

Atmosphärenmodelle

Friedrich Herrmann, Abteilung für Didaktik der Physik, Universität 76128 Karlsruhe

1. Einführung

Man kann die Erdatmosphäre als Wärmedämmschicht der Erde auffassen. Die Erde befindet sich in einem stationären Zustand: Sie bekommt Energie mit dem Licht von der Sonne. Im globalen und zeitlichen Mittel werden davon 236 W/m^2 absorbiert (zum größten Teil von der Erdoberfläche). Für das Sonnenlicht ist die Atmosphäre transparent, für Infrarotlicht aber nur in einem kleinen Spektralbereich, dem *atmosphärischen Fenster*. Das bedeutet, dass das Infrarotlicht erst in einer Höhe von einigen Kilometern emittiert wird. Als typische Höhe des *Emissionsniveaus* kann man etwa 7 km betrachten. In dieser Höhe beginnt die Atmosphäre für das Infrarotlicht durchsichtig zu werden. Im diesem Bereich der Atmosphäre nimmt die Temperatur nach oben hin ab. Die Durchschnittstemperatur in Meereshöhe beträgt im Mittel 15°C , in der Höhe des Emissionsniveaus sind es etwa minus 40°C .

Es geht uns im Folgenden um die Antworten auf drei Fragen:

1. Warum nimmt die Temperatur mit der Höhe ab?
2. Wie funktioniert der Wärmetransport durch dieses untere Stück der Atmosphäre?
3. Wie wird dieser Transport durch *Treibhausgase* behindert?

Die Atmosphäre ist ein kompliziertes System. Um zu verstehen, wie sie funktioniert, muss man Modelle betrachten. Es lohnt sich, verschiedene Modelle zu betrachten. Obwohl einige Modelle sich als nicht brauchbar erweisen werden, sind sie doch nützlich, denn es ist nicht nur wichtig zu verstehen, wie etwas funktioniert, sondern man muss auch wissen wie es nicht funktioniert, und warum es nicht so funktioniert. Wir beginnen also mit schlechten Modellen.

2. Eine feste "Atmosphäre"

Wir vergleichen die Atmosphäre mit einer Wärmedämmschicht aus einem festen Material, Styropor zum Beispiel. Wir heizen nun, wie es auch bei der richtigen Atmosphäre der Fall ist, von unten. Da wir die Wärmeleitfähigkeit und die Dicke der Dämmschicht kennen, können wir die Temperaturdifferenz berechnen, die sich aufbaut, damit der Wärmestrom den Wert erreicht, den er tatsächlich hat, nämlich 236 W/m^2 . Die Rechnung ergibt etwa 40 000 000 Grad. Dieses Ergebnis besagt, dass Styropor ein gutes Dämmmaterial ist, Abb. 2a.

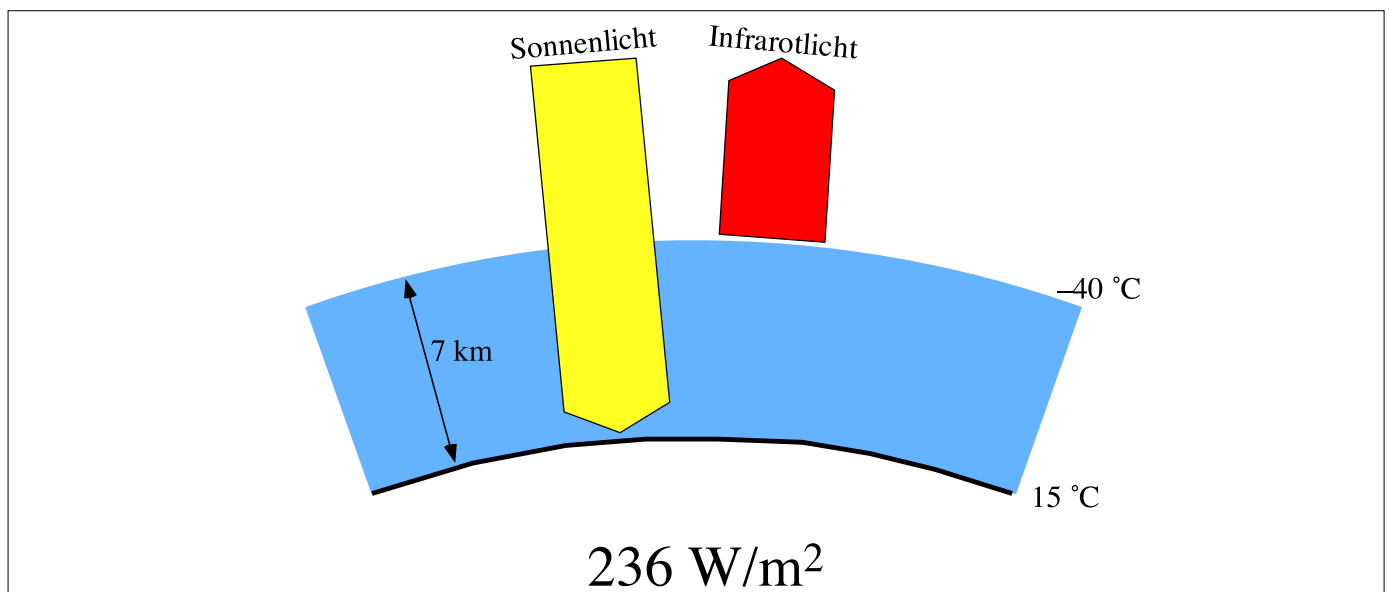


Abb. 1. Wie geschieht der Wärmetransport vom Ort der Absorption des Sonnenlichts zum Ort der Emission des Infrarotlichts?

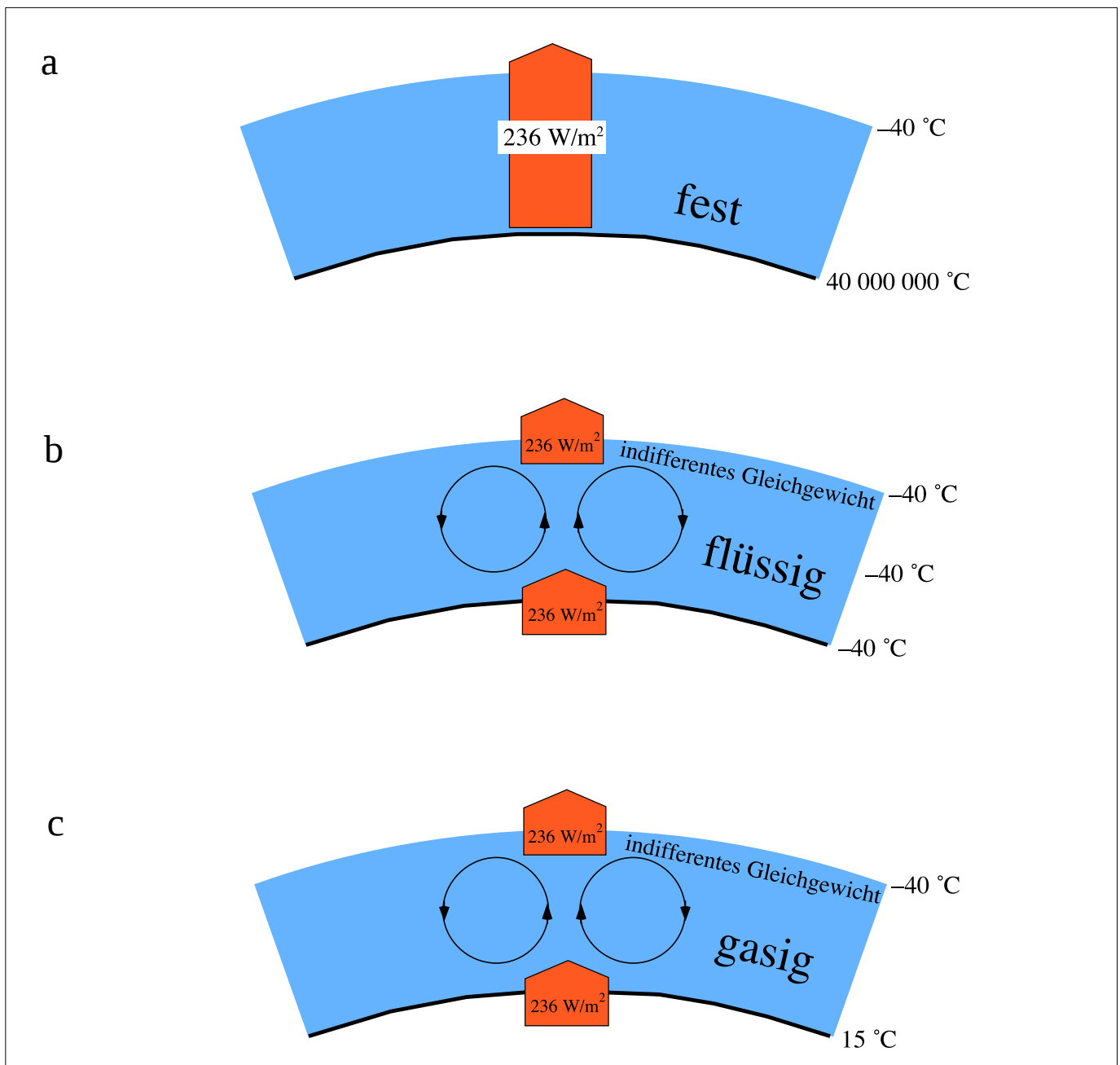


Abb. 2. (a) Eine feste Isolierschicht verursacht einen viel zu großen Temperaturgradienten. (b) In einer von unten geheizten Flüssigkeit lässt sich kein Temperaturgradient aufrecht erhalten. (c) In einem gut durchgerührten Gas im Gravitationsfeld existiert nicht nur ein Druck-, sondern auch ein Temperaturgradient.

Stellt dieses System ein gutes Modell der echten Atmosphäre dar? Ganz und gar nicht. Das Styropor verursacht zwar Temperaturgefälle. Aber der Temperaturgradient ist viel zu groß. Er ist etwa eine Million mal so groß wie das was wir suchen. Wir schließen daraus, dass der Temperaturgradient in der realen Atmosphäre eine andere Ursache haben muss.

Warum entspricht das Modell aber nicht der Situation in der echten Erdatmosphäre? Weil in der Atmosphäre Konvektion stattfindet. Diese Konvektion stellt eine Art thermischen Kurzschluss dar. Wir wollen daher im Folgenden Modelle betrachten, bei denen Konvektion stattfinden kann. Betrachten wir also als nächstes eine flüssige Atmosphäre.

3. Eine flüssige “Atmosphäre”

Wir müssen als erstes den Anfangszustand des Systems festlegen. Wir rühren unsere flüssige Atmosphäre kräftig um. Wenn man etwas umrührt, so tut man es gewöhnlich, um die Zusammensetzung einheitlich zu machen. So mischt man Sand, Kalk und Wasser, um Mörtel zu erhalten. Nun hat das Umrühren daneben stets noch eine andere Folge: Das System wird in den Zustand des indifferenten mechanischen Gleichgewichts gebracht.

Man könnte denken, dass durch das Mischen alle lokalen physikalischen Größen einheitliche Werte bekommen: der Druck und die Temperatur zum Beispiel. Aber das trifft nicht zu. In unserem Fall, d. h. im Fall einer Flüssigkeit, wird der Druck nicht einheitlich. Im Gegenteil: Es stellt sich ein ganz bestimmter Druckgradient ein. Die Temperatur dagegen wird beim Mischen einheitlich.

Wir wollen nun, nachdem wir den Anfangszustand festgelegt haben, die Flüssigkeit von unten her heizen. Das bedeutet, dass wir versuchen, das mechanische Gleichgewicht zu stören. Die Dichte nimmt durch das Heizen unten ein wenig ab. Dadurch wird das System instabil und kippt um. Wenn wir mit der Wärmezufuhr fortfahren, d. h. das System weiter stören, so entsteht eine dauernde Konvektion. Diese Konvektion ist aber nichts anderes als ein ständiges Umrühren und verursacht daher eine Homogenisierung der Dichte und der Temperatur. Dank der Konvektion wird der Zustand des indifferenten Gleichgewichts ständig wieder hergestellt. Es entsteht also keine Abweichung vom indifferenten Gleichgewicht, Abb. 2b.

Zurück zur Atmosphäre. Stellt die Flüssigkeit, die man von unten heizt, ein Atmosphärenmodell dar? Keineswegs. Sie gibt eine wichtige Erscheinung nicht wieder: Es entsteht kein Temperaturgradient.

Wir haben zwei Modelle diskutiert, die beide nicht brauchbar sind. Versuchen wir es nun mit einer gasförmigen Atmosphäre. Schließlich ist unsere richtige Atmosphäre auch ein Gas.

4. Eine gasförmige Atmosphäre

Wir beginnen wieder damit, dass wir den Anfangszustand festlegen, indem wir das Gas umrühren. Wie bei der Flüssigkeit erhalten wir auch hier eine indifferente Schichtung. Wieder hat sich beim Umrühren der Druck nicht homogenisiert. Was aber bemerkenswert ist: Es gibt diesmal noch eine zweite Größe, die sich nicht homogenisiert hat: die Temperatur. Wenn man ein Gas in einem Gravitationsfeld umrührt, so stellt sich nicht nur ein Druckgradient ein, sondern auch ein bestimmter Temperaturgradient.

Das Bemerkenswerte an dieser Situation ist, dass wir einen Temperaturgradienten erhalten haben, ohne dass ein Wärmefluss nötig ist. Der Gradient hat also eine andere Ursache als der im ersten Modell, dem Styropormodell. Und was noch wichtig ist: Der Zahlenwert, der sich aus der Theorie ergibt, stimmt gut mit dem überein, den man in der echten Atmosphäre beobachtet.

Wir wollen nun auch diese Atmosphäre von unten her heizen. Was man dabei beobachtet ist im Wesentlichen dasselbe wie bei der flüssigen Atmosphäre: Es setzt Konvektion ein. Wie im Fall der flüssigen Atmosphäre findet dabei ein Wärmetransport von unten nach oben statt, Abb. 2c.

Wir haben also endlich ein Modell gefunden, das auf die Erdatmosphäre passt. Selbstverständlich kann man es noch verfeinern. Aber es bedarf keiner großen Korrekturen mehr. Um solche Verfeinerungen anzubringen, müssen wir Zahlenwerte betrachten.

5. Die Erdatmosphäre

Der Mittelwert der Stromdichte der Energie, die von der Erde absorbiert wird, beträgt 236 W/m^2 . Diese Energie muss die untere Atmosphäre durchqueren, und zwar in Form von Wärme. Unserem letzten Modell entsprechend geschieht dieser Transport konvektiv. Tatsächlich ist diese Aussage nicht zu 100% richtig. Der Grund: Die Erdatmosphäre ist nicht völlig undurchlässig für Infrarotstrahlung. Im Spektralbereich des atmosphärischen Fensters ist sie durchlässig. Das hat zur Folge, dass ein Teil der Wärme, nämlich 13% von den 236 W/m^2 nicht durch den Konvektionsmechanismus nach oben gelangen, sondern direkt durch das atmosphärische Fenster in den Weltraum abgestrahlt werden, Abb. 3. Man sieht aber, dass der konvektive Transport der dominante Mechanismus ist.

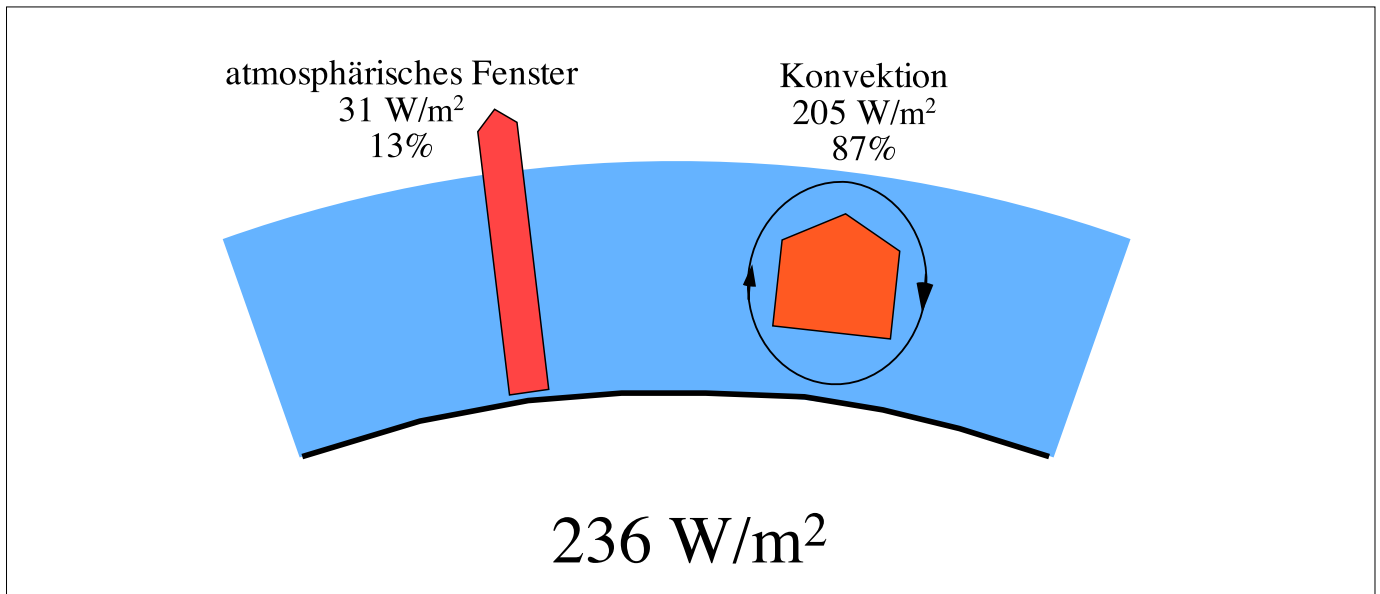


Abb. 3. 13% der Wärme verliert die Erde durch direkte Abstrahlung durch das atmosphärische Fenster, 87% gelangt konvektiv zum Emissionsniveau und wird erst dort abgestrahlt.

Zur Konvektion ist außerdem noch etwas zu ergänzen. Sie ist deshalb so wirkungsvoll, weil sie zum größeren Teil mit einem Phasenübergang verbunden ist. An der Erdoberfläche wird Wasser verdampft. Dabei nimmt das Wasser Wärme auf. Der Wasserdampf steigt mit der Luft nach oben. Wir haben damit einen konvektiven Wärmetransport nach oben. Weiter oben kondensiert der Dampf und gibt die Wärme wieder ab. Dieser Wärmetransport entspricht 35% des gesamten Wärmestroms.

6. Die Treibhausgase

Es ist jetzt nicht mehr schwer zu erklären, wie die Treibhausgase den Wärmetransport beeinflussen. Sie tun es auf zwei Arten. Wenn ein Gas im Spektralbereich des atmosphärischen Fensters absorbiert, so führt die Gegenwart eines solchen Gases dazu, dass das Fenster teilweise geschlossen wird. Dies ist der Fall für die Fluor-Chlor-Kohlenwasserstoffe.

Wenn die Absorption eines Gases außerhalb des Fensters liegt, also dort, wo die Atmosphäre sowieso schon absorbiert, so trägt das Gas einfach zur Absorption der Atmosphäre bei. Das ist der Fall für CO_2 . Das äußert sich darin, dass das Emissionsniveau nach oben wandert. Die effektive Dicke der Absorptionsschicht nimmt zu.

Beide Effekte führen dazu, dass die Temperatur an der Erdoberfläche zunimmt.

7. Zusammenfassung

Wir haben die Antworten auf die drei Fragen gefunden, die eingangs gestellt wurden:

1. Warum nimmt die Temperatur mit der Höhe ab?

Antwort: Es ist der Temperaturgradient eines gut durchmischten Gases.

2. Wie funktioniert der Wärmetransport über dieses Stück der unteren Atmosphäre?

Antwort: 87% durch Konvektion, 13% durch direkte Strahlung.

3. Wie wird dieser Transport durch Treibhausgase behindert?

Antwort: Die 87% dadurch, dass die effektive Dicke der Absorptionsschicht vergrößert wird, die 13% dadurch, dass das Infrarotfenster etwas geschlossen wird.