

Das CO₂-Problem und der »Glashauseffekt« aus physikalischer Sicht

VON HANS HEISE

Mit 12 Abbildungen und 2 Tabellen

Herrn OStD a. D. HERBERT NOACK zu seinem 80. Geburtstag gewidmet

Bei der Behandlung von Strahlungsvorgängen wird meistens pauschal nach den 3 Teilbereichen »Sichtbar«, »Ultraviolett« und »Infrarot« (IR) unterschieden, obwohl der sichtbare Bereich nur 1 Oktave, die beiden anderen dagegen viele Oktaven umfassen. Der meist besonders stiefmütterlich behandelte IR-Bereich, von dem hier die Rede sein soll, verdient diese pauschale Behandlung vor allem deshalb nicht, weil sich in ihm Vorgänge abspielen, die für die Bewohnbarkeit der Erde besondere Bedeutung haben.

In den folgenden Ausführungen werden Versuche und Überlegungen dargestellt, welche die praktische Bedeutung des IR-Bereichs für das CO₂-Problem und die klimatischen Bedingungen auf der Erde erkennen lassen.

1 Vorbemerkung

Wenn man die zahlreichen Äußerungen von Vertretern verschiedener naturwissenschaftlicher Fachrichtungen zum sog. CO₂-Problem [1, 2, 3] liest, stellt man fest, daß über die Konsequenzen des in den nächsten Jahrzehnten mit Sicherheit zu erwartenden Anstiegs des CO₂-Gehalts der Atmosphäre (Abb. 1) bis heute eine erhebliche Unsicherheit besteht. Eine Zeitlang gab es sogar Meinungsverschiedenheiten darüber, ob mit einer Temperaturzunahme oder -abnahme zu rechnen ist. Inzwischen haben sich die Auffassungen der Fachleute aufgrund von verfeinerten Modellrechnungen so weit angenähert, daß man allgemein mit einer allmählichen Temperaturzunahme der Atmosphäre [4] rechnet, die bei Verdopplung des CO₂-Gehalts auf 0,5 K bis 3 K mit Schwerpunkt bei 2 K geschätzt wird (Abb. 2). Aufgrund allgemeinetmeteorologischer Überlegungen sollte diese Zunahme vor allem die Nordhalbkugel der Erde betreffen und dort in der Nähe des Nordpols wesentlich größer sein als in Äquatornähe (Abb. 3). Über weitere klimatische Veränderungen besteht bis heute keine Einmütigkeit. Die Vermutungen reichen von »nicht sehr bedeutend« bis »katastrophenähnlich« (Versteppung weiter Teile

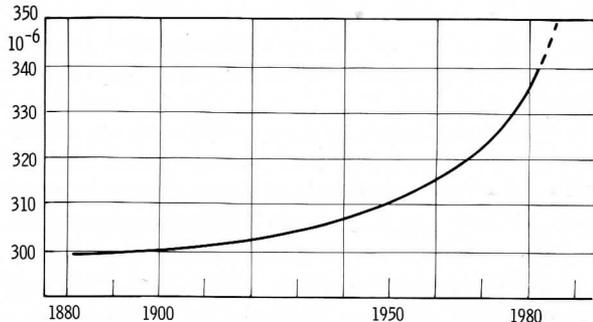


Abb. 1. Zunahme des CO₂-Gehaltes der Atmosphäre seit 1880

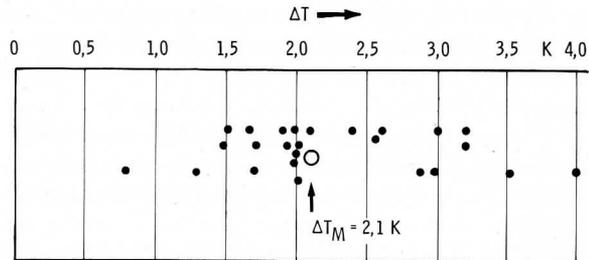


Abb. 2. Temperaturzunahme ΔT der Atmosphäre in Bodennähe nach verschiedenen Modellrechnungen bei Verdopplung des CO₂-Gehalts (nach GATES [4]). Jeder Punkt stellt das Ergebnis einer Modellrechnung dar.

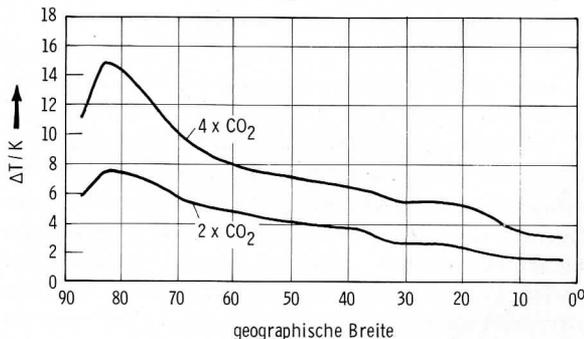


Abb. 3. Temperaturzunahme in verschiedenen geographischen Breiten (nach GATES [4])

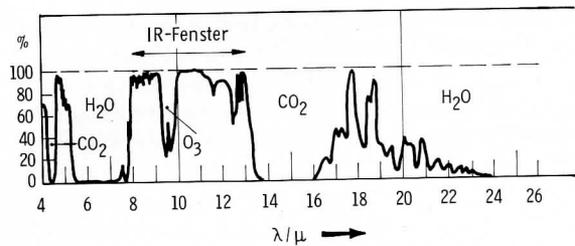


Abb. 4. Durchlässigkeit der Atmosphäre für IR-Strahlung [6]

Mitteuropas, Abschmelzen der Nordpoleiskappe, Steigen des Wasserspiegels der Weltmeere). Das Bedenkliche der gegenwärtigen Situation ist, daß die als Folge der Zunahme an CO_2 in der Atmosphäre vermuteten Klimaeffekte schleichend und über Jahre hinaus nicht sicher erkennbar eintreten, daß sie aber dann, wenn sie bemerkbar sind, schon irreparabel sein können.

Über Möglichkeiten, diesen Problemkreis im Biologieunterricht zu behandeln, hat BEISENHERZ in MNU [5] ausführlich berichtet. Dabei geht es naturgemäß um die Frage, welche biologischen Konsequenzen sich aus der Zunahme des CO_2 -Gehalts ergeben. Es scheint daher erforderlich und auch lohnend, die physikalischen Grundlagen zu klären, die den Energieaustausch innerhalb der Atmosphäre bestimmen und den »Glashauseffekt« der Atmosphäre verstehen lassen.

Für die Behandlung des Themenkomplexes » CO_2 -Problem – Glashauseffekt« im Physikunterricht sprechen über das vorhandene allgemeine Interesse hinaus folgende Gründe:

1. Der Aufwand an experimentellen wie an theoretischen (mathematischen) Hilfsmitteln liegt im Rahmen des Physikunterrichts der Oberstufe des Gymnasiums.

2. Die Notwendigkeit des Zusammenspiels von experimenteller Beobachtung und theoretischer Durchdringung wird beispielhaft sichtbar. Insbesondere gewinnen die bekannten Strahlungsformeln (STEFAN-BOLTZMANN, WIEN, PLANCK), die sonst leicht »Leerformeln« bleiben, konkrete Anwendung.

3. Der Themenkreis bietet interessierten Schülern vielfache Möglichkeiten zu eigener fortführender bzw. ergänzender Arbeit.

Versucht man nun, Genaueres über experimentelle Versuchsanordnungen und Messungen im langwelligen Infrarot (IR), sowie über die absorbierenden Eigenschaften von CO_2 in verschiedenen Spektralbereichen zu erfahren, so kommt man zu einem verblüffenden Ergebnis: In der fachdidaktischen Literatur wird das Problem nirgends behandelt; in der einschlägigen wissenschaftlichen Literatur wird auf das Vorhandensein starker Absorptionsbanden im IR und

zwar bei den Wellenlängen um $2,8 \mu\text{m}$, um $4,2 \mu\text{m}$ und vor allem im Bereich $12,5 \mu\text{m} < \lambda < 17 \mu\text{m}$ hingewiesen, die durch das in Abbildung 4 dargestellte Absorptionsspektrum dokumentiert sind. Genauere Angaben über die dabei eingesetzten Hilfsmittel finden sich nur in Spezialwerken über IR-Spektroskopie und in Gerätebeschreibungen von IR-Spektrometern. Darüber hinaus schreibt M. HARWIT in einem Aufsatz [7] über das Verhalten der Atmosphäre: »Unsere Atmosphäre ist in weiten Bereichen des infraroten Teils des Spektrums undurchsichtig. Kohlendioxid, Wasserdampf und Ozon absorbieren diese Strahlung so stark, daß man in vielen Wellenbereichen die ausgestreckte Hand nicht vor den eigenen Augen sehen könnte.«

Im 1. Teil der folgenden Ausführungen wird über Versuche berichtet, die mit Schulmitteln durchzuführen sind und zum Verständnis des CO_2 -Problems und der damit zusammenhängenden Strahlungsvorgänge beitragen können. Im 2. Teil werden Überlegungen dargestellt, die zum Verständnis des Glashauseffekts der Erdatmosphäre dienen.

2 Absorptionsversuche im langwelligen IR

2.1 Die theoretische Grundlage

Die theoretische Grundlage wird gebildet durch 1. das Stefan-Boltzmann-Gesetz:

$$P = \epsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad \text{mit } \sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4,$$

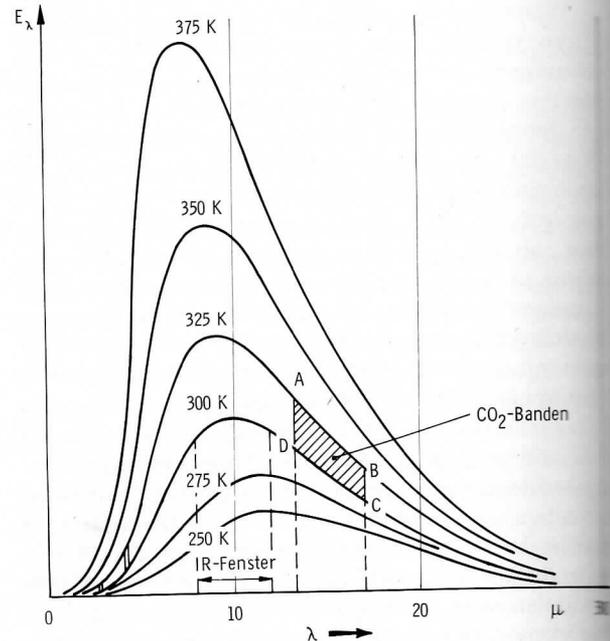


Abb. 5. Plancksche Strahlungskurven für $T = 250 \text{ K}, \dots, 375 \text{ K}$

2. das Wiensche Verschiebungsgesetz:

$$\lambda_m \cdot T = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ m K,}$$

3. die Plancksche Strahlungsformel:

$$E_\lambda = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \left(e^{\frac{hc}{kT\lambda}} - 1 \right)^{-1},$$

von der aber nur insofern Gebrauch gemacht wird, als die Grafiken für verschiedene Temperaturen dazu dienen, den Anteil verschiedener Spektralbereiche an der insgesamt emittierten Leistung abzuschätzen (Abb. 5).

Da eine spektrale Zerlegung der verwendeten thermischen Strahlung mit Schulmitteln nicht in Frage kommt, muß dafür gesorgt werden, daß der Anteil an langwelligem IR ($\lambda > 1 \mu\text{m}$) möglichst groß wird. Andernfalls würden die gesuchten Absorptionseffekte von der Wirkung der kürzerwelligen Strahlung überdeckt werden. Das zeigen deutlich die Strahlungskurven in Abbildung 5: je höher die Temperatur, desto geringer wird der Anteil an langwelligem IR. Aus demselben Grunde ist auch der gelegentlich gemachte Vorschlag, Absorptionseffekte an CO_2 mit sichtbarem Licht nachzuweisen [5], von vornherein zum Scheitern verurteilt. Niedrige Strahlertemperaturen bedingen andererseits nach STEFAN-BOLTZMANN geringe Strahlungsdichten. Als genügend empfindliches Nachweisgerät kommt daher nur die Thermosäule mit nachgeschaltetem Mikrovoltmeter in Frage, zumal auch der Abstand

zwischen Strahler und Empfänger nicht zu klein sein darf, um eine ausreichende Weglänge in den zu untersuchenden Gasen (Luft und CO_2) zu haben.

2.2 Die Versuche

Aus den in 2.1 genannten Vorbedingungen ergab sich folgende Versuchsanordnung (Abb. 6): Als Strahlenquellen standen zur Diskussion

1. eine mit sehr geringer Stromstärke zu betreibende Rotlichtlampe (250 W),
2. ein im Phywe-Katalog beschriebener Keramikstrahler (150 W), der ebenfalls mit geringer Stromstärke zu betreiben war (bei voller Belastung ergibt sich eine Oberflächentemperatur von etwa 700 K),
3. der gute alte Leslie-Würfel, der, um genügende Temperaturkonstanz zu erzielen, mit einer elektrischen Heizung versehen wurde.

Die ersten tastenden Versuche wurden mit der Rotlichtlampe gemacht. Das Rohr (s. Abb. 6) wurde abwechselnd mit Luft und CO_2 gefüllt, die Ausschläge wurden verglichen. Die Ergebnisse waren sehr unbefriedigend, d. h. es ergab sich kaum ein Unterschied der Ausschläge bei Luft- bzw. CO_2 -Füllung. Der Grund für diesen Mißerfolg ist, wenn man ihn erkannt hat, leicht einzusehen: Die registrierte Strahlung setzt sich aus 2 sehr unterschiedlichen Komponenten zusammen, nämlich a) der vom Heizfaden ausgehenden Strahlung, die einen großen Anteil im nahen IR enthält, der unter geringer Schwächung durch den Glaskolben und durch CO_2 hindurchgeht, und b) der vom Glaskolben selbst emittierten langwelligeren Strahlung. Wegen der wesentlich höheren Temperatur des Heizfadens überwiegt aufgrund des T^4 -Gesetzes die Fadenstrahlung, die überwiegend nicht in das Gebiet der CO_2 -Banden fällt, während der langwellige Anteil bereits vom Glaskolben absorbiert und isotrop reemittiert wird (Abb. 7). Dieser Vorgang ist qualitativ einfach zu bestätigen durch folgenden

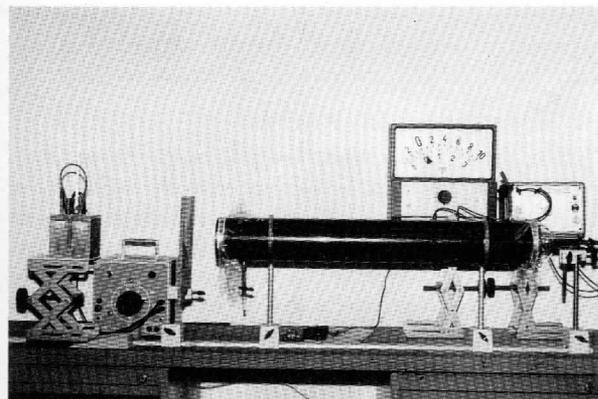
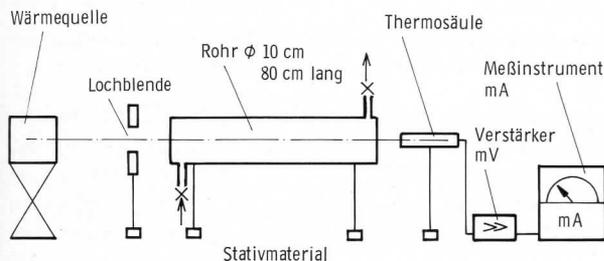


Abb. 6 a und b. Aufbau des Absorptionsversuchs mit IR-Strahlung

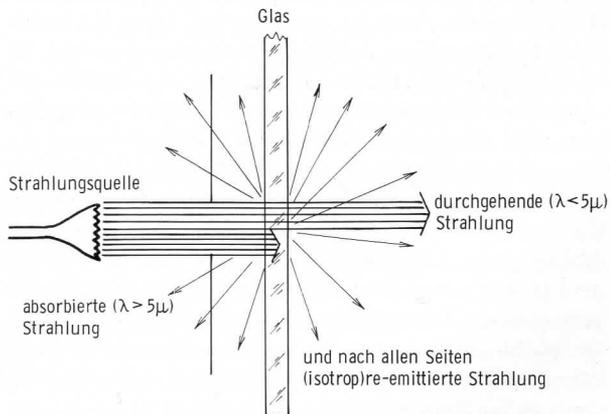


Abb. 7. Absorption und Reemission thermischer Strahlung in Glas

Freihandversuch: Bringt man eine Hand in die Nähe ($d \approx 5$ cm) der oben erwähnten Rotlichtlampe und schaltet dann die Lampe auf dunkle Rotglut, so beobachtet man, obwohl der Heizfaden sehr schnell volle Helligkeit erreicht, ein sehr allmähliches Ansteigen der Wärmewirkung, die in abgeschwächter Form auch nach dem Ausschalten anhält. Beide Vorgänge beim Ein- bzw. Ausschalten der Lampe sind die Folge der beim Einschalten langsam einsetzenden und beim Ausschalten langsam abklingenden IR-Sekundärstrahlung des Lampenkolbens; diese hört auf, sowie man eine Glasplatte vor die Lampe hält, welche die vom Kolben emittierte langwellige Strahlung ($\lambda_{\text{Max}} > 5 \mu\text{m}$) vollständig absorbiert. (Später wird gezeigt, wie die absorbierende Wirkung von Glas auf langwelliges IR gemessen werden kann.)

Als Strahlungsquelle kamen also nur der Keramikstrahler und der Leslie-Würfel in Frage. Für beide ergab sich das Problem der über längere Zeit konstant zu haltenden und genügend genau zu messenden Temperatur. Es ist beim Keramikstrahler dadurch zu lösen, daß man auf den Strahler eine Kappe aus geschwärztem Blech aufsetzt und die Oberflächentemperatur mit dem Temperaturfühler eines elektrischen Thermometers mißt. Für den Leslie-Würfel war die ideale Lösung eine in den Würfel eingesetzte Heizspirale, mit der die Temperatur leicht über längere Zeit konstant gehalten und einfach gemessen werden konnte.

2.2.1 Absorption von IR in CO₂

Die Versuche wurden mit Kunststoffröhren von 10 cm Durchmesser und Rohrlängen von 80, 40 und 20 cm bei Temperaturen des Strahlers zwischen 40 °C und 95 °C durchgeführt. Nach der Lage der Absorptionsbanden des CO₂ (s. Abb. 4) war damit zu rechnen, daß der Absorptionseffekt um so deutlicher wird, je niedriger die Temperatur des Strahlers gewählt wird. Niedrige Strahlertemperatur bedeutet allerdings eine Erschwerung der Messungen wegen des wachsenden Einflusses von Störungen, die mit einer Veränderung der Umgebungsbedingungen verbunden sind. Es muß u. a. darauf geachtet werden, daß die Meßanordnung durch längeres Einschalten (etwa 20 min) vor Beginn der Messung stabilisiert wird, daß ferner die Temperaturverhältnisse sich zwischen den Vergleichsmessungen an Luft bzw. CO₂ nicht ändern. (Beim Einlassen des CO₂ in das Rohr findet eine erhebliche Abkühlung am Einlaßstutzen statt.)

Die Wirkung der zum Abdecken der Rohrenden verwendeten Kunststoffolie vermindert den Ausschlag am Meßinstrument um etwa 10% und ist im wesentlichen auf Reflexionsverluste zurückzuführen; sie kann außer Betracht bleiben.

In der Tabelle 1 sind die bei 3 verschiedenen Tem-

Rohrlänge cm	Temperatur °C	Ausschlag in CO ₂
80	46	73%
	60	82%
	70,5	88%
	(95)	(95%)
40	45	79%
	60	87%
20	45	84%
10	45	93%

Tab. 1. Absorption von thermischer Strahlung in CO₂ bei verschiedenen Rohr-(Weg-)Längen und Temperaturen. (Ausschlag in Luft 100%)

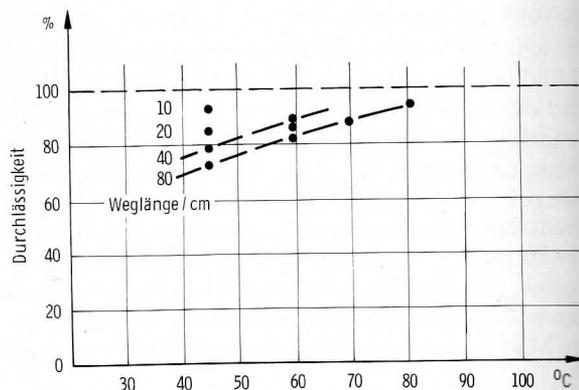


Abb. 8. Durchlässigkeit von CO₂ für thermische Strahlung bei verschiedenen Temperaturen und Weglängen

peraturen und Weglängen von 80, 40, 20 cm erhaltenen Meßwerte zusammengestellt (s. auch Abb. 8). Sie bestätigen, daß langwelliges IR von CO₂ stark absorbiert wird und daß auch schon bei kurzen Weglängen merkbare Absorption stattfindet, die um so deutlicher zutage tritt, je niedriger die Strahlertemperatur ist. Bereits bei Strahlertemperaturen um 100 °C überwiegt der kurzwellige Anteil so stark, daß ein Unterschied zwischen Luft und CO₂ nicht mehr sicher nachweisbar ist.

2.2.2 Absorption von IR in Glas

Um die Wirkung von Glas auf langwelliges IR zu untersuchen, wurden Glasplatten verschiedener Dicke in den Strahlengang, und zwar einmal dicht vor dem Strahler, dann in der Nähe des Empfängers, gebracht. Das Ergebnis der Messungen zeigt Tabelle 2. Während der Rückgang des Ausschlages im 2. Fall auch bei längerer Versuchsdauer erhalten blieb, stieg der Ausschlag im ersten Fall allmählich wieder an. Das bedeutet, daß sich die Glasplatte allmählich erwärmt und dadurch selbst zum Strahler wird; die absorbierte

Temperatur	Glasstärke	Ausschlag
70 °C	1,8 mm	20%
	3 mm	10%
	6 mm	8%

45 °C	3 mm	5%

Tab. 2. Absorption von IR in Glas. (Ausschlag in Luft: 100%)

Strahlung wird »reemittiert«. Diese Beobachtung ist deshalb von Bedeutung, weil sie zeigt, daß Absorptions- oder Emissionsvorgänge nicht isoliert betrachtet werden dürfen, sondern stets die Wechselwirkung zwischen Absorption und (Re-)Emission ins Auge gefaßt werden muß. Sie bildet, wie später gezeigt werden wird, den entscheidenden Ansatzpunkt für das Verständnis der in der freien Atmosphäre ablaufenden Vorgänge. Wie begreift die Durchlässigkeit von Glas im IR-Bereich ist, zeigt die aus einem Prospekt der Firma SCHOTT entnommene Abbildung 9 a. Sie endet bei allen Glassorten bei etwa $5 \mu\text{m}$, so daß man beim Aufbau von IR-Spektrografen auf andere Stoffe zurückgreifen muß (Abb. 9b).

Die Ergebnisse der beschriebenen Versuche lassen sich folgendermaßen zusammenfassen:

1. Bei sehr niedrigen Temperaturen des Strahlers wird überwiegend langwelliges IR (um $10 \mu\text{m}$) emittiert.
2. Glas, auch sog. IR-Filterglas, ist für langwelliges IR ($\lambda > 5 \mu\text{m}$) praktisch undurchlässig. Strahler mit Glasumhüllung sind deshalb zur Untersuchung dieses Spektralbereichs unbrauchbar. Brauchbar sind u. a. Keramikstrahler und Leslie-Würfel.
3. Starke Absorption im langwelligen IR ist auch bei Kohlenstoffdioxid leicht nachweisbar. Schon bei Weglängen von weniger als 50 cm ist CO_2 im Bereich der Absorptionsbanden praktisch undurchsichtig.
4. Die Absorption eines breiten Spektralbandes, wie es bei allen Thermostrahler vorliegt, zeigt einen deutlichen Sättigungseffekt; das für viele Absorptionsvorgänge gültige Exponentialgesetz gilt nicht!

2.3 Vergleich mit der Theorie

Für einen Vergleich der Meßwerte nach Tabelle 1 mit der Theorie stützen wir uns auf die Plancksche Formel in der graphischen Darstellung der Abbildung 5. Diese zeigt deutlich die Verschiebung des Strahlungsmaximums mit wachsender Temperatur zu kürzeren Wellenlängen. Der auf den Absorptionsbereich von CO_2 entfallende Anteil wird in etwa durch die Fläche ABCD im Vergleich zur Gesamtenergie (Fläche zwischen den beiden Kurven für T_1 und T_2) dargestellt. Dieser Anteil liegt größenordnungsmäßig bei 30%,

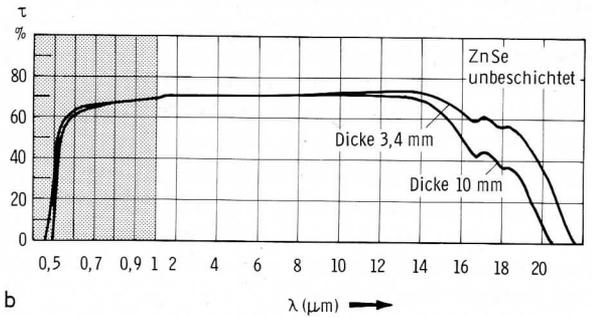
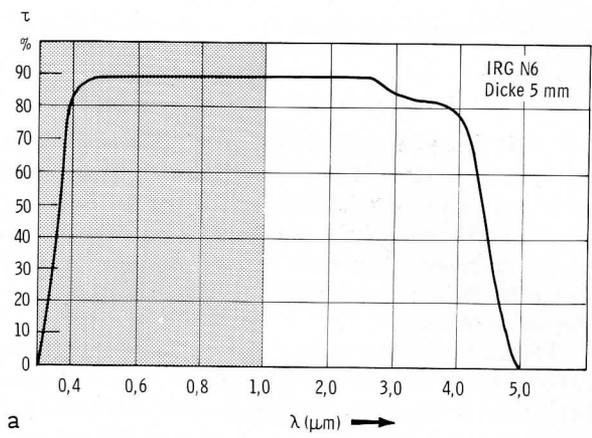


Abb. 9. Durchlässigkeiten von a) Ca-Al-Silikatglas, b) Zink-Selenid (nach Schott-Produktinformation Nr. 3112d (IR-durchlässige Gläser) und 3114d)

wenn man als Umgebungstemperatur $T_1 = 300 \text{ K}$, als Strahlertemperatur $T_2 = 325 \text{ K}$ ansetzt.

Dieser Anteil muß, wie aus Abbildung 5 ebenfalls erkennbar wird, mit wachsender Strahlertemperatur immer kleiner werden, wie das auch durch die Meßwerte der Tabelle 1 bestätigt wird. Auch der durch die Meßwerte angedeutete Sättigungseffekt (mit wachsender Rohrlänge tritt nur noch eine unbedeutende Verstärkung der Absorption ein) findet seine Bestätigung aus der Form der Absorptionskurven (Abb. 4), da über weite Teile des Spektrums schon bei geringen Weglängen eine vollständige Absorption erfolgt. (»Man kann in diesem Bereich nicht die Hand vor Augen sehen«.)

Der entsprechende Sättigungseffekt tritt natürlich auch bei Glas auf, für das schon bei geringen Glasstärken von 3 mm im Bereich über $5 \mu\text{m}$ 100%ige Absorption stattfindet.

Alle diese Überlegungen lassen sich sinngemäß übertragen auf die Frage, in welchem Umfang die von der Erde ausgehende IR-Strahlung in der Atmosphäre absorbiert bzw. reemittiert wird und welche Folgerungen sich aus einer Zunahme des CO_2 -Gehalts der Atmosphäre ergeben können. Dieser Frage wollen wir uns im nächsten Abschnitt zuwenden.

3 Der Glashauseffekt

3.1 Die Gleichgewichtstemperatur in der Atmosphäre

Für das grundsätzliche Verständnis des CO₂-Problems und die damit zusammenhängende Frage nach einer Veränderung der Temperatur auf der Erde lassen sich einige einfache Berechnungen anstellen, denen ein vereinfachtes Modell der in der Erdatmosphäre ablaufenden Ausgleichsvorgänge zugrunde liegt, das sog. »Strahlungsmodell«.

Dieses Modell beschränkt sich auf die rechnerische Erfassung der zwischen Erdoberfläche und Weltraum ablaufenden Strahlungsvorgänge ohne Berücksichtigung von Konvektionsvorgängen innerhalb der Atmosphäre sowie von Energie-Austauschvorgängen zwischen der Atmosphäre und den Weltmeeren. Es wird sich zeigen, daß trotz dieser Vereinfachungen eine brauchbare Annäherung an die Wirklichkeit erreicht wird.

Die Grundlage dieser Berechnungen [10] bildet

1. die Solarkonstante $S_0 = 1,38 \text{ kW m}^{-2}$, die, wie früher einmal ausführlich dargestellt wurde [8], auch mit einfachen Schulmitteln mit recht guter Genauigkeit ermittelt werden kann,

2. das Stefan-Boltzmann-Gesetz $P = \epsilon \cdot \sigma T^4$, das für die thermische Emission von Strahlung maßgebend ist.

Von der die Erde erreichenden Strahlung $S_0 = 1,38 \text{ kW m}^{-2}$ fällt bei gleichmäßiger Verteilung auf die gesamte Erdoberfläche ($A = 4\pi r^2$) die mittlere Strahlungsleistung (s. Abb. 10)

$$P_0 = \frac{1}{4} S_0 = 0,345 \text{ kW m}^{-2}.$$

Strahlungsgleichgewicht wird erreicht, wenn die gesamte ankommende Leistung die Erde wieder verläßt. Daraus ergibt sich die Grundgleichung

$$T = \left(\frac{P}{\epsilon \sigma} \right)^{\frac{1}{4}}. \quad (1)$$

Nimmt man die Erde als schwarzen Körper ohne Lufthülle ($\epsilon = 1$), so errechnet sich aus (1) eine mittlere Oberflächentemperatur

$$T_0 = \left(\frac{0,345}{57} \right)^{\frac{1}{4}} \cdot 1000 \text{ K} = 279 \text{ K} \approx 6^\circ \text{C}.$$

Rechnet man außerdem mit einer Albedo der Erde von $A = 0,3$ ($\alpha = 1 - A$), d. h. daß 30% der auffallenden Strahlung reflektiert werden, so ergibt sich eine Temperatur von nur

$$T_1 = \left(\frac{(1 - A) \cdot P_0}{\sigma} \right)^{\frac{1}{4}} = \left(\frac{0,24}{57} \right)^{\frac{1}{4}} \cdot 1000 \text{ K} \quad (2)$$

$$= 255 \text{ K} \approx -18^\circ \text{C},$$

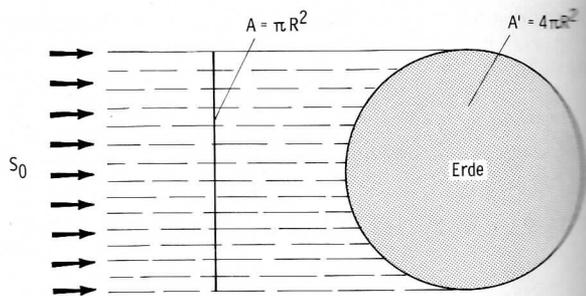


Abb. 10. Zum Zusammenhang zwischen Solarkonstante und mittlerer Strahlungsleistung

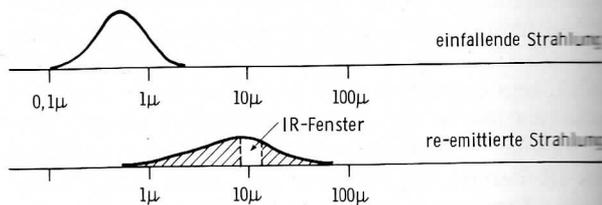


Abb. 11. Spektrale Verteilung der ankommenden und der reemittierten Strahlung

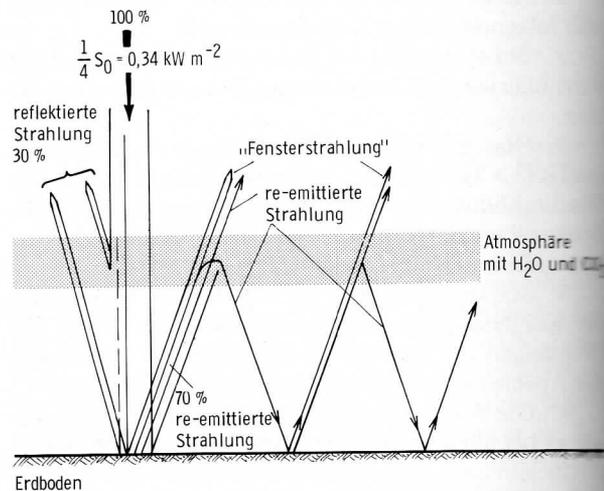


Abb. 12. Strahlungsbilanz in der Erdatmosphäre

d. h. die Erde wäre unter diesen Umständen ein äußerst ungemütlicher Aufenthaltsort. Daß sie es nicht ist, verdanken wir nicht so sehr der Lufthülle, die sie umgibt, sondern vor allem dem Gehalt der Luft an Wasserdampf und an Kohlenstoffdioxid, welche den sogenannten »Glashauseffekt« hervorrufen, wie wir jetzt sehen werden.

Zunächst ist festzustellen, daß die ankommende Strahlung wegen der hohen Oberflächentemperatur der Sonne eine kurzwellige Strahlung ist, die ihr Maximum bei $\lambda_{\text{max}} = 0,59 \mu\text{m}$ hat, während die reemittierte

Strahlung ihr Maximum bei etwa $\lambda_{\max} = 10 \mu\text{m}$, d. h. im langwelligen IR hat (Abb. 11). Ferner ist zu bedenken, daß das Kirchhoffsche Gesetz die Form $\epsilon_\lambda = \alpha_\lambda$ hat, d. h. daß Absorptions- und Emissionskoeffizient nur unter der Voraussetzung gleicher Wellenlänge λ den gleichen Wert haben. (Schwarzer Körper: $\alpha = \epsilon = 1$.) Da ankommende und emittierte Strahlung auf der Erde in weit auseinanderliegenden Wellenlängenbereichen liegen, müssen wir mit durchaus unterschiedlichen α - bzw. ϵ -Werten rechnen.

3.2 Die Strahlungsbilanz in der Atmosphäre

Durch den Gehalt der Atmosphäre an Wasser (in Dampf- oder Tropfenform) und an Kohlenstoffdioxid ergibt sich im wesentlichen (d. h. unter Verzicht auf Einzelheiten) das in Abbildung 12 dargestellte Schema [11], das im folgenden zu interpretieren ist:

Von der die äußere Hülle der Atmosphäre im Mittel erreichenden Strahlungsleistung $\frac{1}{4} S_0$ werden

etwa 30% teils von der Wolkenhülle, teils von der Erdoberfläche unmittelbar in den Weltraum reflektiert. Der Rest $P_r = 0,24 \text{ kWm}^{-2}$ wird von der Erde absorbiert und als langwellige IR-Strahlung reemittiert. Wegen der in Abbildung 4 veranschaulichten Absorption von langwelligem IR durch Wasserdampf und CO_2 kann nur ein kleiner Teil dieser reemittierten Strahlung die Erde durch das Fenster bei $8 \mu\text{m} < \lambda < 12 \mu\text{m}$ wieder verlassen. Der Hauptanteil der vom Erdboden emittierten Strahlung wird in der Atmosphäre absorbiert und anschließend wieder emittiert, und zwar zur einen Hälfte in den Weltraum, zur anderen Hälfte zur Erde zurück. Das führt dazu, daß an der von der Erde emittierten Energie, die wir mit $P_r = 0,24 \text{ kWm}^{-2}$ angesetzt haben, ein Korrekturfaktor k angebracht werden muß, welcher die nach Abbildung 12 durch Mehrfachabsorption bzw. -reflexion anfallenden Beträge berücksichtigt.

Zu einer Abschätzung des Korrekturfaktors k gelangt man durch folgende einfache Überlegung: Nimmt man an, daß der Anteil $c \cdot P_r$ die Erde durch das »Fenster« verläßt, so wird die Hälfte des Restes $(1-c)P_r$ zur Erde reemittiert; die Wiederholung dieses Vorgangs führt dann zu

$$P = k \cdot P_r = P_r \sum_0^{\infty} \left(\frac{1-c}{2} \right)^n = P_r \frac{1}{1 - \frac{1-c}{2}} = \frac{2}{1+c} P_r. \quad (3)$$

Nimmt man aufgrund der Größe des Fensters (s. Abb. 11) den Anteil $c = 0,3$, so ergibt sich für den Korrekturfaktor der Wert $k = 1,54$. Daraus folgt aus

$P = 1,54 \cdot P_r = 1,54 \cdot 0,24 \text{ kWm}^{-2}$ für die Gleichgewichtstemperatur T_e der Wert

$$T_e = 284 \text{ K} \pm 11 \text{ }^\circ\text{C}, \quad (4)$$

ein Wert, der dem tatsächlichen Wert der mittleren Jahrestemperatur der Erde von $T_m = 287 \text{ K}$ bemerkenswert nahe kommt. Hierbei ist $\epsilon \approx 1$ gesetzt, was für den hier angesprochenen IR-Bereich angenähert zutrifft. Dabei entfällt, wie aus der in Abbildung 4 wiedergegebenen Absorptionskurve zu entnehmen ist, etwa $\frac{2}{3}$ des atmosphärischen Glashauseffekts auf H_2O und nur $\frac{1}{3}$ auf CO_2 .

Will man die Wirkung des in der Atmosphäre enthaltenen CO_2 vergleichen mit der im Experiment an CO_2 unter (annähernd) Normalbedingungen beobachteten, so muß man fragen, welche Weglänge dem in der Atmosphäre enthaltenen CO_2 unter Normalbedingungen entspricht. Dazu dient folgende Überlegung:

Wie bekannt, ist die Masse der über $A = 1 \text{ cm}^2$ liegenden Luftschicht gleich der von $76 \text{ cm}^3 \text{ Hg}$ oder von $13,55 \cdot 76 \text{ cm}^3$ Wasser; das sind $M = 1033 \text{ g}$. Bei einer Luftdichte von $\rho = 1,29 \text{ mg/cm}^3$ nehmen 1033 g Luft ein Volumen

$$V = \frac{M}{\rho} = \frac{1033 \text{ g}}{1,29 \cdot 10^{-3} \text{ g cm}^{-3}} = 8,0 \cdot 10^5 \text{ cm}^3 \quad (5)$$

ein. Das entspricht bei 1 cm^2 Grundfläche einer Luftsäule von $h_L = 8,0 \text{ km}$. Bei einem CO_2 -Gehalt der Atmosphäre von $0,033\%$ hat die zugehörige CO_2 -Säule eine Höhe von $h_{\text{CO}_2} = 2,6 \text{ m}$.

Wollte man dieselbe absorbierende Wirkung im Labor erzielen, die von dem in der Atmosphäre enthaltenen Kohlenstoffdioxid ausgeübt wird, müßte man ein $2,6 \text{ m}$ langes Rohr verwenden. Unsere Meßwerte bei 80 cm Rohrlänge (s. Tab. 1) zeigen, daß in den entscheidenden Wellenlängenbereichen bereits bei viel kürzeren Weglängen fast vollständige Absorption erreicht wird.

3.3 Zum Problem der Klimaveränderung

Extrapoliert man die in Abbildung 1 dargestellte Zunahme des CO_2 -Gehalts der Atmosphäre über einige Jahrzehnte, so kann mit hoher Wahrscheinlichkeit in etwa 50 bis 60 Jahren mit einer Verdopplung des CO_2 -Gehalts (d. h. Anstieg auf etwa $650 \cdot 10^{-6}$ gegenüber dem heutigen Wert von $335 \cdot 10^{-6}$) gerechnet werden. Die unmittelbare Folge dieser CO_2 -Zunahme ist eine Verstärkung des in Abbildung 12 dargestellten Rückhalteeffekts, der seinen Ausdruck in einer Vergrößerung des in Gleichung (3) enthaltenen Korrekturfaktors k finden muß. Hierbei ist zu bedenken, daß eine merkliche Zunahme der Absorption nur in denjenigen Wellenlängenbereichen stattfinden kann, in denen beim gegenwärtigen CO_2 -Gehalt weder zu

große noch zu geringe Absorption stattfindet (Sättigungseffekt). Ferner ist zu diskutieren, inwieweit durch den steigenden CO₂-Gehalt weitere Sekundäreffekte (Zunahme des Wasserdampfgehalts der Atmosphäre, verstärkte Wolkenbildung, Veränderung der Albedo der Erde, Änderung der globalen Zirkulation u. v. a.) ausgelöst werden, die ebenfalls zur Temperaturänderung beitragen können. Wie leicht aufgrund von Gleichung (1) durchzurechnen ist, sollte auch ohne Berücksichtigung von Sekundäreffekten eine Zunahme des Strahlungsflusses P um $\Delta P = 1 \text{ Wm}^{-2}$ schon zu einer Temperaturänderung $\Delta T \approx 0,3 \text{ K}$ führen. Derartige Klimateffekte sind, wie in einer Untersuchung von J. PANKRATH [4] ausführlich dargelegt wird, lokal bereits durchaus vorhanden (Beispiel: Großstadtklima). Die anthropogene Belastung der Strahlungsbilanz beträgt nach PANKRATH im Oberrheingebiet bereits $1,6 \text{ Wm}^{-2}$, in großstädtischen und industriell belasteten Gebieten steigt sie bis auf Werte um 30 Wm^{-2} , was zu deutlich meßbaren Veränderungen des Kleinklimas führt.

Die Schwierigkeiten von Berechnungen im globalen Maßstab, die nicht zuletzt durch das Fehlen gesicherter Beobachtungswerte bedingt sind, machen es verständlich, daß die zahlreichen, mit großem Rechenaufwand durchgeführten Modellrechnungen zu so unterschiedlichen Ergebnissen, wie sie anfangs erwähnt wurden, geführt haben. Eine einigermaßen sichere Angabe über die zu erwartende globale Temperaturzunahme scheint aber noch in weiter Ferne zu liegen. Das Rezept des verantwortungsbewußten Physikers kann angesichts dieser Situation daher nur lauten: Der Verbrauch an fossilen Brennstoffen ist so weit wie möglich einzuschränken!

Für anregende Diskussionen und Mitarbeit dankt der Verfasser Herrn Prof. Dr. FISCHLER und Herrn StD ZIEBUR. Für den Aufbau der Versuchsanordnung und Mithilfe gilt

der Dank Herrn JAKOB, Mitarbeiter am Institut für Didaktik der Physik an der Freien Universität Berlin.

Literatur

- [1] H. FLOHN: Stehen wir vor einer Klimakatastrophe? - Umschau **77** (1977) 561.
H. FLOHN: Possible Climate Consequences of a Man Made Global Warming. - Laxenberg: Internat. Inst. Appl. Syst. Anal. 1980.
H. FLOHN: Klimaänderung als Folge der CO₂-Zunahme? - Phys. Bl. **37** (1981) 184.
- [2] U. HAMPICKE: Das CO₂-Risiko. - Umschau **77** (1977) 599.
- [3] K. HEINLOTH: Energie für heute und morgen. - Phys. Bl. **36** (1980) 314.
- [4] W. BACH (Hg.) u. a.: Interactions of Energy and Climate. - Dordrecht: Reidel Publ. Comp. 1980.
- [5] W. BEISENHERZ: Das Kohlendioxidproblem als Thema des fachübergreifenden Biologieunterrichts. - MNU **34** (1981) 423.
- [6] HOWARD - GARING - WALKER: Transmission and Detection of Infrared Radiation. In: Handbook of Geophysics and Space Environment. - New York: McGraw-Hill 1965.
- [7] M. HARWIT: Der infrarote Kosmos. - Umschau **77** (1977) 363.
- [8] H. HEISE: Die Bestimmung der Solarkonstante im Physikunterricht. - MNU **5** (1952) 163.
- [9] K. COULSON: Solar and Terrestrial Radiation. - New York: Acad. Press 1975.
- [10] E. THORNDIKE: Energy and Environment. - Reading: Eddison-Wesley 1976.
- [11] W. WEISCHET: Einführung in die allgemeine Klimatologie. - Stuttgart: Teubner 1979. S. 88.
- [12] K. HEINLOTH - M. KOLSDORF: Einführung in die physikalischen Grundlagen der Energieumwandlung. - Bonn: Phys. Inst. d. Univ. Bonn 1980.

Anschrift des Verfassers: OstD a. D. Hans Heise, Wenckebackstraße 3, 1000 Berlin 42