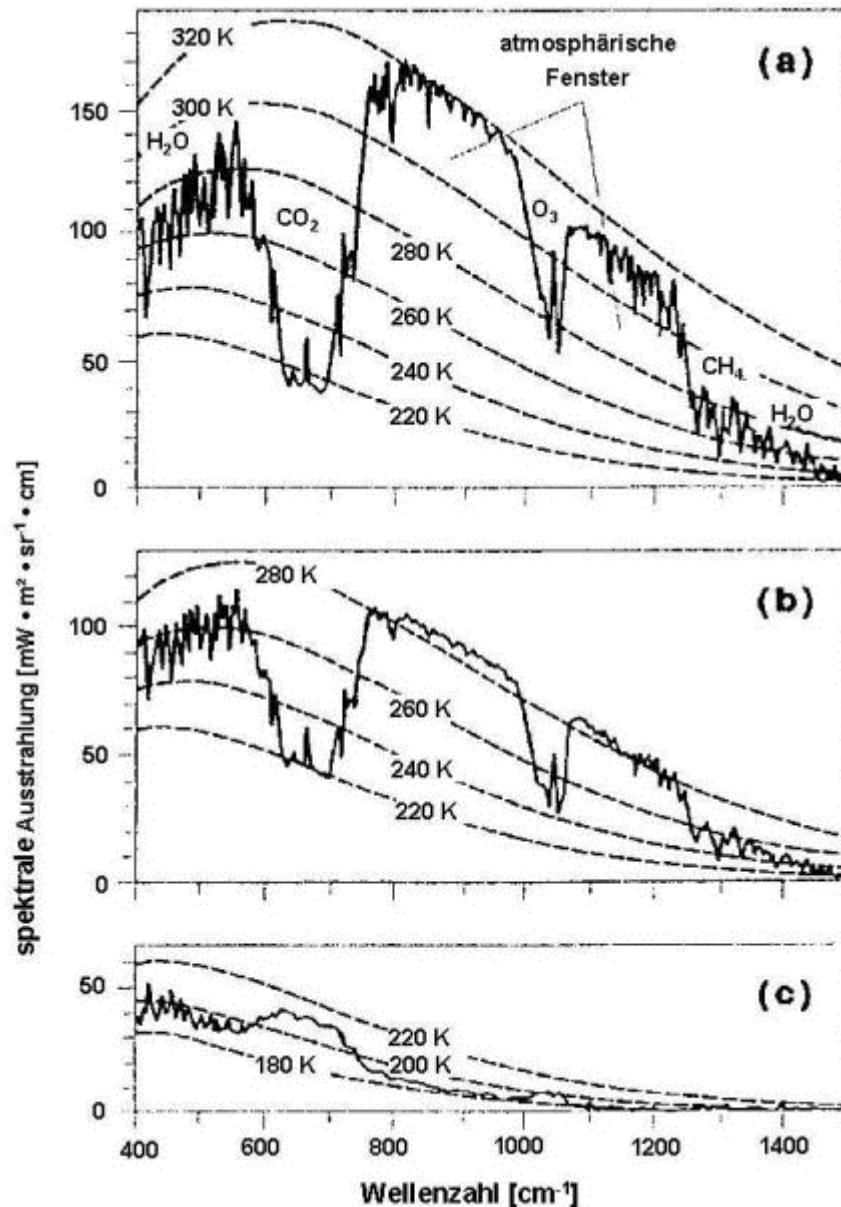


Bild 2: Emissionsspektrum der Erde (aus [ 3])

In Bild 2 ist die Wellenlängeabhängigkeit nicht in  $\mu\text{m}$  sondern in Wellenlängen/cm angegeben, also  $\text{cm}/\lambda$ .  
 Z.B.:  $1 \text{ cm}/400 = 25 \mu\text{m}$ ;  $1 \text{ cm}/500 = 20 \mu\text{m}$ ;  $1 \text{ cm}/800 = 12,5 \mu\text{m}$ ;  $1 \text{ cm}/1000 = 10 \mu\text{m}$ ;  $1 \text{ cm}/1250 = 8 \mu\text{m}$  usw..  
 Eingetragen in die Messkurven sind die Strahlungskurven schwarzer Körper mit einer bestimmten Temperatur und die Stoffe, die jeweils den Hauptbestandteil des "Nebels" bilden.

Betrachtet man die Kurven in Bereichen des "Nebels", so zeigt sich am Äquator (Bild 2a: Sahara), in mittlerer Breite (Bild 2b: Mittelmeer) oder am Pol (Bild 2c: Antarktis) immer eine Strahlungstemperatur von ca.  $220 \text{ K}$  ( $= -53^\circ\text{C}$ ),

dagegen ist im Bereich der Fenster die Temperatur am Äquator 320 K (= 47°C), in mittleren Breiten 285 K (= 12°C) und am Pol 190 K (= -83°C). Es gibt also keine Unstimmigkeiten mit der Annahme, besonders wenn berücksichtigt wird, dass die Strahlung nicht von einem Schwarzkörper, sondern von der realen Oberfläche kommt. Für die Sahara heißt das, dass ein Teil reflektiertes Sonnenlicht mit gemessen wird (Temperaturwert zu hoch). Für die Antarktis bedeutet das, dass die Schneefläche weniger als der Schwarzkörper strahlt (Temperaturwert zu niedrig). Zu erwartende Messwerte und alle physikalischen Gesetze sind also erfüllt. Unsicherheiten bestehen nur im Bereich der sehr vereinfachten Rechnungen. Von einem Hohlraum musste nie gesprochen werden.

Wie sich die Verhältnisse verändern, wenn der Nebel dichter wird, weiß jeder Autofahrer. Sorgen wir also dafür, dass der "Nebel" nicht dichter wird (z.B. Anreicherung der Atmosphäre mit CO<sub>2</sub>).

Dipl.-Physiker Jochen Ebel

#### Literatur:

- [ 1] Thüne, W.: <http://www.dimagb.de/info/thtreib3.htm> (Kurzfassung von [ 2])
- [ 2] Thüne, W.: Der Treibhauswindel. Discovery Press. ISBN 3-9803768-6-9
- [ 3] <http://mitglied.lycos.de/climate/strahlung.htm>