

plex Klimawandel empfehle ich die verschiedenen Essays von Dr. Alexander Koewius ([22]). Der Autor stellt hierin auch die von ihm hieraus (nachvollziehbar !) abgeleiteten Schlussfolgerungen eingehend und unmissverständlich dar.

8.7.1 Strahlungsbilanz der Planeten / Treibhauseffekt (-)

Wie schon des öfteren in diesem Buch beginne ich auch diesen Abschnitt mit einer Frage, die zunächst trivial klingt, bei weiterem Nachdenken aber ihrer Trivialität vollständig beraubt wird. Die Frage lautet:

. Warum ist es auf den Gipfeln der Gebirge kälter als in den Tälern?

In der Tat beobachtet man generell im unteren Bereich der Erdatmosphäre einen von den jeweiligen lokalen und jahreszeitlichen klimatischen Bedingungen weitgehend unabhängigen vertikalen Temperaturgradienten von etwa

$$\frac{\delta T}{\delta z} \approx 6,5 \cdot \frac{K}{km} \quad z : \text{Höhenkoordinate} \quad (8.485)$$

(s. z.B. [23]). Wie wir im Abschnitt 8.2.5 gelernt haben, ist dies nur möglich, wenn in der gesamten Erdatmosphäre ein **vertikaler Wärmestrom** vorhanden ist, der ebenfalls annähernd stationär ist und auch überall etwa denselben Wert annimmt! Die physikalische Deutung für das Auftreten dieses Wärmestroms ist der Kern des in diesem Kapitel diskutierten Sachverhaltes.

Als Einstimmung auf diese Problematik möchte ich herausstellen:

- Die **einzige Energiequelle**, die in relevantem Umfang zum **globalen** Energiehaushalt der Erde beiträgt, ist die auf die Erdoberfläche auftreffende Sonnenstrahlung.
- Der **einzige Energie abgebende** Prozess, der in relevantem Umfang zum **globalen** Energiehaushalt der Erde beiträgt, ist die thermisch bedingte elektromagnetische Abstrahlung von der Erde in das Weltall.

Durch eine einigermaßen korrekte Erfassung der aus diesen beiden Prozessen resultierenden Wärmebilanz der Erde erhält man einen ersten Richtwert für die Oberflächentemperatur der Erde und kann so hoffen, orientierende Antworten auf eine Fülle von Fragen zu erhalten, z.B.

- Sind als primäre Ursache der Eiszeiten die Veränderungen der solaren Einstrahlung ausreichend, die aus den zyklischen zeitlichen Änderungen (Milanković-Zyklen, s. Absatz *Die Milanković-Zyklen* auf S. 1009) der Erdbahn resultieren ?
- Können die mit den sog. *Sonnenflecken* verknüpften Schwankungen der solaren Strahlungsleistung die mittlere Oberflächentemperatur der Erde signifikant beeinflussen ?

- Reichen die unterschiedlichen Entfernungen der Planeten Venus, Erde und Mars von der Sonne bereits aus, um deren stark unterschiedliche Oberflächentemperaturen zu erklären?

Diese Frage der Wärmebilanz der Erde hat schon sehr früh die Wissenschaft beschäftigt, insbesondere bei dem Versuch, die bereits belegten im Verlauf der Erdgeschichte häufig aufgetretenen massiven Klimawechsel zu verstehen. In einer Arbeit von Tyndal aus dem Jahr 1896 findet man sogar bereits eine Verknüpfung der Frage des Erdklimas mit dem CO_2 -Gehalt der Atmosphäre, erste konkrete Berechnungen zu dieser Frage führte Arrhenius 1903 aus ([24]). Als Folge dieser Überlegungen war man jedoch nicht etwa beunruhigt, dass der anthropogene Einfluss auf das globale Klima vielleicht zu einem Problem führen könne. Man schöpfte hieraus vielmehr die Hoffnung, dass der Menschheit auf diese Weise etwas mehr Zeit bis zum Einsetzen der nächsten Eiszeit bliebe.

Sobald wir nun die generelle Auswirkung der Atmosphäre auf die Temperatur der Erdoberfläche in die Diskussion mit einbeziehen, erweitert sich der obige Fragenkatalog etwa wie folgt:

- In welchem Ausmaß kann die Zusammensetzung der Atmosphäre die mittlere Oberflächentemperatur der Erde maximal beeinflussen ?
- Hat die vom Menschen verursachte Veränderung der Struktur der Erdoberfläche (Waldrodung, Ackerbau, Bewässerung etc.) einen relevanten Einfluss auf das globale Klima ?

Diese Gesamt-Thematik ist durch die etwa 1990 massiv einsetzende Diskussion um den sog. *Treibhauseffekt* unserer Atmosphäre in das Interesse einer breiteren Öffentlichkeit gelangt. Bei dieser Diskussion geht es primär um den *anthropogenen Treibhauseffekt*, also um die Frage, inwieweit sich durch den anthropogenen, also den vom Menschen und seiner Technik verursachten Eintrag von Kohlendioxid und anderen sog. *Treibhausgasen* in die Atmosphäre das globale Klima der Erde bereits signifikant und für den Menschen gefährlich verändert hat bzw. in naher Zukunft ändern wird.

Die Relevanz dieser Befürchtungen wird bis heute kontrovers diskutiert. Ich werde in diesem Abschnitt zeigen, welche weit reichenden Aussagen bereits mit dem Instrumentarium gefolgert werden können, das uns allein auf Basis des in diesem Buch vermittelten Wissens schon zur Verfügung steht.

Die Strahlungsbilanz eines Planeten (-)

Im Abschnitt 8.5 haben wir die Definition des Emissions- bzw. Absorptionsvermögens ε eines Körpers kennen gelernt. Bei der Behandlung des Wärmehaushaltes von Himmelskörpern verwendet man in der Literatur überwiegend die zu dieser Kennzahl

komplementäre Größe, nämlich das Reflexionsvermögen $\alpha = (1 - \varepsilon)$, das in diesem Zusammenhang die Bezeichnung *Albedo* (lat. *weiße Farbe*) erhalten hat. Ich werde jedoch auch an dieser Stelle nur die Größe ε benutzen. Zum Verständnis der nun folgenden Berechnung halte ich einen weiteren Hinweis für angebracht: Die nach Kirchhoff benannte Gl. 8.451 besagt, dass grundsätzlich das Emissions- und das Absorptionsvermögen einer Material-Oberfläche identisch sind. Dies gilt jedoch nur für monochromatische Strahlung! Betrachtet man dagegen Strahlungen, die über einen gewissen Frequenzbereich verteilt sind, und ist diese Verteilung für die betrachtete absorbierte bzw. emittierte Strahlung unterschiedlich, so werden die entsprechend gemittelten Werte für das Emissions- und das Absorptionsvermögen i.a. verschieden sein, ggfls. auch signifikant verschieden,

$$\langle \varepsilon_a \rangle \neq \langle \varepsilon_e \rangle \quad (8.486)$$

Diese Tatsache ist eine Voraussetzung für den im Absatz S. 947 behandelten sog. *Treibhauseffekt*.

Wir führen als erstes eine Abschätzung des Wärmehaushaltes von Planeten durch, also z.B. auch der Erde. Die hierfür aktuell relevanten Energieströme sind ausschließlich Strahlungsströme. Andere Energiequellen, die Gravitationsenergie und die durch Kernspaltungsprozesse frei werdende Energie, haben bei der Entstehung der Planeten eine dominierende Rolle gespielt bzw. sind der Grund dafür, dass der Kern der Erde immer noch auf Temperaturen der Größenordnung $6000 \cdot K$ aufgeheizt ist (s. auch Aufgabe 19 sowie Abschnitt 10.2.9). Dennoch ist der daraus resultierende Wärmestrom an die Oberfläche der Erde um den Faktor 10^2 bis 10^3 niedriger ist als die nachfolgend diskutierten Ströme und damit an dieser Stelle irrelevant. Auch als Energiesenke verbleibt im Langzeitmittel ausschließlich die Abgabe thermischer Strahlungsenergie in das Weltall. So beträgt z.B. auf der Erde der durch biochemische Prozesse in Form von Biomasse eingespeicherte Energiestrom lediglich etwa $0,6 \cdot \%$ des insgesamt auf die Erde auftreffenden Strahlungsstroms. (Dieser Zahlenwert lässt sich leicht aus den bekannten, aus Messdaten geschlossenen Daten für die *C*-Ströme des globalen CO_2 -Kreislaufs (s. Absatz *Der globale CO_2 -Kreislauf* auf S. 1001) abschätzen. Zur weiteren Orientierung s. auch Aufgabe 2 und deren Lösungstext im Kapitel 15.2)

Allen Planeten wird durch die Sonne ständig Strahlungsenergie zugeführt gemäß der Beziehung

$$J_a = \varepsilon_a \cdot J_S \cdot \frac{A_P}{\langle \Delta r \rangle^2 \cdot 4\pi} = \varepsilon_a \cdot J_S \cdot \frac{D^2}{16 \cdot \langle \Delta r \rangle^2} \quad (8.487)$$

J_S : Gesamtstrahlungsstrom der Sonne

A_P : Projektionsfläche des Planeten

D : Planeten-Durchmesser

$\langle \Delta r \rangle$: mittlerer Abstand Sonne - Planet

ε_a : Absorptionskoeffizient des Planeten

Diese Gl. folgt unmittelbar aus den geometrischen Gesetzen der Strahlungsausbreitung (s. auch Abschnitt 11.8.1 und Gl. 11.156). Die Projektionsfläche A_P ist die Fläche des Schattens, den der Planet auf eine unmittelbar hinter ihm auf der sonnenabgewandten Seite positionierte und senkrecht zur Verbindungslinie Sonne-Planet orientierte Ebene wirft. Der aktuell gültige Zahlenwert von J_S ist sehr genau bekannt, s. Kapitel 8.11. Andererseits verliert der Planet Energie durch Strahlungsemission (Gl. 8.472),

$$J_e = \varepsilon_e \cdot \sigma \cdot \pi \cdot D^2 \cdot \langle T^4 \rangle \quad (8.488)$$

ε_e : Emissionskoeffizient des Planeten

σ : Stefan-Boltzmann-Konstante

$$\langle T \rangle = (\langle T^4 \rangle)^{\frac{1}{4}} : \text{mittlere Oberflächentemperatur d. Planeten} \quad (8.489)$$

Die über die Gl.-en 8.488 und 8.489 definierte mittlere Oberflächentemperatur $\langle T \rangle$ des Planeten erhält man, wenn man den von diesem Planeten insgesamt emittierten Strahlungsstrom misst, diesen Wert über eine ausreichend lange Zeit mittelt und in die Gl. 8.488 einsetzt. Diese Begriffsbildung macht primär dann einen Sinn, wenn sich die Oberflächentemperatur auf dem Planeten durch geeignete Prozesse in ausreichendem Umfang und ausreichend schnell ausgleicht, so dass keine zu extrem großen Temperaturunterschiede auftreten. Im stationären Zustand gilt dann

$$\begin{aligned} J_a &= J_e \Rightarrow \\ \langle T^4 \rangle &= \frac{\varepsilon_a}{\varepsilon_e} \cdot \frac{J_S}{\sigma \cdot 16 \cdot \pi \cdot \langle \Delta r \rangle^2} \end{aligned} \quad (8.490)$$

Die rechte Seite der Gl. 8.490 besteht offenbar aus dem Faktor $\left(\frac{\varepsilon_a}{\varepsilon_e}\right)$, der durch die Beschaffenheit des Planeten vorgegeben ist, und einem weiteren Faktor von der Dimension $Temperatur^4$, der von der Oberflächenbeschaffenheit des Planeten unabhängig ist. Die 4. Wurzel dieses Faktors möchte ich als die *astronomische Referenztemperatur* T_{ref} des Planeten bezeichnen,

$$T_{ref}^4 = \frac{J_S}{\sigma \cdot 16 \cdot \pi \cdot \langle \Delta r \rangle^2} \quad (8.491)$$

T_{ref} ergibt sich aus ausschließlich astronomischen Werten, nämlich dem Strahlungsstrom der Sonne und dem (als konstant angenommenen) mittleren Abstand des Planeten von seiner Sonne. Für das Verhältnis von Emissions- und Absorptionskoeffizient gilt i.a.

$$\frac{\langle \varepsilon_a \rangle}{\langle \varepsilon_e \rangle} \neq 1 \quad (8.492)$$

Denn die Absorption und die Emission der jeweiligen Strahlung findet in völlig verschiedenen Wellenlängenbereichen statt: Die Schwerpunktswellenlänge (bei einer Gewichtung gem. der Energieverteilung der Strahlung) der solaren Strahlung liegt bei

etwa $750 \cdot nm$, vgl. Abb. 58 des Heftes 11, während der Schwerpunkt der von den Planeten emittierten Strahlung (nicht das reflektierte oder zurückgestreute Sonnenlicht) im Bereich um $15 \cdot \mu m$ liegt, solange sich die Oberflächentemperatur in der Größenordnung von $270 \cdot K$ bewegt, s. Gl.-en 8.468 und 8.469. Die Absorptions- und damit auch die Emissionsbedingungen der meisten Materialien sind aber in diesen beiden Wellenlängenbereichen deutlich unterschiedlich. Außerdem sind an diesen Prozessen, wie wir noch sehen werden, insbesondere bei den sog. *inneren Planeten* mit einem festen Kern die unterschiedlichen Schichten der Atmosphäre und die unterschiedlichen Anteile der festen oder flüssigen Planeten-Oberfläche in deutlich unterschiedlicher Weise beteiligt. Für die Emissionsstrahlung eines jeden Planeten gilt dagegen meistens in guter Näherung

$$\varepsilon_e \approx 0,9 \quad (8.493)$$

Die für die Solarbestrahlung relevante Größe ε_a kann Werte annehmen etwa zwischen 0,1 (z.B. Eis) und 0,93 (z.B. Mondgestein). Einige der für die weitere Diskussion relevanten auf die Erde bezogenen Zahlenwerte findet der Leser im Kapitel 8.11. Wenn wir also für eine orientierende Berechnung der Temperatur $\langle T \rangle$ einiger Planeten eine Spannweite von

$$0,1 \leq \frac{\varepsilon_a}{\varepsilon_e} \leq 1 \quad (8.494)$$

berücksichtigen, erfassen wir in etwa alle in der Realität möglichen Konfigurationen von Oberfläche und Atmosphäre eines Planeten. Zusammen mit dieser Erkenntnis können wir aber allein aus der Gl. 8.490 bereits einige wichtige Schlussfolgerungen ziehen, die weit reichende Konsequenzen haben werden:

- Die Gl. 8.490 ist eine physikalisch eindeutige Definition der soeben eingeführten *mittleren Oberflächentemperatur* $\langle T \rangle$ eines Planeten. Es ist nämlich genau diejenige Temperatur, die ein explanetarer Beobachter berechnet, wenn er den mittleren Energiestrom der Strahlungsemission dieses Planeten misst und dieser Größe über die Gl. 8.488 und unter Verwendung bekannter (oder plausibler) Werte für ε_e und d eine Temperatur zuordnet. $\langle T \rangle$ ist also die *mittlere Temperatur der strahlenden Oberfläche* des Planeten! In dieser Definition ist die Gl. 8.490 **exakt** und nicht etwa nur eine Näherung, deren Anwendbarkeit noch überprüft werden muss. Zur verlässlichen Unterscheidung von anderen Temperaturdefinitionen werde ich diese Größe von nun an immer mit dem Index e (für Emission) versehen.
- Außer von den astronomischen Größen J_S und $\langle \Delta r \rangle$ hängt $\langle T_e \rangle$ nur noch von einem einzigen für den jeweiligen Planeten spezifischen Parameter ab, nämlich dem Verhältnis $\frac{\varepsilon_a}{\varepsilon_e}$. Die Sensibilität von $\langle T_e \rangle$ gegenüber dieser Größe ist vergleichbar mit der gegenüber J_S und $\langle \Delta r \rangle$, d.h. eine Änderung von $\frac{\varepsilon_a}{\varepsilon_e}$ um 10% ändert $\langle T_e \rangle$ genau so stark wie eine 10%-ige Änderung von J_S oder R !

- Konzentrieren wir uns auf einen bestimmten Planeten, z.B. die Erde, so ändern sich $\langle \Delta r \rangle$ und J_S selbst in Bereichen von $10^5 \cdot y$ nur um wenige %. In der aktuellen Diskussion möglicher (astronomisch betrachtet) kurzfristiger Klimaveränderungen können wir die Diskussion daher auf eventuelle Änderungen von $\frac{\varepsilon_a}{\varepsilon_e}$ und deren Ursachen beschränken!
- Da aber $\frac{\varepsilon_a}{\varepsilon_e}$ Werte annehmen kann, die sich um etwa 1 Größenordnung unterscheiden, ist auf diesem Wege eine Veränderung von $\langle T_e \rangle$ etwa um den Faktor $(10)^{\frac{1}{4}} \approx 1,8$ möglich. Das aber entspricht bei der Erde einer extremen Veränderung ihres globalen Klimas (s. nachfolgende Tabelle).

Das Ergebnis einer derartigen Rechnung für die erdähnlichen Planeten ist in der nachfolgenden Tabelle wiedergegeben. Zum Vergleich enthält die Tabelle auch die gemessenen realen Temperaturen der Planetenoberfläche. Beim Merkur sind die tageszeitlichen Schwankungen wegen der sehr langsamen Eigenrotation (1 Merkurtag = 59 Erdentage) sehr hoch. Für die Berechnung der Oberflächentemperatur wurde daher als abstrahlende Fläche nur die Hälfte seiner Oberfläche gewertet und als Vergleichswert hierzu der gemessene mittlere Tageswert genommen.

	$\frac{\varepsilon_a}{\varepsilon_e} = 0,1$	$\langle T_e \rangle / ^\circ C$ $\left(\frac{\varepsilon_a}{\varepsilon_e} \right)_{\text{aktuell}}$	$\frac{\varepsilon_a}{\varepsilon_e} = 1,0$	$T_O / ^\circ C$
Merkur	+25	+261	+257	+273
Venus	-88	-5	+55	+480
Erde	-116	-18	+6	+15
Mars	-146	-57	-47	-53

Mittlere Strahlungstemperatur $\langle T_e \rangle$ u. Oberflächentemperatur T_O einiger Planeten

Diese Tabelle führt uns zum einen deutlich vor Augen, dass die Oberflächentemperatur eines Planeten alleine durch dessen Abstand von der Sonne in der Tat noch keinesfalls weitgehend festliegt. Vielmehr kann die strahlungsrelevante Beschaffenheit der jeweiligen Planetenoberfläche, hier ausgedrückt durch die Kennzahl $\frac{\varepsilon_a}{\varepsilon_e}$, ihrerseits Temperaturunterschiede von mehr als $100 \cdot ^\circ C$ bewirken.

Aus der Tabelle geht aber auch hervor, dass zumindest bei den Planeten Venus und Erde die mittlere Strahlungstemperatur $\langle T_e \rangle$ deutlich niedriger ist als die reale Temperatur T_O der Planetenoberfläche. Diese Aussage bleibt offensichtlich erhalten, solange man einen noch einigermaßen realistischen Wert für die Größe $\frac{\varepsilon_a}{\varepsilon_e}$ ansetzt. Wie man sich leicht klarmacht, kann die Erklärung hierfür keinesfalls in den bisher nicht korrekt berücksichtigten tageszeitlichen Unterschieden in der Abstrahlung der Erde gesucht werden. Diese führen nämlich zu einem in die entgegen gesetzte Richtung weisenden Effekt: Wegen der T^4 -Abhängigkeit des Strahlungsstroms ist der reale

mittlere Abstrahlungsstrom immer höher als der aus der linear gemittelten Temperatur errechnete Strahlungsstrom. Durch diese vereinfachte Abschätzung erhalten wir also immer eine zu hohe mittlere Strahlungstemperatur $\langle T_e \rangle$ und nicht etwa eine zu niedrige.

Als Faktum bleibt also bestehen, dass die reale Oberflächentemperatur der Planeten Venus und Erde deutlich höher ist als die aus der Strahlungsbilanz errechnete Temperatur $\langle T_e \rangle$. Den hierfür verantwortlichen Effekt werden wir im nachfolgenden Absatz herausfinden.

Der Treibhauseffekt (-)

Wir suchen also nun nach dem Mechanismus, durch den die Erdoberfläche im Jahresdurchschnitt etwa um den Wert

$$\langle T_0 \rangle - \langle T_e \rangle = \Delta T = (+15^\circ\text{C}) - (-18^\circ\text{C}) = 33^\circ\text{C} \quad (8.495)$$

(s. obige Tabelle) wärmer ist als man auf Grund der Strahlungsbilanz erwarten würde. Den entscheidenden Hinweis auf die Ursache für diese Diskrepanz erhalten wir aus der Erkenntnis, dass im Gegensatz zum Mars, bei dem dieser Unterschied sehr gering ist, die übrigen 3 genannten Planeten alle eine Atmosphäre besitzen. Der Energieeintrag, d.h. die Absorption der einfallenden Sonnenstrahlung, findet bei allen Planeten vorwiegend auf oder zumindest nahe der Planetenoberfläche statt. Sobald jedoch der Planet eine Atmosphäre besitzt, erfolgt die (dem Betrag nach identische) Emission als IR-Strahlung in das Weltall erst aus dem Bereich der Atmosphäre, oberhalb der keine relevante Strahlungs-Reabsorption mehr auftritt. Dieser Bereich befindet sich je nach der Zusammensetzung und Dichte der Atmosphäre mehr oder weniger weit oberhalb der Planetenoberfläche. Da wir uns noch sehr oft auf diese für die IR-Abstrahlung relevante Zone der Planeten-Atmosphäre beziehen werden, möchte ich diese abgekürzt als die *Abstrahlungsschicht* der Atmosphäre bezeichnen. Der für die stationäre Emission der IR-Strahlung erforderliche Wärmestrom muss also erst in diese Höhe transportiert werden. Für diesen Vorgang gelten die im Abschnitt 8.2.5 behandelten Gesetze des Wärmetransports, insbesondere führt dieser Transportvorgang zu einer endlichen Temperaturdifferenz zwischen diesen beiden Höhenniveaus der Atmosphäre. Die Planetenoberfläche ist also **immer wärmer** als die Abstrahlungsschicht, wärmer also als der aus der Strahlungsbilanz errechnete Wert $\langle T_e \rangle$. Dieser Mechanismus hat den Namen *Treibhauseffekt* erhalten, weil in dem Treibhaus einer Gärtnerei ein analoger Effekt zum Tragen kommt: Die Glasscheiben eines Treibhauses lassen ebenso wie die Luftschichten der Atmosphäre das Sonnenlicht passieren, absorbieren aber die von den Objekten im Inneren des Treibhauses emittierte IR-Strahlung, so dass letztlich für den emittierten Strahlungsstrom des Treibhauses nicht die Temperatur des Erdreichs am Boden des Treibhauses entscheidend ist, sondern die **Außen**temperatur seiner Glaswände. Im Fall der Erdatmosphäre ist es nicht leicht, ein ähnlich einfach strukturiertes Modellsystem anzugeben, das die Realität mit

akzeptabler Genauigkeit wiedergibt, so dass auf diese Weise der genaue Zahlenwert dieser Differenz $\Delta T_{Tr} = T_O - \langle T_e \rangle$ berechnet werden könnte. Mit Hilfe eines derartigen Modellsystems müssten dann auch Richtwerte berechnet werden können z.B. für die Änderung dieses Treibhauseffektes ΔT_{Tr} mit der Zusammensetzung der Atmosphäre, d.h. insbesondere mit der Konzentration an sog. *Treibhausgasen*. Diese sind Gase, die in einem Wellenlängenbereich in der Nähe des Maximums der IR-Emission des Planeten besonders stark absorbieren. Ein Blick auf die Zahlenwerte in der obigen Tabelle zeigt uns aber bereits, dass dieser Treibhauseffekt $T_O - \langle T_e \rangle$ durchaus mehrere $100 \cdot K$ betragen kann. Je höher daher in der Atmosphäre die Konzentration an Treibhausgasen ist, um so mehr verschiebt sich der für die Abstrahlung in das Weltall relevante Bereich in größere Höhen, und um so höher wird demzufolge auch die Temperaturdifferenz ΔT_{Tr} . Wir wollen diesen Prozess formal als Wärmeleitungsprozess beschreiben (s. Abschnitt 8.2.5)

$$j_E = -\frac{de}{dt} = k_{At} \cdot A \cdot (T_2 - T_1) \quad (8.496)$$

Die Größe k_{At} ist der mittlere Wärmedurchgangskoeffizient der Atmosphäre, gemittelt über die Gesamtheit der hierbei wirksamen Prozesse, A ist die Oberfläche des Planeten. Der Wärmestrom j_E ist mit dem gem. Gl. 8.488 vom Planeten emittierten Strahlungsstrom identisch. Es gilt daher

$$k_{At} = \varepsilon_e \cdot \sigma \cdot \frac{\langle T_e \rangle^4}{(T_2 - T_1)} \quad (8.497)$$

Im aktuellen Zustand der Erde gilt

$$\begin{aligned} \langle T_e \rangle &= -18^\circ C = 291 \cdot K ; (T_2 - T_1) = 33 \cdot K \Rightarrow \\ k_{At} &= 11 \cdot \frac{W}{m^2 \cdot K} \end{aligned} \quad (8.498)$$

Im Vergleich zu den in heutigen Gebäuden realisierten Wärmedämmungen entspricht dieser Zahlenwert einer sehr geringen Dämmung, formal z.B. der Dämmung einer Vollziegelwand von nur $2 \cdot cm$ Dicke! Wegen des sehr hohen Wärmestroms ist die Auswirkung auf unser Klima dennoch enorm. Dieser über einen phänomenologischen Ansatz berechnete und in der Gl. 8.498 angegebene Zahlenwert für den Treibhauseffekt macht uns bereits auf anschauliche Weise deutlich, wie empfindlich dieses System *Erdatmosphäre* gegenüber marginalen Veränderungen seiner Wärmeleitungseigenschaften ist.

Als Richtwert für den Temperaturgradienten innerhalb der untersten Schicht der Erdatmosphäre, der *Troposphäre*, findet man in der Literatur den Wert

$$\frac{\delta T}{\delta z} \approx 6,5 \cdot \frac{K}{km} \quad (8.499)$$

Dieser Wert stellt den Mittelwert dar, der übrig bleibt, wenn man den Einfluss kurzzeitiger wetterbedingter Veränderungen (zusätzliche Aufwinde oder Abwinde etc.) durch Mittelung über eine ausreichend lange Zeit eliminiert. Zusammen mit dem experimentell bekannten Wert für den aktuellen Wert des Treibhauseffektes ($33 \cdot K$) folgt daraus als mittlere Höhe der die IR-Eigenstrahlung emittierenden Schicht der Atmosphäre der Wert

$$z_{eff} \approx \frac{33 \cdot K}{6,5 \cdot \frac{K}{km}} = 5,1 \cdot km \quad (8.500)$$

Der Vollständigkeit halber sei angemerkt, dass die Erdatmosphäre die Temperatur von $-18^\circ C$ in größeren Höhen noch mehrmals annimmt, erstmals wieder in ca. $35 \cdot km$ Höhe. Dort ist jedoch die Gaskonzentration bereits zu gering, als dass diese Schicht als in relevantem Umfang IR-Strahlung emittierend in Frage käme. Auf die Einzelheiten der strahlungsphysikalischen Gegebenheiten der Erdatmosphäre und deren Auswirkungen auf den Treibhauseffekt werde ich in den Absätzen *Die Struktur der Erd-Atmosphäre* (S. 965) und *Der Zusammenhang zwischen Gaskonzentration und Treibhauseffekt* (S. 1001) genauer eingehen.

Eine weitere wichtige Schlussfolgerung aus den in diesem Abschnitt dargelegten Zusammenhängen ist aber auch, dass der als Treibhauseffekt bekannt gewordene Mechanismus die **primäre** Triebkraft für die vertikalen Wärmeströme in der Atmosphäre ist und - wie wir im nachfolgenden Abschnitt genauer diskutieren werden - damit auch für vertikale **Luftströmungen**. Damit aber bestimmt der Treibhauseffekt maßgeblich das globale Wettergeschehen und zwar ganz direkt und nicht etwa erst auf Umwegen z.B. über die geänderte mittlere Oberflächentemperatur der Erde.

Abschließend und zur Verdeutlichung (und weil immer wieder auch von angeblich kompetenter Seite das Gegenteil behauptet wird) betone ich noch einmal: Das als *Treibhauseffekt* bekannt gewordene Faktum des signifikanten Unterschiedes zwischen der Temperatur der Erdoberfläche und der Temperatur der für die Wärmeabstrahlung in das Weltall relevanten Zone unserer Atmosphäre ist **kein** ausschließlich optisches Phänomen der Absorption der infraroten Eigenstrahlung der Erdoberfläche. Vielmehr sind in ihm die Gesamtheit der thermodynamischen Prozesse zusammengefasst, die den Wärmetransport bewirken von der Erdoberfläche bis zu der Zone der Atmosphäre, die für die Wärmeabstrahlung in das Weltall verantwortlich ist. Eine unmittelbare Folgerung dieser Aussage ist u.a., dass dieser Mechanismus keinesfalls bereits ein Sättigungsverhalten zeigt, sobald nur die Atmosphäre als ganzes für die relevante IR-Strahlung undurchlässig geworden ist. Vielmehr nimmt der Wärmewiderstand $(k_{At})^{-1}$ auch über diesen Wert hinaus mit der Konzentration an Treibhausgasen ständig zu und ebenso der Abstand dieser Abstrahlungsschicht von der Planetenoberfläche. Entsprechend steigt auch die Temperaturdifferenz zwischen der Planetenoberfläche und dieser für die IR-Abstrahlung relevanten Schicht.

Erste Schlussfolgerungen (-)

Die in diesem Abschnitt gewonnenen Erkenntnisse haben uns unserem Ziel, die Gesetzmäßigkeiten des globalen Klimageschehens und seiner zeitlichen Entwicklung zumindest im Grundsatz zu verstehen, ein gutes Stück voran gebracht, auch wenn wir noch nicht in der Lage sind, die am Anfang dieses Abschnitts 8.7.1 gestellten Fragen vollständig zu beantworten. Insbesondere haben wir die Schlüsselrolle der Planeten-Atmosphäre und ihrer chemischen Zusammensetzung für die sich an der Planetenoberfläche einstellende Temperatur erkannt. Daher steht für uns bereits jetzt außer Frage, dass

- jede signifikante Veränderung der chemischen Zusammensetzung der Atmosphäre eines Planeten, insbesondere des Gehalts an IR-Strahlung absorbierenden Gasen einen signifikanten Einfluss auf dessen Oberflächentemperatur hat; aber auch dass
- jede signifikante Veränderung der Oberflächenbeschaffenheit des Planeten insbesondere das Abschmelzen vereister Flächen die Oberflächentemperatur signifikant beeinflusst.

Damit ist uns bereits jetzt klar geworden, dass jeder Versuch, die Relevanz der mit Beginn des technischen Zeitalters ständig anwachsenden anthropogenen Einflüsse auf das globale Klima anzuzweifeln, wissenschaftlich unhaltbar ist. Auf die Frage, warum die Äußerungen vieler Klimaforscher wesentlich vorsichtiger und relativierender klingen oder zumindest von einem Großteil der sog. öffentlichen Meinung so interpretiert werden, werde ich noch mehrfach zurück kommen.

8.7.2 Ein einfaches Modell des globalen Klimas (-)

Als Einstieg in diesen Abschnitt präzisiere ich die von mir gewählte unterschiedliche Verwendung der Begriffe *Klima* und *Wetter*:

Als *Wetter* bezeichne ich die Beschreibung der aktuellen konkreten Situation auf der Erde: Die Beschreibung der Gebiete mit bzw. ohne Niederschlag, die Dauer und Intensität der direkten Sonneneinstrahlung auf den Erdboden, die damit verbundene Temperaturverteilung am Boden, die auftretenden (bodennahen) Winde etc. . Ebenso gehört die kurz- oder mittelfristige Entwicklung dieser Wettersituation zur Beschreibung des *Wetters*.

Sobald ich mich dagegen von der Einschränkung auf einen eingegengten zeitlichen und/oder räumlichen Bereich der Betrachtung befreie und mich für die **generellen** Gesetzmäßigkeiten derselben Effekte (Sonneneinstrahlung, Niederschlag, Temperatur, Luftströmung etc.) und ihrer typischen jahreszeitlichen Oszillationen interessiere, werde ich immer von dem *Klima* der Erde oder zumindest einer größeren Region der Erde während einer nicht zu engen Zeitperiode sprechen.

Dieser Terminologie folgend behandle ich in diesem Abschnitt also ausschließlich die Fragestellung des *Klimas* auf der Erde. Um die grundsätzlichen Mechanismen

des globalen Klimas herauszuarbeiten, werde ich schrittweise ein Modell dieses Systems entwickeln, das genügend einfach strukturiert ist, um noch alle grundsätzlichen Zusammenhänge erkennen zu können, das aber dennoch bereits die real auftretende Temperaturverteilung auf der Erde und deren jahreszeitliche Entwicklung mit akzeptabler Genauigkeit wiedergibt. Dieses Modell wird uns dann auch in die Lage versetzen, die Empfindlichkeit dieses Systems gegenüber Veränderungen z.B. der Sonneneinstrahlung oder der Zusammensetzung der Atmosphäre zu erkennen und zu quantifizieren.

Das lokale Klimamodell ohne Wärmespeicher (-)

Wir beginnen damit, dass wir die Temperaturverteilung auf der Erdoberfläche berechnen, die sich **ohne** jeglichen horizontalen Temperatursausgleich einstellen würde. Wir diskutieren also eine Modellsituation, in der sich die Temperatur lokal über einen gewissen relativ kurzen Zeitraum der Größenordnung Tage/Wochen ausmittelt, und in der jeder **laterale** Wärmestrom unterbunden ist. Ich werde dieses Modellsystem als das *lokale Klimamodell* bezeichnen. Überdies vernachlässigen wir zunächst auch jeden lokalen jahreszeitlichen Temperatursausgleich, also die lokale Speicherung von Wärme im Sommer und die nachfolgende Abgabe dieser Wärme während der Winterzeit.

Wir gehen also bei der Bilanzierung von Energiezufuhr und -abgabe von der im Absatz *Die Strahlungsbilanz eines Planeten / Treibhauseffekt* (S. 942) diskutierten globalen Betrachtung (s. Gl. 8.487) zu einer ausschließlich lokalen Bilanzierung über. Die an einem Ort der geographischen Breite β auf eine Fläche δA einfallende solare Bestrahlungsstrom beträgt über den Tag gemittelt

$$\langle J_a \rangle_d = \varepsilon_a \cdot J_S \cdot \frac{\delta A \cdot \langle \sin \psi \rangle_d}{\langle \Delta r \rangle^2 \cdot 4\pi} \quad (8.501)$$

Die Bedeutung der in dieser Gl. auftretenden Größen entnehmen wir den Absätzen auf S. 942 und auf S. 367. Für die von derselben Fläche δA (gemeint ist von dem zugehörigen Flächenelement δA^* in der für die Abstrahlung in das Weltall relevanten Schicht der Atmosphäre) abgegebene Strahlungsstrom können wir direkt die Gl. 8.488 verwenden,

$$J_e = \varepsilon_e \cdot \sigma \cdot \delta A \cdot \langle T_e^4 \rangle_d \quad (8.502)$$

Im Gleichgewicht dieser beiden Prozesse gilt daher nun

$$\langle T_e^4 \rangle_d = \frac{\varepsilon_a}{\varepsilon_e} \cdot \frac{J_S \cdot \langle \sin \psi \rangle_d}{\sigma \cdot 4 \cdot \pi \cdot \langle \Delta r \rangle^2} = \frac{\varepsilon_a}{\varepsilon_e} \cdot T_{ref}^4 \cdot 4 \cdot \langle \sin \psi \rangle_d \quad (8.503)$$

$$\langle T_e \rangle_d = T_{ref} \cdot \sqrt[4]{2} \cdot \left(\frac{\varepsilon_a}{\varepsilon_e} \cdot \langle \sin \psi \rangle_d \right)^{\frac{1}{4}} \quad (8.504)$$

T_{ref} ist wieder die astronomische Referenztemperatur der Erde von ca. $+6^\circ\text{C}$. Wir vergleichen diesen Wert mit dem Wert für die mittlere Oberflächentemperatur der