

Die Thermostat – Hypothese!

$$q \left(1 - \frac{T_L}{T_H} \right) \quad (\text{Bejan})$$

Die Stabilität der Erdtemperatur über lange Zeiträume der Vergangenheit war schon sehr lange ein klimatologisches Rätsel. Die Variation der Temperatur des Globus' lag bei +/- 3% (einschließlich der Eiszeiten) während mindestens der letzten halben Milliarde von Jahren, dem Zeitraum also, für den wir die Temperatur abschätzen können. Während des Holozäns variierte die Temperatur um weniger als 1%. Und auch während der Eiszeiten war die Temperatur im Allgemeinen genauso stabil.

Im Gegensatz zur Stabilität der globalen Temperatur gibt es seit langem Hinweise (Gough, 1981; Bahcall et al., 2001), dass die Strahlung der Sonne vor 4 Milliarden Jahren nur etwa drei Viertel des heutigen Wertes erreichte. Jedoch war es auf der Erde in frühen geologischen Zeiten nicht um den gleichen Betrag kälter. Proxy-Daten der Temperatur wie z. B. das Verhältnis zwischen Deuterium und Wasserstoff sowie der Sauerstoff-Isotope O16 und O18 zeigten keine Anzeichen für eine Erwärmung der Erde um 30% während dieser Zeit. Warum hat sich die Erde nicht erwärmt, die Sonne aber schon?

Dies nennt man das "Schwächeparadoxon der frühen Sonne" (Faint Early Sun Paradox) nach Sagan und Mullen, 1972. Normalerweise wird dies damit erklärt, dass in der frühen Erdatmosphäre viel mehr Treibhausgase enthalten waren als in der heutigen Atmosphäre.

Jedoch würde dies eine graduelle Abnahme des GHG-Forcings [Green House Gas] implizieren, die genau zu der Milliarden Jahre langen Zunahme der solaren Strahlung bis auf den heutigen Wert passen müsste. Dies erscheint sehr unwahrscheinlich.

Viel wahrscheinlicher ist, dass irgendein natürlicher Mechanismus die Globaltemperatur in geologischen Zeiträumen reguliert hat.

Bejan (Bejan 2005) hat gezeigt, dass das Klima grob als eine Wärmekraftmaschine modelliert werden kann, mit dem Ozean und der Atmosphäre als agierende Medien. Die Tropen sind das heiße Ende der Wärmekraftmaschine. Ein Teil der tropischen Hitze wird in den Weltraum abgestrahlt. Die agierenden Medien sorgen dafür, dass der übrige Anteil der Wärme zu den Polen transportiert wird. Dort, am kalten Ende der Wärmekraftmaschine, wird die [restliche] Wärme in den Weltraum abgestrahlt. Bejan hat gezeigt, dass die Existenz und räumliche Verteilung der Hadley-Zellen ein aus diesen Vorgängen ableitbares Ergebnis darstellen. Er zeigte auch, wie die Temperatur durch dieses System bestimmt wird.

"Wir verfolgen dies aus der Sicht der Konstruktion, die darin besteht, dass die (globale) Zirkulation selbst eine fließende Geometrie repräsentiert, die das Ergebnis der Maximierung des globalen Geschehens ist und globalen Einschränkungen unterliegt."

Die größte Kraft, die dieses zusammengesetzte System erzeugen kann, lässt sich mit dem reversiblen Betrieb eines Kraftwerkes vergleichen. Die Energieerzeugung in diesem Rahmen ist proportional zu

$$w = q \left(1 - \frac{T_L}{T_H} \right) \quad (\text{Bejan 2005})$$

Hier steht q für den gesamten Energiefluss des Systems (von den Tropen zu den Polen) und T_H und T_L für die höchsten und tiefsten Werte der Temperatur (aus den Tropen und den Polarregionen in Kelvin). Das System arbeitet unaufhörlich, um jenen Energieausstoß zu maximieren. Hier sieht man das ganze System dargestellt, das die Wärme von den Tropen zu den Polen transportiert.

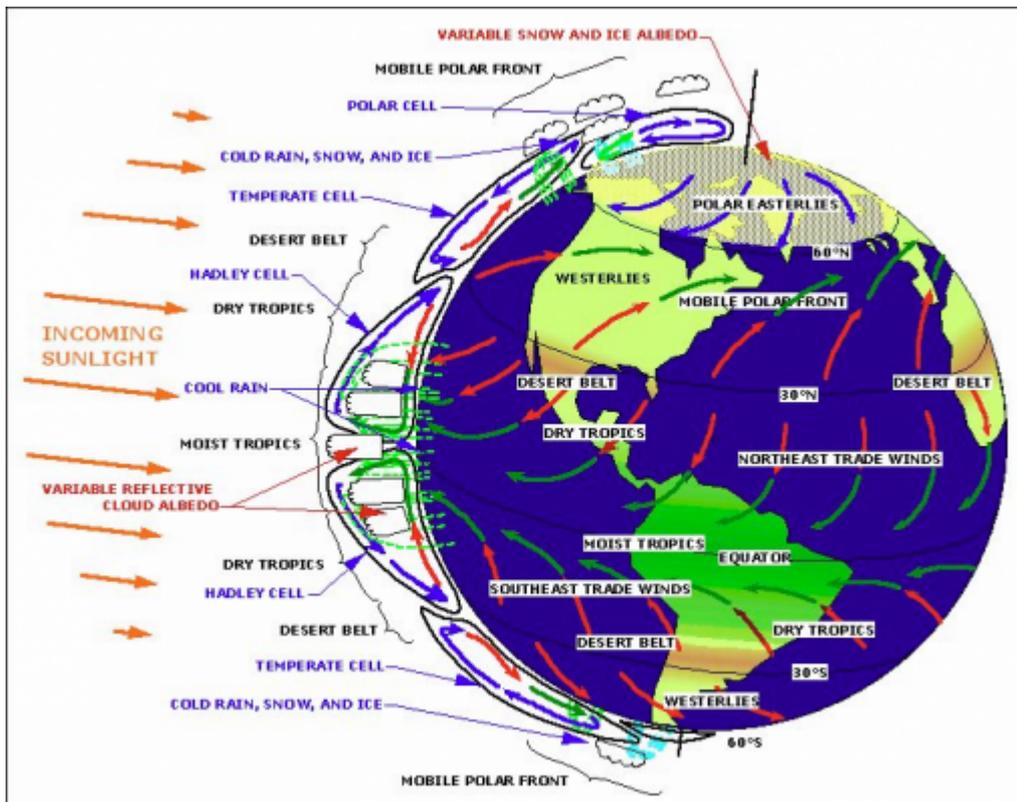


Abbildung 1: Die Erde als Wärmekraftmaschine.

Die subtropischen Hadley-Zellen liefern die Energie für das System. In den Tropen ist die Sonneneinstrahlung (orangene Pfeile) am stärksten, weil die Sonne dort am steilsten steht. Die Länge der orangenen Pfeile repräsentiert die relative Stärke der Sonnenstrahlung. Warme, trockene Luft sinkt um den 30. Breitengrad nördlicher und südlicher Breite ab und bildet die großen Wüstengürtel rings um den Globus. Die Wärme wird durch eine Kombination von Ozeanen und Atmosphäre zu den Polen transportiert. An den Polen wird die Wärme in den Weltraum abgestrahlt.

Mit anderen Worten, variable Systeme wie das Erdklima legen kein stabiles Temperaturregiment fest. Sie regenerieren ihre eigene Entwicklung dergestalt, dass sie die erzeugte und verbrauchte Energie maximieren. Es ist dieser dynamische Prozess, und nicht eine einfache lineare Transformation der Zusammensetzung der Gase in der Erdatmosphäre, der die allgemeine Temperaturspanne des Planeten bestimmt.

Man beachte: das Konstruktionsgesetz besagt, dass jedes sich in einer Umlaufbahn bewegende System danach strebt, sich „quasi zu stabilisieren“ in irgendeinem idealen Status. Dieser ideale Status wird aber nie erreicht. Im

Falle des Erdklimas ist dies der Zustand maximaler Energieproduktion und maximalem Energieverbrauch. Und dies wiederum impliziert, dass jeder wasserartige Planet eine ausgeglichene Temperatur aufweist, die aktiv durch das Fließsystem festgelegt wird. Siehe das Papier von Ou (unten) für ein besseres Verständnis dieses Systems.
Mechanismen, die das Klima bestimmen

Jede Wärmekraftmaschine hat ein Ventil. Das Ventil kontrolliert, wie viel Energie in die Maschine einfließt. In einem Auto nennt man dieses Ventil das Gaspedal. Es kontrolliert die eingehende Energie.

Die Stabilität der Temperatur auf der Erde mit der Zeit (einschließlich des Wechsels zwischen Eis- und Zwischeneiszeiten, die jeweils ebenfalls stabil waren), sowie theoretische Überlegungen lassen vermuten, dass diese Wärmekraftmaschine, die wir Klima nennen, irgendeine Art von Regulator haben muss, der das Ventil kontrolliert.

Während alle Wärmekraftmaschinen ein solches Ventil haben, enthalten nicht alle einen Regulator. In einem Auto ist ein solcher Regulator das Tachometer ("Cruise Control"). Es reguliert das Ventil (das Gaspedal). [Fast alle Autos in den USA haben eine Vorrichtung, mit der man eine bestimmte Geschwindigkeit konstant einstellen kann, ohne ständig das Gaspedal zu berühren. A. d. Übers.] Ein Regulator passt den Energiefluss zum Automotor an, um eine konstante Geschwindigkeit zu erreichen, unabhängig von äußeren Einflüssen (z. B. Berge, Wind, Effizienz und Verluste des Motors).

Man kann die Kandidaten für die Regulierung des Klimas eingrenzen indem wir erstens zur Kenntnis nehmen, dass ein Regulator das Ventil kontrolliert (welches im Gegenzug den Energiezufluss einer Wärmekraftmaschine kontrolliert). Zweitens gilt, dass ein erfolgreicher Regulator in der Lage sein muss, das System über das gewünschte Resultat hinaus zu treiben (overshoot).

(Beachte, dass sich ein Regulator, der ein Trägheitsloop enthält, von negativem Feedback unterscheidet. Ein negatives Feedback kann einfallende Energie höchstens reduzieren. Es kann nicht für ein Gleichgewicht sorgen, wenn verschiedene Antriebskräfte, variable Ladungen und veränderliche Verluste auftreten. Dies kann nur ein Regulator.)

Der größte Teil der Absorption von Wärme durch die Erde findet in den Tropen statt. Die Tropen bestehen wie die übrige Welt überwiegend aus Ozeanen; und die Landmassen dort sind nass. Mit einem Wort, die dampfenden Tropen. Es gibt kaum Eis dort, so dass es nur von der Bewölkung abhängt, wie viel Sonnenenergie in die Wärmekraftmaschine des Klimas eingeht.

Ich schlage zwei separate, in Wechselwirkungen stehende Mechanismen vor, die direkt den Wärmehaushalt der Erde regulieren – tropische Kumulus- und Kumulonimbus-Wolken. Kumuluswolken sind die flauschigen „Wattebälle“, die in relativ geringer Höhe über dem Erdboden an warmen Nachmittagen entstehen. Kumulonimbuswolken sind Gewitterwolken, die aber auch als kleine Kumuli beginnen. Beide Wolkentypen sind Teil des Ventils, das die eintreffende Strahlung kontrolliert und ggf. reduziert. Außerdem sind Kumulonimbuswolken selbst aktive Wärmekraftmaschinen, die den notwendigen Überschuss zur Verfügung stellen, um als Regulator des Systems zu fungieren.

Ein einfaches Gedankenexperiment zeigt, wie dieser Wolkenregulator wirkt. Es nennt sich „Ein Tag in den Tropen“.

Ich lebe mitten in den feuchten Tropen auf 9 Grad südlicher Breite mit Blick

auf den Pazifik von meinem Fenster aus. Der typische Wetterablauf an einem Tag sieht folgendermaßen aus. Tatsächlich ist es ein typischer Sommertag überall in den Tropen. Der Wetterbericht lautet so:

Klar und windstill bei der Morgendämmerung. Leichter Wind, gegen Mittag aufkommende Wolkenbildung. Weiter zunehmende Bewölkung am Nachmittag mit einzelnen Schauern und Gewittern. Aufklaren zum oder nach Sonnenuntergang, eventuell noch ein einzelnes Gewitter nach Einbruch der Dunkelheit.

Fortschreitendes Aufklaren bis zur Morgendämmerung.

Dies ist der allgemeine Tageszyklus tropischen Wetters, einfach genug, um überall in der Welt als Klischee zu dienen.

Dieser Ablauf wird angetrieben durch die Tag-/Nachtvariation der Stärke der Sonnenenergie. Vor der Morgendämmerung ist die Atmosphäre typischerweise ruhig und klar. Sobald der Ozean (oder feuchtes Land) sich erwärmt, steigen Temperatur und Verdunstung. Feuchte, warme Luft beginnt aufzusteigen. Dabei kühlt sich die Luft ab, und die Feuchtigkeit kondensiert zu Wolken. Die Wolken reflektieren das Sonnenlicht. Die Wolken verschließen das Ventil etwas und reduzieren so die einfallende Energie. Damit beginnen sie, das System abzukühlen. Dies ist der Anteil des negativen Feedback der Klimakontrolle durch die Wolken.

Die tropische Sonne ist stark, und trotz des negativen Feedback durch die Kumuluswolken wird es weiter wärmer. Je mehr die Sonne auf den Ozean scheint, umso mehr warme, feuchte Luft entsteht, und umso mehr Kumuluswolken bilden sich. Natürlich reflektieren diese noch mehr Sonnenlicht, so dass das Ventil noch etwas weiter geschlossen wird. Aber der Tag bleibt warm.

Die volle Entwicklung der Kumuli bildet die Bühne für den zweiten Teil der Temperaturregulation. Dies ist kein bloßes negatives Feedback. Es ist das klimaregulierende System. Mit weiter steigender Temperatur und Verdunstung verändern sich die flauschigen Kumuli plötzlich. Sie schießen nach oben und bilden Ambossformen; schießen Tausende von Metern hoch in den Himmel in kurzer Zeit. Die Kumuli haben sich in Kumulonimben oder Gewitterwolken verwandelt. Der säulenförmige Wolkenkörper des Gewitters wirkt wie eine gigantische vertikale Warmluftröhre. Das Gewitter saugt warme, feuchte Luft von den bodennahen Luftschichten und jagt sie in den Himmel. In der Höhe kondensiert der Wasserdampf, so dass die latente Wärme wieder in fühlbare Wärme umgewandelt wird. Die Luft erwärmt sich dadurch wieder [im Vergleich zur Umgebungsluft, A. d. Übers.] und steigt immer weiter nach oben.

An der Wolkenobergrenze wird die Luft aus der Wolke ausgeblasen, weit oberhalb des größten Teils des atmosphärischen Kohlendioxids. In dieser dünnen Atmosphäre kann die Luft viel leichter in den Weltraum abstrahlen. Durch die Bewegung im Wärmeschlauch des Gewitters umgeht die aufsteigende Luft die meisten Treibhausgase und wird erst wieder an der Obergrenze der Troposphäre ausgeblasen. Während des Transportes nach oben gibt es keine radiative oder interaktive Wechselwirkung zwischen der aufsteigenden Luft einerseits sowie der unteren und mittleren Troposphäre andererseits. Im Inneren des Gewitters wird die aufsteigende Luft kanalisiert und an der Obergrenze wieder ausgeblasen.

Zusätzlich zur Reflektion des Sonnenlichtes an der Obergrenze der Kumuli und des Wärmetransports in die obere Troposphäre, wo die Wärme leicht in den Weltraum abstrahlen kann, kühlen die Gewitter die Erdoberfläche auf vielfältige Weise, besonders über dem Ozean.

1. Durch Wind angetriebene Verdunstungskälte. Hat die Entwicklung des Gewitters erst einmal begonnen, bildet sich an der Basis ein eigenes Windsystem. Dieser selbstgenerierte Wind verstärkt die Verdunstung in vielfältiger Weise, besonders über dem Ozean.

a) Die Verdunstung nimmt linear mit der Windgeschwindigkeit zu. An einer typischen Squall-Linie mit einer Geschwindigkeit von 10 m/s ist die Verdunstung etwa zehnmals größer als unter „ruhigen“ Bedingungen (definitionsgemäß um 1 m/s).

b) Der Wind lässt die Verdunstung durch die Entstehung von Gischt und Sprühnebel sowie durch das Abtrocknen von Bäumen und Blättern zunehmen. Dies vergrößert die für die Verdunstung zur Verfügung stehenden Flächen erheblich, denn an der Gesamtoberfläche der Millionen von Tröpfchen verdunstet das Wasser genau so wie an der Erdoberfläche selbst.

c) In geringerem Umfang trägt auch die Erzeugung von Wellen durch den Wind zur Vergrößerung der Oberfläche bei (eine wellenförmige Oberfläche liefert einen größeren Beitrag zur Verdunstung als eine flache).

d) Durch Wind erzeugte Wellen wiederum lassen die Turbulenz in der Grenzschicht stark zunehmen. Dies verstärkt die Verdunstung, weil trockene Luft aus höheren Luftschichten bis zur Erdoberfläche herunter gewirbelt wird, während gleichzeitig feuchte Luft aufwärts weht.

e) Da sich der aufgewirbelte Sprühnebel rasch auf die Lufttemperatur erwärmt, die in den Tropen häufig höher ist als die Wassertemperatur, verstärkt sich die Verdunstung ebenfalls verglichen mit derjenigen an der Wasseroberfläche.

2. Durch den Wind zunehmende Albedo. Der Sprühnebel, Gischt und die weißen Wellenkämme sorgen für eine erhebliche Zunahme der Albedo der Meeresoberfläche. Dies reduziert die vom Ozean absorbierte Energie.

3. Kalter Regen und kalter Wind. Wenn die feuchte Luft durch den Wärmeschlauch in der Gewitterwolke steigt, kondensiert das Wasser und fällt aus. Da dieses Wasser aus Luftschichten mit Temperaturwerten unter dem Gefrierpunkt fällt, kühlt es die untere Atmosphäre, durch die es fällt, und die Oberfläche beim Auftreffen. Diese [selbst produzierte] Kaltluft weht radial aus dem Zentrum des fallenden Regens heraus und kühlt so auch die umgebende Luft.

4. Zunahme des Gebietes mit Reflektion. Weiße, flauschige Kumuli sind nicht groß und reflektieren [das Sonnenlicht] nur an ihrer Oberseite. Andererseits reflektiert der vertikale Luftschauch des Gewitters das Sonnenlicht auf der gesamten Länge. Dies bedeutet, dass Gewitterwolken eine viel größere Fläche beschatten als ihr eigener horizontaler Durchmesser, vor allem am späten Nachmittag.

5. Modifizierung hochtroposphärischer Wolken aus Eiskristallen (Linden [Lindzen?] 2001, Spencer 2007). Diese Wolken bilden sich aus den winzigen Eispartikelchen, die aus der Wärmekraftmaschine des Gewitters ausgeblasen werden. Es scheint so, als ob die regulatorische Wirkung dieser Wolken eine größere Auswirkung haben, da man von ihnen glaubt, dass sie eher wärmend (wegen der Absorption von IR) als abkühlend wirken (durch Reflektion).

6. Verstärkte nächtliche Ausstrahlung. Anders als langlebige Stratusbewölkung

lösen sich Kumuli und Kumulonimben im Allgemeinen zur Nacht auf, bis zu dem typischen klaren Himmel der Morgendämmerung. Dies gestattet eine verstärkte Wärmeabstrahlung in den Weltraum.

7. Absinken trockener Luft bis zur Oberfläche. Die oben aus dem Gewitter ausgeblasene Luft sinkt als Gegengewicht außerhalb der Wolke wieder ab. Diese absinkende Luft ist sehr trocken, denn beim Aufsteigen hat sie fast ihre gesamte Feuchtigkeit durch Kondensation in der Gewitterwolke abgegeben. Je trockener diese Luft ist, umso mehr Feuchtigkeit kann sie bis zum erneuten Aufsteigen aufnehmen. Dies verstärkt die verdunstungsbedingte Abkühlung der Erdoberfläche.

Indem sie eine solche Fülle abkühlender Mechanismen zur Folge haben, sorgen Kumuli und Gewitterwolken extrem effektiv für eine Abkühlung der Oberfläche. Zusammen bilden sie den Regulator für die Temperatur in den Tropen.

Aber wo ist dieser Mechanismus?

Das Problem bei meinem Gedankenexperiment, [das Wetter an] einem typischen tropischen Tag zu beschreiben, liegt darin, dass es sich ständig ändert. Die Temperatur steigt und fällt, die Wolken bilden sich und fallen wieder zusammen, der Tag wechselt zur Nacht und umgekehrt, die Jahreszeiten kommen und gehen. Wo in all dieser ewigen Änderung ist der regulatorische Mechanismus? Wenn sich alles fortwährend ändert, was sorgt dafür, dass es Monat für Monat und Jahr für Jahr das Gleiche ist? Wenn die Bedingungen immer unterschiedlich sind, was hindert sie daran, den Rahmen zu sprengen (to run off the rails)?

Wenn man die Wirkung des Regulators beobachten will, braucht man einen anderen Standpunkt. Man braucht eine zeitlose Betrachtung ohne Jahreszeiten und ohne den Wechsel von Tag und Nacht. Und komischerweise gibt es in diesem „Ein Tag in den Tropen“ genannten Gedankenexperiment tatsächlich einen solchen zeitlosen Standpunkt, bei dem es nicht nur keinen Tages- und Nachtrhythmus gibt, sondern bei dem es auch immer Sommer ist.

Der Standpunkt ohne Tag und Nacht, von dem aus wir die Wirkung des Regulators beobachten können, ist der Standpunkt der Sonne. Man stelle sich vor, man beobachte die Erde von der Sonne aus. Aus diesem Blickwinkel gibt es Tag und Nacht nicht. Alle Teile der sichtbaren Erde liegen fortwährend im Sonnenlicht. Und unter der Sonne ist immer Sommer.

Wenn wir die allgemeine Definition akzeptieren, dass Norden oben liegt, bewegt sich die sichtbare Erdoberfläche von links nach rechts durch die Erdrotation. Also befindet sich der linke Rand der sichtbaren Erdoberfläche immer beim Sonnenaufgang und der rechte Rand immer beim Sonnenuntergang. Der Mittag liegt in einer vertikalen Linie unterhalb der Sonne in der Mitte. Von diesem zeitlosen Standpunkt aus ist der Morgen immer und ewig links, der Nachmittag rechts zu finden. Kurz gesagt haben wir auf diese Weise die Zeitkoordinaten durch die Koordinaten des Weltraumes ersetzt. Dies macht die Wirkung des Regulators anschaulich.

Die Tropen erstrecken sich von links nach rechts über die runde sichtbare Oberfläche. Am linken Ende der Tropen, nach dem Sonnenaufgang, erkennt man nur sehr wenige Wolken. Die Wolken nehmen immer mehr zu, je weiter man auf diesem Band nach rechts wandert. Um die Mittagszeit gibt es schon recht viele Kumuli, während weiter rechts immer mehr Kumuli und auch eine zunehmende Zahl

von Gewitterwolken weite Gebiete der Tropen überdecken.

Es ist, als ob es einen abgestimmten Spiegel [zur Reflektion des Sonnenlichtes] über den Tropen gibt, mit den wenigsten Wolken spiegeln links, die allmählich immer mehr zunehmen bis zur ausgedehnten Bewölkung und den Gewittern rechts.

Nach der Bildung der Hypothese, dass aus Sicht der Sonne die rechte Seite der Tropen stärkere Bewölkung aufweist als die linke, dachte ich „Hey, das ist eine überprüfbare Position, um meine Hypothese zu stützen oder zu zerstören“. Um zu untersuchen, ob die postulierte stärkere Bewölkung im rechten Teil der Erdoberfläche wirklich existiert, habe ich ein Mittel von 24 Bildern vom Pazifik aneinander gereiht, jeweils aufgenommen am 1. und am 15. eines jeden Monats über ein ganzes Jahr. Daraus ermittelte ich die mittlere Änderung der Albedo und daraus folgend die Änderung des Antriebs zu jeder Zeit. Hier ist das Ergebnis:

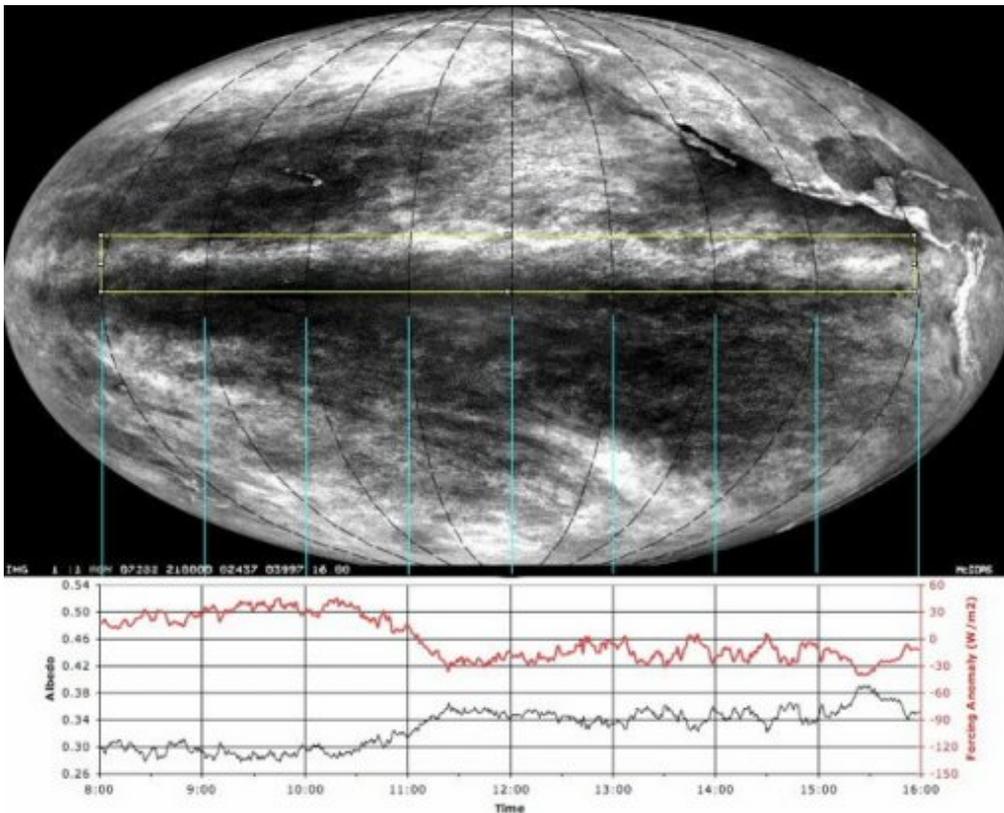


Abbildung 2. Ein-Jahres-Mittel von Satellitenbildern des Satelliten GOES-West aufgenommen jeweils zur Mittagszeit lokal unter dem Satelliten.

Die innertropische Konvergenz erkennt man an dem hellen Band in dem gelben Rechteck. Die lokale Zeit wird durch die blauen Linien im Bild angezeigt. Die Uhrzeiten stehen unter den zugehörigen Graphen. Die rote Linie in der Graphik zeigt die Anomalie der Sonnenstrahlung (in Watt pro Quadratmeter) in der gelb umrandeten Fläche. Der schwarze Graph zeigt die Albedo in diesem Gebiet. Die Graphik unter dem Bild zeigt die Albedo und die Solarstrahlung im [Bereich des] gelben Rechtecks um die innertropische Konvergenz. Man beachte die starke Zunahme der Albedo zwischen 10.00 und 11.30 Uhr. Sie sehen den Mechanismus, der dafür sorgt, dass die Erde sich nicht überhitzt. Er sorgt für eine Änderung der Sonnebestrahlung von -60 W/m^2 zwischen zehn Uhr und Mittag.

Nun überlegen Sie, was passiert, wenn es aus irgendwelchen Gründen in den

Tropen etwas kühler ist. Die Sonne braucht dann länger, die Oberfläche zu erwärmen. Die Verdunstung setzt erst später am Tag ein. Wolken bilden sich nur zögernd. Die Gewitter bilden sich später, es bilden sich weniger davon, und wenn es nicht warm genug ist, bilden sich diese riesigen, die Oberfläche kühlenden Wärmekraftmaschinen überhaupt nicht.

Und aus der Sicht der Sonne verlagert sich die Reflektionstätigkeit nach rechts, so dass mehr und längere Zeit die Sonne scheint. Die Reduzierung der Sonnenstrahlung um 60 W/m^2 findet erst später am Tag statt, so dass die lokale Einstrahlung zunimmt.

Wird es in den Tropen hingegen ein wenig wärmer als normal, verschiebt sich die Reflektion nach links, und Wolken bilden sich früher. Heiße Nachmittage begünstigen die Bildung von Gewittern, die die Oberfläche kühlen. Auf diese Weise sorgt eine sich selbst justierende Abkühlung im Schatten von Gewitterwolken dafür, dass sich die Temperatur am Nachmittag in Grenzen hält. Nun haben einige Wissenschaftler behauptet, dass Wolken ein positives Feedback haben. Aus diesem Grunde sollen Gebiete mit mehr Wolken wärmer werden als Gebiete mit weniger Wolken. Dieses positive Feedback wird als Ursache dafür gesehen, dass Wolken und Wärme miteinander korreliert sind. Ich und andere vertreten eine entgegengesetzte Auffassung. Ich sage, dass die Wolken durch die Erwärmung entstehen, und nicht die Erwärmung durch die Wolken.

Glücklicherweise gibt es Wege, um abzuschätzen, ob Änderungen der Reflektivität durch die Wolkenschirme und Gewitter in den Tropen durch steigende Temperaturen begünstigt werden (und diese damit begrenzen), oder ob eine Zunahme der Wolken die Temperatur allgemein steigen lässt. Das heißt, man muss die Änderung in der Albedo zusammen mit der Änderung der Temperatur betrachten. Hier folgen zwei Ansichten der Albedo in den Tropen im Abstand von sechs Monaten. Der August ist der wärmste Monat in der Nordhemisphäre. Die Sonne befindet sich nördlich [des Äquators]. Beachte die hohe Albedo (hellblaue Gebiete) über Nordafrika, China und die nördlichen Gebiete von Süd- und Mittelamerika. Im Gegensatz dazu ist die Albedo in Brasilien, Südafrika und Indonesien/Australien gering.

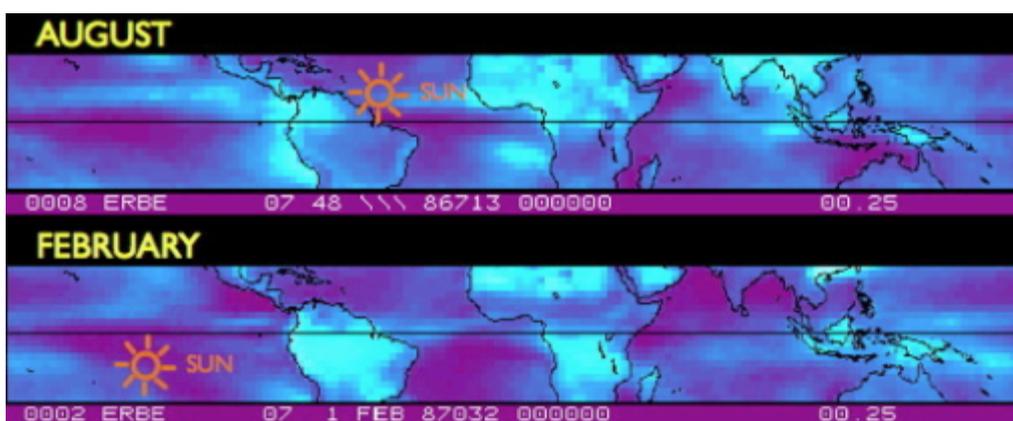


Abbildung 3. Monatliche mittlere Albedo. Beide Darstellungen liegen ein halbes Jahr auseinander.

Im August herrscht auf der Nordhemisphäre, im Februar auf der Südhemisphäre Hochsommer. Hellblaue Gebiete zeigen die höchste Reflektivität (die größte Albedo).

Im Februar steht die Sonne im Süden. Die Verteilung der Albedo ist umgekehrt.

In Brasilien und Südafrika sowie Australien ist es warm unter der Sonne. Als Reaktion darauf bilden sich die Wolken, so dass diese Gebiete nun eine hohe Albedo aufweisen. Im Gegensatz dazu ist die Albedo im Norden niedrig, mit Ausnahme der hohen Reflektion in den Wüsten Sahara und Rub Al Khali. Man erkennt ganz klar, dass die Wolkenalbedo (von Kumuli und Kumulonimben) dem Sonnenstand folgt und die Erde vor der Überhitzung bewahrt. Dies zeigt ziemlich eindeutig, dass die Wolken sich infolge der Wärme bilden und nicht umgekehrt.

Unabhängig davon zeigen diese Bilder auch auf andere Weise, dass die Wärme die Wolkenbildung auslöst. Bekanntlich erwärmt sich das Festland im Sommer stärker als der Ozean. Wenn wirklich die Temperatur die Wolkenbildung steuert, müsste es über Land eine größere Änderung der Albedo geben als über dem Ozean. Und das ist ganz klar der Fall. Man erkennt im Nordpazifik und im Indischen Ozean, dass mit der Sonne die Albedo zunimmt, besonders dort, wo das Wasser flach ist. Aber die Änderungen über Land sind allgemein viel größer als die Änderungen über dem Ozean. Auch dies zeigt, dass sich die Wolken infolge der Erwärmung bilden und diese dadurch limitieren.

Wie der Regulator funktioniert

Die Bildung tropischer Kumulus- und Gewitterwolken wird durch die Dichte der Luft bestimmt. Die Dichte ist eine Funktion von Temperatur (die die Dichte direkt beeinflusst) und Verdunstung (Wasserdampf ist leichter als Luft). Ein Gewitter ist sowohl eine sich selbst erzeugende als auch eine sich selbst erhaltende Wärmekraftmaschine. Die beteiligten Faktoren sind mit Feuchtigkeit geladene warme Luft und flüssiges Wasser. Sich selbst erzeugend bedeutet, dass immer dann, wenn es über tropischen Ozeanen warm genug wird, was fast jeden Tag geschieht, und wenn Temperatur und Feuchtigkeit ein bestimmtes Maß erreichen, die flauschigen Kumuli plötzlich explodieren. Die Wolken schießen nach oben und zeigen die fortschreitende Entwicklung der feuchtwarmen Luft. In der Höhe verlässt die aufsteigende Luft die Wolke und wird durch von unten nachströmende feuchte Luft ersetzt. Auf einmal wird aus einer friedlichen Wolke ein aktives Gewitter.

Sich selbst erzeugend heißt, dass sich Gewitterwolken spontan als eine Funktion von Temperatur und Feuchtigkeit bilden. Oberhalb des Gemenges, das für die Bildung des ersten Gewitters erforderlich ist, nimmt die Anzahl der Gewitter rasch zu. Diese rasche Zunahme der Gewitteraktivität begrenzt den möglichen Temperaturanstieg, [den es ohne diese Wolken geben würde].

Sich selbst erhaltend heißt, wenn ein Gewitter erst einmal entstanden ist, braucht es nicht mehr die volle Auslösetemperatur, um sich zu erhalten. Der Grund hierfür ist durch das sich bildende Windsystem an der Basis sowie durch von oben absinkende trockene Luft die Verdunstungsrate erheblich zunimmt. Das Gewitter wird durch die Dichte der Luft getrieben. Es braucht eine Quelle leichter, feuchter Luft. Die Dichte der Luft wird bestimmt sowohl durch die Temperatur als auch durch den Feuchtegehalt (komischerweise ist Wasserdampf mit einem Molekulargewicht von 16 nur wenig mehr als halb so schwer wie Luft mit einem Molekulargewicht etwa bei 29).

Die Verdunstung ist nicht nur abhängig von der Temperatur, sondern vielmehr von einer komplexen Mischung aus Windgeschwindigkeit, Wassertemperatur und Dampfdruck. Die Verdunstung wird mit einer statistischen Formel berechnet [...by what is called a „bulk Formula“], was bedeutet, dass diese Formel ein

Erfahrungswert ist und nicht auf irgendeiner Theorie basiert. Eine allgemein benutzte Formel lautet:

$$E = VK(es - ea)$$

Hier bedeutet:

E = Verdunstung

V= Windgeschwindigkeit (als Funktion des Temperaturgegensatzes[?T])

K = ein konstanter Koeffizient

es = Dampfdruck an der verdunstenden Oberfläche (als Funktion der Wassertemperatur in Grad Kelvin zur vierten Potenz [?])

ea = Dampfdruck der darüber liegenden Luft (Funktion von relativer Luftfeuchtigkeit und Lufttemperatur in Grad Kelvin zur vierten Potenz)

In dieser Formel ist hauptsächlich zu beachten, dass die Verdunstung linear von der Windgeschwindigkeit abhängt. Das heißt, dass die Verdunstung in der Nähe eines Gewitters um eine Größenordnung höher sein kann als in kurzer Entfernung davon.

Zusätzlich zur Änderung der Verdunstung gibt es zumindest noch einen anderen Mechanismus zunehmender Wolkenbildung bei zunehmendem Wind, und zwar die Entstehung von Salzkristallen aus dem Ozean. Sich brechende Wellen bei starkem Wind erzeugen diese mikroskopisch kleinen Salzkristalle. Sie bilden die Hauptquelle der Kondensationskerne für Wolken, die sich über dem Ozean bilden. Die Erzeugung dieser zusätzlichen Kondensationskerne zusammen mit einer verstärkten Verdunstung führt zu größeren und schnelleren Änderungen der Wolkenbildung mit steigender Temperatur.

Also bedeutet zusätzliche Verdunstung durch den Wind, dass die Temperatur bei der Gewitterbildung bei gleicher Luftdichte unter der Auslösetemperatur liegen kann. Dies wiederum bedeutet, dass das Gewitter auch dann aktiv bleibt, wenn es die Oberfläche bis weit unter die Auslösetemperatur abkühlt. Dieses Vermögen, die Temperatur unter die Auslösetemperatur zu drücken, unterscheidet den Regulator vom negativen Feedback. Ein Gewitter kann mehr als nur die Bodenerwärmung zu begrenzen. Es kann mechanisch die Oberfläche unter die erforderliche Auslösetemperatur abkühlen. Das erlaubt es dem Gewitter, eine bestimmte Temperatur in der Region rings um das Gewitter festzulegen.

Eine Schlüsselfunktion dieser Kontrollmethode (Veränderungen einfallender Energie, Arbeit, zunehmende Wärmeverluste, die den Temperaturanstieg bremsen) liegt darin, dass das Gleichgewicht der Temperatur nicht bestimmt wird durch Änderungen der [Wärme]verluste oder durch Änderungen des Antriebs im System. Das Gleichgewicht der Temperatur wird bestimmt durch Wind, Wasser und Wolken in Abhängigkeit von steigender Temperatur, und nicht durch die Effizienz oder die Menge der in das System eingehenden Energieflüsse.

Außerdem wird das Gleichgewicht der Temperatur nur unwesentlich durch Änderungen der Stärke der Solarstrahlung beeinflusst. Nimmt diese Strahlung ab, verringert sich die Verdunstung, was die Wolkenbildung vermindert und wiederum mehr von der Sonnenstrahlung zur Erdoberfläche durchkommen lässt. Dies ist die wahrscheinliche Antwort auf die schon lange im Raum stehende Frage, wie die globale Temperatur selbst in den geologischen Zeiträumen so stabil sein konnte, in denen die Stärke der Sonnenstrahlung markant zugenommen hat.

Allmähliche Variationen des Gleichgewichts und des Antriebs

Falls die Thermostat-Hypothese zutrifft und die Erde tatsächlich ein aktiv bestimmtes Gleichgewicht der Temperatur aufweist, was ist dann der Grund für die langsamen Veränderungen und Verschiebungen der Temperatur, die man sowohl in historischen als auch in geologischen Zeiträumen beobachtet hat?

Wie Bejan gezeigt hat, ist ein bestimmender Faktor der Temperaturentwicklung, wie effizient die ganze globale Wärmekraftmaschine die Terawatt von Energie von den Tropen zu den Polen transportiert. In geologischen Zeiträumen sind die Anordnung, die räumliche Verteilung und die Höhe von Landmassen offensichtlich ein sehr großer Faktor in dieser Hinsicht. Darin liegt auch der heutige Hauptunterschied zwischen der Arktis und der Antarktis. Die fehlende Landmasse in der Arktis bedeutet, dass unter dem Eis warmes Wasser zirkuliert. In der Antarktis ist es kalt bis in die Knochen...

Außerdem stellt die ozeanische Geographie, die die Meeresströme beeinflusst, die warmes Wasser in Richtung der Pole und kaltes Wasser in Richtung Äquator transportieren, ebenfalls einen großen Faktor der aktuellen Temperatur in der globalen Wärmemaschine dar.

In kürzeren Zeiträumen könnte es allmähliche Änderungen der Albedo geben. Die Albedo ist eine Funktion von Windgeschwindigkeit, Verdunstung, Dynamik der Wolken und (zu einem geringeren Grad) Schnee und Eis. Verdunstungsraten werden durch die Gesetze der Thermodynamik bestimmt, so dass lediglich Windgeschwindigkeit, Dynamik der Wolken sowie Schnee und Eis das Gleichgewicht beeinflussen können.

Die Veränderlichkeit des Gleichgewichts der Temperatur könnte beispielsweise das Ergebnis einer weltweiten Änderung der mittleren Windgeschwindigkeit sein. Die Windgeschwindigkeit reguliert den Wellengang in den Ozeanen, und es kommt zu langfristigen Änderungen in der Wechselwirkung zwischen Ozean und Atmosphäre. Diese Änderungen der Windgeschwindigkeit könnten das Gleichgewicht der Temperatur auf zyklische Weise verändern.

Oder es könnte zusammen hängen mit einer generellen Änderung von Farbe, Typ oder Ausdehnung von Wolken und/oder Schnee und Eis. Die Albedo hängt ab von der Farbe der Oberfläche, die die Energie reflektiert. Wenn sich diese Reflektionen aus irgendwelchen Gründen ändern, könnte dies das Gleichgewicht der Temperatur beeinflussen. Die Reflektionseigenschaften von Schnee und Eis ändern sich durch Russablagerungen auf der Oberfläche, was zu verstärktem Schmelzen führen könnte. Die Reflektion von Wolken ändert sich durch eine Farbveränderung durch Aerosole oder Staub.

Schließlich könnten die Veränderungen des Temperaturgleichgewichtes auch mit der Sonne zusammen hängen. Die Variation der magnetischen [Felder] und des Sonnenwindes könnten groß genug sein, um Veränderungen hervorzurufen. Es gibt starke Hinweise darauf, dass die Bewölkungsmenge beeinflusst wird durch den 22-jährigen Hale-Zyklus, und diese 14-jährige Aufzeichnung überdeckt nur einen Teil davon.

Schlussfolgerungen und Ausblick

1. Die Sonne stößt mehr Energie aus, als nötig ist, um die Erde zu rösten. Aber sie wird daran gehindert durch die Wolken, die etwa ein Drittel der einfallenden Sonnenstrahlung zurück in den Weltraum reflektieren. So weit wir heute wissen, hat dieses System der Wolkenbildung zur Begrenzung des Temperaturanstiegs noch nie versagt.

2. Dieser reflektierende Wolkenschirm bildet sich in den Tropen als Folge steigender Temperatur.

3. Sofern die Temperatur weiter steigt, wird der reflektierende Wolkenschirm verstärkt durch Wärmekraftmaschinen, genannt Gewitter. Diese kühlen die Erdoberfläche auf vielfältige Weise, transportieren Wärme nach oben und verwandeln Wärme in Arbeit.

4. Wie auch die Kumuli bilden sich Gewitter als Folge steigender Temperatur.

5. Weil sie von der Temperatur angetrieben werden, wenn die Temperatur in den Tropen steigt, nimmt die Bildung von Gewittern und Kumuluswolken zu. Diese Kombination reguliert und begrenzt den Temperaturanstieg. Wenn die Temperatur der Tropen niedrig ist, klart der tropische Himmel auf, und die Erde erwärmt sich rasch. Aber wenn es in den Tropen heißer wird, begrenzen Kumuli und Kumulonimben diese Erwärmung. Dieses System hält die [Temperatur der] Erde innerhalb eines schmalen Bandes von Temperaturwerten.

6. Das System zur Regulierung der Erdtemperatur basiert auf den unveränderlichen Gesetzen der Physik von Wind, Wasser und Wolken.

7. Dies ist eine vernünftige Erklärung dafür, wie die Temperatur der Erde Hunderte von Millionen Jahren so stabil war (oder besser, zweifach stabil in Kalt- und Warmzeiten).

Willis Eschenbach, Tuvalu. [Die Originalversion erschien zuerst bei Watts Up hier](#)

dankenswerterweise übersetzt von Chris Frey EIKE
Weiterführende Literatur

Bejan, A, and Reis, A. H., 2005, Thermodynamic optimization of global circulation and climate, Int. J. Energy Res.; 29:303–316. Available at http://homepage.mac.com/williseschenbach/.Public/Constructal_Climate.pdf

Richard S. Lindzen, Ming-Dah Chou, and A. Y. Hou, 2001, Does the Earth Have an Adaptive Infrared Iris?, doi:

10.1175/1520-0477(2001)082<0417:DTEHAA>2.3.CO;2

Bulletin of the American Meteorological Society: Vol. 82, No. 3, pp. 417–432. Available online at

[http://ams.allenpress.com/pdfserv/10.1175%2F1520-0477\(2001\)082%3C0417:DTEHAA%3E2.3.CO%3B2](http://ams.allenpress.com/pdfserv/10.1175%2F1520-0477(2001)082%3C0417:DTEHAA%3E2.3.CO%3B2)

Ou, Hsien-Wang, Possible Bounds on the Earth's Surface Temperature: From the Perspective of a Conceptual Global-Mean Model, Journal of Climate, Vol. 14, 1 July 2001. Available online at

<http://ams.allenpress.com/archive/1520-0442/14/13/pdf/i1520-0442-14-13-2976.pdf>