

Das Energie-Ungleichgewicht der Erde: Teil II

geschrieben von Chris Frey | 14. März 2025

Kevin Kilty

[Teil I dieser Reihe](#) [in deutscher Übersetzung hier] konzentrierte sich auf die Datenquellen, die ein Energie-Ungleichgewicht belegen, die Größenordnung dieses Energie-Ungleichgewichts und die wahrscheinliche Unsicherheit dieser Größenordnung. Messungen deuten darauf hin, dass diese Größenordnung höchstwahrscheinlich bei $0,76 \text{ W/m}^2$ liegt, aber die Unsicherheit wird optimistisch mit nur $0,1$ angegeben. Selbst die Autoren wissenschaftlicher Berichte geben zu, dass ihre Unsicherheit nicht alle Faktoren einschließt, insbesondere Instrumenten- und Verarbeitungsfehler. Der größte Teil (89 %) dieses Energie-Ungleichgewichts führt zur Erwärmung der Ozeane.

Teil II untersucht die Klima-Rückkopplung, ihr mögliches Ausmaß und die wahrscheinliche Unsicherheit. In Teil III werde ich mich, wenn ich dazu komme, darauf konzentrieren, ob die Erde einen Regulator besitzt oder nicht, d. h. ob es einen physikalischen Prozess gibt, der die Reaktion auf ein solches Ungleichgewicht in der Zukunft begrenzt. Insbesondere wird Teil III den merkwürdigen Status des Prinzips von Le Chatelier untersuchen, auf das man sich in letzter Zeit oft beruft, um anzudeuten, dass es einen solchen Regulierungsprozess geben muss.

Die Standard-Sichtweise

Es ist am besten, mit dem Standardargument zu beginnen, warum ein Anstieg des CO_2 die Temperatur erhöhen wird. Dann hinterfragen wir dieses Argument. Abbildung 1 stammt aus einem Übersichtsartikel von Held und Soden (im Folgenden H&S) aus dem Jahr 2000 [1], der jedoch 2006 weitgehend wiederholt wurde.[2] Ich kann es nicht besser erklären, als H&S selbst zu paraphrasieren. Ihr Übersichtsartikel erklärt meiner Meinung nach die Standardansicht so klar und einfach wie nichts anderes, das ich gelesen habe.

Um das Energiegleichgewicht aufrechtzuerhalten, muss die Erde den Anteil von 240 W/m^2 der absorbierten Sonnenstrahlung, den sie erhält, in den Weltraum zurückstrahlen. Um dies auszugleichen, müsste ein Schwarzer-Körper-Strahler eine Temperatur von 255 K ($240 = \sigma T_e^4$) haben, die wir als Emissionstemperatur T_e bezeichnen wollen. Diese Temperatur tritt in einer Höhe über der Oberfläche auf, die wir Z_e nennen. Wie in Abbildung 1 dargestellt, könnte man sich vorstellen, dass ein durchschnittliches Infrarotphoton aus der Nähe dieser Höhe in den Weltraum entweicht.

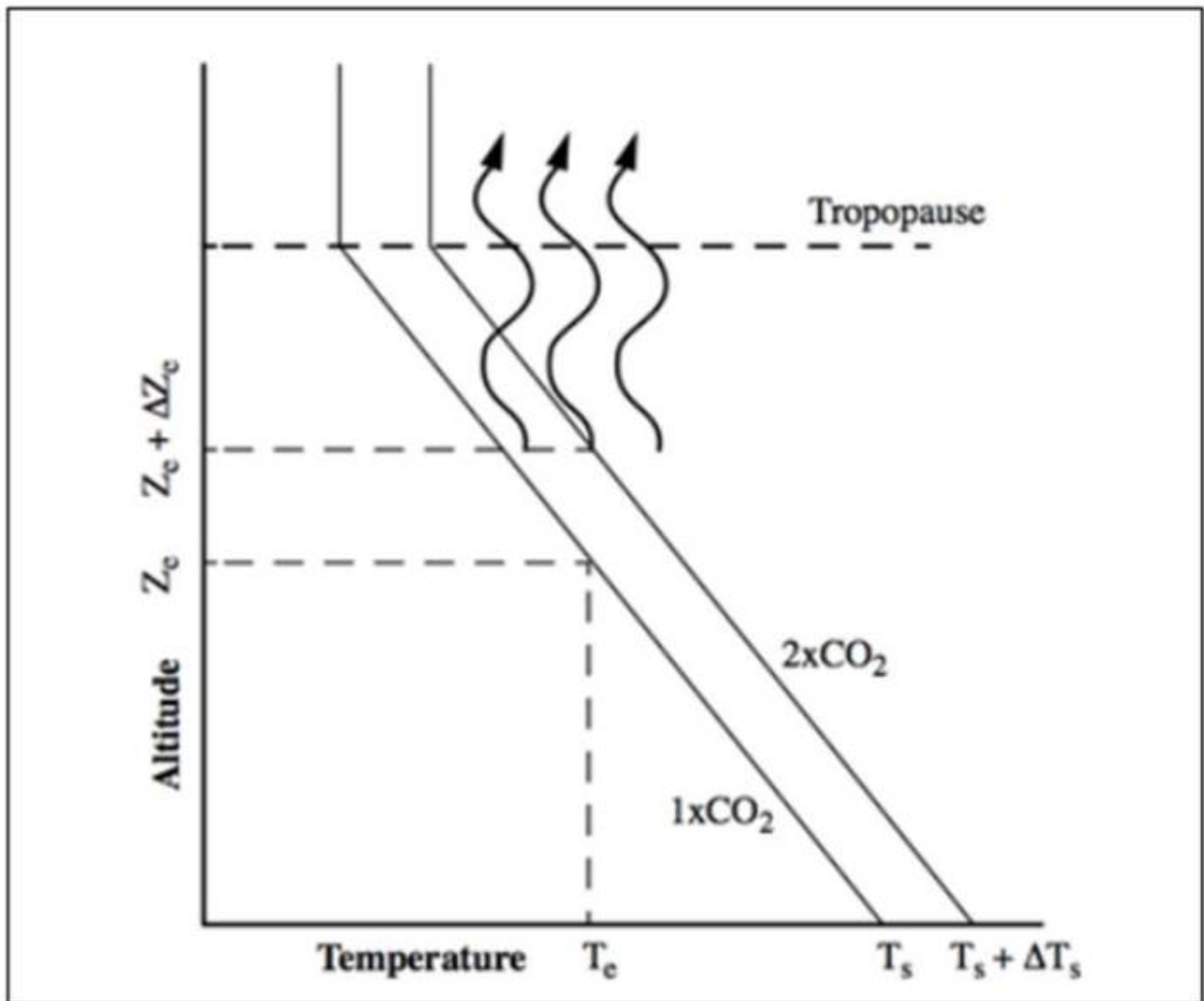


figure 1 Held & Soden (2000)

H&S sagen: „Es ist eine grobe Vereinfachung anzunehmen, dass sich die Temperaturgradienten innerhalb der Troposphäre nicht ändern, wenn sich das Klima erwärmt, aber diese einfache Annahme hat sich als sehr nützlicher Bezugspunkt erwiesen...“

Bei festem T_e und festem Gradienten (Konvektionsrate Γ) ist die Temperatur dann: $T_s = T_e + \Gamma Z_e$. In diesem einfachen Modell spielen nur Änderungen von Z_e eine Rolle. Die Argumentation geht nun in die folgende Richtung:

Eine erhöhte CO₂-Konzentration in der Atmosphäre macht die Atmosphäre für die von der Oberfläche ausgehende Infrarotstrahlung undurchsichtiger. Um also eine CO₂-verdoppelte Atmosphäre zu haben, die oberhalb von Z_e gleich transparent ist, damit das durchschnittliche Photon entweichen kann, muss sich Z_e höher in der Atmosphäre befinden. Eine Verdopplung von CO₂ macht die undurchsichtige Atmosphäre oberhalb von $Z_e + 150\text{m}$ gleich transparent. Der konstante Gradient von 6,5 K/km bedeutet jedoch, dass die Temperatur in $Z_e + 150\text{m}$ um etwa 1 K niedriger ist, und nach dem Stefan-Boltzmann-Gesetz bedeutet dies eine Verringerung der ausgehenden Strahlung um etwa 4W/m^2 ($236,3 = \sigma 254^4$). Es

entsteht ein Energie-Ungleichgewicht, das die gesamte Atmosphäre und Oberfläche erwärmt.

Wasserdampf-Konzentration

Die Auswirkungen hören an diesem Punkt nicht auf. Die gesamte Atmosphäre ist nun 1 K wärmer, und an der Erdoberfläche führt diese höhere Temperatur nach der Clausius-Clapeyron-Beziehung zu einem Anstieg des Wasserdampfdrucks bei Sättigung um etwa 7 %. Dadurch wird die Atmosphäre noch undurchsichtiger, und der Ze-Wert steigt erneut. Der Prozess wiederholt sich, konvergiert aber zu einem neuen Gleichgewicht bei einer Erhöhung der Temperatur um $1/(1-\beta_{H_2O})$, wobei $\beta_{H_2O}=0,4$ der Rückkopplungsfaktor für Wasserdampf ist. Wie H&S in ihrer Studie von 2006 sagen, sind *„eine Reihe wichtiger Aspekte der hydrologischen Reaktion auf die Erwärmung eine direkte Folge des Anstiegs des Wasserdampfs in der unteren Troposphäre.“*

Meine Kritik

Auch wenn H&S zugeben, dass dieses Modell eine zu starke Vereinfachung darstellt, wollen wir dennoch die wichtigsten Elemente in der Reihenfolge ihres Auftretens überprüfen.

Bei 255 K gibt es keine Emissions-Oberfläche.

Erstens scheint man buchstäblich an eine Emissionsfläche in der mittleren Troposphäre mit einer Temperatur von 255 K zu glauben, die wie ein schwarzer Körper strahlt. Mit anderen Worten, sie betrachten das Problem als ein typisches Randwertproblem, bei dem die Oberfläche als eine Grenze und eine imaginäre Schicht darüber als die andere Grenze fungiert. Während sich die Oberfläche wie ein nahezu schwarzer Körper verhält (Emissionsgrad = 0,97), ist die klare Atmosphäre nirgends so emittierend, dass eine dünne Schicht wie ein schwarzer Körper wirken würde. H&S selbst sagen in einer anderen Veröffentlichung [3]: *„...Aufgrund ihres viel größeren Emissionsvermögens ist der Beitrag der Oberfläche um eine Größenordnung größer als der einer einzelnen 100-mb-Atmosphärenschicht.“* Stattdessen entweicht die kompensierende ausgehende LWIR über einen breiten vertikalen Bereich der Atmosphäre, der für einige Wellenlängen direkt an der Oberfläche beginnt.[4] Die obere Grenze dieses Problems ist komplex.

Anstelle eines einzigen Freiheitsgrades Ze, der die Temperatur festlegt, gibt es viele verschiedene Konfigurationen, die diese Aufgabe erfüllen. Die Emissionsfläche hat eine komplizierte, sich ständig ändernde Konfiguration. Während der Gedanke einer Vergrößerung der Emissionsfläche eine mögliche Reaktion ist, könnte eine von oben entfeuchtete Atmosphäre, wie sie der Niederschlag bewirkt, die durchschnittliche Emissionsfläche tiefer in die Atmosphäre verlagern, ohne die Temperatur wesentlich oder überhaupt zu verändern [5].

Strahlungs-Konvektions-Gleichgewichts-Doktrin

Zweitens ist der unveränderliche Wert von 6,5 K/km für den Gradienten des Strahlungs-Konvektions-Gleichgewichts nicht hilfreich. Jeder, der sich mit Temperaturprofilen befasst hat weiß, dass sie sehr viel komplexer sind als nur ein konstanter Gradient. Abbildung 2 zeigt eine Reihe von atmosphärischen Modell-Temperaturprofilen, die aus MODTRAN stammen. Man beachte, dass der einzige konstante 6,5 K-Gradient in der Reihe die US-Standardatmosphäre von 1976 liegt – ein erfundenes Profil der atmosphärischen Nicht-Struktur, das von einem Ausschuss entworfen wurde.[6] Die anderen Beispiele haben tatsächlich eine gewisse Struktur, die uns etwas über die Dynamik der Wärmeübertragung in verschiedenen Gegenden sagt.

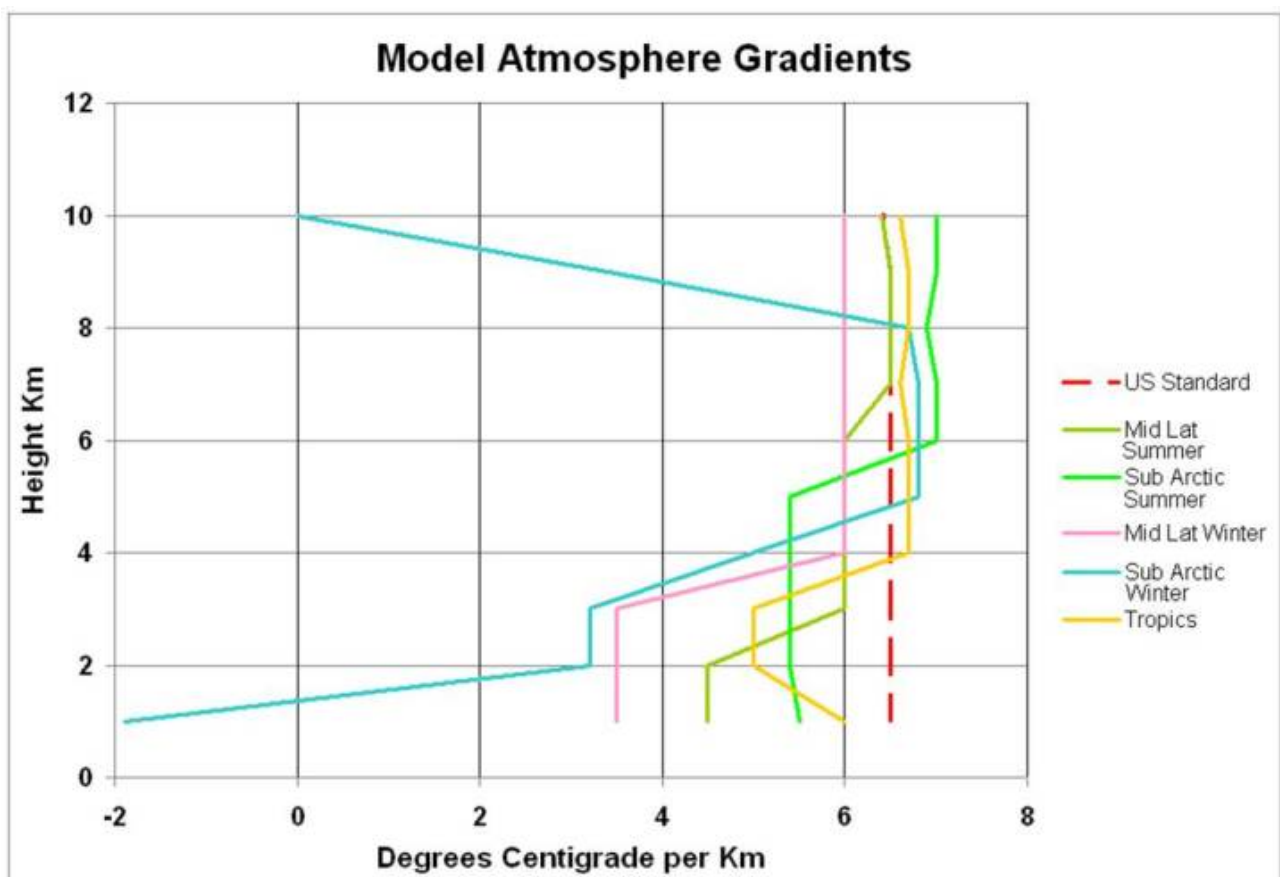


Abbildung 2

Verdunstung

In diesem vereinfachten Modell nimmt der Wasserdampf den ersten Platz ein, insbesondere in den Tropen. Die Berufung auf die Clausius-Clapeyron-Beziehung (im Folgenden CC) bedeutet, dass jeder Anstieg der Temperatur um 1K 7% mehr Wasserdampf in die untere Troposphäre bringt – das ist eine geometrische Zunahme des stärksten Treibhausgases.

Um die CC-Skalierung voranzutreiben, stützen H&S ihre Analyse auf eine

atmosphärendynamische Beziehung für den Verdunstungsprozess [7]. Ich habe hier und an anderer Stelle bereits mehrfach argumentiert, dass diese CC-Skalierung falsch ist, weil die Verteilung von Wasserdampf in der Atmosphäre nicht im Gleichgewicht ist und von Transportprozessen abhängt. Sie ist energieabhängig, wohingegen Modelle der atmosphärischen Dynamik der Verdunstung einfach davon ausgehen, dass die Energieabhängigkeit verschwindet [8].

Die technische Hydrologie befasst sich mit der Verdunstung aus der Oberflächenspeicherung.[9] Von den Ausdrücken für die Verdunstung, die aus diesem Schwerpunkt heraus entwickelt wurden, basieren einige auf der atmosphärischen Dynamik, andere auf der Energiebilanz und wieder andere sind eine Kombination aus beidem.[10] Ausdrücke, die auf der atmosphärischen Dynamik basieren, funktionieren gut genug, haben aber ein Größenproblem, weil sie die Energiebilanz nicht berücksichtigen. Ohne Energiebilanz ist der Prozess unphysikalisch.

Landsay, et al. sagen in Bezug auf die für die Verdunstung verwendete Energie:

„In tiefen Seen mit beträchtlicher Wärmespeicherkapazität haben plötzliche Wind- und Feuchtigkeitsschwankungen länger anhaltende Auswirkungen; die Wärme, die in den oder aus dem Speicher fließt, trägt zum Ausgleich des Energiebedarfs bei. Durch die Nutzung der gespeicherten überschüssigen Energie kann eine übermäßige Verdunstung während einer trockenen, windigen Woche die Verdunstung reduzieren, die sonst in den folgenden Wochen auftreten würde.“ [10]

Die Energiebilanz stellt eine Einschränkung dar. Ich halte die atmosphärische Dynamik für ein schwaches Argument. Die Verdunstung (Tiefe des pro Zeiteinheit verdunsteten offenen Wassers) auf der Grundlage einer Energiebilanz würde etwa so aussehen:

$$E = (Q_n + Q_v - Q_o) / (\rho H_v (1 + R))$$

Dabei sind: R ist das Bowen-Verhältnis, Q_n =Nettowellenstrahlung, Q_o ist die Energie, die gespeichert wird, Q_v =Energie, die zugeführt wird, und H_v ist die latente Verdampfungswärme.

Ignorieren von Beobachtungen zugunsten der Theorie

Bezüglich der Rückkopplungsverstärkung durch Wasserdampf sagen H&S folgendes:

„...Es gibt kein einfaches physikalisches Argument, das uns bekannt ist, aus dem man von vornherein hätte schließen können, dass β_{H_2O} kleiner als eins ist. Der Wert von β_{H_2O} steigt in der Tat mit der Erwärmung des Klimas, wenn die relative Luftfeuchtigkeit konstant bleibt. Auf dieser Grundlage könnte man erwarten, dass sich bei einer ausreichenden Erwärmung des Klimas schließlich Runaway-Bedingungen entwickeln.“

Man könnte so antworten: Es gibt kein einfaches physikalisches Argument, außer dass der Vorläufer von Wasserdampf, flüssiges Wasser, seit 4 Milliarden Jahren einen Großteil der Erdoberfläche bedeckt, und zwar unter sehr unterschiedlichen Bedingungen, einschließlich erhöhtem CO₂-Gehalt, und wir haben nicht im Entferntesten so etwas wie einen unkontrollierten Treibhauseffekt beobachtet. Vielmehr haben wir häufiger Ausschläge in außergewöhnliche Kälte beobachtet.

Klimamodellierer scheinen mehr von der Übereinstimmung ihrer Modelle beeindruckt zu sein als von den Beobachtungen. Ich bin kein Klimamodellierer, aber ich bin nicht beeindruckt von dem Nachweis der Korrektheit durch Übereinstimmung zwischen den Modellen. Ich habe einige Erfahrung mit der Modellierung des Wärmetransports. Ich habe komplexe Codes für alle möglichen Zwecke von einer Programmiersprache in eine andere übersetzt und die Ergebnisse überprüft. Es kam häufig genug vor, dass ich die gleichen Fehler in verschiedenen Plattformen fand, was auf eine gemeinsame Abstammung der Codes schließen lässt; manchmal besteht die Übereinstimmung einfach in mangelnder Unabhängigkeit.

Die Kontroverse um den Wasserdampf beenden

Viertens, wie H&S sagen, erfordert das Beenden der Wasserdampf-Kontroverse einen Vergleich mit Daten.

„Angesichts der Beschleunigung der von vielen Modellen vorhergesagten Trends glauben wir, dass weitere 10 Jahre angemessen sein könnten und 20 Jahre sehr wahrscheinlich ausreichen werden, damit das kombinierte Satelliten- und Radiosondennetzwerk die Vorhersagen über den zunehmenden Wasserdampf in der freien Troposphäre und seine Auswirkungen auf die globale Erwärmung überzeugend bestätigen oder widerlegen kann.“

Wie gut ist die zugrunde liegende Physik verstanden?

Bob Irvine [schrieb](#) vor zwei Jahren über Feedback. Er zeigte Daten, die denen in Abbildung 3 ähneln, aber unabhängig davon sind. Abbildung 3 zeigt die Era5-Reanalyse aus den Tropen, in der 2m-Temperatur- und Taupunktdata gegeneinander aufgetragen sind. Es gibt einen Anstieg der Taupunkt-Temperaturen, der spezifischen Luftfeuchtigkeit oder des Mischungsverhältnisses, je nachdem, was man bevorzugt, alle zeigen einen bescheidenen Anstieg der absoluten Luftfeuchtigkeit von etwa 3 % in den letzten zwei Jahrzehnten. Der beobachtete Anstieg spricht nicht für eine CC-Skalierung und schon gar nicht für eine konstante relative Luftfeuchtigkeit.

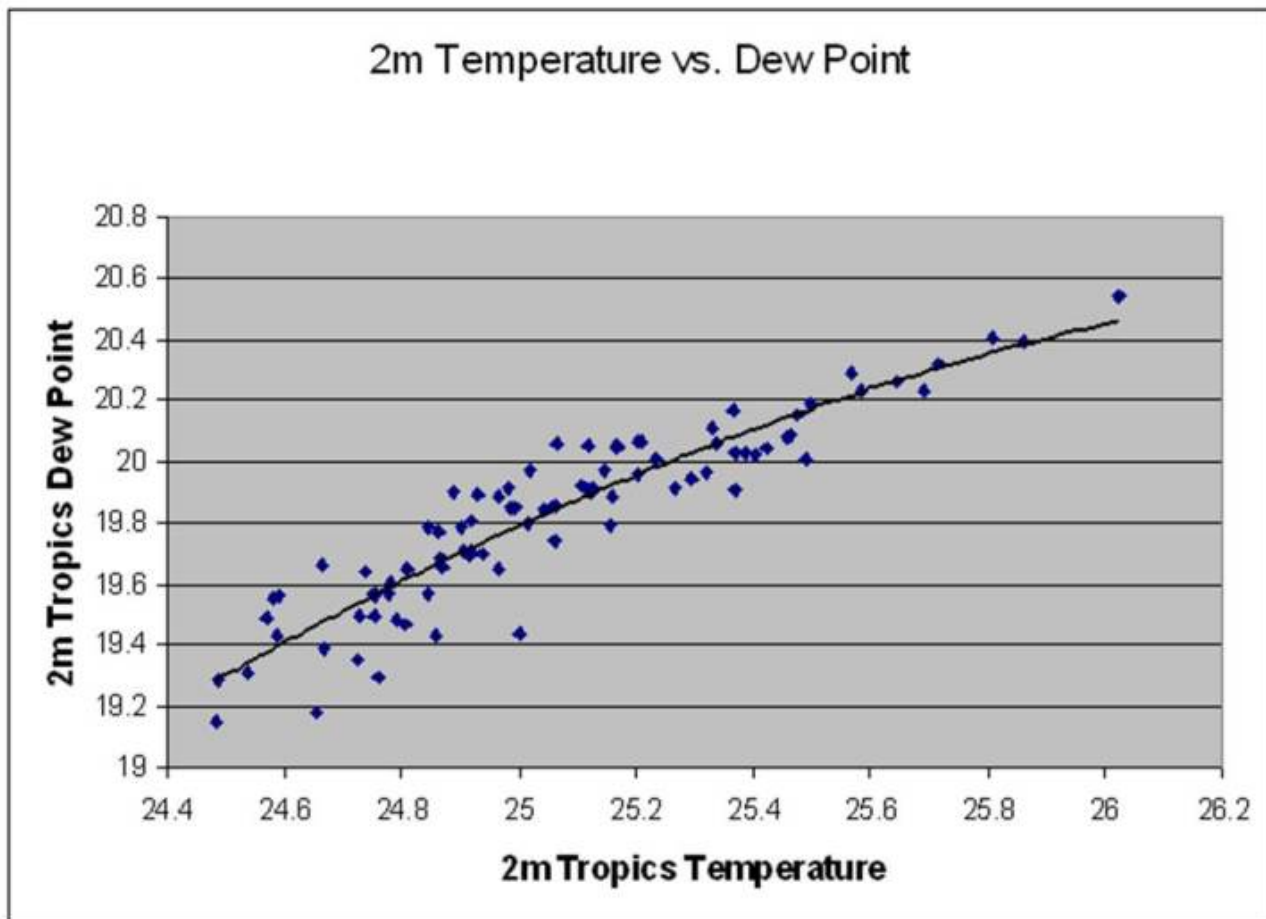


Abbildung 3

Irvines Aufsatz enthält eine Tabelle, in der die Rückkopplungswerte von AR4 und AR6 verglichen werden. Von besonderem Interesse sind die großen Veränderungen bei den kombinierten Rückkopplungswerten für Wasserdampf + Gradient. Im AR4 (2007) beträgt dieser Wert $0,96 \pm 0,08 \text{ W/Km}^2$. Im AR6 (2019) wird er mit 1,30 (1,15 bis 1,47) angegeben. Vielleicht hat die Feststellung, dass der Wasserdampf in den zwei Jahrzehnten von 2000 bis 2019 nicht mit der Skalierung des Klimawandels Schritt gehalten hat, zu dieser Änderung geführt. Von größerem Interesse ist die angegebene Unsicherheit.

Die AR4-Unsicherheit von 0,08 bezieht sich auf einen Erweiterungsfaktor von 1,0, und das Intervall für AR6 ist das 90 %-Konfidenzintervall. Damit liegen die zentralen Werte vier Standardabweichungen auseinander, was bedeutet, dass jede Schätzung in Anbetracht der anderen höchst unwahrscheinlich ist. Darüber hinaus zeigt eine Grafik in Referenz [3] die Wasserdampf- und Gradient-Rückkopplungswerte separat. Wie bereits in Teil I in Bezug auf das Energie-Ungleichgewicht erwähnt, wird die Unsicherheit der kombinierten Größen kleiner als die Unsicherheit ihrer Komponenten. Wie kommt dies zustande? Möglicherweise sind Modellverzerrungen bei den Schätzungen der Wasserdampf-Rückkopplung antikorreliert mit Verzerrungen bei der Gradient-Rückkopplung.

Wolken-Rückkopplung

Jeder weiß, dass Wolken eine Schwachstelle der globalen Klimamodelle sind. Nicht jeder erkennt jedoch die enorme Variabilität der Wolken von Tag zu Tag. Die nachstehende Abbildung 4 zeigt, wie die gesamte abwärts gerichtete Sonnenstrahlung an zwei eng beieinander liegenden Tagen entlang der Front Range von Colorado aussieht. Die Rohdaten sind nach UTC-Tagen aufgeschlüsselt, so dass diese Diagramme zusammengefügt sind. Dennoch ist das, was sie zeigen, offensichtlich. Der teilweise bewölkte Tag weist eine erhöhte Abwärtsstrahlung auf, wenn Cumulus- oder Cumulonimbuswolken nördlich und nordwestlich des Observatoriums das Streulicht auf das Observatorium lenken, aber häufiger eine verringerte Strahlung für subarktische Winterbedingungen, wenn sie das Observatorium beschatten. Die Veränderung der täglich empfangenen Sonneneinstrahlung (abwärts gerichtete Gesamtsonneneinstrahlung) liegt zwischen 34.000 kJ/m² an einem klaren Tag und 23.000 kJ/m² an einem anderen. Das ist nach jedermanns Schätzung gewaltig. Sogar die Albedo der Oberfläche (Verhältnis von blauer zu roter Kurve) ändert sich von 18,8 % auf 19,3 %, einfach aufgrund der Umlenkung des Sonnenlichts.

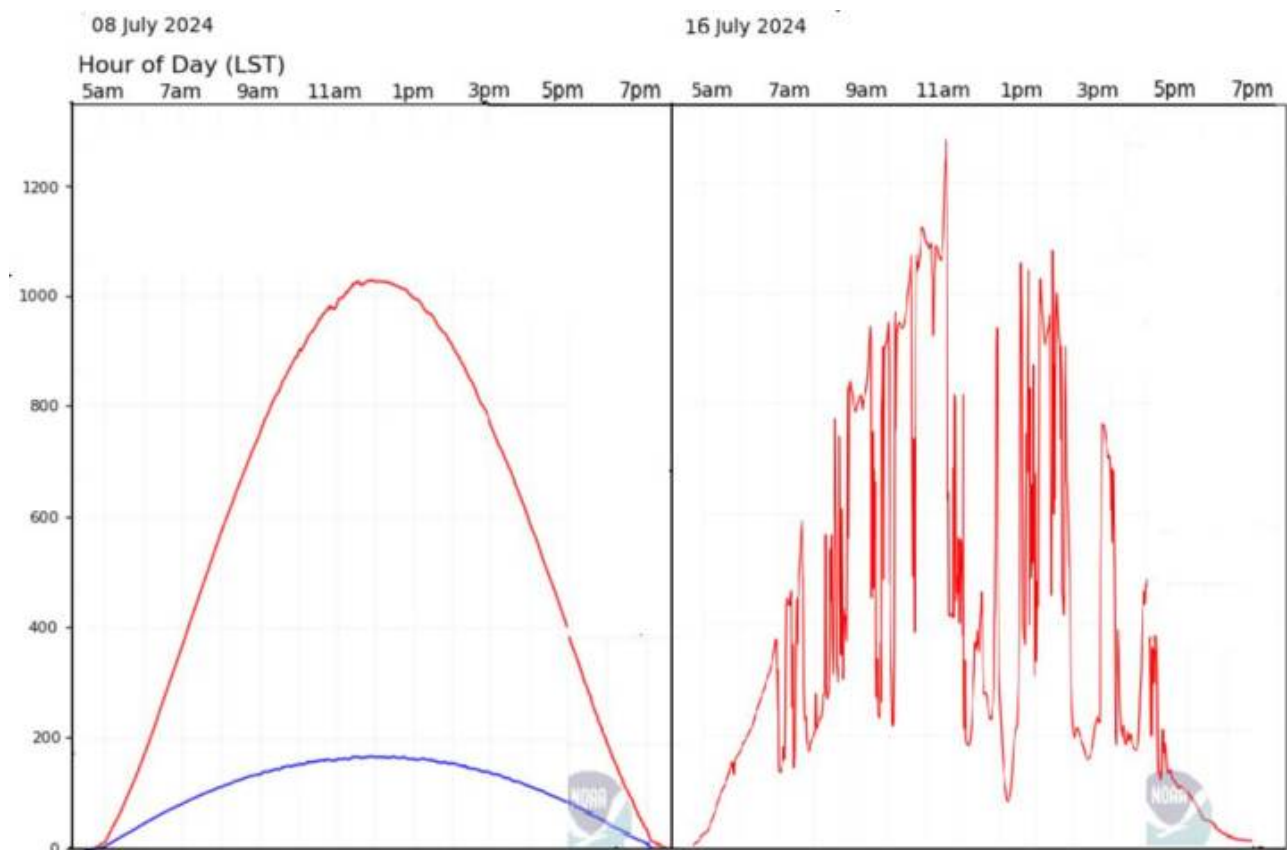


Abbildung 4

Abbildung 5 stammt von Daten, die an einem klaren Sommertag nördlich von Laramie in Wyoming auf einer Höhe von 2200 m aufgenommen worden sind. Hier gibt es keinen SURFRAD-Standort, aber ich besitze zahlreiche

Radiometer und war dabei, eines zu testen und zu kalibrieren. Wie es der Zufall so will, erwischte ich die schönsten Wolken – subvisuelle Zirren, die so substanzlos waren, dass ich sie mit dem Auge nicht erkennen konnte. Das Radiometer erkannte sie jedoch, und gelegentlich, wenn die Zirruswolken ein mit dem Auge erkennbares Wölkchen bildeten, das vor der Sonne vorbeizog, konnte ich es mit dem Radiometer in Verbindung bringen.

Lynch [12] geht davon aus, dass diese Wolken eine optische Tiefe von etwa $\tau=0,03$ haben, was eine Änderung der Leistungsdichte in der Größenordnung von $1000^{0,03} = 970$ oder eine Abnahme von 30 W/m^2 bedeuten würde. Dies entspricht in etwa dem, was Abbildung 5 zeigt. Selbst in diesem Fall der geringsten vorstellbaren Bewölkung ist die Wirkung also zehnmal größer als die einer Änderung der Temperatur um 1 K.

Wolken haben einen großen Einfluss auf das Klima.

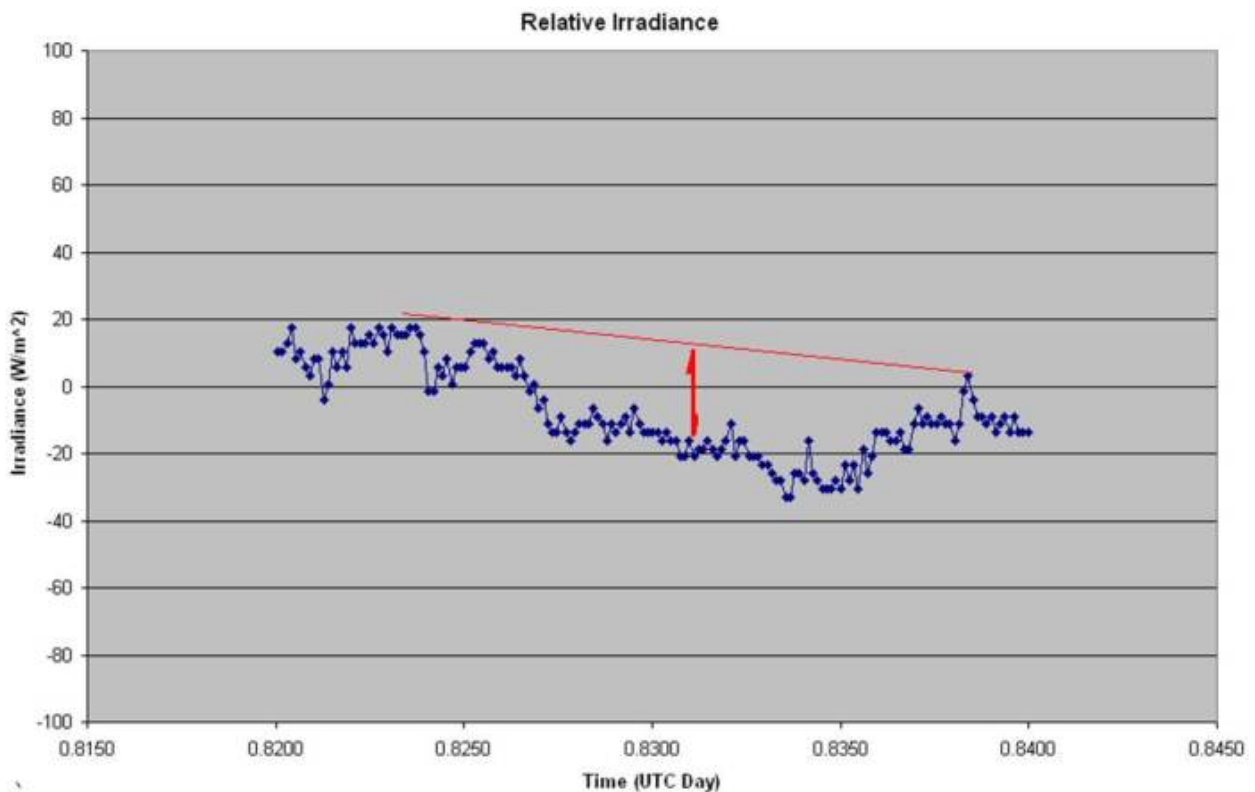


Abbildung 5

Dieser Klimaantrieb ist jedoch nicht das, was „Rückkopplung“ im Kontext der Klimawissenschaft bedeutet. Rückkopplung ist der Effekt, den eine wärmere Oberfläche auf die Strahlungsdifferenz zwischen klarem Himmel und Gesamthimmel hat. Es handelt sich um die Veränderung des Wolkenforcings (klarer Himmel minus Gesamthimmel), und erschwerend kommt hinzu, dass der klare Himmel wiederum eine Berechnung aus der Theorie ist. AR4 gibt den Rückkopplungseffekt der Wolken mit $0,69 \pm 0,38 \text{ W/K-m}^2$

an; AR6 nennt 0,42 (-0,1 bis 0,94).

Erkundung der Rückkopplungen

Modelle führen im Allgemeinen zu einer positiven Rückkopplung. Ich habe keine Grundlage, um das zu bestreiten. Was ich nicht glaube ist, dass eine relativ winzige Differenzgröße, die als Differenz zwischen zwei anderen großen variablen Größen berechnet wird, die ihrerseits Differenzen großer variabler Größen sind, nicht von Unsicherheiten erdrückt wird. Dies gilt insbesondere angesichts der mangelnden Auflösung von Klimamodellen und der Parametrisierung von Dingen wie Wolken, Konvektion und Niederschlag, die nicht direkt aus der Physik berechnet werden.

Ich bin kein Gegner der Klimamodellierung, aber ich würde mir wünschen, dass die Ergebnisse der Modellierung durch einen Vergleich mit Beobachtungen untermauert werden könnten. Mir ist durchaus bewusst, dass die Beobachtungen mit Problemen der Kalibrierung und Datenreduzierung behaftet sein können, so dass die Ergebnisse ebenfalls mit großen Unsicherheiten behaftet sind. Trotzdem möchte ich ab und zu einen Vergleich sehen. Was machen wir also mit der Rückkopplung?

Betrachten wir die Berechnungsverfahren für Rückkopplungen. Sie werden mit Modellen durchgeführt. Die Herausforderung bei der Durchführung der gleichen Dinge mit Beobachtungen besteht darin, genügend lange Zeiträume von Tagen zu haben, um das Klima anzunähern. Kann man irgendwelche Verfahren mit Beobachtungen nachahmen? Soden et al. skizzieren Verfahren auf der Grundlage von Modellen[3] Wie würden sie sich auf Beobachtungen übertragen lassen?

Verfahren 1: Man stelle sich das Energie-Ungleichgewicht am oberen Ende der Atmosphäre (TOA) als eine Funktion einiger weniger Faktoren vor. Nennen wir dies bildlich $R(w, T, a, c)$, wobei w für Wasserdampf, T für die Oberflächentemperatur, a für die Oberflächenalbedo und c für Wolken steht. Führen Sie mehrere Modelle durch, indem Sie jeweils nur ein Element, z. B. c , ändern, und vergleichen Sie mit dem ungestörten Zustand. Dies ist bei Beobachtungen sehr schwierig, ist es doch schwierig, längere Zeiträume zu suchen und zu finden, die in jeder Hinsicht bis auf einen Punkt identisch sind.

Verfahren 2: Aufteilung der Rückkopplung in zwei Faktoren. Der erste, der „Strahlungskern“, hängt nur vom Strahlungsalgorithmus ab, und der andere ist einfach die Veränderung der Klimatologie der interessierenden Rückkopplung zweier Vergleichszustände. Das Produkt aus beiden ist die Rückkopplung. Dieses Verfahren ist für die Beobachtung nicht von Belang. Strahlungskerne sind jedoch aus einem anderen Grund in Teil III interessant.

Verfahren 3: Stören Sie das Klimamodell mit einer schrittweisen Änderung der Meerestemperatur. Dann wird die Klimasensitivität aus den

berechneten Änderungen der Strahlungsflüsse abgeleitet.

Schema 3 ist das Verfahren, das sich am besten für Beobachtungen eignet. Die natürlich verfügbaren Störungen der Meeresoberfläche sind ENSO, PDO, AMO und so weiter. Außerdem könnten wir darüber nachdenken, den Aufwand wie die faktoriellen Experimente zu organisieren, die wir in der Technik durchführen; wir ändern absichtlich mehrere Variablen in jedem aufeinanderfolgenden Durchlauf, weil es das ist, was das Wetter tun wird. Erstellen Sie eine Kontrasttabelle mit vier Faktoren (w,T,a,c) und notieren Sie, wie sich jeder Faktor bei jeder aufeinanderfolgenden Änderung von PDO oder ENSO verändert. Schließlich werden wir die gesamte Tabelle mit den Kontrasten ausfüllen und eine ungefähre Vorstellung nicht nur von den Rückkopplungsfaktoren, sondern auch von den Wechselwirkungen zwischen ihnen haben [13].

Schlussfolgerung

Wie in Teil I finde ich auch in Teil II Zahlen zu grundlegenden Konzepten, die zwar klein sind, aber mit Unsicherheitsschätzungen, die ich weder nachvollziehen kann noch völlig glaubwürdig finde. Das gesamte Thema des Klimawandels scheint so zu sein; geleitet von Zahlen und Messungen, die auf 0,1 % genau sein müssen, aber oft 10 oder 100 Mal schlechter sind. Ist die Wolkenrückkopplung positiv? Ich weiß es nicht. Um das herauszufinden, muss man eine Menge Wetterdaten durchgehen. Wenn sie jedoch positiv ist, ist das nicht unbedingt etwas Schlechtes, wie in Teil III erläutert wird.

References and Notes

1-Held, I. M., and B. J. Soden, 2000: Water vapor feedback and global warming. *Annu. Rev. Energy Environ.*, 25, 441–475.

2-Isaac Held, Brian J. Soden, 2006, Robust Responses of the Hydrological Cycle to Global Warming, *J. Climate*, V. 19, p.5686

3-Brian J. Soden, et al, 2008, Quantifying Climate Feedbacks Using Radiative Kernels, *J. Climate*, V. 21, p3504

4-Selbst in der feuchten tropischen Atmosphäre ist der klare Himmel für viele Segmente des IR-Spektrums mit einer Wellenzahl von bis zu 2 inversen Zentimetern zu über 80 % durchlässig.

5- Dies ist ein Element von Lindzens Iris-Hypothese.

6- Bei diesem Durchschnittsprofil kann es sich um einen Durchschnitt handeln, der nie wirklich beobachtet wird – wie der 3,5-Durchschnitt von Würfelwürfen. Von weiterem Interesse ist, dass die Wasserdampf-Satellitenbilder der Spektralbereiche 8, 9 und 10 unter Verwendung der US-Standardatmosphäre reduziert wurden. Vielleicht könnte die Verwendung dieses Modells in diesem Zusammenhang in einem zukünftigen Beitrag erforscht werden.

7-Ein Atmosphären-Dynamikmodell von H&S: „ ... die Verdunstung E aus dem Ozean kann als proportional zur Differenz zwischen dem Sättigungsdampfdruck bei der Temperatur T^* und dem Dampfdruck in der Atmosphäre in einer kleinen, geeigneten Referenzhöhe modelliert werden...“

8-Eine analoge Situation tritt bei elektronischen Rückkopplungsschaltungen auf. Die Stromversorgung wird in solchen Schaltungen fast nie explizit dargestellt, da man davon ausgeht, dass die Stromversorgung in der Lage ist, alles zu liefern, was die Rückkopplungsschaltung benötigt. Clipping tritt auf, wenn der Ausgang in die Nähe der Stromversorgungsschienen kommt. Dies kommt in Modellen nicht vor, obwohl es physikalisch gesehen passiert.

9-In den 1970er Jahren habe ich drei Jahre lang als Hydrologe beim USGS gearbeitet. Die Beschäftigung ist ein fähiger Lehrer.

10-Ray K. Lindsay, Jr., et al, 1975, Hydrology for Engineers, 2nd ed, McGraw-Hill

11- Lynch, Subvisual Cirrus, Aerospace Report number TR-93(3308)-1, 1994, available online at <https://apps.dtic.mil/sti/tr/pdf/ADA289329.pdf>

12- Ich hatte ein wenig Spaß mit generativer KI. Ich fragte, ob ENSO als Analogon zum Klimawandel verwendet werden kann. Sie sagte „nein“. Dann habe ich gefragt, ob El Niño das sein könnte. Die KI sagte „ja“.

13-Auf einer Konferenz im Jahr 2002 schlug ich dies als eine Methode vor, um die Geschichte selbst und die Geschichtswissenschaft mehr wie eine experimentelle Wissenschaft aussehen zu lassen. Meines Wissens hat niemand diese Idee aufgegriffen.

Link:

<https://wattsupwiththat.com/2025/02/24/earths-energy-imbalance-part-ii/>

Übersetzt von Christian Freuer für das EIKE