

P. LEMKE

# Einfache Energiebetrachtungen von realen und fiktiven Planeten

Einem außerirdischen Beobachter erscheint die Erde als blauweißer Planet: blau durch das in der Atmosphäre gestreute und am Ozean reflektierte Sonnenlicht; weiß durch die Reflexion an der Wolkenoberseite. Er erkennt eine Lufthülle um die Erde, die allerdings nur eine sehr dünne Schicht darstellt. Reduziert man die Erde auf normale Globusgröße (etwa 40 cm Durchmesser), dann beträgt die Dicke der Troposphäre (die unteren 12 km der Atmosphäre), in der das Wetter stattfindet, nur etwa 0,3 mm. In der Troposphäre befinden sich 80 % der gesamten Masse der Atmosphäre. Die Atmosphäre stellt also eine sehr dünne Schale dar, die den flüssigen und festen Teil der Erde umgibt. Diese dünne Schicht sorgt aber ganz entscheidend dafür, dass an der Erdoberfläche Bedingungen herrschen, die das Leben ermöglichen.

## 1 Energiebilanz von Venus, Erde und Mars

Das Strahlungsthermometer, das der außerirdische Beobachter auf die Erde richtet, zeigt einen Wert von  $-19^\circ\text{C}$  an. Dieser überraschend niedrige Wert lässt sich durch eine einfache Rechnung leicht verstehen. Die Erde empfängt am Oberrand der Atmosphäre eine mittlere Strahlungsleistung von  $S_e = 1368 \text{ Wm}^{-2}$  von der Sonne. Dieser Wert wird Solarkonstante genannt. Allerdings ist dies keine echte Konstante, denn die Strahlungsleistung pro Fläche (Bestrahlungsstärke) nimmt quadratisch mit dem Abstand von der Sonne ab. Für die Venus beträgt die „Solarkonstante“  $S_v = 2623 \text{ Wm}^{-2}$ , und für Mars nur  $S_m = 589 \text{ Wm}^{-2}$ .

Die von der Sonne auf einen Planeten treffende Strahlung wird von diesem teilweise reflektiert. Die Reflektivität (Albedo) eines Planeten hängt von seiner Oberflächenbeschaffenheit, insbesondere aber von seiner Bewölkung ab. So ist die Albedo der vollständig bewölkten Venus  $\alpha_v = 0,77$ , die des wolkenfreien Mars  $\alpha_m = 0,24$  und die der teilweise bewölkten Erde  $\alpha_e = 0,31$ , d. h. 31 % der einkommenden solaren Strahlung werden von ihr wieder in den Weltraum zurück reflektiert.

Die von einem Planeten aufgenommene Energie wird im thermischen Gleichgewicht als Wärmestrahlung wieder in den Weltraum abgegeben. Das Gesetz der Wärmestrahlung besagt, dass die abgestrahlte Leistung pro Einheitsfläche proportional zur vierten Potenz der absoluten Temperatur des strahlenden Körpers ist. Die Proportionalitätskonstante (die so genannte Stefan-Boltzmann-Konstante) beträgt  $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$ .

Berücksichtigt man, dass die gesamte von dem Planeten eingefangene (kurzwellige) Sonnenenergie in erster Näherung gegeben ist durch seine Querschnittsfläche multipliziert mit der entsprechenden Solarkonstanten abzüglich des reflektierten Anteils, und dass die gesamte abgegebene (langwellige) Wärmestrahlung berechnet wird durch seine Oberfläche multipliziert mit der Stefan-Boltzmann-Konstanten und der vierten Potenz der Temperatur, dann folgt für einen Planeten mit dem Radius  $r$

$$\pi r^2 (1 - \alpha) S = 4 \pi r^2 \sigma T^4 \quad (1)$$

Daraus folgt für die globale Strahlungstemperatur:

$$T = \sqrt[4]{S(1 - \alpha) / (4\sigma)} \quad (2)$$

Wie man sieht, ist die Lösung für die globale Strahlungstemperatur eines Planeten unabhängig von seiner Größe. Sie hängt nur von der Albedo  $\alpha$  und von der Solarkonstanten, d. h. dem Energieangebot der Sonne am Ort des Planeten ab.

Für die Erde folgt mit  $S_e = 1368 \text{ Wm}^{-2}$  und  $\alpha_e = 0,31$  eine Strahlungstemperatur von  $T_e = 254 \text{ K}$  ( $-19^\circ\text{C}$ ). Selbst wenn die Erde ein schwarzer Körper wäre und die gesamte solare Strahlung absorbieren würde, d. h.  $\alpha_{e,b} = 0$ , dann betrüge die Strahlungstemperatur nur  $T_{e,b} = 279 \text{ K}$  ( $6^\circ\text{C}$ ).

Für Venus und Mars folgen mit den oben genannten Werten:  $T_v = 227 \text{ K}$  ( $-46^\circ\text{C}$ ) bzw.  $T_m = 211 \text{ K}$  ( $-62^\circ\text{C}$ ). Obwohl die Venus viel dichter an der Sonne ist, liegt ihre Strahlungstemperatur deutlich unter der der Erde, da ihre Albedo wesentlich höher ist und sie deswegen weniger Sonnenenergie absorbiert.

## 2 Der Treibhauseffekt

Die niedrige Strahlungstemperatur von  $-19^\circ\text{C}$  herrscht zum Glück nicht an der Erdoberfläche, denn einige Gase in der Lufthülle der Erde (im Wesentlichen Wasserdampf und Kohlendioxid) sind strahlungsaktiv, d. h. sie sind gut durchlässig für die sichtbare Sonnenstrahlung, aber weniger gut durchlässig für die von der Erdoberfläche ausgesendete langwellige Wärmestrahlung. Dadurch werden die unteren Luftschichten erwärmt. In der Tat liegt die Lufttemperatur in Bodennähe (im globalen Mittel  $+14^\circ\text{C}$ ) deutlich über der oben genannten Strahlungstemperatur. Diese Tatsache wird zu einem beträchtlichen Teil durch die Absorptionseigenschaften der Atmosphäre, d. h. durch den natürlichen Treibhauseffekt<sup>1</sup> hervorgerufen. Die an der Wärmeabstrahlung der Erde beteiligten Bereiche sind im Wesentlichen die mittleren und hohen Schichten der Lufthülle und die Oberseiten der Wolken. Dadurch erscheint die Erde dem außerirdischen Beobachter als ein  $-19^\circ\text{C}$  kaltes Objekt.

Aus Strahlungstransportrechnungen folgt, dass die Oberflächentemperatur eines Planeten eine Funktion der optischen Dicke, d. h. der Absorptionseigenschaften seiner Atmosphäre ist. Je größer die Absorption (z. B. durch erhöhte Konzentration von Treibhausgasen) desto höher die Oberflächentemperatur. Die globale Strahlungstemperatur am Außenrand der Atmosphäre bleibt natürlich konstant solange die planetare Albedo konstant bleibt.

In erster Näherung lässt sich der globale Treibhauseffekt mathematisch folgendermaßen beschreiben: Wir betrachten die Atmosphäre als eine Schicht, die vollkommen durchlässig für die kurzwellige solare Einstrahlung ist, die aber einen Teil der terrestrischen Wärmestrahlung absorbiert. Unter der Voraussetzung, dass die Wärmeabstrahlung der Erde proportional zur Wärmeabstrahlung an der Erdoberfläche ist, folgt für die globale Energiebilanz

$$\pi r^2 (1 - \alpha) S = 4 \pi r^2 \beta \sigma T_0^4 \quad (3)$$

bzw.

$$T_0 = \sqrt[4]{S(1 - \alpha) / (4\beta\sigma)} \quad (4)$$

<sup>1</sup> Obwohl der Vergleich der Atmosphäre mit einem „Treibhaus“ nicht ganz zutreffend ist, wollen wir den Ausdruck „Treibhauseffekt“ trotzdem verwenden, da er das Ergebnis sehr anschaulich beschreibt.

wobei  $T_0$  die Temperatur der Oberfläche und  $\beta$  eine Zahl zwischen 0 und 1 ist. Der Faktor  $\gamma = 1 - \beta$  charakterisiert die Strahlungseigenschaften der Atmosphäre, d. h. insbesondere den Treibhauseffekt. Setzt man die Oberflächentemperatur der Erde  $T_0 = 287 \text{ K}$  ( $+14 \text{ °C}$ ) ein, dann erhält man für den Treibhausfaktor  $\gamma = 0,39$  ( $\beta = 0,61$ ), d. h. die Wärmeabstrahlung der Erde am Außenrand der Atmosphäre beträgt nur 61 % der von der Erdoberfläche ausgesandten Wärmestrahlung. Setzt man für den Fall der Venus die gemessene Oberflächentemperatur ( $760 \text{ K}$ ) ein, dann ergibt sich ein Treibhausfaktor von  $\gamma = 0,992$ , bzw.  $\beta = 0,008$ . Die Venusatmosphäre besteht zu etwa 90 % aus  $\text{CO}_2$ .

Die Lufthülle schafft also durch ihre Strahlungseigenschaften optimale Lebensbedingungen auf der Erdoberfläche. Nur durch den natürlichen Treibhauseffekt ist Leben auf unserem Planeten möglich. Durch diese Strahlungseigenschaften bestimmt die Atmosphäre die Energiebilanz auf der Erde und spielt daher im Klimageschehen eine bedeutende Rolle.

### 3 Waterworld

Kevin Costner als Mariner im Film Waterworld hatte sicherlich andere Prioritäten als sich Gedanken über die Energiebilanz seines Planeten zu machen. Nehmen wir an, dass die Erde vollständig mit Wasser bedeckt, sie also ein einziger Ozean wäre, dann hätte ihre Albedo den Wert  $\alpha_w = 0,1$ . Nehmen wir weiter an, dass der Treibhausfaktor gleich dem der wirklichen Erde ist ( $\gamma = 0,39$ ), dann ergibt sich aus Gl. (4) eine Oberflächentemperatur von:

$$T_w = 307 \text{ K} (34 \text{ °C})$$

Waterworld ist also aufgrund der geringen Albedo um 20 K wärmer als die Erde.

### 4 Der Wüstenplanet

Frank Herberts wolkenloser Wüstenplanet Dune hat wohl eine mittlere Albedo von  $\alpha_d = 0,3$  (dies ist der Wert für eine Sandwüste). Unter der Annahme, dass die Solarkonstante gleich der der Erde ist und der Treibhausfaktor wegen des deutlich geringeren Wasserdampfgehaltes und der fehlenden Wolken in der Dune-Atmosphäre nur etwa ein Drittel des Erd-Treibhausfaktors, d. h.  $\gamma = 0,13$ , beträgt, ergibt sich eine Oberflächentemperatur von:

$$T_d = 264 \text{ K} (-9 \text{ °C})$$

Eine wüstenähnliche Erde wäre also deutlich kühler.

### 5 Der Eisplanet

Es wird spekuliert, dass die Erde in ihrer Entwicklung einmal vollständig von Eis bedeckt gewesen sein könnte. In diesem Falle hätte sie eine Albedo von etwa  $\alpha_{ep} = 0,8$  gehabt. Mit dem heutigen Treibhausfaktor ergibt sich dafür aus Gl. (4) eine mittlere Temperatur von

$$T_{ep} = 211 \text{ K} (-62 \text{ °C})$$

Hier wird deutlich, welcher starken Effekt die Albedo auf die globale Energiebilanz hat. Es wird spekuliert, dass verstärkter Vulkanismus den  $\text{CO}_2$ -Gehalt der Atmosphäre soweit erhöhte, dass der damit verbundene größere Treibhauseffekt die Erde schließlich wieder aus den Gefrierschrankverhältnissen befreit hätte. Benutzt man Gl. (4), dann ist ein Treibhausfaktor von  $\gamma = 0,785$  notwendig, um bei einer Albedo von  $\alpha_{ep} = 0,8$  eine positive globale Oberflächentemperatur zu

erhalten, das bedeutet mehr als eine Verdoppelung des Treibhausfaktors. Berücksichtigt man allerdings, dass Vulkanstaub Eis und Schnee verschmutzt und damit die Albedo herabsetzt (M. Claußen, pers. Mitteilung), dann reicht bei einer Albedo von  $\alpha_{ev} = 0,55$  für schmutziges Eis schon ein Treibhausfaktor von  $\gamma = 0,51$  aus, um Schmelzbedingungen an der Oberfläche zu erzeugen.

### 6 Wolken auf Waterworld und dem Eisplaneten

Wolken beeinflussen die planetare Albedo ganz entscheidend. Sie selbst haben eine Albedo von 0,5 und mehr. Nehmen wir nun an, dass Waterworld und der Eisplanet zur Hälfte mit Wolken bedeckt seien, und diese Wolken hätten eine Albedo von  $\alpha_c = 0,5$ . Dann folgt für die planetare (global gemittelte) Albedo  $\alpha_p$

$$\alpha_p = (1 - n)\alpha_0 + n\alpha_c \quad (5)$$

wobei  $n$  den Wolkenbedeckungsgrad,  $\alpha_0$  die Albedo der Oberfläche und  $\alpha_c$  die Albedo der Wolken darstellen. Für Waterworld ( $\alpha_0 = 0,1$ ) und den Eisplaneten ( $\alpha_0 = 0,8$ ) folgt dann  $\alpha_{w,p} = 0,3$  und  $\alpha_{ep,p} = 0,65$ , und damit

$$T_{w,c} = 288 \text{ K} (15 \text{ °C}) \text{ und } T_{ep,c} = 243 \text{ K} (-30 \text{ °C})$$

Durch den Einfluss der Albedo kühlen Wolken Waterworld und wärmen den Eisplaneten also recht deutlich. Nicht berücksichtigt ist hier der Einfluss von Wolken auf die Strahlung im Infrarotbereich.

### 7 Jupiter, die verhinderte Sonne

Die Solarkonstante für Jupiter beträgt  $S_j = 50,6 \text{ Wm}^{-2}$ . Mit seiner Albedo von  $\alpha_j = 0,73$  folgt aus Gl. (2) eine Strahlungstemperatur von

$$T_j = 88 \text{ K} (-185 \text{ °C})$$

Vor einigen Jahren hat die Raumsonde PIONEER die effektive Strahlungstemperatur von Jupiter bestimmt. Die Messungen ergaben einen Wert von  $T_{j,eff} = 125 \text{ K}$ , der also deutlich über der Strahlungstemperatur liegt. Die Lösung dieses Widerspruchs ergibt sich aus der Tatsache, dass Jupiter offensichtlich eine interne Energiequelle besitzt. Er ist vielleicht eine nicht richtig gezündete Sonne. Grund dafür wäre wohl seine etwas zu geringe Masse. Andererseits könnte er Energie aus einer gravitativen Schrumpfung gewinnen.

Die Größe dieser internen Energiequelle lässt sich folgendermaßen bestimmen. Die gesamte Energieabgabe von Jupiter durch Wärmeabstrahlung in den Weltraum ( $\sigma T_{j,eff}^4$ ) setzt sich zusammen aus der internen Energie  $F_i$  und der absorbierten Sonnenenergie,  $S_j(1 - \alpha_j)/4$ .

$$\sigma T_{j,eff}^4 = \sigma T_j^4 + F_i = \frac{S_j}{4}(1 - \alpha_j) + F_i \quad (6)$$

Daraus folgt

$$F_i = \sigma T_{j,eff}^4 - \frac{S_j}{4}(1 - \alpha_j) = 13,8 \text{ Wm}^{-2} - 3,4 \text{ Wm}^{-2} = 10,4 \text{ Wm}^{-2}. \quad (7)$$

Die interne Energiequelle des Jupiters ist also dreimal so groß wie die von ihm absorbierte solare Strahlungsenergie.

### Anschrift des Autors:

Prof. Dr. Peter Lemke  
 Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung  
 Postfach 12 01 61  
 27515 Bremerhaven  
 E-Mail: plemke@awi-bremerhaven.de