

"Das Meer wird süß, wenn es gen Himmel steigt"

Das Wetter aus physikalischer Sicht

H. Joachim Schlichting Universität Essen

Wettervorhersage

"Über dem Atlantik befand sich ein barometrisches Minimum; es wanderte ostwärts, einem über Rußland lagernden Maximum zu, und verriet noch nicht die Neigung, diesem nördlich auszuweichen. Die Isothermen und Isotheren taten ihre Schuldigkeit. Die Lufttemperatur stand in einem ordnungsgemäßen Verhältnis zu mittleren Jahrestemperatur, zur Temperatur des kältesten wie des wärmsten Monats und zur aperiodischen monatlichen Temperaturschwankungen. Der Auf- und Untergang der Sonne, des Mondes, der Lichtwechsel des Mondes, der Venus, des Saturnringes und viele andere bedeutsame Erscheinungen entsprachen ihrer Voraussage in den astronomischen Jahrbüchern. Der Wasserdampf in der Luft hatte seine höchste Spannkraft, und die Feuchtigkeit der Luft war gering. Mit einem Wort, das das Tatsächliche recht gut bezeichnet, wenn es auch etwas altmodisch ist: Es war ein schöner Augusttag des Jahres 1913" /1/ Mit diesen Worten beginnt Robert Musil seinen berühmten Roman: Der Mann ohne Eigenschaften. Kann man die Diskrepanz zwischen der unmittelbaren Erfahrung des Wetters und seiner wissenschaftlichen Beschreibung besser zum Ausdruck bringen? Diese Frage erscheint um so berechtigter, je mehr der Laie den Eindruck gewinnt, den schon vor gut zweihundert Jahren Georg Christoph Lichtenberg folgendermaßen umschrieb: *„Trotz den Bänden meteorologischer Beobachtungen ganzer Akademien, ist es noch immer so schwer vorherzusagen, ob übermorgen die Sonne scheinen wird, als es vor einigen Jahrhunderten gewesen sein muß, den Glanz des Hohenzollerischen Hauses vorauszusehn. Und doch ist der Gegenstand der Meteorologie, so viel ich weiß, eine bloße Maschine, deren Triebwerk wir mit der Zeit näher kommen können. Es steckt kein freies Wesen hinter unsern Wetterveränderungen, kein eigensinniges, eifersüchtiges, verliebtes Geschöpf, das um einer Geliebten willen einmal im Winter die Sonne wieder in den Krebs führte.“*/2/. Das gilt auch heute noch für langfristige Wettervorhersagen (siehe z.B. 3/), auch wenn das System oder besser gesagt, das Netzwerk von Systemen, das dem Wetter zugrundeliegt, in seinen physikalischen Grundlagen sehr viel besser verstanden wird als zur Zeit Lichtenbergs. Was verstehen wir heute aus physikalischer Sicht vom Wetter?

Von globaler Bedeutung für das Wetter ist die Wirkung der eingestrahnten Sonnenenergie. Sie sorgt dafür, daß die Erde in der Umgebung des unwirtlich „kalten“ Weltalls auf lebensverträgliche Temperaturen aufgeheizt wird. Dies geschieht sowohl passiv, indem sich die Erde wie ein Bratspieß rotierend den Sonnenstrahlen aussetzt als auch aktiv dadurch, daß die fluiden Bestandteile der Erdoberfläche, nämlich die Atmosphäre und das Wasser in seinen verschiedenen Aggregatzuständen, die Energie in äußerst effektiver Weise über die Erde verteilen. Erst dadurch wird der Planet in weiten Teilen bewohnbar.

Die Erde im Lichte der Sonne

Neben der Einstrahlung eines passenden Energiestroms, der durch den Abstand der Erde von der Sonne bestimmt ist, spielt die weiträumige Verteilung der Energie auf der Erde eine wichtige Rolle. Dies geschieht zum einen durch die Drehung der Erde um die eigene Achse, wobei die Strahlung auf die geographischen Längen über den Umfang der Erde verteilt wird. Sehr viel langsamer, nämlich im Verlaufe eines Jahres, verschiebt sich aufgrund der Neigung der Erdachse zur Ekliptik der Bereich des senkrechten Strahlungseinfalls und damit der maximalen Energieübertragung um 23° nach Norden und nach Süden. Die damit einhergehende Energieverteilung über einen größeren Breitenbereich macht sich in den Jahreszeiten bemerkbar.

Nachdem die Erde infolge der kopernikanischen Revolution wie ein Gegenstand betrachtet werden kann, „der sich in die Hand nehmen läßt“ (Paul Valéry), können wir sie ähnlich behandeln, wie etwa einen der Sonnenstrahlung ausgesetzten Stein. Ein solcher Stein absorbiert einen Teil der Sonnenenergie und nimmt infolge dessen eine zunehmend höhere Temperatur als die Umgebung an. Dadurch wird er aber selbst zum Energiestrahler. Der ausgestrahlte Energiestrom wächst mit zunehmender Temperatur an, bis er so groß ist wie der absorbierte (konstante) solare Energiestrom. Es stellt sich bei einer charakteristischen Temperatur ein stationäres Gleichgewicht zwischen Energieemission und -absorption ein (Abb. 1). Im folgenden werden die theoretischen Grundlagen in elementarer Form dargestellt.

Ein Körper, der alle Strahlung absorbiert, weist ein besonders einfaches Strahlungsverhalten auf: Die ausgestrahlte Energie ist in einer Weise auf die einzelnen Frequenzen verteilt, die nicht von der speziellen Natur des Körpers, sondern nur von seiner (absoluten) Temperatur abhängt. Daraus folgt u. a.:

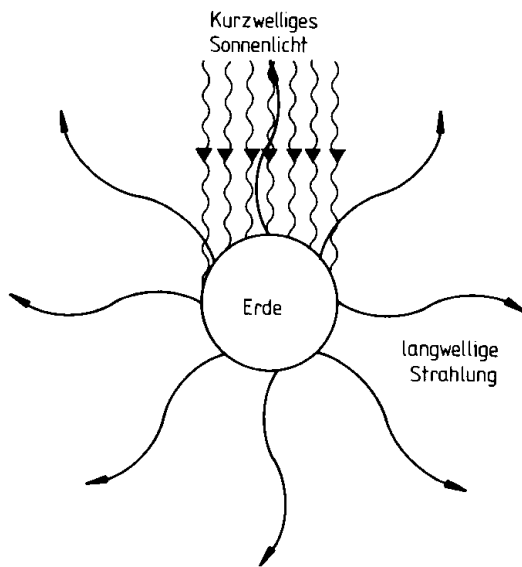


Abb. 1: Im zeitlichen Mittel strahlt die Erde genau so viel Energie

1. Die Energiestromdichte S , also der pro Flächeneinheit ausgestrahlte Energiestrom, ist eindeutig durch die (absolute) Temperatur des Strahlers bestimmt, und zwar gilt:

$$S = \sigma T^4 \quad (\text{Stefan-Boltzmannsches Strahlungsgesetz}),$$

mit $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K}^4)$.

Mit anderen Worten: Eine Verdopplung der Temperatur geht mit einer Versechszehnfachung der ausgestrahlten Energiestromdichte einher. Da ein Körper mit einem solchen Strahlungsverhalten im Bereich „normaler“ Temperaturen (z.B. Umgebungstemperatur) von schwarzem Aussehen ist, spricht man ganz allgemein von *schwarzen Körpern* bzw. *Strahlern*, auch dann, wenn sie bei hohen Temperaturen weißglühend sind.

2. Die Wellenlänge, bei der der Strahler am intensivsten strahlt, und die absolute Temperatur sind umgekehrt proportional zueinander:

$$\lambda_{\text{max}} = \frac{\eta}{T} \quad (\text{Wiensches Verschiebungsgesetz})$$

mit $\eta = 2880 \mu\text{m}\cdot\text{K}$

Bei Verdopplung der absoluten Temperatur eines schwarzen Strahlers halbiert sich also die Wellenlänge des intensivsten Strahlungsanteils. Dieser Sachverhalt macht sich im sichtbaren Spektralbereich dadurch bemerkbar, daß sich die Farbe des Strahlers mit steigender Temperatur vom Rötlichen ins Bläuliche und damit zu den kürzeren Wellenlängen verschiebt.

Das Wiensche Verschiebungsgesetz liefert für die Lage des Strahlungsmaximums der Erdoberfläche $\lambda_{\text{max}} = 2880 \mu\text{mK} / 288\text{K} = 10 \mu\text{m}$.

Da das Strahlungsspektrum der Sonne mit guter Näherung dem eines schwarzen Körpers entspricht, lassen sich unter der Voraussetzung, daß keine Energie verlorengeht, trotz der enormen Entfernung zwischen Erde und Sonne aus der Strahlung Rückschlüsse auf die Temperatur der Sonnenoberfläche ziehen. Dazu muß man nur die Energiestromdichte der Sonnenstrahlung am Ort der Erde kennen. Diese sog. Solarkonstante $S_E = 1,37 \text{ kW}/\text{m}^2$ (oberhalb der Erdatmosphäre gemessen) besagt, daß auf eine senkrecht zur Strahlungsrichtung orientierte Fläche von 1m^2 ein Energiestrom $P_a = 1,37 \text{ kW}$ auftrifft. Gemittelt über die Erdoberfläche (4-fache Querschnittsfläche) trifft demnach das Sonnenlicht mit einer mittleren Energiestromdichte von $S_m = 342 \text{ W}/\text{m}^2$ auf. Da die Erde ebenfalls wie ein schwarzer Körper strahlt, läßt sich daraus die mittlere Temperatur der atmosphärenfreien Erde abschätzen, wenn man berücksichtigt, daß ein Bruchteil α , die sog. Albedo, der auftreffenden Energie direkt reflektiert bzw. zurückgestreut wird. Da man nur spekulieren kann, wie es auf einer atmosphärenfreien Erde aussehen würde, ist die Angabe von α mit großen Unsicherheiten behaftet. Bei $\alpha = 0,3$ für Wüstenboden oder $0,35$ für Eis ergäbe sich eine Temperatur von 250K (-23°C) bis 254 K (-19°C), die der mittleren Temperatur von ca. 15° bereits erstaunlich nahe kommt, aber noch unterhalb der Schwelle liegt, über der Leben in der uns bekannten Form möglich ist.

Durch jeden Quadratmeter einer gedachten Kugeloberfläche um die Sonne als Zentrum im Erdabstand R_E strömt gleich viel Energie hindurch. Daraus läßt sich berechnen, daß insgesamt ein Energiestrom von

$$P_S = 4\pi R_E^2 S_E = 3,79 \cdot 10^{23} \text{ kW}$$

von der Sonne ausgestrahlt wird, wodurch die Sonne gemäß der Einsteinschen Beziehung zwischen Masse m , Lichtgeschwindigkeit c und Energie $E = mc^2$, eine Masse von $4,2$ Mio Tonnen pro Sekunde verliert. Davon bekommt die Erde

$$P_a = \pi R_E^2 S_E = 174,5 \cdot 10^{12} \text{ kW}$$

ab. (πR_E^2 ist die Querschnittsfläche der Erde). Aus P_S berechnet man die Energiestromdichte am Ort der Sonne:

$$S_S = P_S / (4\pi R_S^2) = 64200 \text{ kW}/\text{m}^2,$$

Daraus errechnet man die Oberflächentemperatur der Sonne zu:

$$T_S = (S_S / \sigma)^{1/4} = 5760 \text{ K}.$$

Aus dem Wienschen Verschiebungsgesetz folgt für die Lage des Strahlungsmaximums der Sonne: $\lambda_{\max} = 2880 \mu\text{m K} / 5760 \text{ K} = 500 \text{ nm}$. Für Licht dieser Wellenlänge weist das menschliche Auge die größte Empfindlichkeit auf. Es wird als Grün wahrgenommen.

Wechselwirkungen von Strahlung und Atmosphäre

Aber nicht nur wegen der zu niedrigen Temperatur wäre auf einer nackten Erde kein Leben möglich. Es würden vermutlich ähnlich unwirtliche Bedingungen herrschen wie auf dem etwa gleich weit entfernten Mond. Sieht man einmal von allen anderen Problemen ab, so würden allein die extrem hohen Temperaturunterschiede zwischen Licht und Schattengebieten insbesondere zwischen Tag und Nacht ausreichen, jedes Leben im Keim zu ersticken. Es kommt eben nicht nur auf die Durchschnittstemperatur an, sondern auch auf die Werte, aus denen der Durchschnitt gebildet wird.

Entscheidend für das Leben auf der Erde ist die Atmosphäre, mit der es derart innig verwoben ist, daß die getrennte Betrachtung als grobe Vereinfachung angesehen werden muß. Obwohl auch die hohe Atmosphäre durch ihre Absorptionswirkung für die Teilchen-, Gamma-, Röntgen-, und UV-strahlung für das Leben von enormer Bedeutung ist, beschränken wir uns für die folgende Betrachtung auf das energetisch bedeutungsvollste untere Stockwerk, die Troposphäre, also jene 8 km (Polargebiete) bis 20 km (Tropen) hohe Schicht, in der sich das Wettergeschehen abspielt.

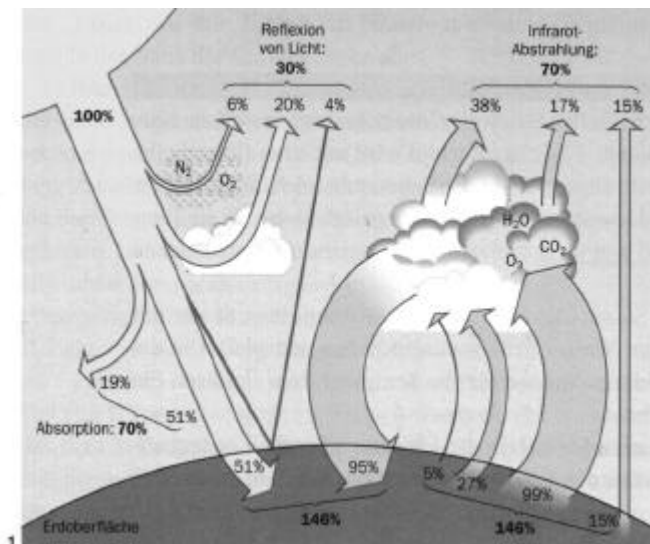


Abb.2: 30 % der eingestrahnten Sonnenenergie werden direkt reflektiert bzw. zurückgestreut 19 % treten schon bei der Einstrahlung mit der Atmosphäre in Wechselwirkung. Nur etwa 51 % werden von der Erdoberfläche direkt absorbiert. Der Rücktransport der Energie erfolgt nur unter Beteiligung der Atmosphäre.

- vorher tiefblauen Himmel,
- das „aus heiterem Himmel“ einbrechende Gewitter begleitet von Sturmböen und Hagelschauern,
- Luftspiegelungen auf der heißen Asphaltstraße und
- nebelverhangene Niederungen am Morgen

sind mehr oder weniger direkte Äußerungen dieses Wechselspiels.

Angesichts der Vielzahl der ablaufenden Prozesse und der damit verbundenen ständigen Veränderungen stellt sich die Frage, wie es zu der bemerkenswerten Konstanz, Dauerhaftigkeit und Stabilität innerhalb des komplexen Erde-Atmosphäre- Systems kommt, wie mit einem Wort Goethes die „Dauer im Wechsel“ aufrecht erhalten wird.

Die Erde als dissipative Struktur

Würde man die Sonne plötzlich wie eine Lampe "ausgeknipsen", so erginge es der Erde in der Umgebung des extrem kalten Weltraums nicht anders als einer auf einem Stövchen warm gehaltenen Kanne Tee, deren Kerze erlischt: Wie das heiße Teewasser würde die Erde unter Abgabe von thermischer Energie ins thermodynamische Gleichgewicht übergehen und Umgebungstemperatur annehmen. Dies ist der Inhalt des 2. Hauptsatzes der Ther-

Letztlich werden die meisten Vorgänge und Erscheinungen, die mit dem Leben auf der Erde im allgemeinen und mit der Energieversorgung im besonderen zusammenhängen, dadurch hervorgebracht, daß sowohl das von der Erde absorbierte kurzwellige sichtbare Sonnenlicht als auch die von der Erde wieder ausgestrahlte langwellige unsichtbare Wärmestrahlung die Atmosphäre durchdringen. Den dabei auftretenden Wechselwirkungen ist es zu verdanken,

- daß trotz der zeitlichen und örtlichen Schwankungen der Sonneneinstrahlungen Temperatur, Luftdruck und Feuchtigkeit nur in engen Grenzen schwanken,
- trotz des ständigen Verbrauchs der Sauerstoff nicht weniger wird,
- die Meere trotz der einmündenden Flüsse nicht überlaufen und der Salzgehalt konstant bleibt.

Aber auch

- ein farbenprächtiger Sonnenuntergang am

modynamik, der ganz allgemein die Erfahrung konzeptualisiert, daß jeder von selbst ablaufende Vorgang mit Entwertung von Energie einhergeht (ausführlicher in /4/ unterrichtsbezogen in /5/ und /6/).

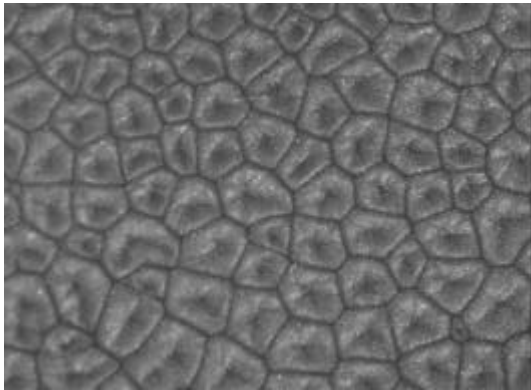


Abb. 3: In einer von unten geheizten Flüssigkeit können die Konvektionszellen mit Hilfe von Kupferpulver sichtbar gemacht werden. In der Mitte der Zellen steigt die Flüssigkeit auf, an den Rändern sinkt sie wieder ab. Die entstehenden Strukturen erinnern nicht nur zufällig an gelegentlich beobachtbare Wolkenbilder.

ten, muß also Energie entwertet bzw. dissipiert werden (Abb. 3).

Ein solches durch Dissipation von Energie geschaffenes und aufrechterhaltenes System nennt man nach Prigogine auch "dissipative Struktur" /7/. Letztlich kommt die Entwertung der Sonnenenergie dadurch zum Ausdruck, daß die Sonne wie die Kerze allmählich „abbrennt“ und die wertlose (innere) Energie des Weltalls in gleichem Maße zunimmt. Wenn man das Teewasser auf dem Stövchen etwas genauer ansieht, so stellt man fest, daß oberhalb eines kritischen Energiestroms die Wärme nicht nur durch die Flüssigkeitsschicht hindurch *geleitet* wird, sondern vor allem durch *Konvektion* zur Oberfläche gelangt. Am Kesselboden erwärmte Flüssigkeitsportionen werden durch kältere und damit dichtere Flüssigkeitsportionen zur Oberfläche gedrückt. Dort werden sie unter Abgabe von Wärme wieder kälter, sinken wieder und drücken erneut erwärmtes Wasser hoch: Der Kreis ist geschlossen. Es ist interessant, daß auch dieses Kreislaufgeschehen als grobes Bild für die vielfältigen Vorgänge in der Natur dienen kann.

Kreisläufe der Natur

Das Wesen eines Kreislaufs kann man darin sehen, daß selbsttätig ablaufende Vorgänge (z. B. das Absinken des dichten Wassers im Teekessel), immer wieder zurückgespult werden (z. B. durch das Aufsteigen des erwärmten Wassers), um erneut ablaufen zu können. Die Idee des Kreislaufs beschreibt einen wesentlichen Aspekt einer dissipativen Struktur und macht insbesondere verständlich, wie der Tendenz eines Systems, ins thermodynamische Gleichgewicht überzugehen, ständig entgegengewirkt wird, um auf diese Weise die Dauerhaftigkeit, Stabilität aber auch die Flexibilität des Systems zu garantieren. Die Kreisläufe werden also letztlich durch die Entwertung bzw. Dissipation von Energie aufrechterhalten bzw. „angetrieben“.

Bislang haben wir die Einstrahlung der Sonnenenergie auf die Erde sehr pauschal betrachtet. Wir haben u.a. davon abgesehen, daß von einer gleichmäßigen Erwärmung, wie es die Angabe einer Durchschnittstemperatur für die gesamte Erde suggeriert, nicht die Rede sein kann. Sowohl in vertikaler Richtung, d.h. zwischen Erdoberfläche und größeren Höhen in der Atmosphäre, als auch in horizontaler Richtung, d.h. zwischen verschiedenen Orten auf der Erdoberfläche treten unterschiedlich starke Erwärmungen auf.

- Da die Atmosphäre für die auftreffende sichtbare Sonnenstrahlung weitgehend durchlässig ist, wird sie weniger stark erwärmt als die Erdoberfläche.
- Die Äquatorregion wird wesentlich stärker erwärmt als die Polregionen. Die mit der Neigung der Erdachse zur Ekliptik bedingten Verschiebungen des senkrechten Strahlungseinfalls zwischen den Wendekreisen entschärfen diese Differenz zu einem nicht unerheblichen Teil. Davon zeugen u.a. die Temperaturunterschiede zwischen den Jahreszeiten. Dennoch bleiben erhebliche Unterschiede bestehen.

Diese globalen und auch die hier nicht betrachteten regionalen Differenzen, die sich nicht nur als Temperaturunterschiede, sondern u. a. auch als Luft- und Dampfdruckunterschiede bemerkbar machen, rufen – infolge der Tendenz ins thermodynamische Gleichgewicht überzugehen – selbsttätige Vorgänge hervor, die im Wettergeschehen ihren sichtbaren Ausdruck finden. Die Vielfalt des Wetters und seine Unberechenbarkeit zeugen von der Komplexität des Systems. Dadurch daß die Sonnenstrahlung diese Ausgleichsvorgänge direkt oder indirekt immer wieder rückgängig macht, wird wie beim Teewasser auf dem Stövchen verhindert, daß die atmosphärischen Teilsysteme ins thermodynamischen Gleichgewicht übergehen. Diese mehr oder weniger langlebigen globale und regionale Kreislaufsysteme sind untrennbar miteinander verwoben und lassen sich nur den zugrundeliegenden physikalischen Mechanismen entsprechend in idealtypischer Weise getrennt darstellen.

Der Kreislauf langwelliger Strahlung: Treibhauseffekt

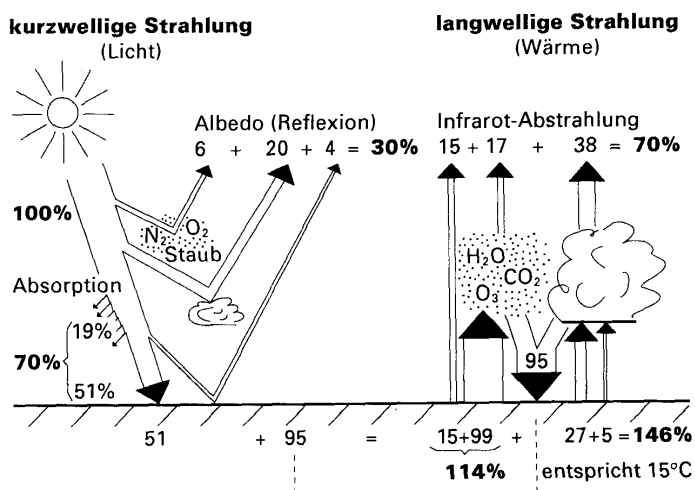


Abb. 4: Die wichtigsten Strahlungsprozesse, die zum Treibhauseffekt führen (nach /8/).

Die langwellige Wärmestrahlung undurchlässige Atmosphäre einen Teil der von der Erdoberfläche abgegebenen Energie wie in einem Treibhaus das Glas (Treibhauseffekt) immer wieder zurückstrahlt, was im stationären Gleichgewicht 0,95 S_m ausmacht. Wie man leicht berechnen kann, würden die 1,46 S_m zu einer Temperatur von 33° C führen. Dazu kommt es glücklicherweise nicht, weil weitere Stoffkreisläufe, nämlich die Zirkulation des Wassers und der Luft für einen strahlungsfreien Abtransport von Energie sorgen: 0,05 S_m werden durch die Konvektion der Luft und 0,27 S_m in Form des energiereichen Wasserdampfes abgeführt, so daß nur noch 1,14 S_m „wärmewirksam“ bleiben und uns die beobachtete mittlere Temperatur von 15°C auf der Erde bescheren (Abb. 4).

Luftkreislauf und Windsysteme

Zwischen den Wendekreisen wäre der Wetterhahn kein Symbol der Unbeständigkeit.

Er sieht immer denselben Weg.

Georg Christoph Lichtenberg.

Aus der Energiebilanz (siehe oben) läßt sich ablesen, daß die Erdoberfläche stärker aufgeheizt wird als die Atmosphäre. Die Erdoberfläche gibt daher wie eine Herdplatte Wärme an die angrenzende Luft ab. In dieser Heizung von unten liegt die Ursache aller lokalen, regionalen und globalen atmosphärischen Strömungen. Die aufgeheizte bodennahe Luft expandiert. In großräumigen Systemen erfolgt diese Expansion zunächst – d.h. solange sich kein horizontales Druckgefälle aufgebaut hat – überwiegend nach oben. In der Höhe fließt dann Luft aus der hochragenden Warmluftssäule ab. Dadurch sinkt der Luftdruck am Boden unter der Warmluft und steigt unter der überschichteten kälteren Umgebungsluft. Die so entstehenden Druckdifferenzen führen dann zur Konvektion. Es stellt sich ein Kreislauf ein, der solange bestehen bleibt, bis die Druckdifferenzen abgebaut sind.

Dieser Vorgang liegt grundsätzlich allen schwerkraftgetriebenen Kreisläufen zugrunde. Bei kleinräumigen Systemen stellt sich die Druckdifferenz schnell ein, bei großräumigen thermischen Hoch- und Tiefdruckgebieten wird ein stationärer Zustand erst nach Stunden erreicht. Liegen bei kleinen Konvektionssystemen keine zusätzlichen horizontalen Strömungen vor, kann sich der Auf- und Abstieg in ähnlichen Zellen organisieren wie bei der von

unten erwärmten Flüssigkeitsschicht (siehe: Abb. 3). Aufgrund der Kondensation des mitgeführten Wasserdampfes werden die Zellen manchmal im Wolkenbild sichtbar (Abb. 5).



Abb. 6: Die Konvektion der Luft organisiert sich manchmal ähnlich wie die von unten geheizte Flüssigkeit in Zellen (hier von oben gesehen). Der in Wolken kondensierende Dampf macht die aufsteigenden Strömungen sichtbar.

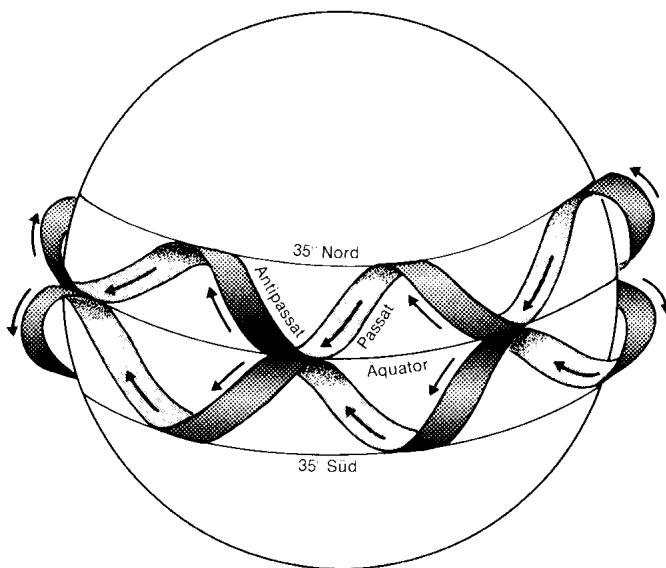


Abb. 5: Schematische Darstellung des Passatkreislaufsystems (nach /9/).

der Regelmäßigkeit statt wie in den Hadleyzellen. Vielmehr herrschen in dieser Zone zyklonale und antizyklonale Luftströmungen vor. Die Luftmassen rotieren um vertikale Achsen, obwohl auch sie indirekt durch thermische Konvektionen angetrieben werden (auf den genauen Mechanismus kann hier nicht eingegangen werden).

Als Zyklonen (Tiefs – auf der Nordhalbkugel linksdrehend) und Antizyklonen (Hochs – rechtsdrehend) wandern sie innerhalb der durch die Erddrehung bedingten Westwinddrift von West nach Ost und bringen uns abwechselnd Sonne und Regen sowie die Hitze- und Kälteperioden in Sommer und Winter. Auf der Vorderseite der Zyklonen werden mit den Winden aus dem Süden warme Luftmassen nach Norden und auf der Rückseite kalte nach Süden transportiert. Die viel geschmähten Tiefs sind also wichtige Elemente beim meridionalen Energieaustausch. Ohne sie wäre es in unseren Breiten erheblich kälter.

Großräumige Zirkulationssysteme dieser Art werden durch die Aufheizung der Erde in den Tropen längs des Äquators erzeugt. Die in der stark erwärmten sogenannten innertropischen Konvergenzzone (ITC) aufsteigenden Luftmassen bewegen sich als Antipassatwinde meridional polwärts, um in größeren Breiten (25°-35°) wieder abzusinken und zum Äquator als Passatwinde wieder zurückzufließen. Aufgrund der Ablenkung der Winde infolge der Erddrehung kommt es zu einer Ablenkung nach Osten, also zu einer westlichen Strömung der polwärts fließenden Höhenluft, und zu einer Strömung mit östlicher Komponente in der äquatorwärts strömenden bodennahen Luft. Daraus ergibt sich eine vertikale Zirkulation, die sich schraubenförmig um die Erde windet (Abb. 5). Durch die Inhomogenität der Luftschichten zerfallen die Gürtel einheitlichen Luftdrucks in Luftdruckzellen (Hadley-Zellen), deren Lage sich ständig verändert. Die Antipassate transportieren überschüssige Wärme aus der Äquatorialgegend nach Norden und Süden, während im Gegenzug die Passate in Bodennähe kühlere energiearme Luft zum Äquator zurückführen. Die ITC, in der die Passate aufeinanderstoßen, ist auf der Satellitenaufnahme durch ein langgezogenes zonales Wolkenband sichtbar (Abb. 8). Wolken entstehen dort, wo Wasserdampf aufsteigt und infolge der Abkühlung mit zunehmender Höhe (Überschreitung des Taupunktes) kondensiert.

In den sich polwärts anschließenden Hochdruckbereichen mit absinkenden Luftbewegungen (Roßbreiten) können sich demgegenüber kaum Wolken bilden. Denn die absinkende Luft erwärmt sich mit steigendem Druck adiabatisch und wird dadurch „entwässert“(). In diesen Bereichen finden man daher auch die großen Wüstengebiete der Erde. In der sich weiter polwärts anschließenden Westwindzone findet die vertikale Zirkulation nicht mehr in

In den Polgegenden erfolgt der meridionale Energieausgleich wieder in Zirkulationen analog zu den Hadley-Zellen. Durch die im Vergleich zur Einstrahlung starke Energieabstrahlung kommt es an den Polen zu einer großen Abkühlung der Luft, die daher zusammensackt und in der Höhe aus benachbarten Luftmassen überströmt wird. Durch das dadurch entstehende Bodenhoch wird die Bodenluft seitlich verdrängt. In größeren Höhen fließt zum Ausgleich aus den wärmeren tieferen Breiten warme Luft herbei. Die entsprechenden Windsysteme sind aber weit weniger ausgeprägt wie in den Passatregionen und werden Rossby-Zellen genannt.

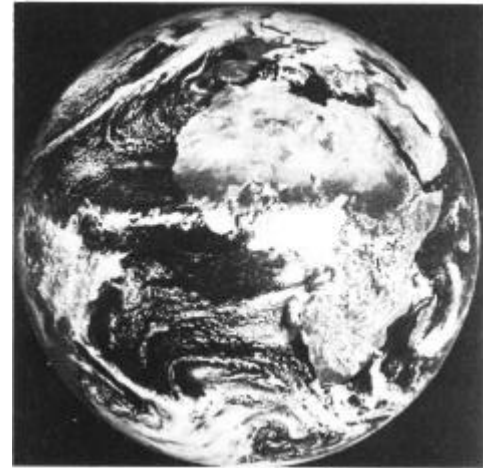
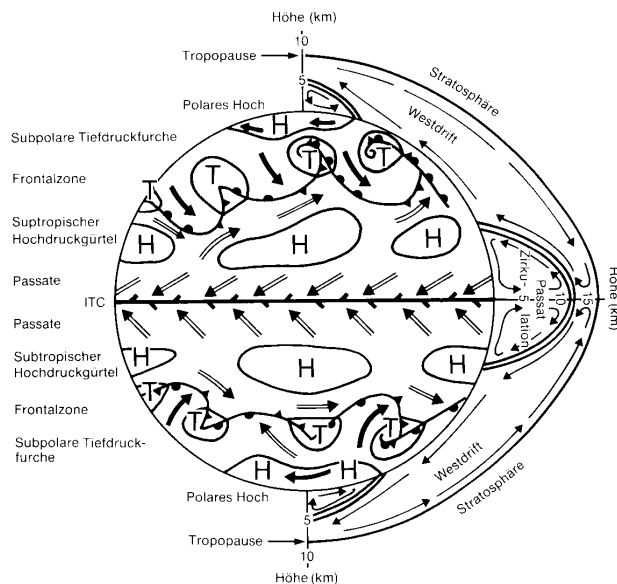


Abb. 7: Schematische Darstellung der allgemeinen Zirkulation der Atmosphäre. Vertikal stark überhöht (nach /9/). Neben den ursächlichen vertikalen Zirkulationen entstehen durch die ablenkende Wirkung der Erddrehung zusätzlich horizontal rotierende Zyklogen und Antizyklogen, die sich in wandernden Tief- und Hochdruckzellen zeigen.

der direkt oder auf teilweise verschlungenen Wegen in unter- und überirdischen Flüssen in die Weltmeere zurückzukehren oder erneut unmittelbar zu verdunsten. Bereits die Tatsache, daß der Meeresspiegel konstant bleibt, bringt zum Ausdruck, daß das Wasser auch wieder nach oben gelangen muß. Der Aufstieg passiert anders als der Niederschlag nicht von selbst. Wie beim vertikalen Luftkreislauf wird die Abkühlungstendenz zwischen warmer Erdoberfläche und kälterer Atmosphäre „ausgenutzt“, eine Konvektion in Gang zu setzen. Damit das Wasser jedoch daran teilnehmen kann, muß es erst verdunsten. Das geschieht in einem selbsttätig ablaufenden Vorgang, der jedoch schnell zum Erliegen käme, wenn nicht zum einen die dazu reichlich vorhandene thermische Energie an der Erdoberfläche zur Verfügung stünde und zum anderen der entstehende Dampf infolge der Konvektion ständig aufsteigen würde.

Diese Verdunstungskühlung ist eine der für das Leben auf der Erde wesentlichen Wirkungen des zirkulierenden Wassers. Der gigantische Konvektionsvorgang trägt auf eine für das Leben besonders günstige Weise dazu bei, Energie von der Erdoberfläche wegzuschaffen und Wasser auf ihr zu verteilen: Anders als bei der Konvektion in der Teekanne steigt das Wasser in einer energiereichen Form (dampfförmig) auf und sinkt in einer energiearmen

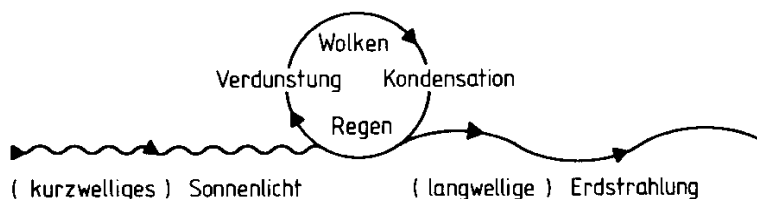


Abb. 9: Der Wasserkreislauf wird durch die Entwertung hochwertigen Sonnenlichtes, das schließlich als minderwertige Erdstrahlung in den Weltraum gestrahlt wird, angetrieben.

Der Wasserkreislauf

Sehr viel mehr Energie wird in dem eng mit diesem Luftkreislauf verbundenen Wasserkreislauf von der Erde wegtransportiert. Sichtbare und nicht immer willkommene Teilvorgänge dieses Kreislaufs sind die Niederschläge – Regen, Hagel, Schnee. Sie fallen unter Entwertung ihrer potentiellen Energie auf die Erde hinab, um entweder

Form (flüssig oder gar fest) wieder ab.

Während die potentielle Energie des Wassers, die über den Weltmeeren niedergeht, auf einmal vollständig entwertet wird, findet die Entwertung über dem Land, je nach der Höhe, in dem es auftritt, schrittweise statt, indem es sich z.B. in Flüssen zu den

Weltmeeren hin bewegt. Wasserkraftwerke nutzen einen Teil dieser Energieentwertung aus, um elektrische Energie zu erzeugen.

Abschätzung der Menge des zirkulierenden Wassers

Aus der im Wasserstromkreis mit einer Dichte $\epsilon = 0,27 S_m$ zirkulierenden Energie läßt sich abschätzen wieviel Wasser weltweit im Mittel pro Sekunde und pro Quadratmeter verdunstet. Die Wasserstromdichte ω läßt sich durch $\omega = \epsilon/\lambda$ berechnen, wobei $\lambda = 2470 \text{ kJ/kg}$ die spezifische Verdampfungsenergie des Wassers ist. Setzt man die entsprechenden Werte ein so ergibt sich $\omega = 37,38 \text{ mg/(s m}^2\text{)}$. Weltweit ist damit ein enormer vertikaler Wasserstrom von $I_\omega = A \omega = 19 \text{ Mio m}^3/\text{s}$ verbunden, wobei $A = 5,1 \cdot 10^{14} \text{ m}^2$ die Oberfläche der Erde darstellt. Davon gehen der Größe der Meere entsprechend fast 79 % als Niederschläge über dem Meer und nur etwa 3,5 Mio m^3/s über dem Land nieder. Rechnet man diese Werte auf die globale jährliche Niederschlagsmenge um, so ergibt sich mit etwa $610 \cdot 10^{12} \text{ m}^3$ eine bemerkenswerte Übereinstimmung mit den Messungen, die eine Niederschlagsmenge von $510 \cdot 10^{12} \text{ m}^3$ bis $560 \cdot 10^{12} \text{ m}^3$ liefern (/10/).

Meeresströmungen

Die Erdoberfläche ist zum größten Teil mit Wasser bedeckt. Das Wasser nimmt daher einen erheblichen Teil der eingestrahlten Energie auf. Die regionalen Differenzen in der Energiestromdichte rufen vergleichsweise geringe Höhendifferenzen hervor, die i.a. nicht ausreichen wie im Luftmeer größere Ausgleichsbewegungen in Gang zu setzen. Trotzdem kommt es auch in den Weltmeeren analog zur Atmosphäre zu vertikalen und horizontalen Kreisläufen, die ähnlich komplex verflochten sind wie diejenigen der Atmosphäre. Die Oberflächenströmungen kommen durch über das Wasser streichende Winde zustande. Diese rufen in einem sich selbst verstärkenden Prozeß Wasserwellen hervor und erhöhen dadurch die Reibung in der Berührungszone Wasser/Luft. Dadurch geht Bewegungsenergie aus der Luft auf das Wasser über und ruft Driftströmungen hervor. Diese werden also durch die Entwertung der Bewegungsenergie des Windes „angetrieben“. Der wichtigste Antrieb der Meeresströmungen ist in den Passaten zu sehen. Diese relativ konstante und kräftige Luftströmung treibt in Gestalt der Äquatorialströme Kreisläufe an, die schematisch in Abb. 10 dargestellt sind. Wegen der Wirkung der Erddrehung herrschen auf der Nordhalbkugel rechtsdrehende, auf der Südhalbkugel linksdrehende Strömungssysteme vor, deren Gestalt aber von den Landmassen erheblich beeinflußt wird. Der Antrieb des Golfstroms wird beispielsweise vom passatgetriebenen Nordäquatorialstrom angetrieben. Dieser führt warmes und – aufgrund der starken Verdunstung – salzhaltiges Wasser in die Karibik, wo sich unter dem Einfluß des amerikanischen Kontinents und der Erddrehung (Rechtsablenkung) der Golfstrom bildet. Im Januar hat der Golfstrom beispielsweise zwischen Schottland und Irland eine um etwa 15° höhere Temperatur als man sie sonst in diesen Breiten vorfinden würde. Bei einem Wasserstrom von 130 Mio m^3/s wird somit ein Energiestrom von fast 10^{13} kW aus der Karibik in den Nordatlantik geführt (siehe Übungsaufgabe in /11/. Bezogen auf die Fläche Europas (ca 10^{13} m^2) ergibt sich damit eine Energiestromdichte von ca. 1 kW/m^2 . Das ist erheblich mehr als die mittlere solare Energiestromdichte von $S_m = 342 \text{ W/m}^2$ und beispielsweise zur Folge, daß im Januar die Temperaturen von Tromsø (Norwegen) 24°C über der Durchschnittstemperatur für diese Breiten liegt, der Golfstrom somit zu einer Art globaler Warmwasserleitung für Europa wird. Im Sommer hingegen ist sein Einfluß auf Europa wegen der klimatischen Einflüsse des Festlandes wesentlich geringer.

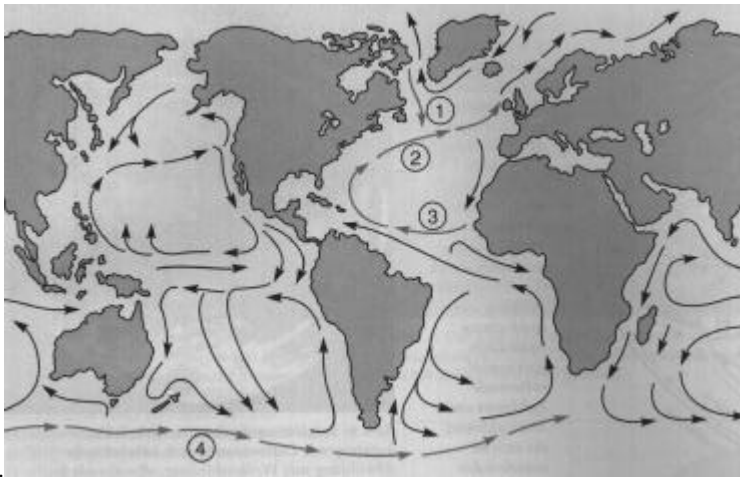


Abb. 10: Driftströmungssysteme in den Weltmeeren: 1. Labradorstrom, 2: Golfstrom, 3: Nordäquatorialstrom, 4: Westwind- Drift.

Der Antrieb des Golfstroms wird beispielsweise vom passatgetriebenen Nordäquatorialstrom angetrieben. Dieser führt warmes und – aufgrund der starken Verdunstung – salzhaltiges Wasser in die Karibik, wo sich unter dem Einfluß des amerikanischen Kontinents und der Erddrehung (Rechtsablenkung) der Golfstrom bildet. Im Januar hat der Golfstrom beispielsweise zwischen Schottland und Irland eine um etwa 15° höhere Temperatur als man sie sonst in diesen Breiten vorfinden würde. Bei einem Wasserstrom von 130 Mio m^3/s wird somit ein Energiestrom von fast 10^{13} kW aus der Karibik in den Nordatlantik geführt (siehe Übungsaufgabe in /11/. Bezogen auf die Fläche Europas (ca 10^{13} m^2) ergibt sich damit eine Energiestromdichte von ca. 1 kW/m^2 . Das ist erheblich mehr als die mittlere solare Energiestromdichte von $S_m = 342 \text{ W/m}^2$ und beispielsweise zur Folge, daß im Januar die Temperaturen von Tromsø (Norwegen) 24°C über der Durchschnittstemperatur für diese Breiten liegt, der Golfstrom somit zu einer Art globaler Warmwasserleitung für Europa wird. Im Sommer hingegen ist sein Einfluß auf Europa wegen der klimatischen Einflüsse des Festlandes wesentlich geringer.

Neben den windgetriebenen Oberflächenströmungen – ihre Tiefe übersteigt nur selten 300m – gibt es von der Schwerkraft angetriebene Zirkulationen (um eine horizontale Achse): Wasser mit größerer Dichte sinkt ab und drückt weniger dichtes Wasser nach oben. Die Dichte des Meerwassers wird durch die Temperatur und den Salzgehalt verändert. Letzterer steigt zum Beispiel mit der Verdunstungsrate oder beim Ausfrieren. In den Polarregionen sinkt daher schweres Wasser nach unten, in wärmeren Regionen steigt es wieder auf. Dadurch entstehen globale hemisphärenübergreifende Tiefenzirkulationssysteme der Weltmeere mit einer Umlaufdauer von mehreren

hundert Jahren. Sie stellen gewaltige Puffer für den Temperaturhaushalt und die chemische Zusammensetzung der Atmosphäre dar. Beispielsweise transportieren sie CO₂, das an der Oberfläche aus der Atmosphäre in Lösung geht, in große Tiefen oder sauerstoffreiches Tiefenwasser an die Oberfläche.

.Die Bedeutung der Tiefenzirkulation ist daher für das Weltklima kaum zu überschätzen. Die Forschung befindet sich jedoch noch in einem Hypothesenstatus ohne gesicherte Vorhersagemöglichkeiten. Eine globale Erwärmung könnte aufgrund der dadurch erhöhten (salzlosen) Niederschläge, der Temperaturerhöhung und durch „aussüßendes“ Schmelzwasser beispielsweise zu einer Dichteminderung in den Polarmeeren führen. Dies könnte den Golfstrom ins Stocken bringen und dabei in Europa zu einer Abkühlung führen. Wenn sich aber zugleich die Tiefenströmung verzögert, wird der Atmosphäre weniger CO₂ entzogen, was die globale Erwärmung beschleunigt. Die Temperaturgegensätze könnten sich vergrößern.

Immer mehr Klimaforscher gehen heute davon aus, daß die Witterscheinungen und die eng damit zusammenhängenden Strömungssysteme der Meere eine chaotische Dynamik besitzen. Dies bedeutet, daß schon geringfügige Veränderungen in den Ausgangsbedingungen (z.B. Windgeschwindigkeiten; Oberflächentemperaturen) völlig veränderte Kreisläufe und damit unvorhersagbare klimatische Verschiebungen zur Folge haben können, so wie es in der erdgeschichtlichen Vergangenheit immer schon gewesen ist.

Geradezu dramatische Wintereinbrüche auf dem europäischen Kontinent erwarten Klimatologen, wenn sich der Kohlendioxidgehalt der Atmosphäre durch weltweites Verbrennen fossiler Energieträger vervierfacht, was in kommenden Jahrhunderten im schlimmsten Falle eintreten könnte. Durch den Temperaturanstieg würde es über dem Nordatlantik erheblich mehr regnen; der Salzgehalt der oberen Wasserschichten läge niedriger als normalerweise — mit weitreichenden Folgen. Weil die warmen Meeresströmungen durch unterschiedliche Salzgehalte zwischen Tiefen- und Oberflächenwasser in Richtung Europa vorangetrieben werden, käme mit der „Verdünnung“ der oberen Wasserschichten infolge des verstärkten Regens auch die Zirkulation des nordatlantischen Stromes zum Erliegen. „Damit verbunden fielen die größte natürliche Heizanlage Europas, der Golfstrom, aus“, beschreibt Claußen das Szenario. Das Erlahmen des wärmespendenden Strömungssystems käme dem Beginn einer neuen Eiszeit in Europa gleich.

Abb. 11: Zeitungsnotiz zur Klimaproblematik /12/

Literatur

- /1/ Musil: Robert: Der Mann ohne Eigenschaften. Reinbek: Rowohlt, 1972
- /2/ Lichtenberg, Georg Christoph: Werke und Briefe III. München: Hanser 1980
- /3/ Nordmeier, Volkhard; Schlichting, H. Joachim: Auf der Suche nach Strukturen komplexer Phänomene. In: Praxis der Naturwissenschaften- Physik 45 (1996)1, S. 22
- /4/ Schlichting, H. Joachim: Energie und Energieentwertung in Wissenschaft und Umwelt. Heidelberg: Quelle & Meyer 1993.
- /5/ Boysen, G. et al.: Physik für Gymnasien. Berlin: Cornelsen 1994. Gesamtband Länderausgabe D.
- /6/ Boysen, G. et al.: Oberstufe Physik. Berlin: Cornelsen 1997. Ausgabe A. Band 1.
- /7/ Prigogine, I., Stengers, I.: Dialog mit der Natur. München: Piper 1983.
- /8/ Gassmann, Fritz: Was ist los mit dem Treibhaus Erde. Stuttgart, Leipzig: Teubner 1994.
- /9/ Häckel, Hans: Meteorologie. Stuttgart: Ulmer 1993
- /10/ Roeder, Walter: Physik unserer Umwelt: Die Atmosphäre. Berlin etc.: Springer 1992, S. 160
- /11/ Vogel, H.: Gerthsen
- /12/ Georgescu, V.: Väterchen Frost als Dauergast. In: Frankfurter Rundschau vom 11.01.1997, S. 8