

Wo ist die Obergrenze der Atmosphäre?

geschrieben von Chris Frey | 12. Januar 2022

[Willis Eschenbach](#)

In meinem letzten Beitrag mit dem Titel *Advection* habe ich das Online-Modell *MODTRAN Infrared Light In The Atmosphere* besprochen. Ein Kommentator wies mich darauf hin, dass ich mich in der Vergangenheit darüber gewundert hatte, warum die MODTRAN-Ergebnisse zeigten, dass eine Verdoppelung des CO₂ eine Abnahme der aufsteigenden langwelligigen Strahlung (LW) an der Obergrenze der Atmosphäre [Top of Atmosphere TOA] um weniger als den offiziellen Wert von 3,7 Watt pro Quadratmeter (W/m²) pro Verdoppelung des CO₂ verursachte. Hier sind die Daten:

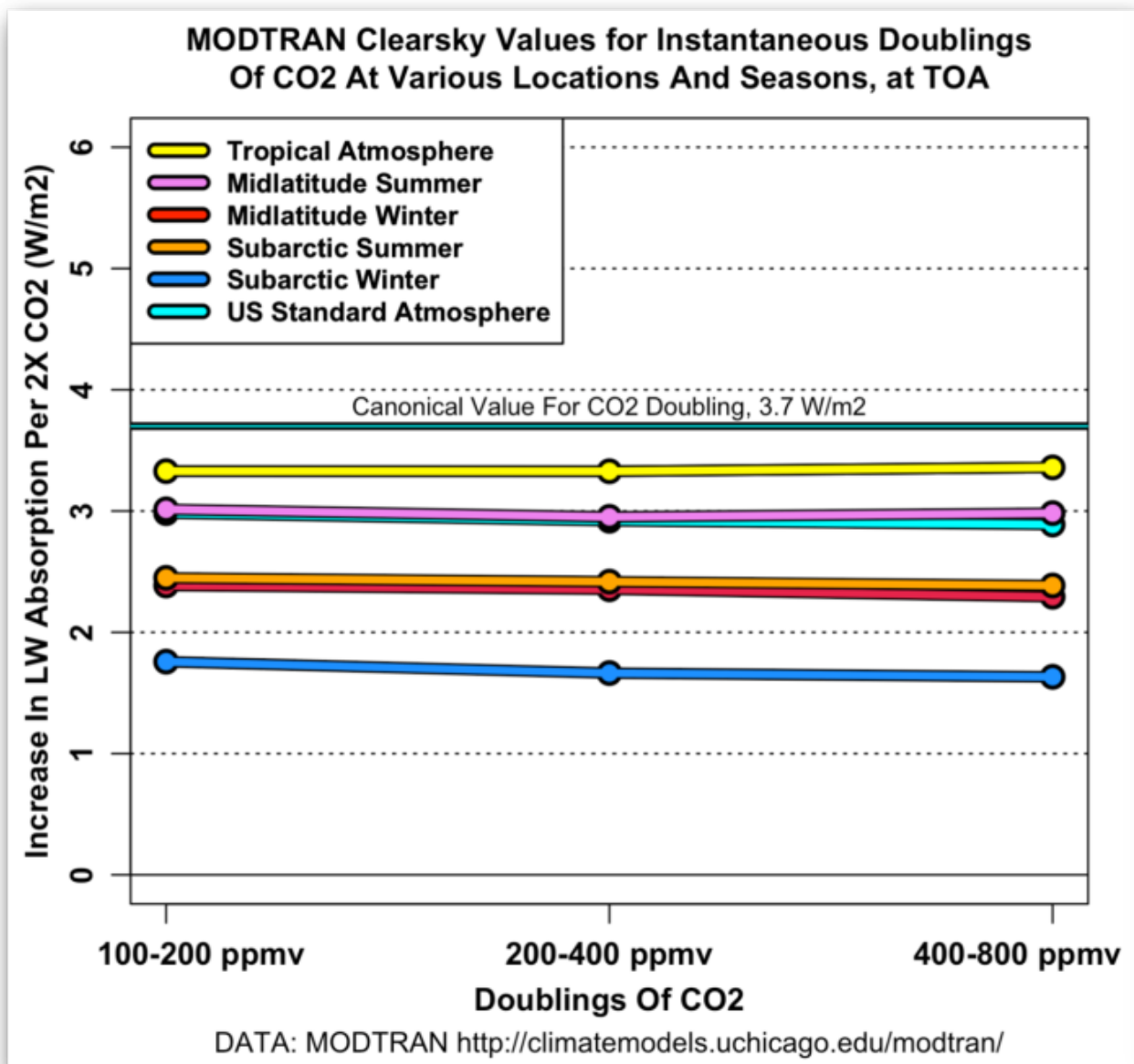


Abbildung 1. MODTRAN-Ergebnisse für mehrere CO₂-Verdoppelungen, nur bei klarem Himmel, gemessen an der Obergrenze der Atmosphäre (TOA). Die Einheiten sind Watt pro Quadratmeter (W/m²).

Um herauszufinden, warum diese Werte so niedrig waren, ging ich zurück zu der [Studie](#) mit dem Wert von 3,7 W/m² von Mhyre et al. Ich erinnerte mich auch daran, dass in meinem früheren Thread Kommentatoren erwähnt hatten, dass es zwei Definitionen von „top-of-atmosphere“ gibt. Eine davon war die, die ich für Abbildung 1 verwendet hatte, mit Blick aus 70 km Höhe über der Oberfläche. Und die andere Definition des „oberen Teils der Atmosphäre“ war die Tropopause. Nach erneuter Lektüre von Mhyre und weiteren Nachforschungen konnte ich bestätigen, dass die Messungen und Modellergebnisse, die den kanonischen Wert von 3,7 W/m² pro Verdoppelung ergeben, nicht am tatsächlichen oberen Ende der Atmosphäre (TOA), sondern an der Tropopause gemessen wurden.

Die Tropopause ist die Grenze zwischen der Troposphäre und der Stratosphäre. Sie ist der Ort, an dem die Temperatur der Atmosphäre mit zunehmender Höhe nicht mehr kälter wird. Die Tropopause befindet sich zu verschiedenen Zeiten und an verschiedenen Orten in unterschiedlichen Höhen.

Das MODTRAN-Modell bietet eine Grafik des atmosphärischen Temperaturprofils an verschiedenen Orten und zu verschiedenen Jahreszeiten. Hier ist das Profil für die so genannte „US-Standardatmosphäre“:

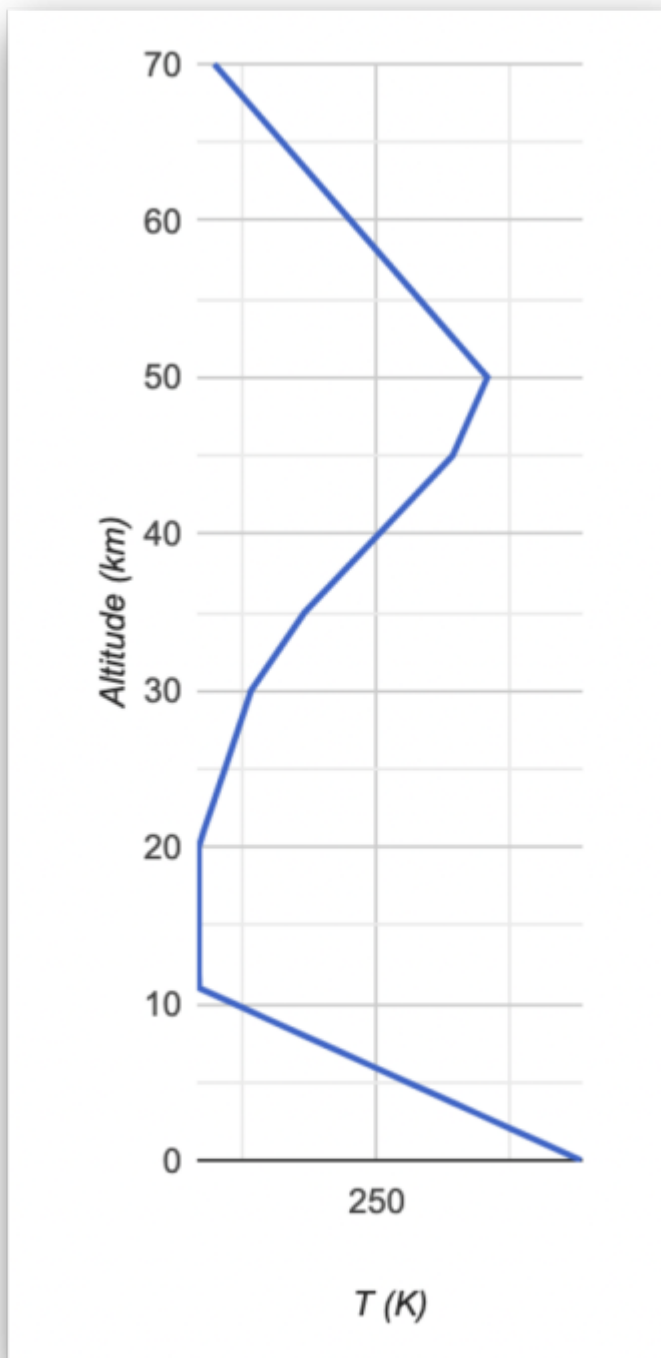


Abbildung 2. Profil der Temperatur in Abhängigkeit von der Höhe, US-Standardatmosphäre

Meine Berechnungen für Abbildung 1 wurden aus 70 km Höhe durchgeführt ... aber wie Sie sehen können, liegt die Tropopause in Abbildung 2 an diesem Ort nur bei 11 km.

Also habe ich meine MODTRAN-Läufe in Abbildung 1 wiederholt und diesmal

von den entsprechenden Tropopausenhöhen an jedem Ort aus gemessen. Bei der Berechnung der langwelligen Veränderungen an der Tropopause müssen zwei Messungen vorgenommen werden – eine nach oben und eine nach unten. Die endgültige Antwort ist der Saldo der beiden Änderungen.

Dies als Prolog, hier sind meine Ergebnisse. Ich habe sie mit den Ergebnissen in Tabelle 1 der Arbeit von Mhyre et al. verglichen. Meine durchschnittlichen Ergebnisse, die wie in der Arbeit von Mhyre et al. berechnet wurden, ergeben einen Anstieg der langwelligen Absorption (LW) in der Troposphäre über freiem Himmel, der sich aus einer Verdopplung des CO₂ um 4,97 Watt pro Quadratmeter (W/m²) ergibt. Dies kommt dem Wert von Mhyre et al. (Tabelle 1) von 5,04 W/m² pro Verdopplung sehr nahe – es sind weniger als 0,1 W/m² Unterschied. Zusammen mit der guten Übereinstimmung mit den CERES-Zahlen, die ich in meinem letzten Beitrag erwähnt habe, geben mir diese Ergebnisse Vertrauen in das MODTRAN-Modell.

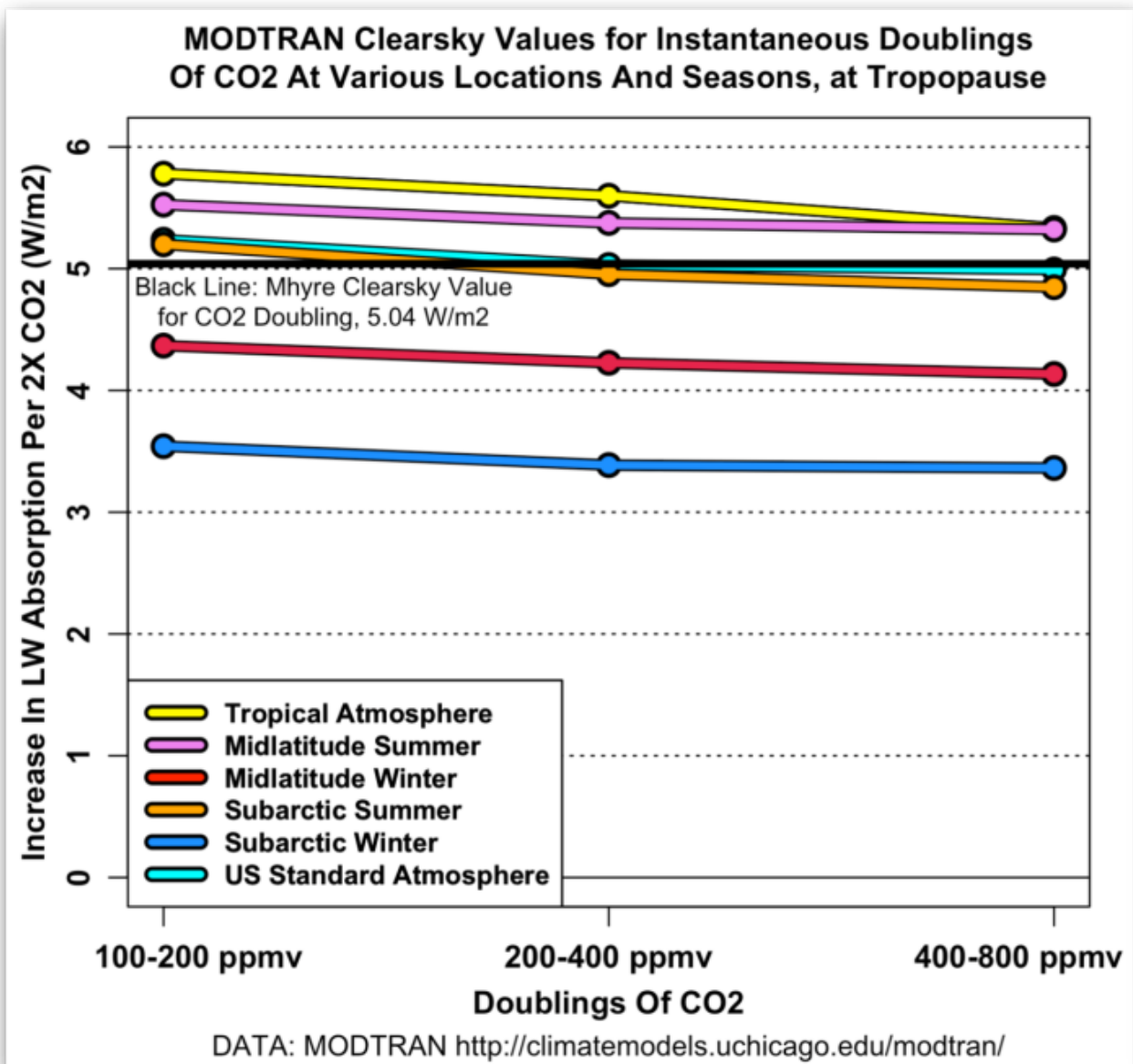


Abbildung 3. Wie in Abbildung 1, jedoch an der Tropopause und nicht in 70 km Höhe am oberen Ende der Atmosphäre (TOA) gemessen.

In Abbildung 3 sind einige überraschende Dinge zu erkennen. Erstens nimmt die Veränderung pro Verdoppelung leicht ab, wenn der absolute Wert des atmosphärischen CO₂-Gehalts steigt. Unerwartet. Vermutlich spiegelt dies eine allmähliche Sättigung der Absorptionsbanden wider. Sie ist jedoch nicht groß genug, um die meisten Berechnungen zu beeinflussen.

Zweitens, und das ist noch wichtiger, habe ich einen so großen Unterschied zwischen den Messungen auf den beiden Ebenen nicht erwartet. Die TOA-Messungen sind im Durchschnitt etwa 52 % kleiner als die Tropopausenmessungen.

Dies ist wegen der Theorie interessant, warum ein CO₂-Anstieg zu einer Oberflächenerwärmung führt. Die Theorie lautet wie folgt:

- *Die Menge des atmosphärischen CO₂ nimmt zu.*
- *Dadurch wird mehr aufsteigende langwellige Strahlung absorbiert, was zu einer unausgewogenen Strahlung an der Oberseite der Atmosphäre (TOA) führt. Dies ist das TOA-Gleichgewicht zwischen dem einfallenden Sonnenlicht (nachdem ein Teil des Sonnenlichts in den Weltraum zurückgeworfen wurde) und der von der Oberfläche und der Atmosphäre ausgehenden langwelligen Strahlung.*
- *Um das Gleichgewicht wiederherzustellen, so dass die eingehende Strahlung gleich der ausgehenden Strahlung ist, muss sich die Oberfläche zwangsläufig erwärmen, bis genügend zusätzliche aufsteigende Langwellen-Strahlung vorhanden ist, um das Gleichgewicht wiederherzustellen.*

Ich habe auf das Problem dieser Theorie hingewiesen, nämlich dass es eine Reihe anderer Möglichkeiten gibt, das TOA-Gleichgewicht wiederherzustellen. Dazu gehören:

- *Erhöhte Wolken- oder Oberflächenreflexionen können die Menge des einfallenden Sonnenlichts verringern.*
- *Eine verstärkte Absorption des Sonnenlichts durch atmosphärische Aerosole und Wolken kann zu einer größeren aufsteigenden Langwellen-Strahlung führen.*
- *Eine Zunahme der Anzahl oder Dauer von Gewittern verlagert zusätzliche Oberflächenwärme in die Troposphäre und damit über einen Teil der Treibhausgase, was zu einer erhöhten aufsteigenden TOA- Langwellen-Strahlung führt.*
- *Eine Zunahme der Energiemenge, die von den Tropen zu den Polen transportiert wird, erhöht die aufsteigende TOA-Langwellen-Strahlung .*

– Eine Änderung des Anteils der atmosphärischen Strahlung, der nach oben und nicht nach unten gerichtet ist, kann zu einem Anstieg der aufsteigenden Strahlung führen.

Es ist also nicht erforderlich, dass die Oberflächentemperaturen als Reaktion auf eine CO₂-Erhöhung steigen. Eine Erhöhung der Oberflächentemperaturen ist nur eine von mehreren Möglichkeiten, das TOA-Strahlungsgleichgewicht wiederherzustellen.

Die Erkenntnis, die sich aus dem großen Unterschied zwischen TOA- und Troposphärenmessungen für mich ergibt, ist, dass ich dachte, das Ungleichgewicht am tatsächlichen TOA bei einer CO₂-Verdoppelung würde 3,7 W/m² betragen ... tatsächlich ist es aber nur etwa die Hälfte davon, nämlich 1,9 W/m².

Wie ich bereits oben erwähnt habe, gibt es eine Reihe von Möglichkeiten, wie die TOA-Strahlungsbilanz wiederhergestellt werden kann. Wie viel davon ist also auf die Oberflächenerwärmung zurückzuführen?

Nun, hier ist die Beziehung zwischen der Oberflächentemperatur und der aufsteigenden langwelligen TOA-Strahlung.

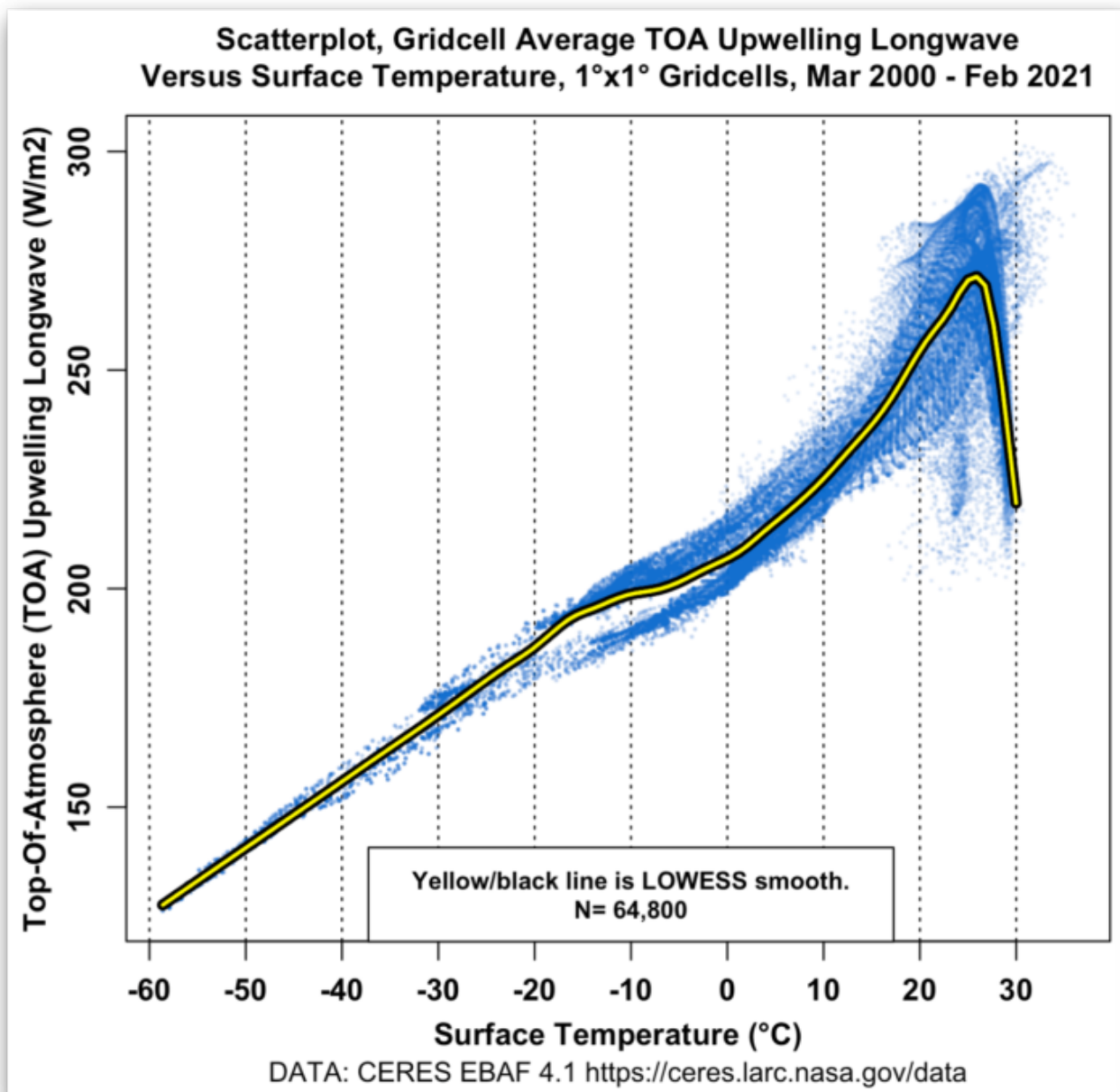


Abbildung 4. Streudiagramm, durchschnittliche aufsteigende TOA-Langwellen-Strahlung im Vergleich zur Oberflächentemperatur, 1° Breitengrad mal 1° Längengrad Gitterzellen.

Wie zu erwarten, nimmt die aufsteigende TOA-Langwelle in weiten Teilen der Erde mit der Erwärmung der Oberfläche zu. Das macht Sinn, denn eine wärmere Oberfläche strahlt mehr Langwelle ab, so dass man annehmen sollte, dass die aufsteigende TOA-Langwellen-Strahlung zunimmt.

Bei Temperaturen oberhalb von etwa 26 °C ändert sich die Situation jedoch rasch. Oberhalb dieser Temperatur nimmt die aufsteigende TOA-Langwellen-Strahlung mit steigender Temperatur sehr schnell ab.

Ich führe dies auf die Wirkung von tropischen Gewittern zurück. Diese bilden sich bevorzugt bei Temperaturen über ~ 26°C. Hier ist ein Blick auf den Effekt anhand zweier sehr unterschiedlicher Datensätze:

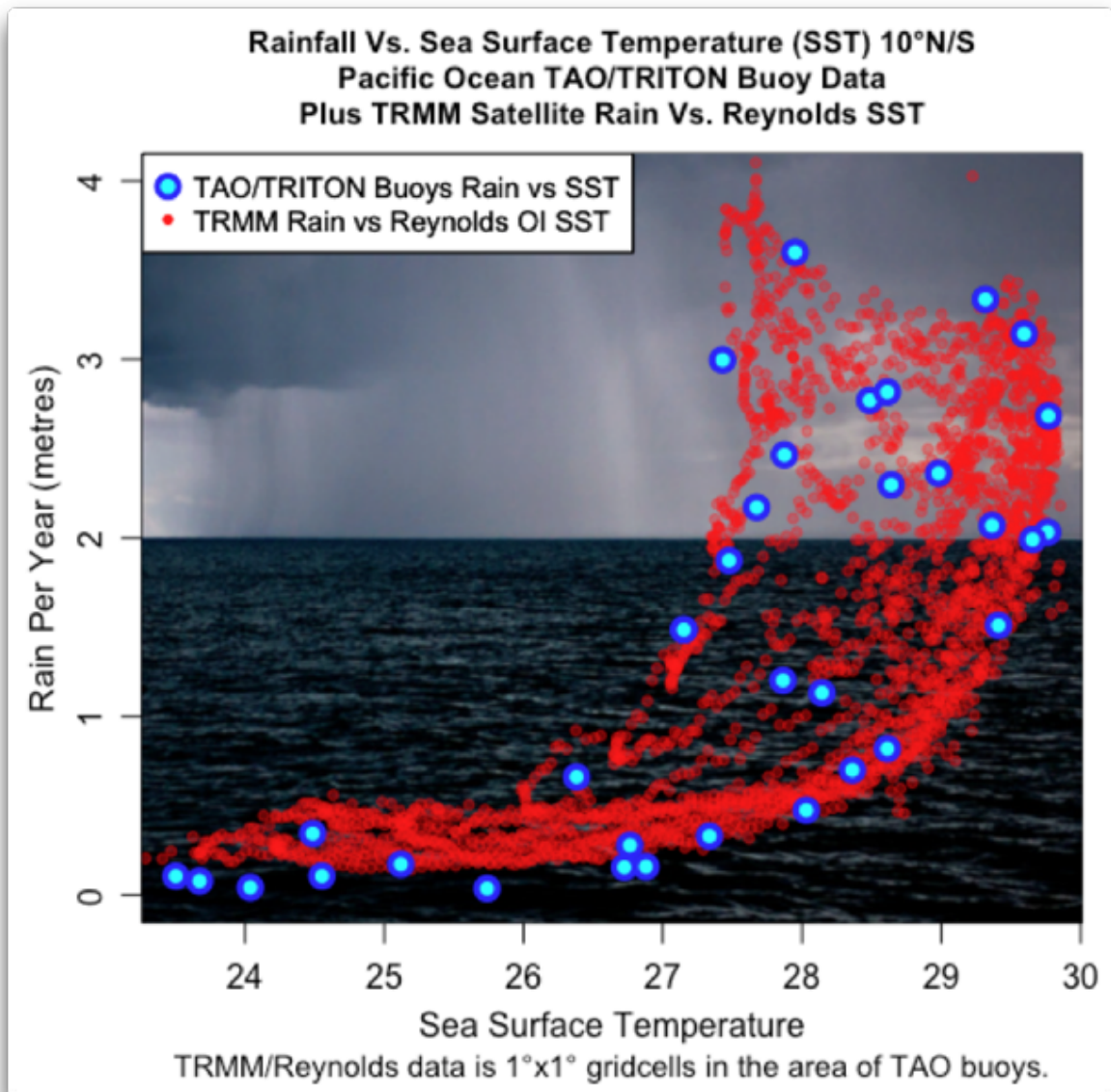


Abbildung 5. Niederschlag aus tropischen Gewittern im Vergleich zur Meeresoberflächen-Temperatur. Die roten Punkte stammen von der Tropical Rainfall Measuring Mission. Die blauen Punkte stammen von der TAO/TRITON-Anlage mit verankerten Meeresbojen.

Und wie sieht die langfristige Bilanz von all dem auf dem gesamten Globus aus? Abbildung 6 zeigt das Ergebnis:

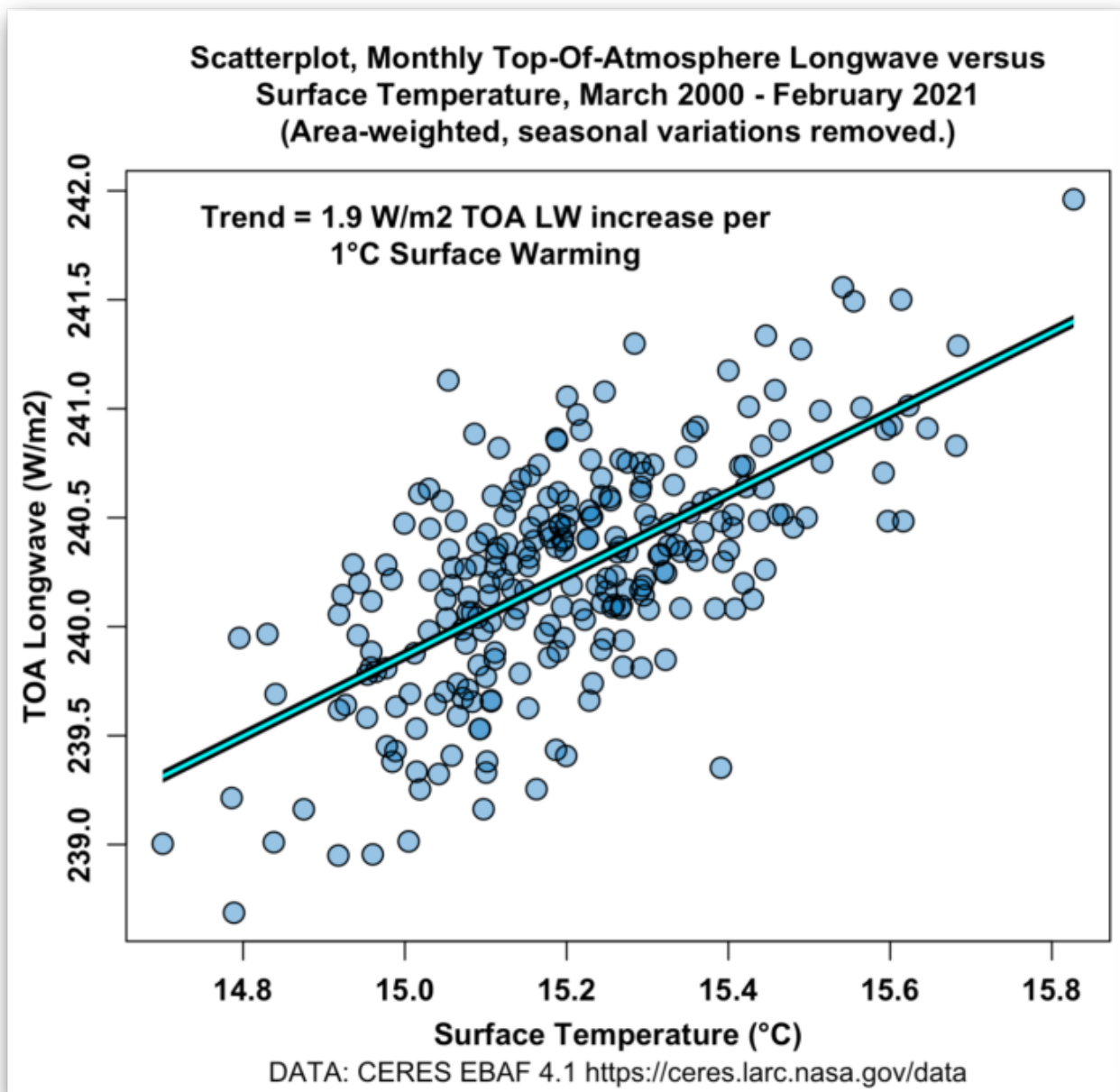


Abbildung 6. Streudiagramm, monatliche aufsteigende Langwelle über der Atmosphäre (TOA LW) gegenüber der Oberflächentemperatur.

Unter sonst gleichen Bedingungen (was nie der Fall ist) führt den CERES-Daten zufolge ein Anstieg der globalen Durchschnittstemperatur um 1°C zu einem Anstieg der aufsteigenden TOA-LW um 1,9 W/m² ... Dies entspricht der Höhe des Rückgangs der aufsteigenden TOA-LW, was ein eindeutiger Zufall ist, der sich aus einer Verdopplung des CO₂ ergeben würde.

In diesem Zusammenhang ist es erwähnenswert, dass sich die Dinge mit Lichtgeschwindigkeit abspielen, da wir es mit Strahlung in der Atmosphäre zu tun haben. Eine Kreuzkorrelationsanalyse zeigt, dass es keine Verzögerung zwischen monatlichen Änderungen der Oberflächentemperatur und monatlichen Änderungen der langwelligigen TOA-Strahlung gibt:

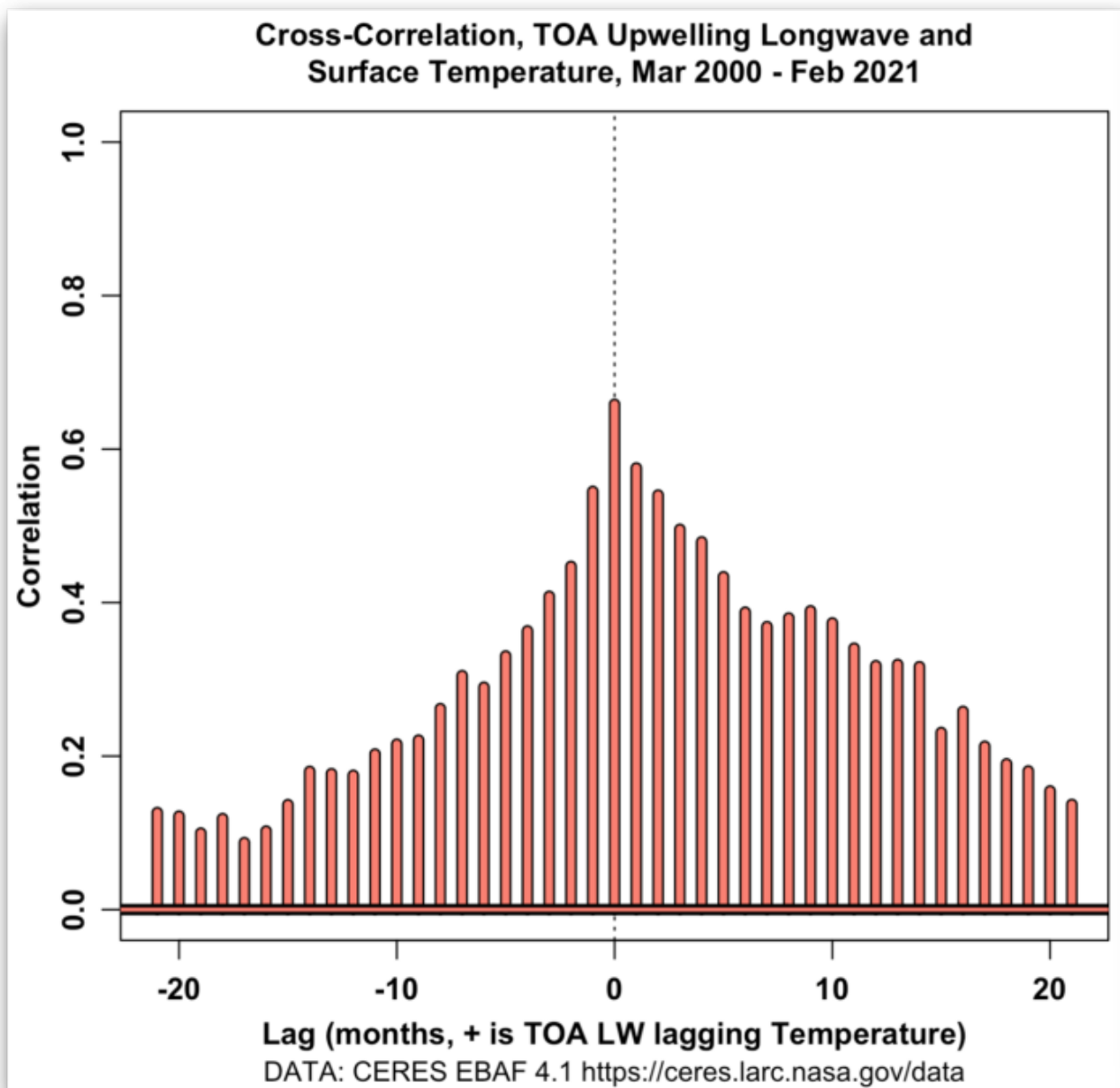


Abbildung 7. Kreuzkorrelation, monatliche aufsteigende Langwelle über der Atmosphäre (TOA LW) und Oberflächentemperatur. Positive Werte zeigen eine Verzögerung der TOA-LW gegenüber der Oberflächentemperatur, negative Werte eine Verzögerung der Oberflächentemperatur gegenüber der TOA-LW. Insgesamt gibt es keine Verzögerung zwischen den beiden.

Da es hier keine Verzögerung gibt und die Oberflächentemperatur direkt mit den Änderungen der langwelligen TOA-Strahlung in Beziehung steht, scheint mir dies eine gute Schätzung für die Gleichgewichts-Klimasensitivität (ECS) von 1°C pro CO_2 -Verdoppelung zu sein ... aber was weiß ich schon, ich bin ja gestern geboren.

Der berechnete Rückgang der TOA-Langwellen-Strahlung, der auf den CO_2 -Anstieg im 21-Jahres-Zeitraum zurückzuführen ist, beträgt etwa $-0,3 \text{ W/m}^2$. Die Änderung der Oberflächentemperatur in diesem Zeitraum beträgt $\sim 0,4^{\circ}\text{C}$. Dadurch hat sich die TOA-LW um $\sim 0,8 \text{ W/m}^2$ erhöht, was bedeutet,

dass sich die Oberfläche mehr als doppelt so schnell erwärmt, wie es zum Ausgleich des TOA-Ungleichgewichts erforderlich wäre.

Warum erwärmt sich die Oberfläche schneller, als es der CO₂-Anstieg vermuten lässt? Nun, der Hauptgrund ist die Zunahme der von der Oberfläche absorbierten Sonnenlichtmenge. Diese Sonnenenergie hat in den 21 Jahren der CERES-Aufzeichnung um 1,5 W/m² zugenommen ... wie ich schon sagte, sind andere Dinge nie gleich.

Link:

<https://wattsupwiththat.com/2022/01/07/where-is-the-top-of-the-atmosphere/>

Übersetzt von [Christian Freuer](#) für das EIKE