

INSTITUT FÜR MATHEMATISCHE PHYSIK
DER TECHNISCHEN UNIVERSITÄT CAROLO-WILHELMINA
- Prof. Dr. G. Gerlich -

Mendelssohnstraße 3
38106 Braunschweig
Tel. 0531-391-5200/01/02
Fax 0531-391-8183
pr. 05341-268495
14. Juli 1998

Vortrag auf dem Herbstkongress der Europäischen Akademie für Umweltfragen,
Präsident Dr. Dr. h. c. H. Metzner, Derendinger Str. 41-45, 72072 Tübingen:
Die Treibhaus-Kontroverse, Leipzig, 9./10. Nov. 1995.

Zusammenfassung:

Die physikalischen Grundlagen des Treibhauseffektes und fiktiver Treibhauseffekte

In den guten Standardlehrbüchern der Experimentalphysik und theoretischen Physik sucht man vergeblich die Stichworte Treibhaus- oder Glashauseffekt und auch deren physikalische Behandlung. Andererseits gehört die Beschreibung des Phänomens, daß im Glashaus oder im Auto bei Sonnenschein die Luft und der Boden normalerweise heißer sind als in der Umgebung, durchaus zu den Vorgängen, bei denen die Physikstudenten vor dem Vordiplom zeigen können, daß sie etwas von der Beschreibung der Strahlung gelernt haben und mit den betreffenden Formeln umgehen können.

Offenbar seit der Arbeit von SVANTE ARRHENIUS aus dem Jahr 1896 hat sich in vielen meteorologischen und klimatologischen Texten ein ganz anderer Glashauseffekt eingebürgert, nämlich daß eine Schicht von Gasen, die Teile des ultraroten Lichtes absorbiert, während sie das sichtbare durchläßt, wie ein Perpetuum mobile zweiter Art arbeiten soll: Der äußere kältere Bereich soll kälter werden, während die innere wärmere Bereich wärmer werden soll, ohne daß äußere Arbeit aufgewandt werden muß. Für diese Mechanismen wird untersucht, welche physikalisch begründbar sind, welche nicht. Zu den letzteren gehört das sogenannte "Strahlungsbudget" für Mittelwerte, für die es keine physikalisch begründeten Gleichungen gibt. Rechnungen für dieses "Strahlungsbudget" gelten aber andererseits als wesentliche moderne Begründung für den fiktiven CO₂-Treibhauseffekt der Atmosphäre.

Prof. Dr. Gerhard Gerlich

Institut für Mathematische Physik der Technischen Universität
Braunschweig, Mendelssohnstr. 3

38106 Braunschweig

Die physikalischen Grundlagen des Treibhauseffektes und fiktiver Treibhauseffekte

(Manuskript)

1) Einleitung

Wenn man die Begriffe "Glashauseffekt" bzw. "Treibhauseffekt" in einem der klassischen guten Lehrbücher der Experimentalphysik oder theoretischen Physik nachlesen möchte, stellt man - möglicherweise mit Überraschung und Enttäuschung - fest, daß man diesen Effekt nicht behandelt findet. Andererseits war in meiner Studienzeit die Erklärung des Treibhauseffektes eine Übungsklausur vor dem Vordiplom im physikalischen Praktikum, in dem Optik, Atomphysik und auch die Strahlungstheorie behandelt wurden. In diesem Studienabschnitt kannte man weder die mathematische Formulierung der Hauptsätze der Thermodynamik, noch die partiellen Differentialgleichungen der Hydrodynamik oder irreversiblen Thermodynamik; der Effekt mußte also in diesem Studienabschnitt mit relativ elementaren Mitteln behandelt werden.

2) Der physikalische Treibhauseffekt

Gerade nach dem heißen trockenen Sommer dieses Jahres kennt jeder Autofahrer den Glashaus- oder Treibhauseffekt: Wenn er sein normal temperiertes Auto am Morgen abgestellt hat, am Vormittag die Sonne scheint und er mittags in sein Auto steigt, verbrennt er sich fast die Finger am Lenkrad, wenn der Bereich des Armaturenbretts der direkten Sonnenstrahlung ausgesetzt war. Außerdem ist im Autoinnenraum die Luft unerträglich heiß, auch wenn man es außerhalb des Autos noch ganz gut aushalten kann. Man öffnet das Fenster und Schiebedach, trotzdem kommt einem beim Fahren eventuell noch von der Armaturenverkleidung unangenehm heiße Luft entgegen. Im Winter kann man einen ähnlichen Effekt beobachten, nur ist man dann meist froh, daß das Autoinnere wärmer ist als die Umgebung. Bei Treibhäusern und Gewächshäusern (greenhouse, glashouse) nutzt man diesen Effekt: Man heizt mit der sehr umweltverträglichen Solarenergie, für die es vermutlich auch in fernerer Zukunft keine Energiesteuer geben wird. Trotzdem haben sich aber Glashäuser als Wohnhäuser selbst in unseren gemäßigten Breiten nicht so stark durchsetzen können, nicht nur, weil die meisten Leute lieber die Energiesteuern bezahlen, im Winter heizen und im Sommer am Tage eine weniger warme Wohnung bevorzugen, sondern weil Glashäuser auch noch andere Nachteile haben.

Man braucht nicht viel physikalischen Sachverstand, um sofort zu erklären, warum das Auto innen heiß ist: Es ist die Sonne, die das Auto innen so aufgeheizt hat. Etwas schwieriger ist aber schon die Frage zu beantworten, wieso es nicht auch *außerhalb* des Autos genauso heiß ist, obwohl dort die Sonne viel weniger behindert auf den Boden scheint. Als Studenten hatten wir damals die physikalischen Phänomene mit deren Beschreibung zur Verfügung, die ich im Anhang zusammengestellt habe.

Mit diesen physikalischen Beziehungen kann man den Treibhauseffekt "erklären": Der Hauptteil der von der Sonne kommenden Strahlung dringt durch die Glasscheiben, da das Maximum der Strahlung der Sonne im gelben Wellenlängenbereich (0.5μ) liegt, für die die Glasscheiben durchlässig sind. Mit der Kirchhoff-Planck-Funktion kann man den Anteil berechnen:

$$\frac{\int_{0.3\mu}^{1\mu} B(5780)d}{\int_0 B(5780)d} = 77,2\% .$$

Durch die Fresnel-Reflexion an *beiden* Grenzflächen der Glasscheiben muß man noch 8 bis 20 Prozent abziehen; also dringt **60-70 Prozent** der Sonnenstrahlung auf den Boden.

Der Boden des Glashauses hat etwa eine Temperatur von $300 \text{ }^\circ\text{K}$; das Maximum der Strahlung eines schwarzen Körpers von $300 \text{ }^\circ\text{K}$ liegt nicht wie bei der Sonne mit einer Temperatur von $6000 \text{ }^\circ\text{K}$ bei 0.5μ , sondern wegen des Wienschen Verschiebungsgesetzes bei

$$6000 / 300 \cdot 0.5 \mu = 10 \mu .$$

Dies ist weit im ultraroten Wellenlängenbereich, bei dem das Glas praktisch alles Licht nach den Beerschen Formeln reflektiert. Praktisch hundert Prozent der Strahlung eines schwarzen Körpers bei Bodentemperaturen liegt oberhalb der Wellenlängen von 3.5μ . Die Wärmestrahlung des Bodens wird also durch die Glasscheiben "eingesperrt". Natürlich ist die Intensität der Strahlung am Boden beim Maximum nach dem Wienschen Gesetz um

$$(6000 / 300)^5 = 20^5 = 3.2 \text{ Millionen}$$

mal kleiner als auf der Sonne und

$$20^5 / 215^2 = 70$$

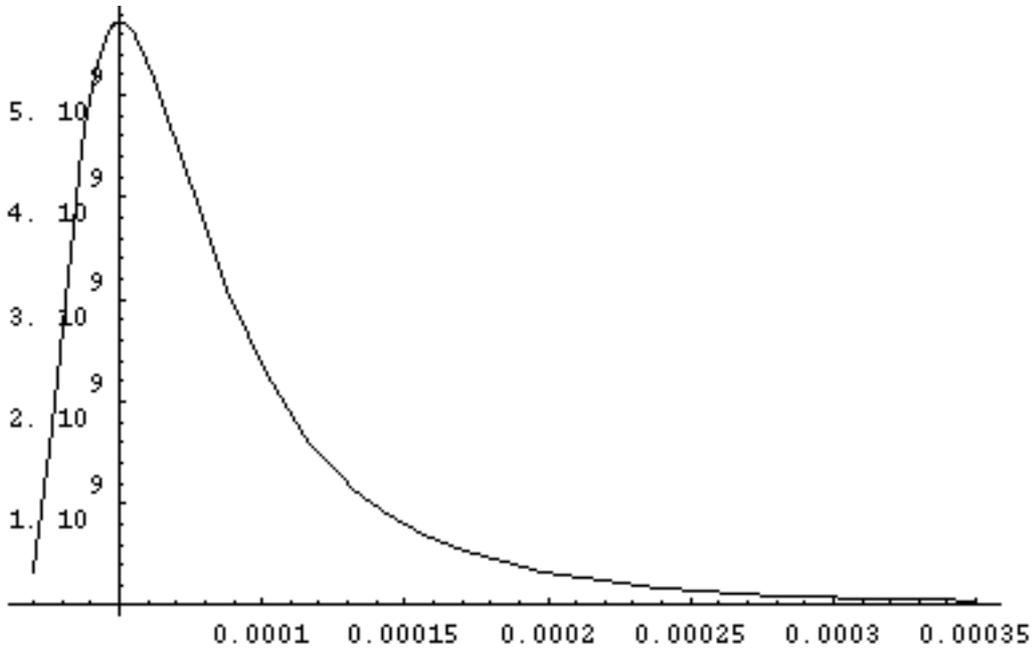
mal kleiner als die Sonnenstrahlung auf der Erde und die Gesamtstrahlung am Boden um

$$20^4 / 215^2 = 3.46$$

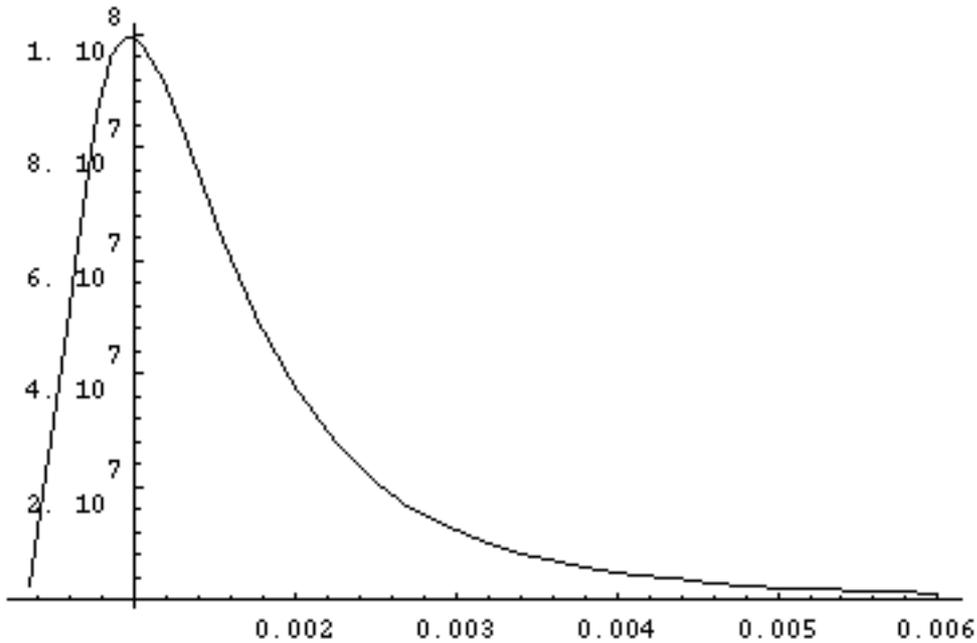
mal kleiner als die eingestrahlte Intensität der Sonnenstrahlung. Um diese Unterschiede zu verdeutlichen, möchte ich hier einmal die Intensitätsverteilungen der Sonnenstrahlung bei der Erdbahn und die eines schwarzen Strahlers von $300 \text{ }^\circ\text{K}$ graphisch über der Wellenlänge darstellen:

Spektrale Intensität der Sonne im Abstand der Erde

(5780 °K, cgs-Einheiten):



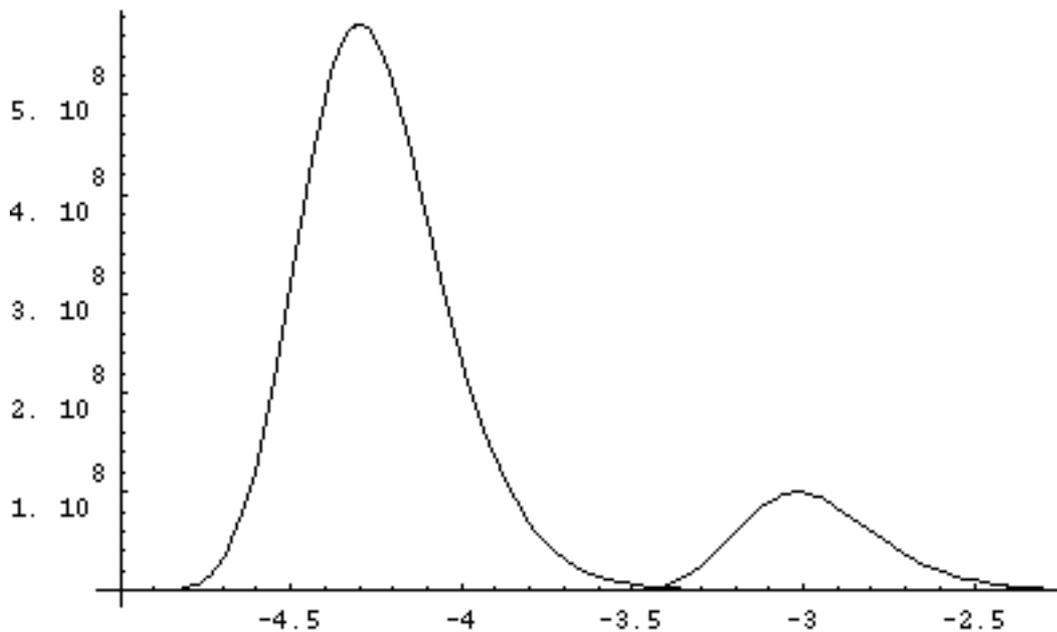
Spektrale Intensität des Erdbodens (300 °K) (cgs-Einheiten):



Man sieht deutlich, daß die Maxima bei 0.5μ bzw. 10μ liegen und deren Intensitäten um mehr als eine Zehnerpotenz verschieden sind. Bei der Sonnenintensität sollte man beachten, daß oberhalb von 0.8μ (ultrarot, infrarot) durchaus ein merklicher Intensitäts-

teil liegt. Die Bodenkurve ist breiter. Um beide Kurven erkennbar in einer Zeichnung unterzubringen, habe ich die Wellenlängen in Zehnerexponenten und von der Sonnenintensität **ein Zehntel** gezeichnet:

Ein Zehntel der spektralen Sonnenintensität neben der Bodenintensität (300 °K) (cgs-Einheiten) über dem Zehnerlogarithmus der Wellenlänge:



In dieser Weise mußten wir Studenten den Treibhauseffekt erklären. Wie viele didaktisch wertvolle Erklärungen ist aber auch diese leider sehr unvollständig und sogar teilweise falsch. Wie vorne erläutert, geht es ja darum, zu erklären, wieso die Luft im Auto wärmer ist als außerhalb des Autos und wieso das Armaturenbrett heißer ist als der Erdboden außerhalb des Autos; d. h. es ist die Situation im Auto mit der außerhalb des Autos zu *vergleichen!*

Ich habe an einem heißen Sommernachmittag die folgenden Messungen gemacht:

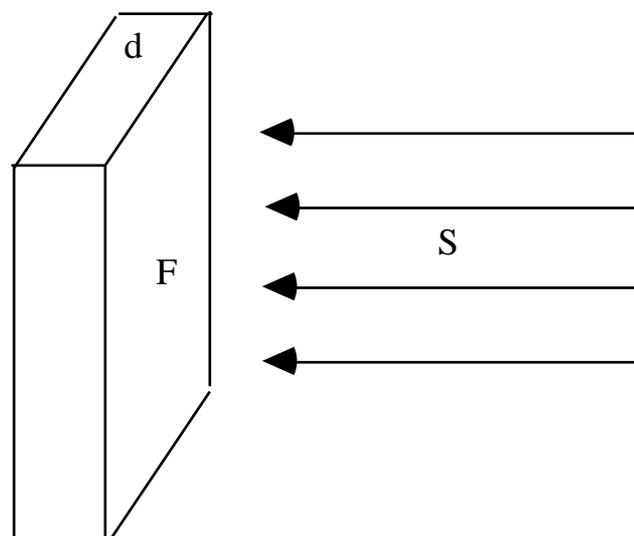
Thermometerfühler im Auto, direkt in der Sonne:	71°C
Thermometerfühler im Auto, im Schatten:	39°C
Thermometerfühler neben dem Auto, direkt in der Sonne, über dem Boden:	31°C
Thermometerfühler neben dem Auto, im Schatten, über dem Boden:	29°C
Im Wohnzimmer:	25°C

In der Sonne erhält man also einen Unterschied von über vierzig Grad!

Anmerkung: Von Prof. Dr. F. Fiedler wurde gegen diese Messungen der Einwand erhoben, daß man berücksichtigen müsse, daß der Boden feucht sei: Sicher sind im Jahresmittel irgendwann die Steine vom Regen naß geworden. Die oben genannten Messungen sind gemacht worden, als es wochenlang nicht geregnet hatte! Es sind wirkliche Meßwerte und *nicht* Mittelwerte über alle Breiten und Längen der Erde und Tag und Nacht und alle Jahreszeiten und Witterungswechsel.

Jedem Klimatologen, der an den CO₂-Treibhauseffekt glaubt, möchte ich diese Messungen empfehlen, da er schon beim Messen *fühlt*, daß der gerade beschriebene Effekt mit der eingesperreten Wärmestrahlung überhaupt nichts zu tun hat. Auch kann man die Autoscheiben anfassen und bemerken, daß die Scheiben, die ja das Ultrarotlicht absorbieren, eher kühl sind und auf keinen Fall das Autoinnere aufheizen. Wenn man die Hand im Sonnenschatten neben einen von der Sonne beschienenen sehr heißen Teil des Armaturenbrettes hält, spürt man praktisch keine Wärmestrahlung, trotz der hohen Temperatur von siebzig Grad Celsius. Dagegen spürt man deutlich die heiße Luft. Über dem Erdboden bemerkt man, wieso es dort kühler ist, als im Auto: Im Auto "steht" die Luft, über dem Boden spürt man immer eine leichte Luftbewegung. Der Boden ist *nie* vollständig eben, also gibt es immer Licht und Schatten, wodurch die Luftzirkulation in Gang gehalten wird. Diesen Effekt benutzte man früher bei vielen Altbauwohnungen in Braunschweig. Die Südfront der Häuser hatte Ausbuchtungen, so daß die meiste Zeit des Tages Teile der Wand im Schatten liegen und durch die dadurch zusätzlich angeregte Zirkulation die Wände weniger stark aufgeheizt wurden.

Wir betrachten einen Körper, der mit der Fläche F der Strahlungsintensität S ausgesetzt ist und die Dicke d und spezifische Wärme c_v besitzt:



$$Fdc_v \frac{dT}{dt} = FS$$

bzw.

$$\frac{dT}{dt} = \frac{S}{c_v d}$$

bzw.

$$T = T_o + \frac{S}{c_v d} (t - t_o)$$

*In dieser Näherung gibt es durch die eingestrahelte Intensität einen linearen Anstieg der Temperatur in der Zeit. Man sieht, daß für kleine Dicken des absorbierenden Körpers die Temperaturerhöhung besonders schnell ist: Dünne Schichten werden durch die Sonnenstrahlung besonders schnell auf hohe Temperaturen gebracht. Entsprechendes gilt für die Wärmekapazität c_v einer Volumeneinheit: Ist sie groß, ist die Temperaturänderung langsam (feste Körper); ist sie klein, ist die Temperaturänderung schnell (Gase). Die eingestrahelte Intensität ist also für die schnelle **Änderung der Temperatur** verantwortlich, nicht für die Größe selbst. *Dieser Anstieg der Temperatur wird durch den **Wärmeübergang** vom Körper an die Umgebung aufgefangen.**

Nicht nur die Leute, die Brennkammern und Heizkessel bauen, müssen sich mit dem Problemen des *Wärmeüberganges* beschäftigen. Hier gibt es einen alten Standardtext vom Prof. A. Schack, der inzwischen in der achten Auflage erschienen ist:

Der industrielle Wärmeübergang, Verlag Stahleisen m. b. H., Düsseldorf, 1. Aufl. 1929, 8. Aufl. 1983.

Es wird hier unterschieden zwischen der Wärmeübertragung durch

Leitung,
Konvektion,
kondensierende Dämpfe und
Strahlung.

*Die den Temperaturanstieg bremsenden Wärmeübergangsmechanismen Leitung, kondensierende Dämpfe und Strahlung funktionieren für das Autoinnere und den Außenbereich praktisch gleich. Also bleibt als mögliche Ursache für einen Unterschied in den Endtemperaturen nur die **Wärmekonvektion**: Über dem von der*

Strahlung geheizten Körper wird ein Volumenbereich der Luft (durch Wärmeleitung) aufgeheizt, der dann aufsteigt und durch kältere ersetzt wird. Dadurch bleibt im Mittel eine höhere Temperaturdifferenz zwischen dem Körper und der Luft und ein höherer Wärmeübergang gegenüber der Situation, daß die Luft nicht ersetzt würde. Das passiert auch im Autoinnern, aber dort bleibt die Luft fast eingesperrt und die die aufsteigende Luft ersetzende wird immer wärmer, was zu einem niedrigeren Wärmeübergang führt. Außerhalb des Autos steht natürlich wesentlich mehr kühlere Luft zur Verfügung als im Autoinnern. Insgesamt stellt sich also sowohl für die das Sonnenlicht absorbierenden Oberflächen, als auch die Luft eine höhere Temperatur ein.

Natürlich verliert der bestrahlte Körper auch durch **Wärmestrahlung** Energie. Diese Strahlung ist aber nach dem Stefan-Boltzmannschen Gesetz der vierten Potenz der absoluten Temperatur proportional: *Der wärmere Körper im Autoinnern würde also in der Zeiteinheit mehr Wärme als der kältere Boden außerhalb verlieren, was aber zu einer höheren Temperatur außerhalb führen würde, wenn der Temperaturanstieg nicht durch einen anderen Mechanismus aufgefangen würde! Wenn man bedenkt, daß durch die Metallteile des Autos nur ein kleiner Bruchteil der vorne abgeschätzten 60-70 Prozent der Strahlungsintensität der Sonne in das Autoinnere gelangt, würde dieser Effekt noch wesentlich stärker zugunsten des Außenbereichs eingehen! Die "Erklärung" des physikalischen Treibhauseffektes nur mit einer Betrachtung der Strahlungsbilanz würde also zu dem umgekehrten Effekt führen!*

Natürlich bleibt noch der vorne diskutierte Effekt der "eingesperrten" Wärmestrahlung durch die reflektierenden Glasscheiben, den man in diesem Zusammenhang einfach als *behinderten* Wärmeübergang durch Wärmestrahlung lesen kann. Dies bedeutet also eine Verlangsamung der Abkühlung. **Da aber dieser Wärmeübergang gegenüber der Konvektion zu vernachlässigen ist, bleibt von den Absorptions- und Reflexionseigenschaften der Gläser für Ultrarotstrahlen für die Erklärung des physikalischen Treibhauseffektes nichts mehr übrig.**

Bei dieser Erklärung des physikalischen Treibhauseffektes spielt also weder das Absorptionsvermögen, noch das Reflexionsvermögen des Glases für das Infrarotlicht eine Rolle, sondern nur die durch die Glasscheiben behinderte Luftbewegung. Obwohl dies schon lange den Meteorologen bekannt ist (The "greenhouse" effect, J. Appl. Meteor. 1973, **12**, 556-557; 1974, **13**, 603 - 606), wird immer wieder von ihnen der physikalische Treibhauseffekt für die Erklärung von Temperatureffekten der Planetenatmosphären herangezogen.

3) Die fiktiven Treibhauseffekte

Nachdem nun ausführlich dargestellt wurde, daß der physikalische Treibhauseffekt darin besteht, zu erklären, wieso die Lufttemperaturen im geschlossenen Glashaus oder im Auto höher sind als außerhalb, müssen wir genauer die fiktiven Treibhauseffekte beschreiben. Ich benutze den Plural, weil es inzwischen viele unterschiedliche Phänomene und unterschiedliche Erklärungen für diese Effekte gibt. Allen fiktiven Treibhauseffekten ist wohl gemeinsam, daß *eine* Ursache festliegen soll: Eine eventuelle Erhöhung des CO₂-Anteils in der Atmosphäre soll zu einer erhöhten Temperatur des Erdbodens und der bodennahen Luft führen. Ich nenne dies den **CO₂-Treibhauseffekt**. Ich möchte darauf aufmerksam machen, daß wir bei diesem Effekt den gleichen Beteiligten, den Boden außerhalb des Autos, haben, *aber nun für den gegenteiligen Mechanismus*. Methodisch gibt es einen gewaltigen Unterschied: **Beim physikalischen Treibhauseffekt kann man Messungen machen und den Unterschied der Meßwerte sehen und den Effekt völlig ohne wissenschaftliche Erklärungen beobachten. Bei den fiktiven Treibhauseffekten kann man nichts beobachten, und es werden nur *Rechnungen* verglichen:** Früher extrem einfache Rechnungen, später immer aufwendigere, inzwischen werden Computersimulationen herangezogen, die kein Mensch nachvollziehen kann.

Wenn man schon in den guten Lehrbüchern der Physik unter dem Stichwort Treibhauseffekt nichts findet, bleibt nur das Konversationslexikon: In Meyers Enzyklopädischen Lexikon ist man erfolgreich: Man findet bei "Treibhauseffekt" den Verweis auf "Glashauseffekt" und dort:

Glashauseffekt (Glashauswirkung),
Bez. für den Einfluß der Erdatmosphäre auf den Strahlungs- und Wärmehaushalt der Erde, der der Wirkung eines Gewächshausglasdaches ähnelt: Wasserdampf und Kohlendioxid in der Atmosphäre lassen die kurzwellige Sonnenstrahlung mit relativ geringer Abschwächung zur Erdoberfläche gelangen, absorbieren bzw. reflektieren jedoch den von der Erdoberfläche ausgehenden langwelligen [Wärme]strahlungsanteil (atmosphär. Gegenstrahlung; ↑ Atmosphäre).

Danach handelt es sich offensichtlich um einen meteorologischen Effekt, bei dem Gase *ohne einen Sprung des Brechungsindex sollen reflektieren können*. Daß dieses Phänomen bei den kurzen Wellenlängen der Wärmestrahlung nicht möglich ist, habe ich im Anhang (m) ausgeführt. Es ist offensichtlich, daß hier die *Reemission* mit der *Reflexion* verwechselt wird (Anhang (k), (l)).

Von den Klimatologen wird für diesen Mechanismus ein Nobelpreisträger für Chemie erwähnt:

Svante [August] Arrhenius, 19. 2. 1859 - 2. 10. 1927.

Von ihm stammt eine der frühesten, extrem einfachen Rechnungen aus dem Jahr **1896**, die sofort - mit Recht - angezweifelt wurde und wohl viele Jahrzehnte in Vergessenheit geraten ist. Es ist eine Arbeit über den Einfluß der Kohlensäure in der Luft auf die Bodentemperatur der Erde:

THE
LONDON, EDINBURGH, AND DUBLIN
PHILOSOPHICAL MAGAZINE
AND
JOURNAL OF SCIENCE.

[FIFTH SERIES.]

APRIL 1896.

XXXI. *On the Influence of Carbonic Acid in the Air upon the Temperature of the Ground.* By Prof. SVANTE ARRHENIUS*.

I. *Introduction: Observations of Langley on Atmospheric Absorption.*

A GREAT deal has been written on the influence of the absorption of the atmosphere upon the climate. Tyndall † in particular has pointed out the enormous importance of this question. To him it was chiefly the diurnal and annual variations of the temperature that were lessened by this circumstance. Another side of the question, that has long attracted the attention of physicists, is this: Is the mean temperature of the ground in any way influenced by the presence of heat-absorbing gases in the atmosphere? Fourier ‡ maintained that the atmosphere acts like the glass of a hot-house, because it lets through the light rays of the sun but retains the dark rays from the ground. This idea was elaborated by Pouillet §; and Langley was by some of his researches led to the view, that "the temperature of the earth under direct sunshine, even though our atmosphere were present as now, would probably fall to -200° C., if that atmosphere did not possess the quality of selective

* Extract from a paper presented to the Royal Swedish Academy of Sciences, 11th December, 1895. Communicated by the Author.

† 'Heat a Mode of Motion,' 2nd ed. p. 405 (Lond., 1865).

‡ *Mém. de l'Ac. R. d. Sci. de l'Inst. de France*, t. vii. 1827.

§ *Comptes rendus*, t. vii. p. 41 (1838).

In dieser recht langen Arbeit stellt Arrhenius die Hypothese zur Diskussion, daß das **Auftreten der Warm- und Eiszeiten** durch gewisse Gase in der Atmosphäre, die Wärmestrahlen absorbieren, soll erklärt werden können. Er erwähnt hier eine Arbeit von Fourier aus dem Jahre **1827**, der behauptet haben soll, daß die Atmosphäre wie das Glas eines Treibhauses arbeite, da sie die Lichtstrahlen der Sonne hindurchlasse, aber die dunklen Strahlen vom Boden zurückbehalte. Auf welcher abenteuerlichen Weise Arrhenius das Stefan-Boltzmannsche Strahlungsgesetz benutzt, um diesen "Effekt" zu berechnen, erkennt man besser in einer anderen Publikation, in der er seine Eiszeithypothese verteidigt:

S. Arrhenius(1906): Die vermutliche Ursache der Klimaschwankungen.

MEDDELANDEN

FRÅN

K. VETENSKAPSAKADEMIENS NOBELINSTITUT

BAND 1. N:o 2.

Die vermutliche Ursache der Klimaschwankungen

von

SVANTE ARRHENIUS.

In seiner Bakerian Lecture vom 7. Febr. 1861¹ gab Tyndall die Resultate einiger Untersuchungen über die relativ kräftige Absorption von Wärmestrahlen durch Wasserdampf und Kohlensäure. Auf Grund dieser Untersuchungen sprach er die Ansicht aus, dass Veränderungen im Gehalt der Atmosphäre an Kohlensäure und Wasserdampf »alle die Klimaschwankungen, welche durch die Untersuchungen der Geologen konstatiert sind, erklären könnten.»

Später habe ich versucht diese Idée über den thermischen Einfluss der atmosphärischen Absorption, welche von De Saussure, Fourier und Pouillet vor etwa hundert Jahren entwickelt wurde, weiter quantitativ zu entwickeln, indem ich zu berechnen versuchte, wie viele Grade Temperatursteigerung der Erdoberfläche einer bestimmten Schwankung des Kohlensäuregehalts der Atmosphäre entsprechen. Seitdem ich meine letzte Berechnung ausführte, sind einige Untersuchungen erschienen, welche diese interessante Frage berühren und welche ich nicht unerwähnt lassen möchte, da sie teilweise zu unrichtigen Schlussfolgerungen veranlassen könnten.

Die erste dieser Untersuchungen stammt von Hrn Koch.³ Er beobachtete die Strahlung von einer 100° warmen Quelle,

¹ Neugedruckt in John Tyndall: Contributions to molecular physics London 1872. Die citierte Stelle findet sich auf S. 40.

² S. Arrhenius: Phil. Mag. (5) 41. 237, April 1896. Bihang der Stockh. Ak. d. Wiss. Bd. 22, Abth. 1 N:o 1, 1896, Drudes Annalen d. Phys. Bd. 4, 690, 1901, Öfversigt d. Stockh. Ak. 1901, N:o 1. p. 55 und 56.

³ J. Koch: Öfversigt der Stockh. Ak. 1901. 475.

Zuerst schätzt Arrhenius ab, daß wegen der Absorption der ultraroten Erdstrahlung durch die Kohlensäure 18.7 Prozent der Erdstrahlung nicht in den Weltraum abgestrahlt würden. **Dies könne man dadurch berücksichtigen, daß die mittlere effektive Strahlungstemperatur der Erde, die er als 15 °C bzw. 288 °K annimmt, so erniedrigt werden müsse, daß nach dem Stefan-Boltzmannschen Gesetz nur noch das 1- 0.187=0.813-fache ausgestrahlt würde:** Er erhält

$$T_{\text{eff}} = \sqrt[4]{0.813} \cdot 288 = 273.47,$$

also als Temperaturerniedrigung 14.5 °C. Ich habe mit meinem Rechner die vierte Wurzel etwas genauer ausgerechnet als Arrhenius. Da man diese absurde Behauptung vermutlich nicht für möglich hält, habe ich hier den entsprechenden Abschnitt kopiert:

Diese Äusserung kann wohl die Vorstellung erwecken, als ob von mir geäußert worden wäre, dass eine Verminderung des Kohlensäuregehalts der Atmosphäre um 20 Prozent genügend wäre, um die Temperatur der Eiszeit hervorzurufen, d. h. um die mittlere Temperatur Europas, um vier bis fünf Grad C. zu erniedrigen. Um zu verhindern dass eine solche Vorstellung um sich greife, möchte ich hervorheben, dass nach der alten Berechnung eine Abnahme der Kohlensäuremenge um 50 Prozent eine Temperaturabnahme von 4 (1897) bzw. 3,2 (1901) Grad hervorrufen würde.

Die Ansicht, dass eine Kohlensäureabnahme der Luft die Temperatur einer Eiszeit erklären kann, wird nicht eher als unhaltbar erwiesen, als bis man zeigt, dass das vollkommene Verschwinden der Kohlensäure aus der Atmosphäre nicht genügend wäre, um eine Temperaturabnahme von vier bis fünf Grad hervorzurufen. Es ist nun leicht eine Schätzung auszuführen wie tief die Temperatur sinken würde, wenn die Strahlung der Erde im Verhältniss 1 zu 0,775, d. h. um 29 Prozent, steigen würde, was einigermaßen den Daten von Hrn. Rubens und Ladenburg entspricht. Ein Steigen der Ausstrahlung um 1 Proz. entspricht einer Temperatursenkung von 0,72° C. ($=\frac{1}{100} \cdot 288$, da die mittlere absolute Temperatur der Erdoberfläche zu 15° C. = 288° abs. angenommen wird). Man könnte demnach eine Temperatursenkung von etwa 20,9° als Folge des Verschwindens der Kohlensäure aus der Atmosphäre vermuten.

4 MEDD. FRÅN VET.-AKAD:S NOBELINSTITUT. BD. 1. N:O 2.

Eine genauere Rechnung, wobei die geringe Strahlung der Kohlensäure berücksichtigt wird, und wovon ich die Details in meiner Untersuchung von 1901 gegeben habe,¹ führt zu etwas niedrigeren Zahlen. Nach derselben würde von den 22,5 Prozent der Erdstrahlung, welche durch die Kohlensäure der Atmosphäre in ihrem jetzigen Zustand absorbiert werden, 3,8 Prozent wieder von der Kohlensäure in den Weltraum ausgestrahlt werden, so dass die wirkliche Verminderung der Erdstrahlung 18,7 Prozent betragen würde. Anstatt der jetzigen Temperatur von 15°C . = 288°abs. hätte man also nach Verschwinden der Kohlensäure eine absolute Temperatur T , für welche gilt:

$$T^4 : 288^4 = (1 - 0,187) : 1$$

woraus $T = 273,4^{\circ}\text{abs.} = 0,4^{\circ}\text{C}$.

Die jetzige Kohlensäuremenge würde demnach die Temperatur der Erdoberfläche um $14,6^{\circ}\text{C}$. erhöhen; ihr Verschwinden aus der Atmosphäre würde infolgedessen eine etwa drei mal so starke Temperaturenniedrigung als diejenige, welche für die Eiszeit charakteristisch war, hervorrufen.

In ähnlicher Weise berechne ich, dass eine Verminderung des Kohlensäuregehalts zur Hälfte oder eine Zunahme desselben auf den doppelten Betrag Temperaturänderungen von $-1,5^{\circ}\text{C}$. bzw. $+1,6^{\circ}\text{C}$. entsprechen würde.

In den sechziger und siebziger Jahren dieses Jahrhunderts bemerkten die Atmosphärenmodellrechner die politische Schubkraft des CO_2 -Treibhauseffektes, da man ihn ja als von den Menschen erzeugt verkaufen konnte. Diese Leute bauten eine CO_2 -Wirkung in ihre Atmosphärenmodelle und siehe da, es kamen beim Verdoppeln des CO_2 -Anteils in der Atmosphäre bei den Modellen Temperaturerhöhungen zwischen **0.7 bis 9.6 °K** heraus! Dies kann man mit den vermuteten Ursachen für die Unterschiede nachlesen in:

Stephen H. Schneider: On the Carbon Dioxide-Climate Confusion, Journal of Atmospheric Sciences, 32, p. 2060 (1975).

Inzwischen trimmt man die Computersimulationen so, daß die Ausreißer nicht mehr vorkommen. Außerdem koppelt man Modelle, damit man noch leichter Steuerungen der Ergebnisse in Richtung der aktuellen, auf demokratische Weise bestimmten Werte vornehmen kann.

Beim CO₂-Treibhauseffekt geht es, wie beim physikalischen, um eine Vergleichssituation, nur wechselt sie von Zuhörerkreis zu Zuhörerkreis: Zum Beispiel wird eine fiktive "Modellrechnung" für einen Himmelskörper ohne Atmosphäre mit Modellrechnungen für die Erdatmosphäre oder mit berechneten "Mittelwerttemperaturen" verglichen. Oder es werden Modellrechnungen für die Erdatmosphäre, gekoppelt mit Modellrechnungen für die Ozeanströmungen, mit unterschiedlichen Parametern verglichen. Außerdem werden noch Strahlungstransportrechnungen eingebaut. Natürlich kann ich hier nicht alle diese Modellrechnungen besprechen, da ich sie gar nicht alle kennen kann. *Eines haben diese verschiedenen Vergleiche gemeinsam: in der öffentlichen Propaganda spielt immer das "Strahlungsbudget" bzw. die "Strahlungsbilanz" eine besondere Rolle, auf deren physikalische Grundlagen ich hier genauer eingehen möchte.*

Wir wollen durchrechnen, was sich ergibt, wenn **für den Wärmeübergang von einem bestrahlten Körper nur die Wärmestrahlung** möglich wäre (**Strahlungsbilanz**). Wir benutzen das Stefan-Boltzmannsche Gesetz, um die durch diese Bilanz bestimmte Bodentemperatur zu berechnen. Ich habe nur auf der rechten Seite einen Korrekturfaktor angebracht, den auf der linken Seite - kein Boden ist ein echter schwarzer Strahler - kann man sich auf die andere Seite gebracht denken:

$$T_{\text{Boden}}^4 = S = 5780^4 \frac{1}{46225} \quad 1368 \text{ Watt/m}^2 \text{ bzw.}$$

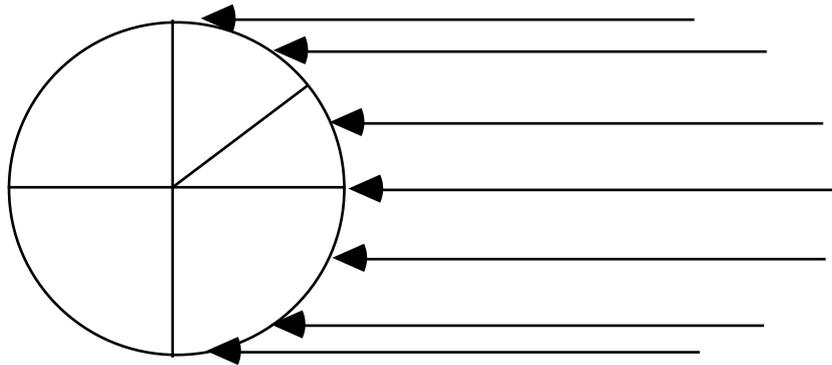
$$T_{\text{Boden}} = \sqrt[4]{\frac{5780}{215^2}} = \sqrt[4]{\quad} \quad 394,2$$

= 1	= 0.7	= .62	= 0.25	= 0.25 0.7
394.2 °K	360.6 °K	349.8 °K	278.7 °K	255 °K
121.2 °C	87.6 °C	76.8 °C	5.7 °C	-18 °C

Nur die in der Sonne des Autoinnern gemessene Temperatur hat hier Ähnlichkeit mit den ersten hier berechneten. **Also ist die Temperatur außerhalb des Autos nicht durch die Strahlungsbilanz bestimmt!** Bei diesen Berechnungen haben wir mit der letzten Spalte gleich auch den ersten fiktiven Treibhauseffekt "erklärt": die Erde *ohne die Treibhausgase* in der Atmosphäre sollte eine "mittlere effektive" Temperatur von -18 °C haben. Man erhält dies, indem man die Wirkung der Atmosphäre dadurch berücksichtigt, daß die Solarkonstante mit dem Faktor 0.7 reduziert wird *und ein Viertel der Solarkonstanten* in die "Strahlungsbilanz" eingesetzt wird. Wie kommt dieses Viertel zustande? Die Sonnenstrahlung wird von der Fläche R_{Erde}^2 absorbiert und auf die Kugeloberfläche $4 R_{\text{Erde}}^2$ "verteilt". Teilt man diese Flächen, erhält man ein

Viertel.

Daß ein solcher Mittelwert völlig ohne irgendeine physikalische Bedeutung ist, kann man am einfachsten dadurch zeigen, daß man die mittlere Temperatur für eine solche bestrahlte Kugel berechnet, wenn sich die Oberfläche in diesem sogenannten Strahlungsgleichgewicht befindet:



$$T^4 = \begin{cases} S \cos \mu & \text{für } 0 \leq \mu \leq \pi/2 \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} = 5780^4 \frac{1}{215^2} \cos \mu \quad \text{für } \mu \leq \pi/2$$

Man erkennt sofort, daß man die vorne angegebenen "mittleren" effektiven Temperaturen erhält, wenn man die rechte Seite durch π teilt, T^4 über die Kugeloberfläche mittelt und dann die vierte Wurzel zieht:

$$\begin{aligned} T_{\text{eff}}^4 &= \frac{1}{4} \int_0^{\pi/2} T^4 d\mu d\varphi = \frac{1}{4} \int_0^{\pi/2} S \cos \mu d\mu d\varphi = \frac{1}{2} \int_0^{\pi/2} S \cos \mu d\mu \\ &= \frac{1}{4} S = \frac{1}{4} (394.2)^4 \\ T_{\text{eff}} &= \sqrt[4]{\frac{1}{4} S} = \sqrt[4]{\frac{1}{4}} 394.2 = \frac{1}{2} \sqrt{2} \sqrt[4]{S} = 0.707 \sqrt[4]{S} 394.2 \end{aligned}$$

Wenn man die mittlere Temperatur berechnen möchte, muß man aber *zuerst* die vierte Wurzel ziehen und dann mitteln:

$$\begin{aligned} T_{\text{gem}} &= \frac{1}{4} \int_0^{\pi/2} T d\mu d\varphi = \frac{1}{4} \int_0^{\pi/2} \sqrt[4]{\frac{S}{\cos \mu}} \cos \mu d\mu d\varphi = \frac{1}{2} \int_0^{\pi/2} \sqrt[4]{\frac{S}{\cos \mu}} \cos \mu d\mu = \frac{2}{5} \sqrt[4]{\frac{S}{5}} \\ T_{\text{gem}} &= \frac{2}{5} \sqrt[4]{S} 394.2 = 0.4 \sqrt[4]{S} 394.2 \end{aligned}$$

Die gemittelten Temperaturen sind erheblich kleiner als die vierte Wurzel von der gemittelten vierten Potenz der absoluten Temperatur:

	= 1	= 0.7	= 0.62
$T_{\text{eff}} - 273$	5.7 °C	-18 °C	-25.6
$T_{\text{gem}} - 273$	-115 °C	-129 °C	-133 °C

Die Abstrahlung eines Körpers richtet sich aber nach der tatsächlichen Temperatur und nicht nach irgendwelchen Temperaturmittelwerten! Temperaturmittelwerte müssen immer aus gegebenen Temperaturverteilungen bestimmt werden und für diese Mittelwerte gibt es keine lösbaren theoretischen Modelle. Damit ist wohl deutlich gezeigt, daß alle Berechnungen mit einem "mittleren Strahlungsbudget" oder einer "Strahlungsbilanz" nichts mit mittleren Erdtemperaturen zu tun haben.

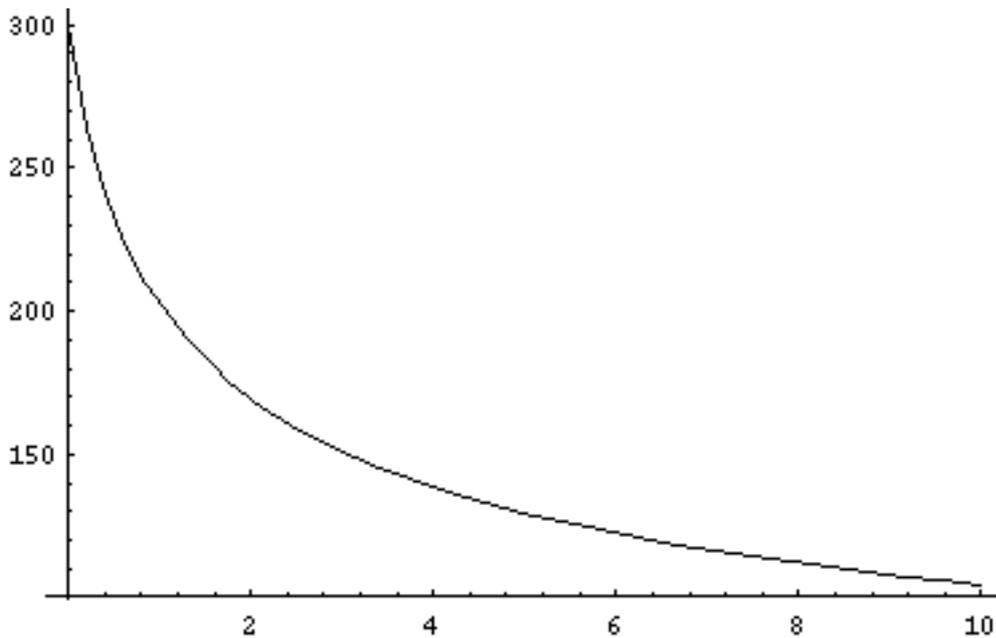
Ich möchte hier kurz das Beispiel eines ausstrahlenden Volumens behandeln, wenn die durch die Oberfläche tretende Strahlungsdichte T^4 aus dem Wärmeinhalt des Volumens stammen soll, obwohl sich diese Situation experimentell nicht einfach, wenn überhaupt, verwirklichen läßt. Wenn man die Ausgleichsvorgänge im Innern vernachlässigt, erhält man für diese Situation die Differentialgleichung

$$V c_v \frac{dT}{dt} = -F T^4 \text{ bzw. } \frac{dT}{dt} = -\frac{F}{c_v} T^4 \text{ mit } F = \frac{F}{V}.$$

Für einen Würfel der Kantenlänge a ist $F = 6/a$, bei einer Kugel vom Radius r ist $F = 3/r$; für einen Einheitswürfel bzw. eine Einheitskugel ist $F = 6$ bzw. $F = 4.8$. Diese Differentialgleichung kann man einfach lösen, man erhält

$$T(t) = \frac{T_o}{\sqrt[3]{1 + \frac{3 T_o^3}{c_v} t}}.$$

Für den Einheitswürfel (Kubikzentimeter) erhält man bei einer Ausgangstemperatur von 300 °K mit den Werten für Luft in etwa drei Sekunden den halben Temperaturwert:



Bei Eisen ist c_v etwa dreitausend mal größer und deshalb der Abfall auf die halbe Temperatur in ungefähr drei Stunden erreicht. Selbst wenn man nur eine der Würfel­flächen abstrahlen ließe, erhielte man bei Luft in drei Sekunden einen Temperaturabfall von siebzig Grad und in zehn Stunden um fast 290 Grad, also völlig unrealistische Abkühlungsvorgänge. Diese einfache Abschätzung zeigt also, daß man sehr vorsichtig sein muß, wenn man die Strahlungsgesetze für die Hohlraumstrahlung, bei denen die Energie aus den geheizten Wänden des Hohlraums kommt, einfach für Gase benutzen möchte, bei denen die ausgestrahlte elektromagnetische Strahlung von der Bewegung der Gasmoleküle stammen müßte (vgl. Anhang (j) und (k))!

Prof. A. Schack, der den vorne erwähnten Standardtext für den industriellen Wärmeübergang geschrieben hat, hat in den zwanziger Jahren als erster darauf hingewiesen, daß die ultrarotes Licht absorbierenden Gase Kohlendioxid und Wasserdampf in den Feuergasen bei den hohen Brenntemperaturen durch eine erhöhte Emission im Ultraroten für einen erhöhten Wärmeübergang in den Brennkammern verantwortlich sein könnten. Mit Messungen des spektralen Absorptionsvermögens von Kohlendioxid und Wasserdampf hat er die Emission abgeschätzt. In einem alten Artikel (1972) in den Physikalischen Blättern (1/72, S. 26, Der Einfluß des Kohlendioxidgehalts der Luft auf das Klima der Welt) hat er sich in die Klimadiskussion eingemischt und auf die wesentliche Rolle des Wasserdampfes hingewiesen. Er zeigt, daß, wenn der Wasserdampf nicht in den meisten Situationen schon das Ultrarotlicht absorbiert hätte, CO₂ höchstens nur ein Siebtel der Wärmestrahlung des Bodens absorbieren würde. Außerdem würde ein Verdoppeln des CO₂-Gehalts der Luft nur die charakteristische Absorptionslänge für die Strahlung halbieren, d. h. die Strahlung würde zum Beispiel statt auf einer Länge

von 10 km auf einer Länge von 5 km absorbiert. Auf den absurden Gedanken, mit der vom Gas absorbierten Strahlung den strahlenden, wärmeren Boden zu erwärmen, ist er nicht gekommen. Gegen diese Abschätzung des CO₂-Treibhauseffektes ist eingewandt worden, daß Prof. Schack nicht kompliziert genug gerechnet habe

(vgl. Hans Oeschger, Neue Zürcher Zeitung, Nr. 262, 9. 11. 1976, S. 28.);

insbesondere werden Strahlungstransportrechnungen erwähnt. Diese Rechnungen wurden aus gutem Grund früher nur für Sternatmosphären durchgeführt, weil die Vorgänge in Planetenatmosphären für solche einfachen Modellannahmen viel zu kompliziert sind. Der Witz der astrophysikalischen Strahlungstransportrechnungen besteht darin, mit *einer* Randintensitätsverteilung und *einer* Höhenschichtung der Temperatur möglichst viele Absorptionslinien (mit der Sahaschen Gleichung und vielen anderen Zusatzhypothesen) zu berechnen, um damit auf die Zusammensetzung der Sternatmosphären zu schließen. Die Randverteilung der Strahlungsintensität bzw. Temperatur erhält man *nicht* aus diesen Rechnungen. Wenn man bedenkt, daß Prof. Schack als erster für die Brennkessel die selektive Reemission durch die Ultrarotlicht absorbierenden Feuergase berücksichtigt hat, wirkt es fast erheiternd, wenn Meteorologen kommen und ihm vorhalten, er habe zu einfach gerechnet, nur weil er wußte, welche primitive physikalische Vorstellungen hinter den Gleichungen für den Strahlungstransport stehen (vgl. Anhang (k), (l)) !

Bei dem vorne von Arrhenius angegebenen Zitat von Fourier muß man bedenken, daß in dieser Zeit die beiden *Hauptsätze der mechanischen Wärmetheorie* nicht bekannt waren. Sie lauten in der Formulierung von Rudolf Clausius, dem "Erfinder" der mathematischen Form des ersten und zweiten Hauptsatzes (Die Mechanische Wärmetheorie, 3. Aufl. , Vieweg Braunschweig 1887):

1. Hauptsatz auf S. 24:

In allen Fällen, wo durch Wärme Arbeit entsteht, wird eine der erzeugten Arbeit proportionale Wärmemenge verbraucht, und umgekehrt kann durch Verbrauch einer ebenso großen Arbeit dieselbe Wärmemenge erzeugt werden.

bzw. auf S. 25:

Es läßt sich Arbeit in Wärme und umgekehrt Wärme in Arbeit umwandeln, wobei stets die Größe der einen der der anderen proportional ist.

2. Hauptsatz auf S. 81:

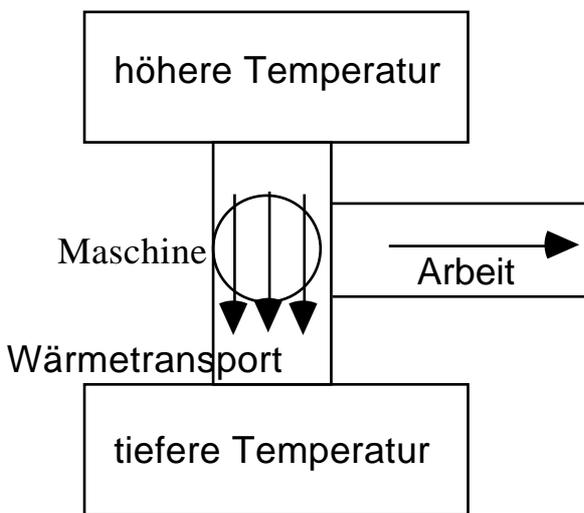
Die Wärme kann nicht von selbst aus einem kälteren in einen wärmeren Körper übergehen.

bzw. auf S. 82:

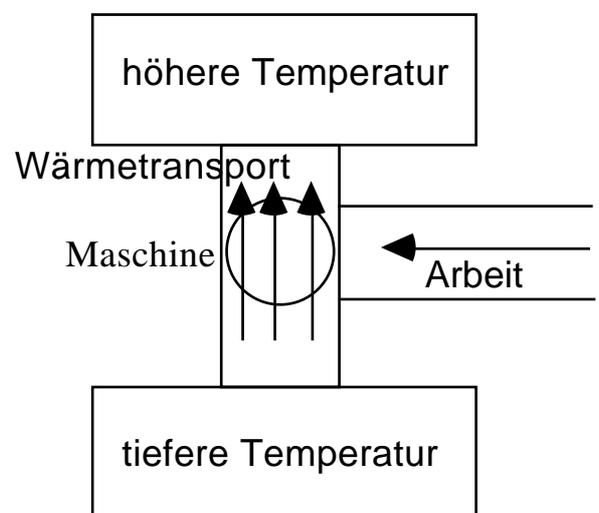
Ein Wärmeübergang aus einem kälteren in einen wärmeren Körper kann nicht ohne Compensation stattfinden.

R. Clausius untersucht ausführlich, daß diese Aussage auch auf die *Wärmestrahlung* anzuwenden ist, selbst wenn man mit Spiegeln und Linsen Abbildungen der Flächen vornimmt (loc. cit. S. 317-354). Es ist ganz nützlich, sich den zweiten Hauptsatz mit Bildern zu veranschaulichen:

Dampfmaschine funktioniert:

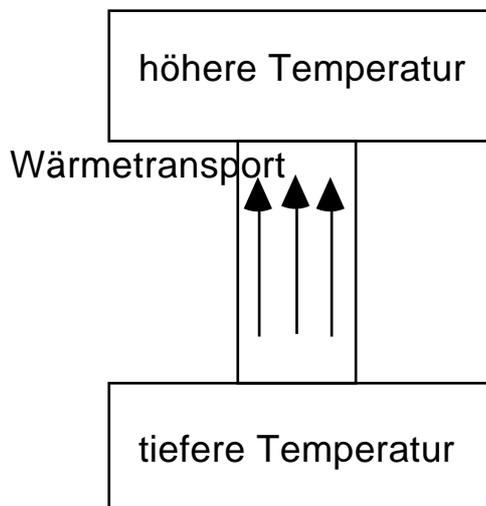


Wärmepumpe funktioniert:

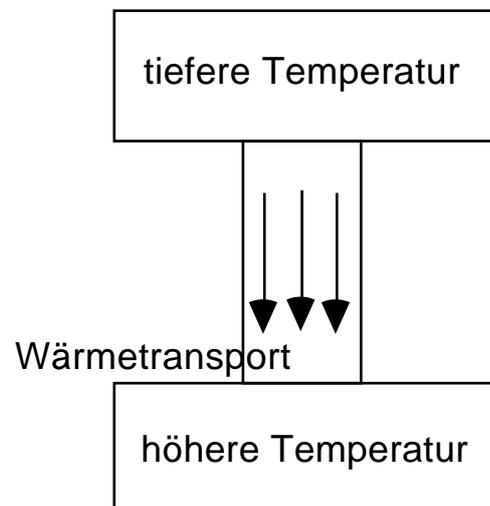


Perpetuum mobile zweiter Art:

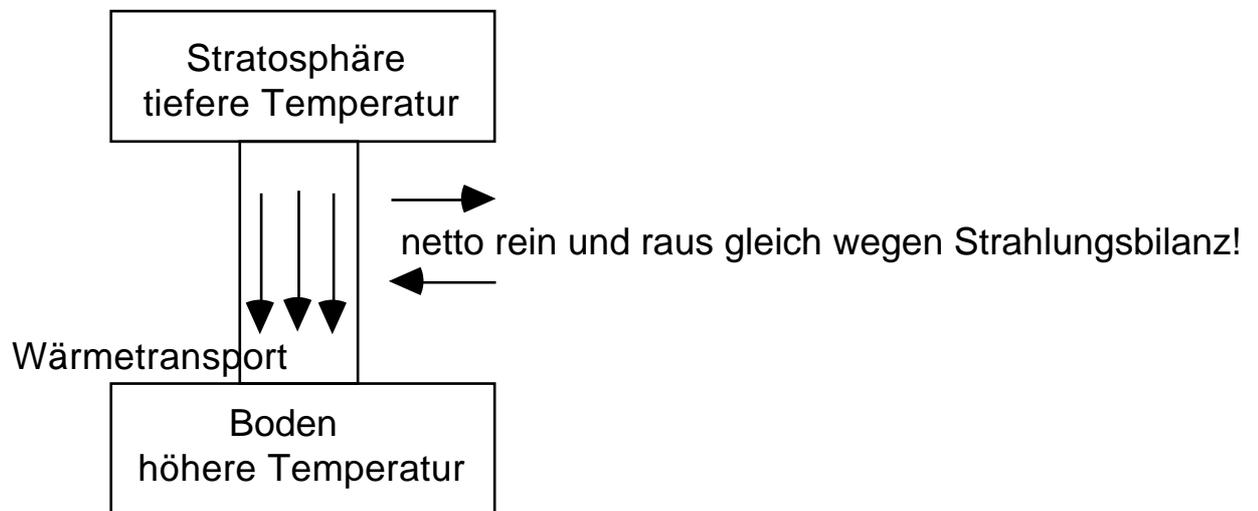
funktioniert nicht:



funktioniert nicht:



funktioniert????:



Genau so eine Maschine sollen die modernen Klimamodelle sein!

Mir war die Verwendung dieses Perpetuum mobile 2. Art bei vielen modernen "Erklärungen" des CO₂-Treibhauseffektes aufgefallen. Da dies vermutlich niemand glauben will, aus "kompetentem" Mund ein wörtliches Zitat:

Prof. Dr. Peter C. Stichel, stellv. Vorsitzender des Arbeitskreises Energie der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, Theoretische Physik, Universität Bielefeld:

"Es ist inzwischen anerkanntes Lehrbuchwissen, daß langwellige Infrarotstrahlung, emittiert von der erwärmten Erdoberfläche, teilweise von CO₂ und anderen Spurengasen in der Atmosphäre absorbiert und reemittiert wird. Dieser Effekt führt zu einer Erwärmung der unteren Atmosphäre und aus Gründen des Gesamtstrahlungshaushaltes gleichzeitig zu einer Abkühlung der Stratosphäre. "

Man findet eine entsprechende Darstellung auch in dem Bericht des United States Department of Energy, in dem sogar ausdrücklich darauf hingewiesen wird, das die Benennung "greenhouse gas " und "greenhouse effect" irreführend ist:

Projecting the Climatic Effects of Increasing Carbon Dioxide, DOE/ER 0237, December 1985, p. 27/28.

Hier eine Kopie des letzten Absatzes dieses Abschnittes von der Seite 28:

Both of these perspectives describe the process by which increases in the atmospheric abundance of *greenhouse gases* lead to warming at the Earth's surface. The term *greenhouse gases* refers to gases that are highly transparent to solar radiation but are relatively opaque to longwave radiation, similar to glass in a greenhouse. The process by which warming occurs in a greenhouse is different from that described above. In this regard the terms *greenhouse gas* and *greenhouse effect* are misnomers.

Wieso in den Klimamodellen tatsächlich etwas möglich sein kann, das dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik widerspricht, kann an der folgenden Näherung liegen. In der feldtheoretischen Beschreibung der irreversiblen Thermodynamik findet man den zweiten Hauptsatz in der Aussage, daß die Wärmestromdichte dem Temperaturgradienten (der Temperaturänderung) entgegengerichtet ist:

$$\underline{q} = - \text{grad}T .$$

In dieser Formel ist die Wärmeleitfähigkeit notwendig eine positive Größe. Es ist üblich, in Klimamodellen die Wärmeleitfähigkeit in der Atmosphäre zu vernachlässigen, was bedeutet, sie gleich Null zu setzen.

(vgl.

J. Hansen, G. Russel, d. Rind, P. Stone, A. Lacis, S. Lebedeff, R. Ruedy and L. Travis (1983) : Efficient Three-Dimensional Global Models for Climate Studies: Models I and II, Monthly Weather Review 111, p. 612)

Dies könnte erklären, wieso in den numerischen Simulationen tatsächlich kleine Effekte im Widerspruch zum zweiten Hauptsatz der Thermodynamik herauskommen können!

Das Nullsetzen der Wärmeleitung wäre noch nicht ein echtes Verletzen des zweiten Hauptsatzes, weil es die Näherung eines idealen Systems bedeutete, daß

nämlich trotz Temperaturunterschieden kein Wärmestrom vom wärmeren in den kälteren Bereich fließen kann. Zum zweiten Hauptsatz würde dann passen, wenn es im Mittel *keine* Temperaturerhöhung gäbe. In diese Richtung zeigen inzwischen die numerischen Computersimulationen mit den Klimamodellen, worauf mich der Wissenschaftsjournalist W. Heuseler aufmerksam machte: Das IPCC stellte 1992 als Temperaturerhöhung fest

0.27 - 0.82 °C/Jahrzehnt

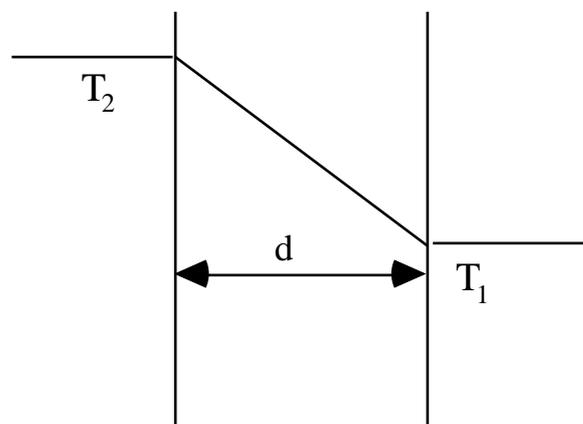
und 1995

0.08 - 0.33 °C/Jahrzehnt,

also einen schönen Trend zu *keiner* Temperaturerhöhung. Wenn der vorne erwähnte Physiker Prof. Dr. P. C. Stichel schreibt, daß eine Erhöhung von 0.3 °C/Jahrzehnt in guter Übereinstimmung mit einer Erhöhung von 0.5° C/Jahrhundert sein sollen, obwohl sich diese Zahlen um den Faktor 6 unterscheiden, bedeutet eine solche Aussage bei jedem Physiker, daß beide Zahlen gleich Null sind! Es spricht also sehr viel dafür, daß die berechneten Temperaturerhöhungen bei den Computersimulationen numerische Rechenfehler sind, die sich weiter der Null nähern werden.

Beim Lesen vieler Meteorologietexte habe ich den Eindruck gewonnen, daß viele glauben, daß die Wärmestrahlungsmechanismen *nicht* in der Wärmeleitfähigkeit berücksichtigt sein sollen, was natürlich falsch ist, weil immer die *gesamte Wärmestromdichte* gemeint ist. Es ist unzulässig, die Strahlungsströme unabhängig von den Wärmeströmen zu behandeln.

Dazu betrachte man die experimentelle Situation zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit.



Der Wärmestrom ist gegeben durch $F (T_2 - T_1)/d$, der für die stationäre Situation durch Joulesche Wärme (elektrisch) bei der höheren Temperatur erzeugt und

gemessen wird. Der Wärmetransport durch Strahlung ist bei diesem Experiment überhaupt nicht von dem der kinetischen Energie zu trennen. Natürlich versucht man durch die experimentelle Anordnung die Wärmekonvektion zu vermeiden. Irgendwelche Effekte durch die Wärmestrahlung ("Gegenstrahlung") schlagen sich einfach in den stationären Temperaturen und der gemessenen Jouleschen Wärme nieder.

Leider kommt man bei der Behandlung der Wärmeleitungsprobleme schon bei den einfachsten Beispielen in die physikalischen Bereiche, die über den physikalischen Stoff des Vordiploms hinausführen.

Mit dem gerade gegebenen Ansatz für die Wärmestromdichte erhält man für *konstante* Wärmeleitfähigkeit die **Wärmeleitungsgleichung**

$$c_v \frac{T}{t} = \Delta T$$

bzw.

$$\frac{T}{t} = \frac{\Delta T}{c_v}$$

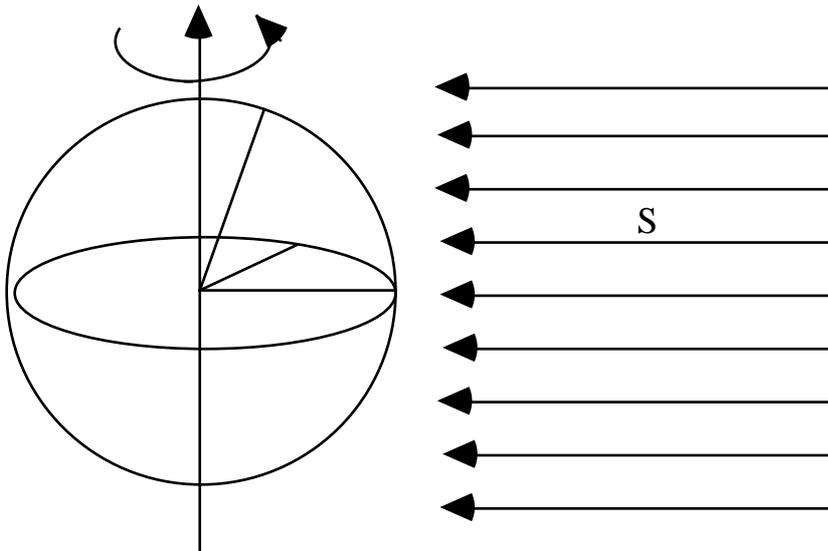
Man muß beachten, daß hier die Wärmeleitfähigkeit durch die Dichte geteilt wird, was zur Konsequenz hat, daß die Temperaturleitzahlen $\Delta T / c_v$ von Gasen und Metallen in die gleiche Größenordnung kommen können, selbst wenn die Wärmeleitfähigkeiten um Größenordnungen auseinander liegen. Natürlich kann ich hier nicht ausführlich auf diese partielle Differentialgleichung eingehen. Hier sollen die folgenden Aussagen reichen: Unter gewissen Umständen kann man zu einer gegebenen Temperaturverteilung und gewissen Randbedingungen die raum- zeitliche Temperaturverteilung berechnen. Wenn die Temperaturveränderungen die charakteristische Länge L haben, ist die charakteristische Zeit für den Temperatúrausgleichsvorgang

$$t_{\text{char}} = \frac{c_v L^2}{\Delta T}$$

Wenn man hier als Länge zum Beispiel den Mondradius einsetzt und typische Werte für die anderen Größen, erhält man für die Zeitkonstante *Vielfache des Alters des Universums*. **Eine mittlere konstante Bodentemperatur (über hunderte von Jahren) ist also überhaupt kein Argument dafür, daß im Mittel die eingestrahlte Sonnenenergie auch abgestrahlt wird. Wenn es da einen Unterschied gebe, würde man ihn wegen dieser großen Zeitkonstanten nie messen können. Bei diesen riesigen Zeitkonstanten ist also für das Langzeitverhalten der mittleren Bodentemperatur mit Sicherheit die Wärmestromdichte aus dem Erdinnern nicht zu vernachlässigen; schließlich sollen ja nach gewissen Hypothesen die Himmelskörper an der Oberfläche sehr heiß gewesen sein und sich abgekühlt haben. Diese Temperaturänderungen lassen sich experimentell nie von denen trennen, die durch die**

Sonneneinstrahlung verursacht werden.

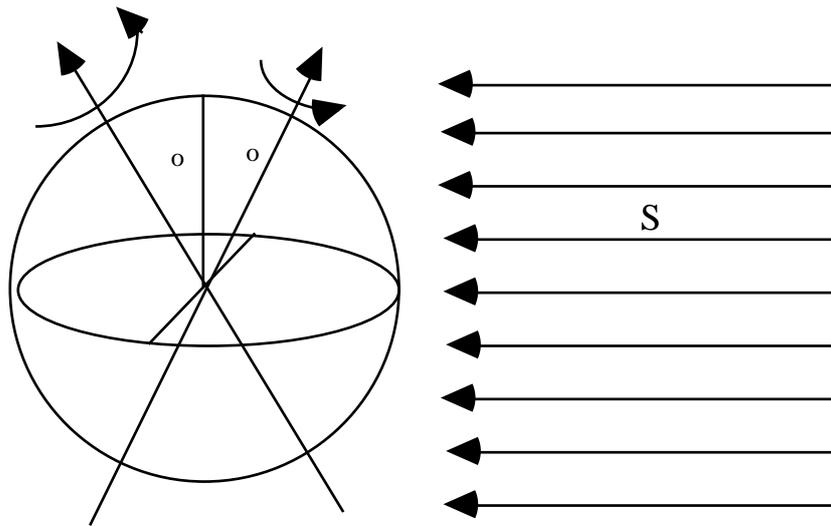
Wenn man eine (rotierende) Kugel einer Strahlung aussetzt und in den Außenraum nur ein Wärmeübergang durch Strahlung möglich ist, müßte man das Anfangswertproblem der Wärmeleitungsgleichung mit der folgenden Nebenbedingung lösen:



$$-\frac{T}{n} = \begin{cases} T^4 - S \sin \cos(\dots) & \text{für } -/2 \dots /2 \\ T^4 & \text{für } /2 \dots 3/2 \end{cases}$$

Seit der oben genannte *Fourier* die Wärmeleitungsgleichung behandelt hatte, gehörte selbst für den Fall einer nichtrotierenden Kugel diese nichtlineare Randbedingung nie zu den behandelbaren Wärmeleitungsproblemen.

Ich habe mir die Mühe gemacht, für eine schräg rotierende Kugel diese nichtlineare Randbedingung aufzuschreiben. und sind die Koordinaten auf der sich drehenden Kugelfläche:



$$A = \begin{pmatrix} \cos \theta \cos \phi \\ \sin \theta \cos \phi \\ \sin \theta \sin \phi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} (\sin \theta \cos \phi \cos \alpha + \cos \theta \sin \phi \cos \alpha) \sin \theta \cos \theta \\ + (-\sin \theta \sin \phi \cos \alpha + \cos \theta \cos \phi \cos \alpha) \sin \theta \sin \theta & 0 \\ -\cos \theta \sin \theta \cos \alpha \end{pmatrix}$$

$$- \frac{T}{n} = \begin{pmatrix} (\sin \theta \cos \phi \cos \alpha + \cos \theta \sin \phi \cos \alpha) \sin \theta \cos \theta \\ + (-\sin \theta \sin \phi \cos \alpha + \cos \theta \cos \phi \cos \alpha) \sin \theta \sin \theta \\ -\cos \theta \sin \theta \cos \alpha \end{pmatrix} T^4 - S$$

für $(\theta, \phi) \in A$

$$T^4 \text{ für } (\theta, \phi) \in A$$

Selbst mit diesem unrealistischen Problem zwingt man jeden Computer in die Knie, allein wegen der extrem unterschiedlichen Frequenzen und weil die Wärmeleitungsgleichung eine sehr unphysikalische Eigenschaft hat, die sich auch auf die Numerik auswirkt: Nach einem berühmten Satz von N. Wiener bewegen sich in diesem mathematischen Modell fast alle Teilchen, die die Diffusion erzeugen, auf Bahnen mit unendlich hohen Geschwindigkeiten! Bei diesen Randbedingungen brauchte der Computer sicher eine Ewigkeit, bis man von einer "eingeschwungenen" Temperaturverteilung reden kann. Mit den riesigen Gitternetzen der Klimamodelle läßt sich die Wärmeleitungsgleichung numerisch nicht behandeln.

Wir kommen also zu den folgenden Aussagen:

- (1) Zwischen dem physikalischen Treibhauseffekt und den fiktiven Treibhauseffekten

der Planetenatmosphären gibt es *keine* die wesentlichen physikalischen Erscheinungen erklärenden *gemeinsamen* physikalischen Gesetze (absichtliche Mißbenennung).

- (2) Es gibt keine Rechnungen, die erlauben, eine mittlere Oberflächentemperatur eines Himmelskörpers zu bestimmen, ob mit oder ohne Atmosphäre, ob mit oder ohne Rotation, ob mit oder ohne ultrarotes Licht absorbierende Gase. Die regelmäßig erwähnten 33 Grad Temperaturdifferenz beim fiktiven Treibhauseffekt der Atmosphäre sind deshalb eine reine Fiktion.
- (3) Die Strahlungsbilanz für mittlere Strahlungsströme ist völlig ohne Bedeutung für die Einstellung der bodennahen Temperaturen und deshalb auch für deren Mittelwert.
- (4) Mittelwerte der Temperatur kann man nicht zur vierten Wurzel von Mittelwerten der vierten Potenz der absoluten Temperatur in Beziehung setzen.
- (5) Strahlungs- und Wärmeströme bestimmen *nicht* die Temperaturverteilungen und deren Mittelwerte.
- (6) Reemission ist keine Reflexion und kann auf keinen Fall ohne äußere mechanische Arbeit die bodennahen Lufttemperaturen gegen den tatsächlichen Wärmestrom aufheizen.
- (7) Die Temperaturerhöhungen der Klimamodellrechnungen werden mit einem Perpetuum mobile 2. Art plausibel gemacht. Dies ist möglich, weil in den Atmosphärenmodellen die Wärmeleitfähigkeit gleich Null gesetzt wird. Wenn man die "mittlere" fiktive Strahlungsbilanz aufgäbe, die sowieso physikalisch nicht zu begründen ist, wäre es keines mehr.
- (8) Die Absorption der Ultrarotstrahlung in der Erdatmosphäre geschieht überwiegend durch Wasserdampf. Der Wellenlängen- bzw. Frequenzanteil, den CO₂ absorbiert, ist nur ein kleiner Teil des ultraroten Spektrums und wird nicht wesentlich durch Erhöhen des Partialdruckes des CO₂ verändert (Prof. A. Schack).
- (9) Bei der Verwendung des Strahlungstransportmodells mit dem lokalen thermodynamischen Gleichgewicht wird verwendet, daß die absorbierte Strahlung in die Wärmebewegung aller Gasanteile übergeht. Es gibt bei den niedrigen Temperaturen der Erdatmosphäre keine verstärkte selektive Reemission der ultraroten Strahlung.

Ich habe hier die Horrorvisionen mit dem gestiegenen Meeresspiegel und den abschmelzenden Polkappen und den in USA und in Europa entstehenden Wüsten nicht als fiktive Treibhauseffekte behandelt, da diese noch nicht einmal aus den Klimamodellrechnungen abzuleiten sind. In den ernsthafteren wissenschaftlichen Abhandlungen habe ich diese Aussagen nicht gefunden. Auch das Entstehen von Wirbelstürmen läßt sich mit Klimamodellen nicht voraussagen, da alle diese Schwankungen ausgeschlossen werden. Nicht einmal die Zeitabhängigkeit der Schwerebeschleunigung durch den Mond und die Sonne (Ebbe und Flut) und die lokale geographische Situation, die ja für das lokale Klima wichtig ist, ist in den Klimamodellen berücksichtigt.

Durch meine Beschäftigung mit diesen Fragestellungen bin ich zu dem Resultat gekommen, daß eine steigende mittlere bodennahe Temperatur vermutlich der Menschheit nur Vorteile bringen sollte. Es ist richtig schade, daß es den CO₂-Treibhauseffekt nicht gibt, mit dem die Menschheit eine Eiszeit in einer sehr fernen Zukunft vielleicht hätte abwehren können.

4) Die wissenschaftspolitischen CO₂-Treibhauseffekte

Der wesentliche Trick der modernen CO₂-Treibhausgas-Verteidiger besteht darin, daß man sich immer weiter hinter "Erklärungen" versteckt, die nicht zum Allgemeinut der akademischen Ausbildung oder sogar der Physikausbildung gehören. Deshalb habe ich auch die Strahlungstransportrechnungen aufgeführt, die vermutlich nur wenigen bekannt sind. Außerdem lehnen die Verteidiger der CO₂-Treibhaushysterie inzwischen jede nachvollziehbare Rechnung als Erklärung ab und ziehen sich nur noch auf nicht nachvollziehbare zurück. Früher hätte man so etwas als absichtlichen wissenschaftlichen Betrug eingestuft. Heutzutage ist jede wirre Behauptung eine wissenschaftliche These und, wenn sie oft genug wiederholt wird, eine Theorie oder feststehende Tatsache. Unabhängig von der speziellen Disziplin sollte in den Wissenschaften aber eine minimale Grundregel eingehalten werden, auch wenn die Bereiche methodisch so weit auseinander liegen, wie die Physik und Meteorologie: *Mindestens für den Kreis der Fachkollegen sollten Ergebnisse und Folgerungen nachvollziehbar bzw. reproduzierbar sein.* Wenn Folgerungen aus Computersimulationsrechnungen mehr als simple Spekulationen sein sollen, müßten neben der Untersuchung der numerischen Stabilität, der Abschätzung der Auswirkungen der Unsicherheit der zahlreichen Eingabeparameter zumindest die Vereinfachungen an den physikalischen Ausgangsgleichungen kritisch dargelegt werden. Bei dem hier angesprochenen Beispiel der Wärmeleitfähigkeit hat nicht der Kritiker die Auswirkungen der Näherung abzuschätzen, sondern der, der die Computersimulationen macht.

Was macht leider dieses Vorgehen in unserem modernen Wissenschaftsbetrieb notwendig? So wenig, wie normale Bürger jemandem für das Beobachten der Sterne oder Planeten eine müde Mark geben würden, würde man heute einem Atmosphären- oder Klimamodellrechner eine müde Mark geben. Aber genauso, wie sich früher die Astrologen überlegen mußten, wie man aufgrund der Stern- und Planetenpositionen wichtige Ereignisse auf der Erde sollte voraussagen können, damit sie sich den schönen Sternenhimmel auf Staatskosten ansehen durften - sie waren wirklich "Weise", die mit geschickten Formulierungen den Königen die Zukunft "richtig" voraussagten, genauso mußten die Klimamodellrechner etwas finden, womit man von den modernen Königen Geld für Computer bekommt. Dazu eignet sich besonders der CO₂-Treibhauseffekt: Man muß nur die Prognosen so weit in die Zukunft legen, daß sie niemand überprüfen kann. Damit die Geldquelle nicht versiegt, verändert man immer in der politisch vertretbaren Bandbreite mit neuen sorgfältigen, nicht nachvollziehbaren Rechnungen seine Prognosen.

Schließen möchte ich mit einem völlig unverfänglichen Beispiel, das zeigt, daß es oft auch in der Physik nicht anders ist. Ich greife auf einen der ganz Großen der Physik zurück: Galilei. Wenn er nicht die Bewegungen der Erde und Sonne zu einem wichtigen theologischen Problem hochstilisiert hätte, hätte sich kein Bischof für diese Sachen interessiert. Er wollte gerne -wie Kepler - so etwas wie ein Hofastronom werden. Dummerweise hatte sich Galilei aber über die Machtverteilung bei den damaligen Bischöfen geirrt. Er glaubte, der intelligente Bischof könnte ihn vor dem dümmeren schützen. Leider haben aber oft die dümmeren mehr Macht und nutzen sie auch rücksichtsloser aus.

Ceterum censeo:

Der CO₂-Treibhauseffekt der Erdatmosphäre ist eine reine Fiktion von Leuten, die gerne große Computer benutzen, ohne physikalische Grundlagen.

5) Anhang

(a) *Wärme* ist kinetische Energie der Moleküle und Atome und wird durch direkte Berührung oder durch Wärmestrahlung übertragen.

(b) *Wärmestrahlung* ist elektromagnetische Strahlung (wie Licht, Röntgenstrahlen, Wellen der Radio- und Fernsender, Radar), die sich von anderen elektromagnetischen Wellen nur durch die Wellenlänge bzw. Frequenz unterscheidet. Die Wellenlänge des sichtbaren Lichtes liegt im Bereich:

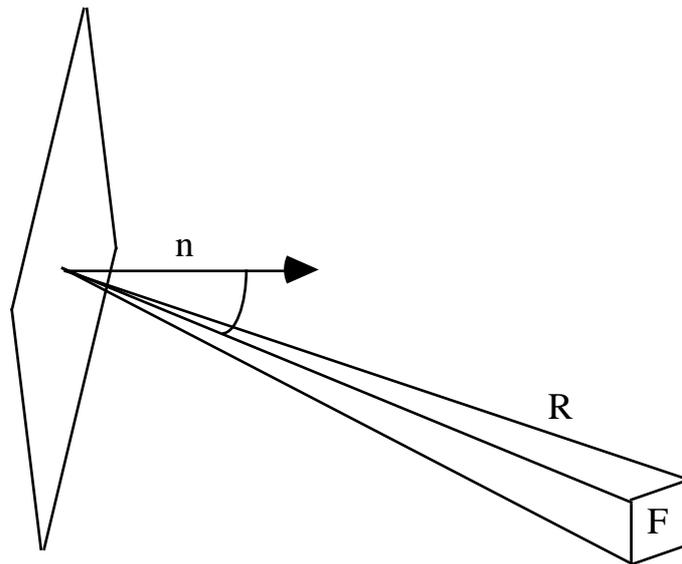
$$0.3 - 0.8 \mu \quad \text{bzw.} \quad (.3 - .8) 10^{-4} \text{ cm}$$

$$\text{bzw.} \quad (.3 - .8) 10^{-6} \text{ m} \quad \text{bzw.} \quad 0.0000003 - 0.0000008 \quad \text{m.}$$

Die Wellenlänge des gelben Lichtes ist 0.5μ . Es gilt die Beziehung:

$$\text{Lichtgeschwindigkeit} = \text{Wellenlänge} \text{ mal Frequenz}$$

(c) Strahlungsintensität von einer Fläche gibt man immer in die Richtung eines kleinen Raumwinkels an. Dadurch wird berücksichtigt, daß die Intensität ebener Wellen von einem Punkt umgekehrt zum Quadrat der Entfernung abnimmt:



F/R^2 ist der Raumwinkel.

(d) Die Strahlungsintensität von der Fläche F_1 auf die Fläche F_2 , deren Normalenvektoren mit der Verbindungslinie die Winkel α_1 und α_2 einschließen, ist gegeben durch die Formel:

$$\frac{I F_1 \cos \alpha_1 + F_2 \cos \alpha_2}{R^2}.$$

- (e) Die Intensität von einer Fläche mit dem Radius r auf eine parallele Einheitsfläche im Abstand a ist gegeben durch

$$I \frac{r^2}{r^2 + a^2}.$$

- (f) Ein schwarzer Körper strahlt in Abhängigkeit von der Temperatur durch eine kurz vor der Oberfläche aufgestellte Einheitsfläche in ein Einheitslängenwellenintervall pro Zeiteinheit die Energie nach der Formel:

$$B(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1}.$$

Für das Einheitsfrequenzintervall lautet sie:

$$B(\nu, T) = \frac{2h^3}{c^2} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}.$$

Die hier definierte Funktion $B(\lambda, T)$ bzw. $B(\nu, T)$ ist die **Kirchhoff-Planck-Funktion**. Die Buchstaben in den Formeln bedeuten:

c: Lichtgeschwindigkeit, h: Plancksche Konstante, ν : Frequenz, λ : Wellenlänge, k: Boltzmannsche Konstante, T: absolute Temperatur.

- (g) Wenn man diese Intensität über alle Wellenlängen oder Frequenzen integriert, erhält man das **Stefan-Boltzmannsche Gesetz**:

$$\int_0^\infty B(\lambda, T) d\lambda = \int_0^\infty B(\nu, T) d\nu = T^4 \text{ mit} \\ = \frac{2^4 k^4}{15c^2 h^3}.$$

Dies ist die gesamte Strahlungsenergie, die pro Zeiteinheit durch eine dicht vor dem strahlenden schwarzen Körper gestellte Einheitsfläche strömt.

- (h) Die Plancksche Strahlungsformel hat ein ausgeprägtes Maximum und der größte Teil der Strahlungsenergie wird im Bereich des Maximums ausgestrahlt. Für dieses Maximum gibt es zwei **Wiensche Gesetze**:

$$\lambda_{\max} T = \text{Konstante (Wiensches Verschiebungsgesetz)}.$$

Die Intensität bei der maximalen Wellenlänge ist proportional zur fünften Potenz der

Temperatur:

$$B_{\max}(T) \sim T^5.$$

582

IV. Theorie der Wärmestrahlung

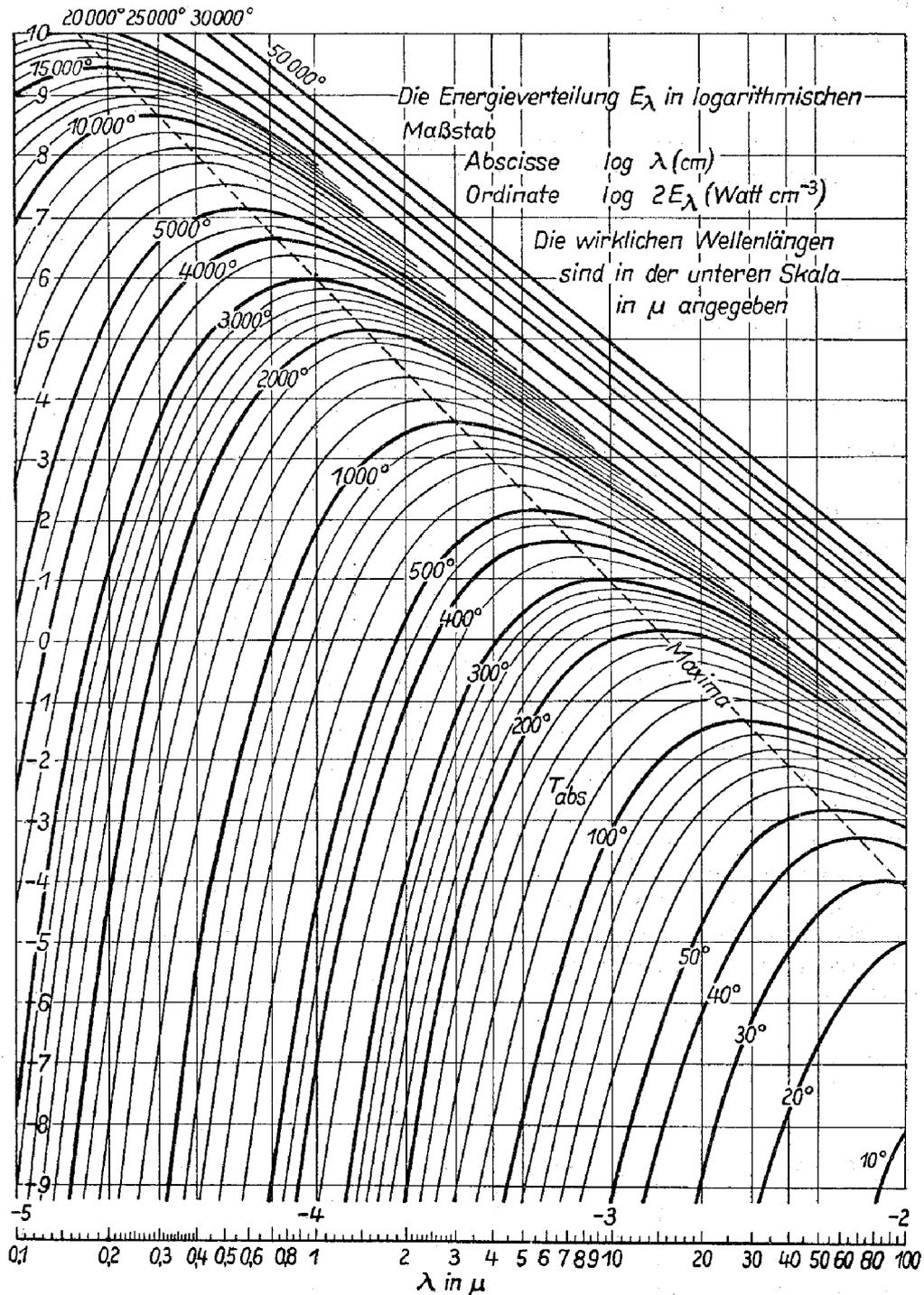


Fig. 166. Die spektrale Energieverteilung der Strahlung des schwarzen Körpers

aus G. Joos (1959): Lehrbuch der Theoretischen Physik, Frankfurt.

- (i) Die Sonne strahlt in guter Näherung wie ein schwarzer Strahler mit der Temperatur von 5780°K (grob 6000°K), wobei außerhalb der Erdatmosphäre die Intensität gegeben ist durch

$$B(T) \frac{R_{\text{Sonne}}^2}{R_{\text{Erdbahn}}^2} = B(T) \frac{1}{215^2} = B(T) \frac{1}{46225}.$$

Integriert man diese Intensität über alle Wellenlängen, erhält man die **Solarkonstante**:

$$S = 5780^4 \frac{1}{46225} = 1368 \text{ Watt/m}^2.$$

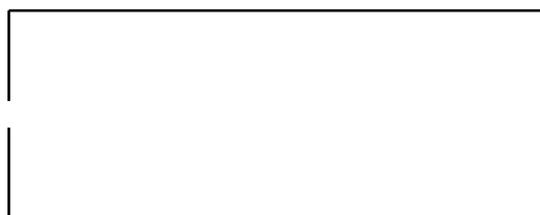
- (j) Wenn eine Fläche mit einem Strahlungsfeld im thermodynamischen Gleichgewicht ist, ist die von der Flächeneinheit in eine Frequenzeinheit oder Wellenlängeneinheit emittierte Intensität gleich dem Absorptionsvermögen, multipliziert mit einer universellen Funktion der Frequenz (oder Wellenlänge) und absoluten Temperatur:

$$E = A B(T) \text{ bzw. } E = A B(T).$$

Dies ist ein **Satz von Kirchhoff**. Die Funktion $B(T)$ bzw. $B(T)$ heißt **Kirchhoff-Planck-Funktion**. Das **Reflexionsvermögen** ist

$$R = 1 - A \text{ bzw. } R = 1 - A$$

und liegt wie das **Absorptionsvermögen** zwischen Null und Eins. Wenn R gleich Null und A gleich 1 ist, nennt man den Körper einen schwarzen Körper. Für einen schwarzen Körper ist das Emissionsvermögen am größten. Schon von Kirchhoff stammt der Vorschlag für das Realisieren eines schwarzen Körpers durch einen Hohlraum mit einer kleinen strahlenden Öffnung:



Deshalb heißt die Emission eines schwarzen Körpers für $A=1$ bzw. $E = B(T)$ auch Hohlraumstrahlung (cavity radiation). Die ausgestrahlte Energie stammt von

den auf einer festen Temperatur gehaltenen Wänden, wo die Strahlung entsteht. Wenn man sich dies mit einem Oberflächenstück eines Körpers realisiert denken möchte, sieht man, daß diese Sichtweisen nur dann zusammenpassen, wenn die elektromagnetische Strahlung nur von einer extrem dünnen Oberflächenschicht emittiert bzw. absorbiert wird (vgl. auch (k)). Deshalb kann man z. B. Volumenbereiche von Gasen nicht mit dem Modell der schwarzen Hohlraumstrahlung beschreiben. Da Wärmestrahlung elektromagnetische Strahlung ist, müßte bei Gasen diese Strahlung durch die thermische Bewegung erzeugt werden, was bei Zimmertemperaturen normalerweise nicht sehr effektiv funktioniert, aber durchaus bei Sterntemperaturen, wenn genügend Energieniveaus der Atome thermisch (durch Stöße) angeregt sind.

- (k) Für die Strahlungstransportrechnungen wird der Satz von Kirchhoff "verallgemeinert" auf die Situation, daß die entsprechende Formel für die Emission bzw. die Absorption *pro Längeneinheit* in Richtung des Raumwinkels gelten soll:

$$ds = ds B(T) \text{ bzw. } = B(T).$$

Was diese "Verallgemeinerung" physikalisch bedeutet, kann man am einfachsten dadurch erkennen, indem man mathematisch aus dieser Formel den vorne angegebenen Satz von Kirchhoff zurückgewinnt. Dazu muß man setzen

$$= E(s - s_0) \text{ bzw. } = A(s - s_0)$$

mit einer an der Grenzfläche lokalisierten ρ -Dichte. Dies bedeutet physikalisch, daß die gesamte Absorption und Emission aus einem dünnen Bereich der Oberfläche kommt. Genau wie beim richtigen Satz von Kirchhoff wird hier verwendet, daß *alle absorbierte Strahlung auch emittiert wird*, da sonst der Volumenbereich seine Temperatur im thermischen Gleichgewicht erhöhen würde (lokales thermisches Gleichgewicht). *Reemittieren bedeutet also keineswegs Reflektieren, sondern nur, daß durch die Absorption keine Temperaturerhöhung im Gas stattfindet.* Einen wesentlichen physikalischen Unterschied zum richtigen Satz von Kirchhoff erkennt man auch daran, daß es für die Absorption pro Längeneinheit keineswegs eine zu $R = 1 - A$ analoge Formel gibt.

- (l) Die strahlende Intensität einer Fläche verändert sich in einem Gas *in Richtung des Raumwinkelbündels* gemäß der "Strahlungstransportgleichung" (radiative transfer)

$$-\frac{dI}{ds} = I - \text{ bzw. } -\frac{1}{ds} \frac{dI}{ds} = I - S .$$

Hier ist κ der Absorptionskoeffizient in Richtung des Raumwinkelbündels und S die Quellfunktion der Strahlung (source function), die die **Reemission** der Strahlung beschreibt. Daß diese Reemissionsfunktion keineswegs nur durch physikalische Überlegungen festgelegt ist, sieht man an zwei extrem unterschiedlichen Ansätzen (nach S. Chandrasekhar: Radiative Transfer):

$$S(x,y,z;l,m,n) = B(T(x,y,z;l,m,n)).$$

Man begründet diesen Ansatz mit der Kirchhoff-Planck-Funktion B mit dem unter (k) "verallgemeinerten" Satz von Kirchhoff mit $\kappa = \epsilon$ bzw. $\epsilon = \kappa B(T)$. Man nennt es die Annahme des **lokalen thermodynamischen Gleichgewichts** (local thermodynamical equilibrium, **LTE**), die selbst für die extrem heißen Sternatmosphären früher von vielen Leuten nicht für zulässig gehalten wurde. Natürlich hat dieser Ansatz für die Strahlungstransportrechnungen nur dann eine gewisse Bedeutung, wenn die Absorptionskoeffizienten unabhängig von der Temperatur wären, was aber gerade bei niedrigen Temperaturen nicht der Fall ist. Dieser Ansatz wird bei den modernen Klimamodellrechnungen bedenkenlos verwendet. Ein anderer Ansatz ist die "streuende Atmosphäre" (scattering atmosphere):

$$S = \frac{1}{4} \int_0^2 \int_0^2 p(\mu, \mu') I(\mu, \mu') \sin \mu \, d\mu \, d\mu' .$$

Diese extrem unterschiedlichen Ansätze sollen zeigen, daß selbst die physikalisch so "gesicherten" Strahlungstransportrechnungen nicht frei von Willkür sind. Formal kann man die Strahlungstransportgleichung integrieren und erhält:

$$I(s) = I(0)e^{-\tau(s,0)} + \int_0^s S(s')e^{-\tau(s,s')} \, ds'$$

mit

$$\tau(s,s') = \int_{s'}^s \kappa \, ds \quad (\text{optische Dicke, optical thickness}).$$

Die Integrationen für die einzelnen Richtungen sind von einander unabhängig, also insbesondere die nach oben bzw. die nach unten haben nichts miteinander zu tun.

Man muß beachten, daß Differentialgleichungen nur erlauben, die Änderungen aus der Kenntnis der bekannten Größen zu berechnen. **Die Anfangswerte (oder Randwerte) erhält man nicht aus den Differentialgleichungen!**

- (m) Wenn elektromagnetische Wellen auf eine Grenzfläche treffen, bei der ein Sprung des Brechungsindex im Längenbereich der Wellenlänge stattfindet, tritt Reflexion auf (**Fresnelsche Formeln**).

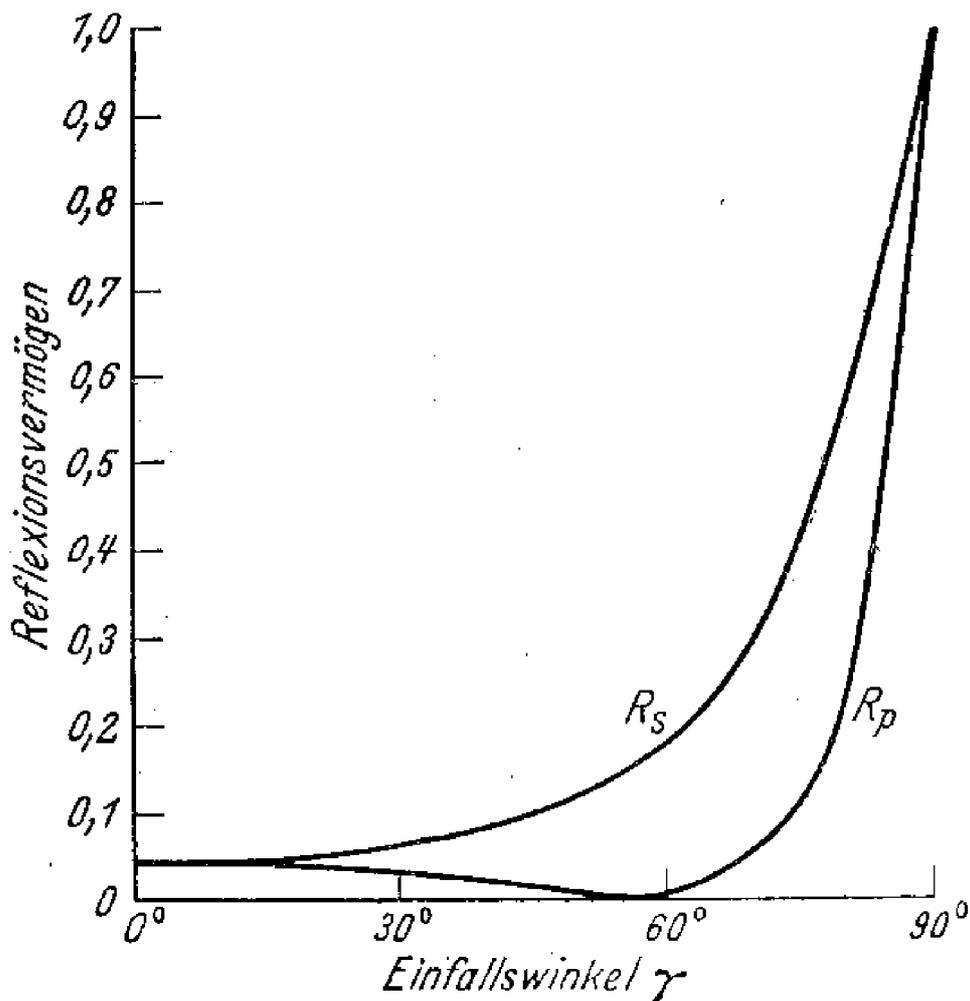


Abb. 184. Reflexionsvermögen für senkrecht (R_s) und parallel (R_p) zur Einfallsebene polarisiertes Licht bei $n_2/n_1 = 1,5$.

aus W. Weizel(1963): Lehrbuch der Theoretischen Physik, Bd. 1, S. 507.

Bei senkrechtem Einfall gilt für die Reflexion:

$$R = \frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1}^2 \quad (\text{für } n=1.5 \text{ gegen Luft : } 4\%).$$

Bei **starker Absorption** (großes κ) kann man auch für größere Einfallswinkel einfache Formeln angeben (**Beersche Formel**):

$$R_s = \frac{(n_2 - n_1 \cos \theta)^2 + n_2^2 \kappa^2}{(n_2 + n_1 \cos \theta)^2 + n_2^2 \kappa^2} \quad R_p = \frac{(n_1 - n_2 \cos \theta)^2 + n_2^2 \kappa^2 \cos^2 \theta}{(n_1 + n_2 \cos \theta)^2 + n_2^2 \kappa^2 \cos^2 \theta}$$

Wenn sich der Brechungsindex auf Längen in der Größenordnung der Wellenlänge des Lichtes ändert, gibt es Reflexion und diese ist bei großer Absorption groß! Bei Gasen ist dies nur bei sehr langwelligen Radiowellen in der Atmosphäre (Ionosphäre) bei schrägem Einfallswinkel möglich. Im homogenen absorbierenden Bereich gibt es keine Reflexion!

- (n) Etwa bei 1μ und größerer Wellenlänge absorbieren die meisten Gläser das ultrarote Licht fast vollständig: wegen (m) ist deshalb für normale Gläser die Reflexion auch sehr groß.