Einführung des Treibhauseffekts durch einen anschaulichen Prozess

Hans - Otto Carmesin
Hohenwedeler Weg 136, 21682 Stade
Gymnasium Athenaeum, Harsefelder Str. 40, 21680 Stade
Fachbereich Physik, Universität Bremen, 283344 Bremen

Kurzfassung
Zur Einführung des Treibhauseffekts untersucht man das Zusammenwirken von Vorgängen des Energietransports und Energieumwandlungen im Weltall, in der Atmosphäre und am Boden. Meist betrachtet man einen stationären Zustand und löst dazu ein entsprechendes Gleichungssystem. Man kann aber ebensogut einen anschaulichen dynamischen Prozess behandeln. Ich berichte über einen entsprechenden Unterrichtsversuch.

1. Einleitung

Das Klima ist für das Leben auf der Erde sehr wichtig und unterliegt Wandlungen, die teilweise auf das Einwirken des Menschen zurückzuführen sind. So führt der Ausstoß an Kohlendioxid tendenziell zu einer Verstärkung des Treibhauseffekts und damit zu einer globalen Erwärmung. Um dem entgegen zu wirken unternimmt Deutschland große Anstrengungen. Entsprechend ist der Treibhauseffekt Thema des Physikunterrichts der Klasse 11.

Soll ein Schüler den Treibhauseffekt einigermaßen selbstständig beurteilen, so muss er ihn im Modell auch zahlenmäßig nachvollziehen können. Hierzu wird meist ein Gleichungssystem gelöst [1,2]. Leider entspricht das mathematische Lösungsverfahren kaum den prozesshaften Vorgängen im Modell. Hier stelle ich ein Iterationsverfahren vor, das die Vorgänge im Modell widerspiegelt und ebenfalls die zahlenmäßige Lösung des Modells liefert. Ich präsentiere auch Ergebnisse eines Unterrichtsversuchs [2], den Christian Bethke am Atheaeum Stade im Jahr 2000 hierzu durchführte.

Dazu schildere ich zunächst, wie man ausgehend von einem besonders einfachen Modell für die Entstehung der Temperatur auf der Erde zu immer genaueren Modellierungen gelangt. Dann präsentiere ich den neuen Zugang durch das Iterationsverfahren und stelle schließlich Ergebnisse des Unterrichtsversuchs dar.

2. Modell ohne Atmosphäre

Meist geht man von einem Modell ohne Atmosphäre aus, s. Abb. 1. Man bestimmt [3] zunächst die Solarkonstante $S_E = 1370\ W\ m^{-2}$. Um die der Erdoberfläche zugeführte Leistung zu berechnen, multipliziert man die Solarkonstante mit der Querschnittsfläche πr^2 der Erde, kurz $P_{zu} = S_E\ \pi r^2$. Dabei bleiben sowohl die Atmosphäre als auch die Oberflächeneigenschaften der Erde unberücksichtigt. Im Gleichgewicht muss die gleiche Leistung von der Erdoberfläche abgestrahlt werden, kurz $P_{ab} = P_{zu}$.

Die abgegebene Leistung P_{ab} ergibt sich als Produkt einer (mittleren) abgegebenen Leistungsdichte S_{ab} und der Fläche der Erde $4\pi r^2$, kurz $P_{ab} = S_{ab} \cdot 4\pi r^2$. Gleichsetzen mit der zugeführten Leistung, s.o., ergibt:

$$S_{ab} = 0{,}25\ S_E \qquad \text{(Gl. 1)}$$

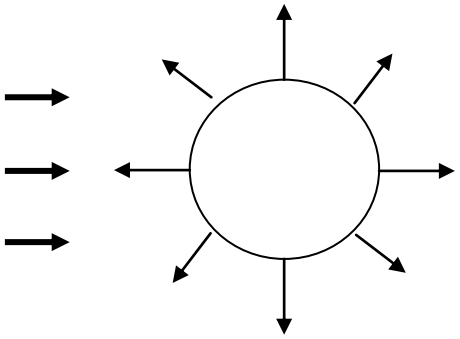

Abb. 1: **Modell ohne Atmosphäre:** Die Sonnenstrahlen (von links) treffen auf die Querschnittsfläche der Erde. Die Erde sendet in alle Richtungen Temperaturstrahlung.

Im folgenden gehen wir vereinfachend von einer Erdoberfläche mit einer überall gleichen Temperatur T aus. Um diese zu berechnen, verwenden wir das Stefan - Boltzmann - Gesetz für die abgegebene Leistungsdichte $S_{ab} = \sigma T^4$ mit der Stefan-Boltzmann-Konstanten $\sigma = 5{,}8 \cdot 10^{-8} W m^{-2} K^{-4}$. Auflösen nach T ergibt:

$$T = (S_{ab} : \sigma)^{0{,}25} \qquad \text{(Gl. 2)}$$

Durch Einsetzen von Gl. 1 erhalten wir T = 277,2K. Die durchschnittliche Erdtemperatur liegt mit 287K darüber.

3. Ein Modell mit Reflexion

Auf Fotos, die von Raumschiffen aus gemacht sind, erscheint die Erde hellblau. Demnach reflektiert die Erde einen Teil der eintreffenden Sonnenstrahlen. Realistisch ist, dass 30% der auftreffenden Sonnenstrahlen reflektiert werden, bevor sie wesentlich in die Atmosphäre der Erde eindringen.

Es kommen somit nur 70% der Sonnenstrahlen in die Atmosphäre. D. h. die rechte Seite von Gl. 1 wird mit 0,7 multipliziert, $S_{ab} = 0,7 \cdot 0,25\ S_E$. Einsetzen in Gl. 2 ergibt die Temperatur 253,6K.

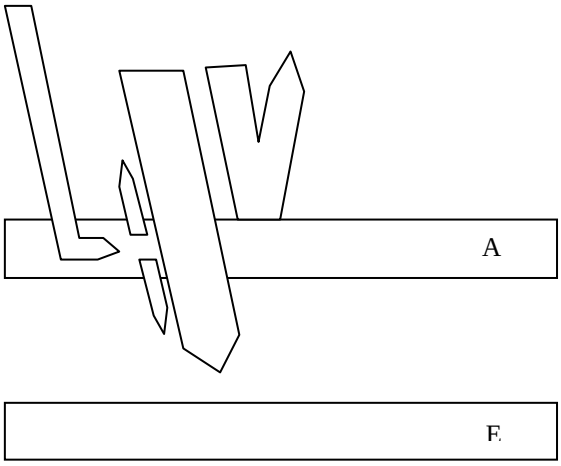

Abb. 2.: Energieströme an der Atmosphäre: Von den auf die Atmosphäre A treffenden Sonnenstrahlen werden 30% reflektiert (rechts), 50% durchgelassen (Mitte) und 20% absorbiert (links). Die absorbierte Energie wird zur Hälfte zum Erdboden E und zur Hälfte ins Weltall emittiert (kleine Pfeile). Das sind je 10% der auftreffenden Energie.

4. Modell mit Reflexion und Thermalisieren

Treffen Sonnenstrahlen auf die Atmosphäre, so wird ein Teil reflektiert, s. o. ein Teil wird durchgelassen und ein Teil wird absorbiert. Realistisch ist 30 % Reflexion, 20 % Thermalisierung und 50 % Transmission. Die thermalisierte Energie wird im Gleichgewicht wiederum emittiert, im Idealfall die Hälfte nach innen und die andere Hälfte nach außen, s. Abb. 2. Hier kommen insgesamt 60% der auf die Atmosphäre treffenden Strahlung auf dem Erdboden an, s. Abb. 2. Also wird aus Gl. 1 hier:

$$S_{ab} = 0,6 \cdot 0,25\ S_E \qquad \text{(Gl. 3)}$$

Einsetzen in Gl. 2 ergibt die Temperatur 244,0K.

5. Modell mit Treibhauseffekt

Die Schüler merken sofort, dass in Abb. 2 der Energiestrom fehlt, der vom Erdboden ausgeht. Als Vorbereitung für diesen Energiestrom wird experimentell gezeigt, dass Kohlendioxid die von der Erde ausgehende Infrarotstrahlung absorbiert, s. Abb. 3, während es für das sichtbare Sonnenlicht offensichtlich transparent ist. Daher wird von der IR - Strahlung 88% in der Atmosphäre absorbiert. Von der entsprechenden Energie wird wieder die Hälfte nach innen, die andere nach außen abgestrahlt, s. Abb. 4.

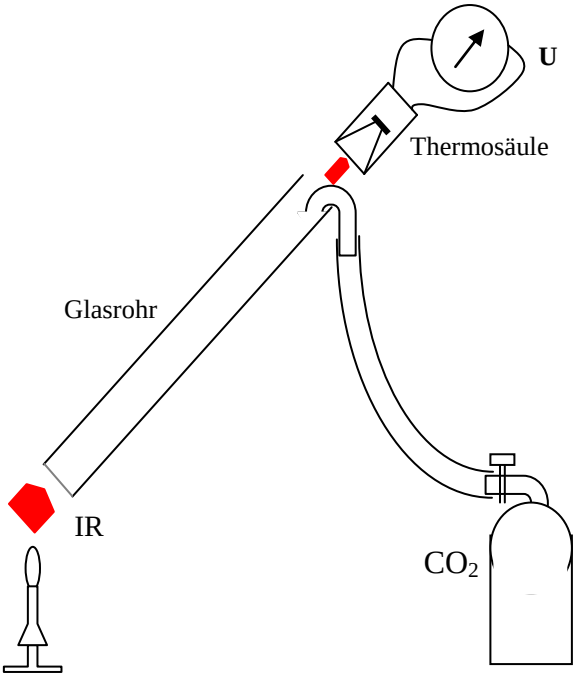

Abb. 3.: IR - Absorption durch Kohlendioxid: Die IR - Strahlung eines Bunsenbrenners wird durch ein zunächst mit Luft gefülltes Glasrohr gesendet und am oberen Ende mit einer Thermosäule nachgewiesen. Dabei ist das Glasrohr unten mit Tesafilm verschlossen. Dann wird das Rohr von oben her mit Kohlendioxid gefüllt. Dadurch wird deutlich weniger IR nachgewiesen als zuvor.

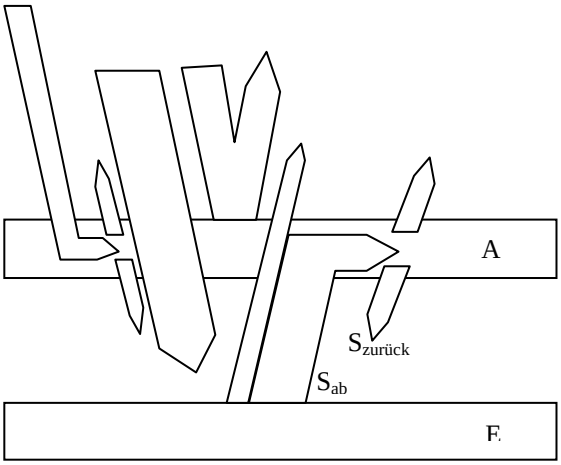

Abb. 4.: Energieströme an der Atmosphäre und am Erdboden: Zusätzlich zu den Energieströmen aus Abb. 2 ist folgendes dargestellt. Das von der Erde abgestrahlte IR S_{ab}, das zu 12% durch die Atmosphäre gelassen (langer dünner Pfeil) und zu 88% absorbiert wird (von unten kommender abknickender Pfeil). Davon geht die Hälfte nach oben, die andere nach unten, $S_{zurück}$ (kleine Pfeile rechts).

6. Mathematische Lösung

In diesem Klimamodell sind 9 Energieströme wichtig, s. Abb. 4. Davon können die 5 Ströme aus Abb. 2 direkt berechnet werden. Von den verbleibenden 4 Strömen sind die beiden Emissionen aus der Atmosphäre gleich groß, die beiden anderen teilen sich im Verhältnis 12 zu 88. Daher genügt es hier, für zwei unbekannte Ströme die Größe zu berechnen, etwa für $S_{zurück}$ und S_{ab}. Dazu müssen zwei Gleichungen aufgestellt werden: Im Gleichgewicht ist die Summe $0{,}6 \cdot 0{,}25\ S_E + S_{ab}$ der auf die Erdoberfläche treffenden Ströme genauso groß wie die Summe S_{ab} der von der Erdoberfläche abgestrahlten Ströme:

$$0{,}6 \cdot 0{,}25\ S_E + S_{zurück} = S_{ab} \qquad \text{(Gl. 4)}$$

Von S_{ab} gelangen 44% zurück auf die Erdoberfläche:

$$S_{zurück} = 0{,}44\ S_{ab} \quad \text{(Gl. 5)}$$

Einsetzen von Gl. 5 in Gl. 4 ergibt:

$$0{,}6 \cdot 0{,}25\ S_E + 0{,}44\ S_{ab} = S_{ab}$$

Auflösen nach S_{ab} führt zu:

$S_{ab} = 0{,}6 \cdot 0{,}25\ S_E : 0{,}56 = 0{,}26786\ S_E = 366{,}96\ Wm^{-2}$

Einsetzen in Gl. 2 ergibt:

$$T = 282{,}0\ K \qquad \text{(Gl. 6)}$$

Diese Temperatur liegt deutlich höher als die bisher berechneten. Die Ursache kann man sich leicht denken: Ein Teil der von der Erdoberfläche abgestrahlten Energie wird bleibt unterhalb der Atmosphäre, s. Abb. 4. Insofern funktioniert die Atmosphäre ähnlich wie das Dach eines Treibhauses. Es lässt Licht hinein aber IR nur in geringem Umfang hinaus.

Die mathematische Lösung des Klimamodells zum Treibhauseffekt ist wesentlich komplizierter als die Aufgaben, welche die Schüler im Mathematikunterricht zum Thema Gleichungssysteme behandeln. Da hier 9 Ströme wesentlich sind, s. o., ist diese Komplexität unvermeidbar. Für den Physikunterricht ist eine derart komplexe mathematische Methode ungünstig.

7. Lösung durch einen anschaulichen Prozess

Um das Lösen eines Gleichungssystems zu vermeiden lesen wir Abb. 4 schrittweise von links nach rechts:

1) Die linken zwei Pfeile nach unten stellen die primäre Einstrahlung auf die Erdoberfläche dar: $0{,}6 \cdot 0{,}25\ S_E$
2) Der Doppelpfeil nach oben stellt die Emission einer gleich großen Strahlung dar: $0{,}6 \cdot 0{,}25\ S_E$
3) Der rechte Pfeil nach unten zeigt die 44 Prozent von Teil 2, die zur Erdoberfläche zurück emittiert werden: $0{,}6 \cdot 0{,}25 \cdot 0{,}44\ S_E$
4) Der rechte Doppelpfeil nach oben in Abb. 5 zeigt die Emission des Teils 3 von der Erdoberfläche: $0{,}6 \cdot 0{,}25 \cdot 0{,}44\ S_E$
5) Der rechte Pfeil nach unten in Abb. 5 zeigt die 44 Prozent von 4, die zur Erdoberfläche zurück emittiert werden: $0{,}6 \cdot 0{,}25 \cdot (0{,}44)^2\ S_E$
6) Die Strahlung aus 5 wird wieder von der Erdoberfläche emittiert: $0{,}6 \cdot 0{,}25 \cdot (0{,}44)^2\ S_E$
7) Von der Strahlung aus 5 werden, ähnlich wie zuvor, wieder 44 Prozent zur Erdoberfläche hin emittiert: $0{,}6 \cdot 0{,}25 \cdot (0{,}44)^3\ S_E$

Die Schüler berechnen für jeden Schritt den Betrag der von der Erdoberfläche emittierten Strahlung und erkennen, dass die Berechnung immer genauer wird. Auch merken sie, dass die Berechnung beliebig genau gemacht werden kann. Es ist nicht nötig, die hier entstehende geometrische Reihe exakt zu berechnen. Die ersten sechs Glieder kommen dem Grenzwert schon recht nahe, s. Gl. 6:

a) $0{,}6 \cdot 0{,}25\ S_E = 205{,}5\ Wm^{-2}$ mit T=244,0K
b) $0{,}6 \cdot 0{,}25 \cdot [1+0{,}44]\ S_E = 295{,}9 Wm^{-2}$ mit T=267,3K
c) $0{,}6 \cdot 0{,}25 \cdot [1+0{,}44+(0{,}44)^2]\ S_E = 335{,}8 Wm^{-2}$ mit T=275,8K
d) $0{,}6 \cdot 0{,}25 \cdot [1+0{,}44+(0{,}44)^2+(0{,}44)^3]$ $S_E = 353{,}2 Wm^{-2}$ mit T=279,4K
e) $0{,}6 \cdot 0{,}25 \cdot [1+0{,}44+(0{,}44)^2+(0{,}44)^3+(0{,}44)^4]$ $S_E = 360{,}9 Wm^{-2}$ mit T=280,9K
f) $0{,}6 \cdot 0{,}25 \cdot [1+0{,}44+(0{,}44)^2+(0{,}44)^3+(0{,}44)^4+(0{,}44)^5]\ S_E = 364{,}3 Wm^{-2}$ mit T=281,5K

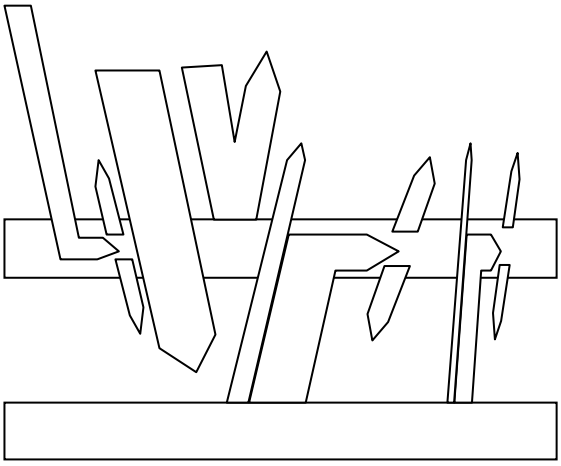

Abb. 5: Anschaulicher Prozess:

1) Primär trifft Strahlung auf die Erdoberfläche (zwei linke nach unten zeigende Pfeile).
2) Diese wird an der Erdoberfläche absorbiert und emittiert (mittlerer Doppelpfeil nach oben).
3) Davon werden 88% in der Atmosphäre absorbiert und 44 % wieder zu Erdoberfläche emittiert (mittlerer Pfeil nach unten).
4) Diese Strahlung wird an der Erdoberfläche absorbiert und emittiert (rechter Doppelpfeil nach oben).
5) Davon werden 88% in der Atmosphäre absorbiert und 44 % wieder zu Erdoberfläche emittiert (rechter Pfeil nach unten).

Die ersten Glieder in diesem Prozess liefern bereits eine gute Näherung für den Betrag der Temperatur. Im Prinzip kann der Prozess unbegrenzt fortgesetzt werden und ergibt eine geometrische Reihe, deren Grenzwert zum exakten Temperaturbetrag führt.

8. Ergebnisse des Unterrichtsversuchs

Bei diesem Unterrichtsversuch [2] wurde vorher und nachher wurde eine Fragebogenaktion durchgeführt und während des Unterrichts wurden Protokolle angefertigt.

Die Schüler konnten die dargestellten Modelle entwickeln. Dabei haben sie für das Modell mit Treibhauseffekt nicht das Gleichungssystem gelöst, sondern den dargestellten anschaulichen Prozess relativ selbstständig entdeckt. Hierbei wurden ihnen die Bedeutung der Atmosphäre für das Klima und der Treibhauseffekt bewusst. Die Schüler erkannten so, dass die Energie zwischen dem Erdboden und der Atmosphäre zirkuliert und dass dabei das Kohlendioxid in der Atmosphäre wesentlich ist. Die Schüler waren an der Iteration interessiert und wollten das Ergebnis mit Hilfe der Tabellenkalkulation Excel genau bestimmen. Die Schüler konnten bei einer abschließenden Diskussion über den natürlichen und anthropogenen Treibhauseffekt auf der Basis der behandelten Modelle vorgelegtes Datenmaterial sachgerecht beurteilen.

Literatur

[1] Dorn, F. und Bader, F.: Physik (Ausgabe A; Gymnasium Sek II; 11), Schrödel, 1998.

[2] Bethke, Ch.: Die Entwicklung eines Klimamodells. Ein Unterrichtsversuch in der Unterrichtseinheit "Thermodynamik" in der Vorstufe (Klasse 11) des Gymnasiums im Fach Physik. Zweite Staatsexamensarbeit. Studienseminar Stade für das Lehramt an Gymnasien. Stade 2000.

[3] Boysen, G. et al.: Physik (Oberstufe, Ausgabe A Band 1), Cornelsen, 1997.

Veröffentlicht:
H.-O. Carmesin, Einführung des Treibhauseffekts durch einen anschaulichen Prozess. In: Tagungs-CD Fachdidaktik Physik, Deutsche Physikalische Gesellschaft, 2001, Deutsche Physikalische Gesellschaft.