

Sich änderndes Sonnenlicht, Wetter & Klima

geschrieben von Chris Frey | 5. Mai 2026

Richard Willoughby

Summary

Dieser Artikel untersucht, wie die Geometrie von Erde und Sonne sowie die Sonnenvariabilität das Sonnenlicht an der Obergrenze der Atmosphäre (ToA) je nach Breitengrad und Jahreszeit verändern und wie sich diese Veränderungen durch Konvektion, Wolken und den Wärmetransport in Richtung der Pole ausbreiten und regionale Klimatrends prägen können. Die über einen Zeitraum von 1200 Jahren berechnete tägliche Sonneneinstrahlung über verschiedene Breitengrade hinweg wird mit Beobachtungen aus der Satellitenära verglichen, um zu beurteilen, ob das geografische Muster der beobachteten Veränderungen mit den durch die Sonne verursachten Veränderungen im Klimasystem übereinstimmt.

Der Wärmetransport von den Tropen in Richtung der Pole wird beschrieben und mit der Frage in Verbindung gebracht, warum sich Veränderungen des Ozeanwärmeinhalts (OHC) tendenziell auf die Hauptkondensations- und Sturmzonen der jeweiligen Hemisphäre konzentrieren. Ziel ist es, die Breitengradunterschiede im solaren Antrieb mit Unterschieden in der Advektion und der Wärmespeicherung in Verbindung zu bringen.

Eine einfache Matrix aus Klimazonen und Jahreszeiten dient dann als organisatorischer Rahmen, um Veränderungen der saisonalen Sonneneinstrahlung auf Jahres- und Jahrhundert-Skala zu vergleichen und diese Veränderungen mit beobachteten Verschiebungen bei Temperatur, Bewölkung und Wärmeaufnahme in Beziehung zu setzen.

Introduction

In diesem Artikel wird die elektromagnetische Sonnenstrahlung pro Flächeneinheit (Sonnenfluss) in W/m^2 angegeben und bezieht sich auf die tägliche durchschnittliche Sonneneinstrahlung an der Obergrenze der Atmosphäre (ToA). Über Zeiträume von mehr als einem Tag wird die ToA-Sonneneinstrahlung an einem bestimmten Breitengrad und zu einer bestimmten Jahreszeit bestimmt durch (i) den Abstand zwischen Erde und Sonne, (ii) die Sonnendeklination (die Winkelposition der Sonne relativ zur Äquatorialebene der Erde) und (iii) die Sonnenleistung. Diese Eingangsgrößen reichen aus, um die tägliche durchschnittliche ToA-Sonneneinstrahlung an jedem Breitengrad für jeden Tag des Jahres zu berechnen. In den folgenden Abschnitten wird zunächst quantifiziert, wie sich die Sonneneinstrahlung je nach Breitengrad und Zeitpunkt verändert, und anschließend werden diese Muster mit der Reflexion in den Tropen,

dem Wärmetransport zu den Polen, dem OHC und der Temperaturreaktion in den mittleren Breiten in Verbindung gebracht.

Das HORIZONS-System der NASA/JPL liefert präzise Ephemeriden, mit denen sich die Entfernung zwischen Sonne und Erde sowie die Sonnendeklination für jedes beliebige Datum berechnen lassen. Dies sind die wichtigsten astronomischen Eingangsgrößen, die hier zur Berechnung der täglichen mittleren ToA-Sonneneinstrahlung nach Breitengrad verwendet werden. Die zyklische Veränderung der Solarkonstante basiert auf der beobachteten Korrelation zwischen der Abweichung der Sonnen-Rotation vom Mittelwert und der Sonnenaktivität.

Täglicher durchschnittlicher Sonnenfluss über Breitengrade und Zeit

Die Grafiken in diesem Abschnitt zeigen, wie sich der maximale tägliche Durchschnittsfluss für ausgewählte Breitengrade im Laufe der Zeit verändert hat. Grafik 1 zeigt die Trends für die nördliche Hemisphäre (NH), während Grafik 2 die Trends für die südliche Hemisphäre (SH) darstellt:

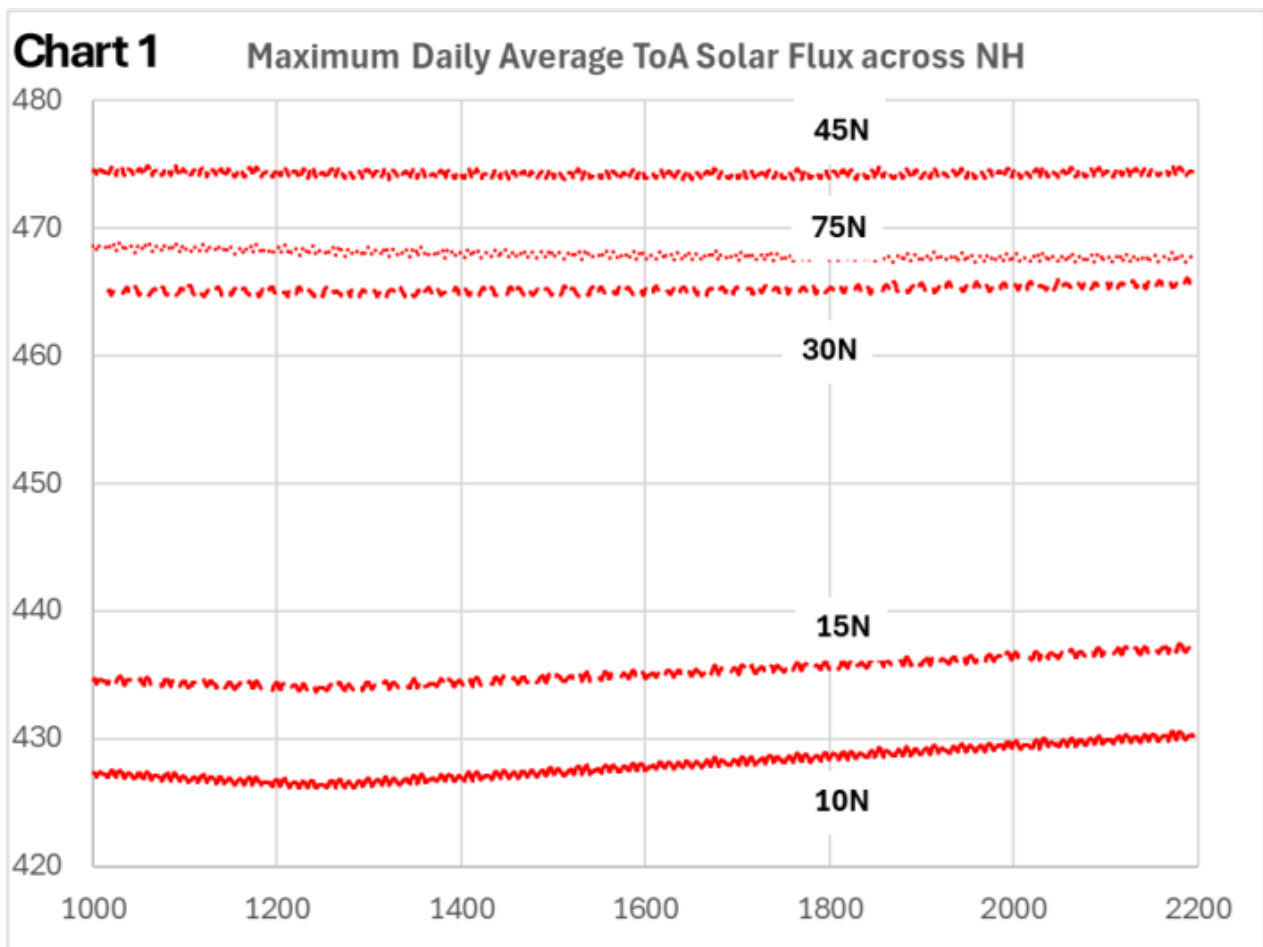
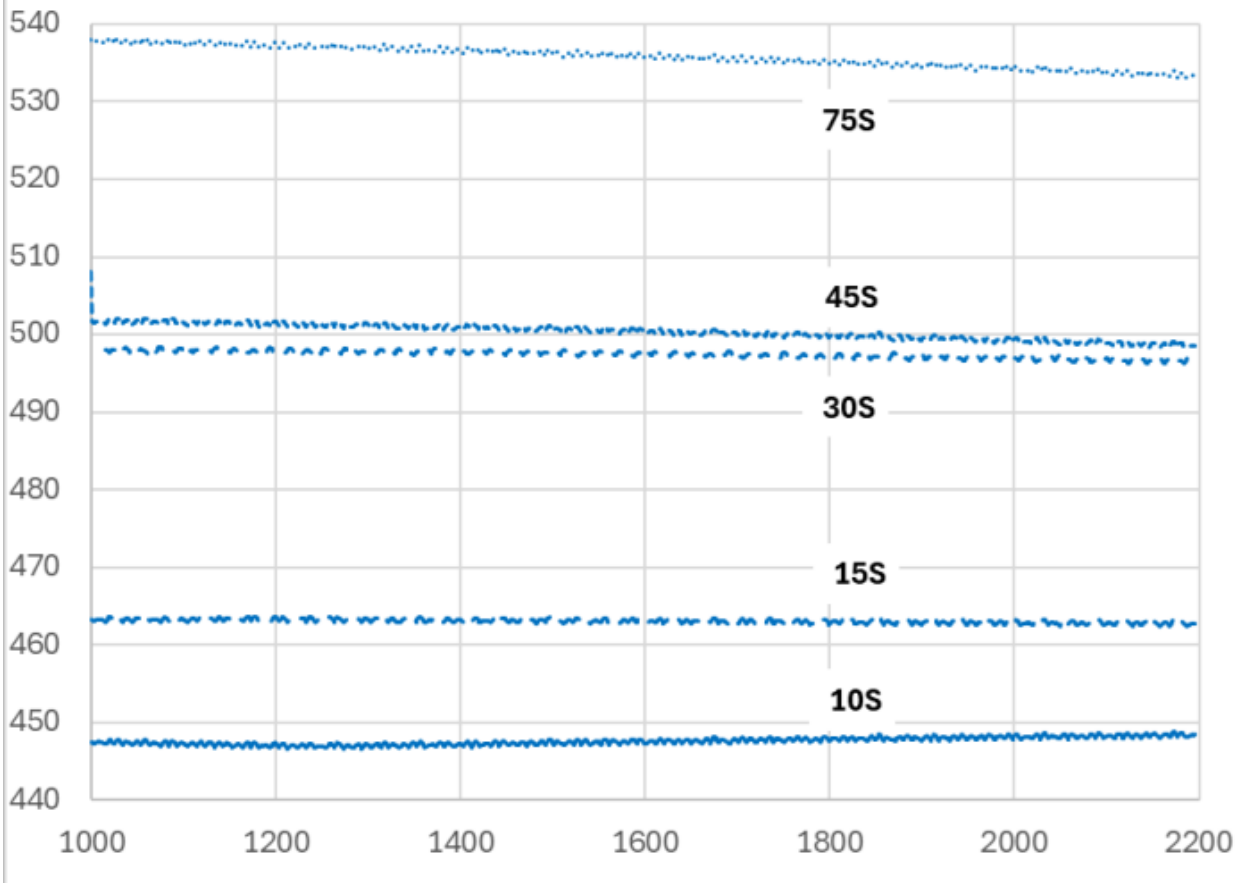
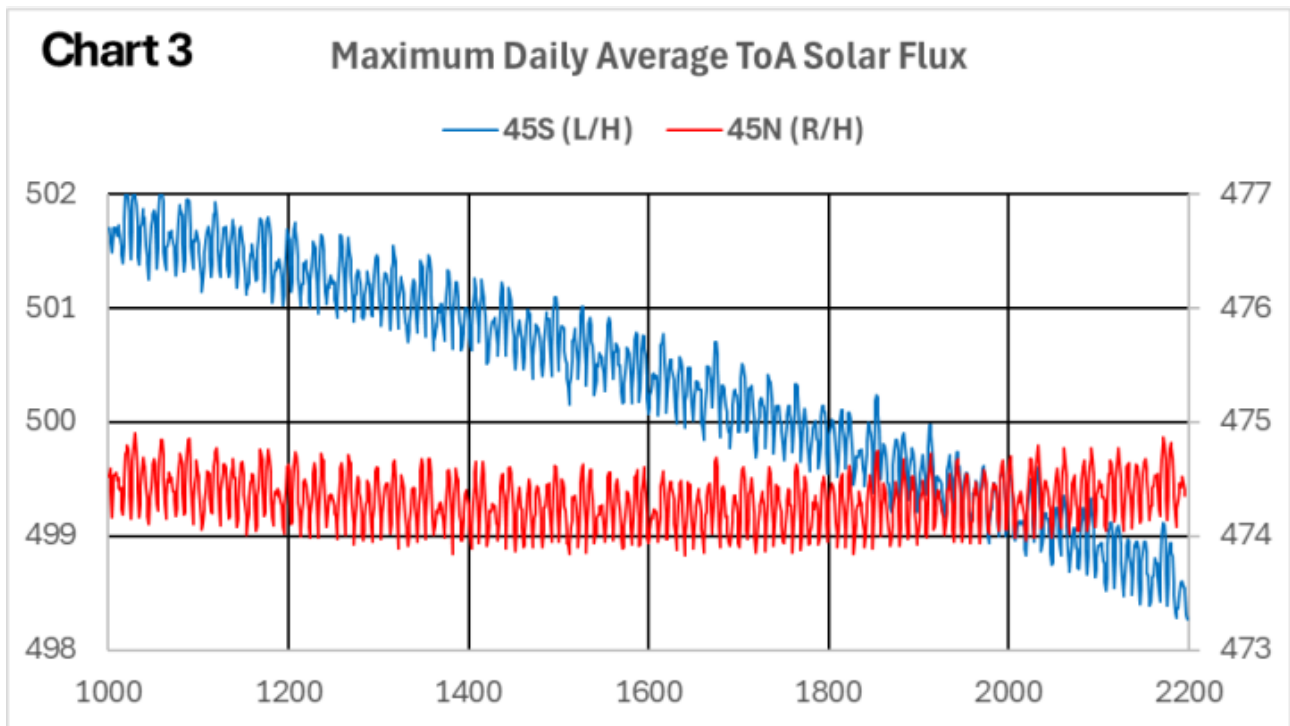


Chart 2**Maximum Daily Average ToA Solar Flux across SH**

Für die ausgewählten Breitengrade auf der Nordhalbkugel weist 45° N den höchsten maximalen Tagesdurchschnitt von fast 474 W/m² auf, der sich über den dargestellten Zeitraum von 1200 Jahren kaum verändert hat. Im Gegensatz dazu weist 10° N den niedrigsten maximalen Tagesdurchschnitt auf und zeigt um 1200 n. Chr. eine deutliche Wendung.

Für die gleichen ausgewählten Breitengrade auf der südlichen Hemisphäre (SH) weist 75°S den höchsten maximalen täglichen Durchschnitts-Sonnenfluss auf, der über den gesamten Zeitraum von 538 W/m² im Jahr 1000 n. Chr. zurückgegangen ist. 10°S zeigt einen kaum sichtbaren minimalen Wendepunkt um 1200 n. Chr. 15°S verzeichnet einen nahezu flachen Trend, während 30°S und 45°S leichte Abwärtstrends aufweisen.

Es ist zu beachten, dass keine Symmetrie zwischen der nördlichen und der südlichen Hemisphäre besteht. Die signifikanten Unterschiede lassen sich besser erkennen, wenn man den Maßstab für ausgewählte nördliche und südliche Breitengrade vergrößert. Abbildung 3 vergleicht 45° N und 45° S:



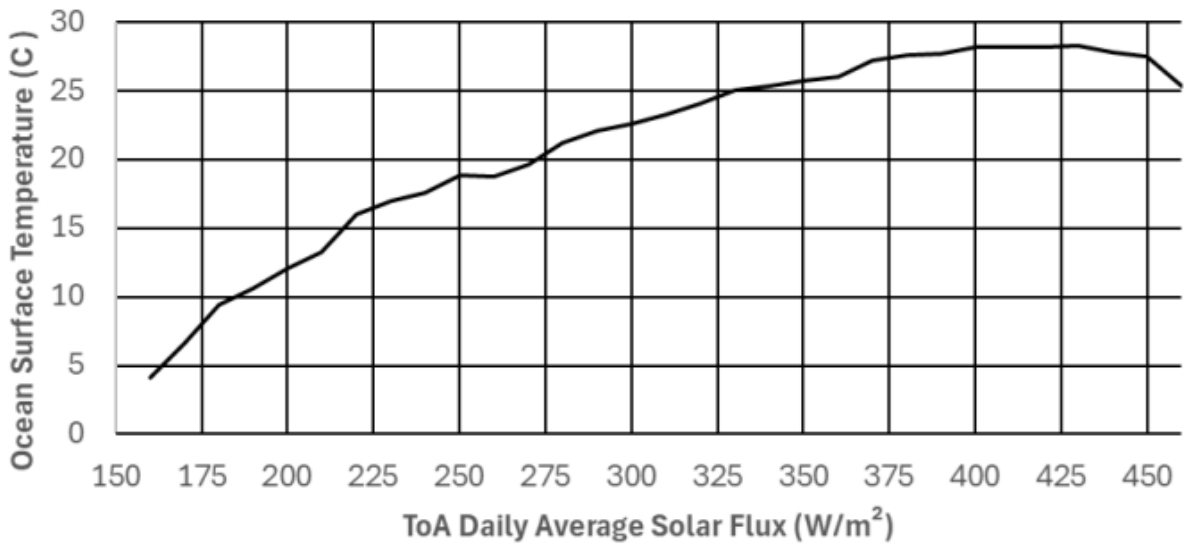
Im Laufe der 1200 Jahre sinkt der Wert bei 45° S von 502 W/m² um fast 4 W/m², während 45° N im Jahr 1640 ein flaches Minimum von 473,8 W/m² aufweist und sich über den gesamten Zeitraum von 1200 Jahren um weniger als 1 W/m² verändert. Man beachte auch, dass die Skalen den gleichen Bereich haben, jedoch um 25 W/m² versetzt sind. In der heutigen Zeit ist der maximale tägliche durchschnittliche Sonnenfluss in der südlichen Hemisphäre (SH) deutlich intensiver als der Sonnenfluss in der nördlichen Hemisphäre (NH).

Der nächste Schritt besteht darin, zu untersuchen, wie viel dieser ToA-Sonneneinstrahlung tatsächlich vom Ozean-Atmosphäre-System absorbiert und wie viel zurück ins All abgestrahlt wird, insbesondere in den Tropen, wo Konvektion und damit verbundene Wolken die Temperatur stark regulieren.

Abgestrahlter ToA-Solarfluss

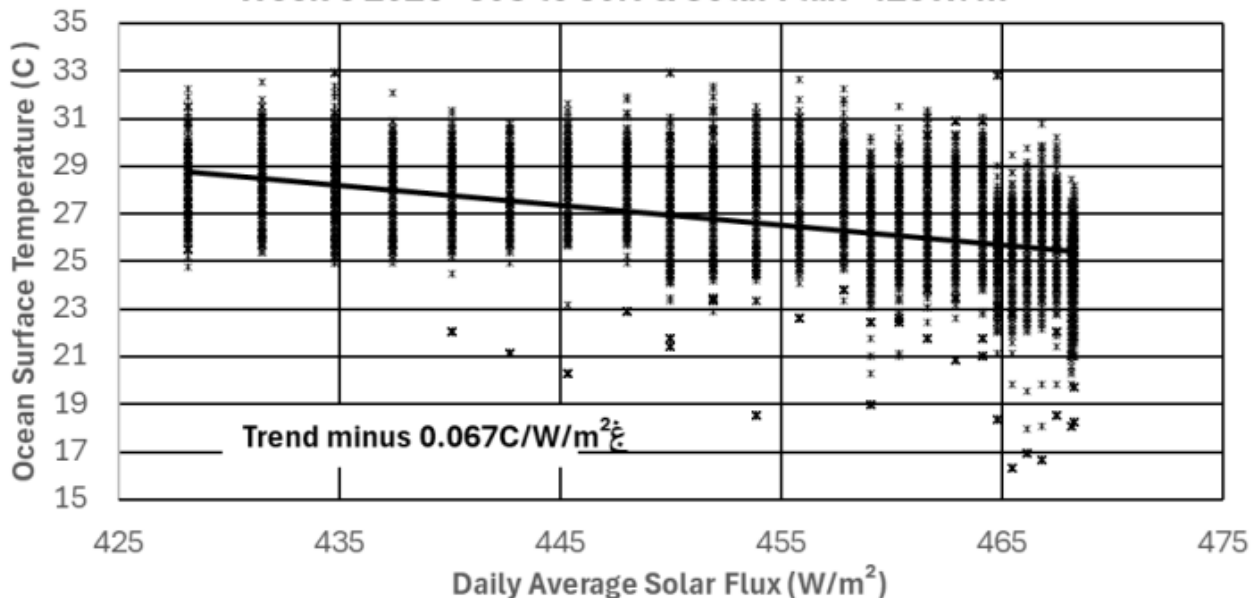
Ein erheblicher Teil des einfallenden ToA-Sonnenflusses wird nicht thermalisiert, sondern von Wolken und Oberflächen mit hoher Albedo (Eis und Schnee) reflektiert. Dies ist besonders in den Tropen von Bedeutung, wo hoch reichende Konvektion und die damit verbundenen Wolkenfelder als starker Regulator der Meerestemperatur (SST) wirken, die selbst in den wärmsten Regionen selten Werte deutlich über ~30 °C erreicht. Abbildung 4 untersucht diese Regulierung, indem sie die mittlere Meerestemperatur gegen den verfügbaren ToA-Sonnenfluss auf einem globalen 1°×1°-Raster aufträgt:

Chart 4 Ocean Surface Temperature Versus ToA Solar Intensity
Week 5 2026



Es ist offensichtlich, dass die Temperatur bei einem steigenden ToA-Sonnenfluss über 425 W/m² sinkt. Abbildung 5 zeigt eine Nahaufnahme des tropischen Ozeans, wo der Sonnenfluss über 425 W/m² liegt, und stellt alle Gitterpunkte sowie eine Regressionsgerade dar.

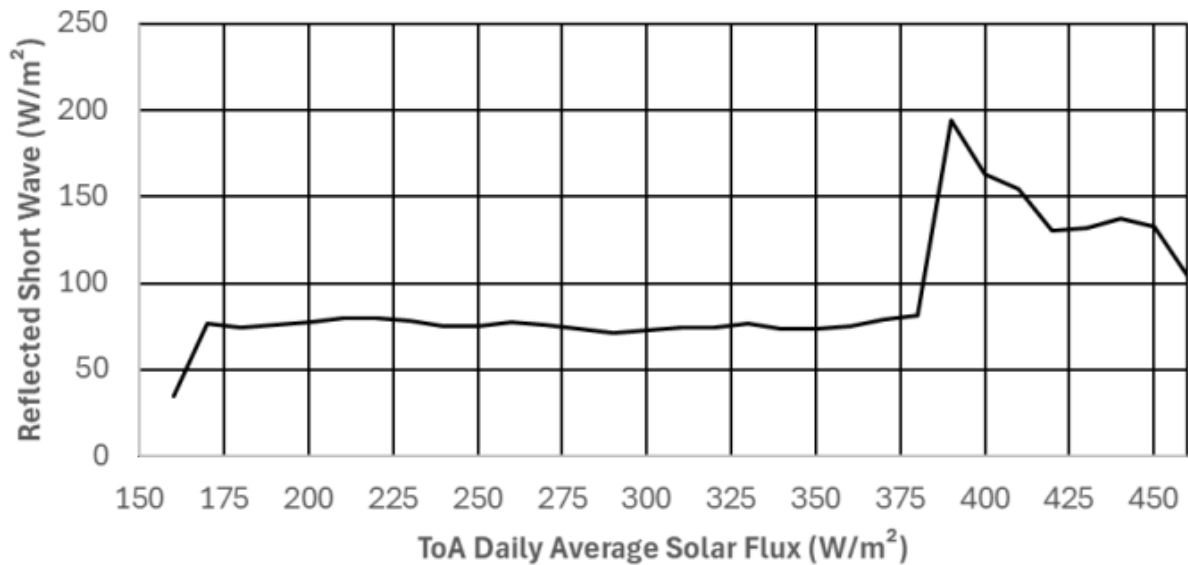
Chart 5 Ocean Surface Temperature Response to Solar Forcing
Week 5 2026- 30S to 30N & Solar Flux > 425 W/m²



Die Temperatur nimmt mit steigendem Sonnenfluss ab.

Diagramm 6 stellt den reflektierten kurzwelligigen Flux des gesamten Himmels dem verfügbaren ToA-Sonnenfluss für einen repräsentativen Tag (in Woche 5, 2026) gegenüber, abgestimmt auf die oben verwendete SST-Momentaufnahme.

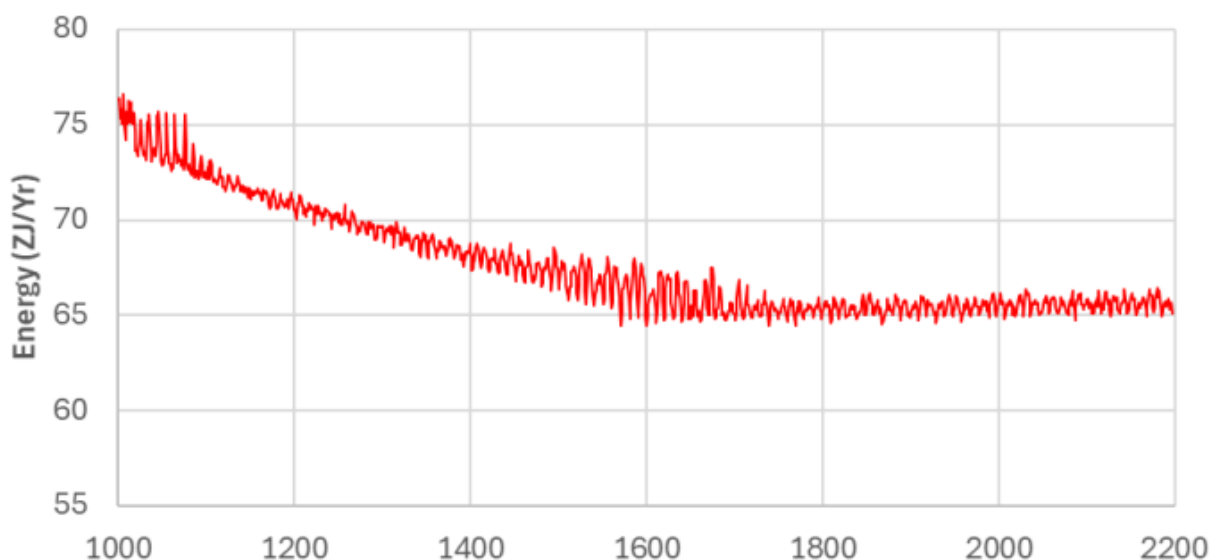
Chart 6 Reflected Short Wave Versus ToA Solar Intensity
3 Feb 2026



Der reflektierte Sonnenfluss bleibt nahezu konstant, bis er einen Wert von über 375 W/m² erreicht; danach steigt die Reflexion rasch auf einen Spitzenwert von fast 50 % der verfügbaren Sonneneinstrahlung, bevor sie wieder etwas abnimmt.

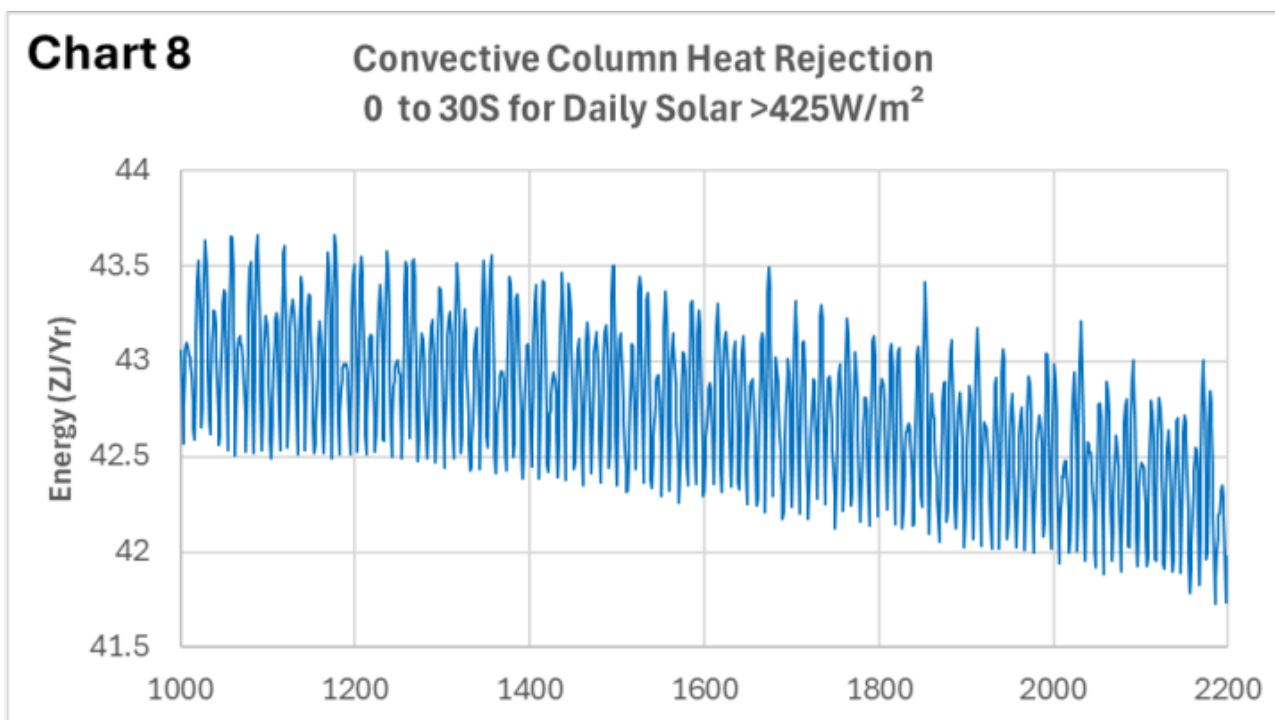
Abbildung 7 kombiniert den berechneten durchschnittlichen täglichen Sonnenfluss über alle Breitengrade hinweg mit dem thermoregulierenden Prozess der Atmosphäre, um eine Schätzung der potenziellen Wärme zu erhalten, die jedes Jahr in den Tropen der nördlichen Hemisphäre durch kurzwellige Reflexion abgeführt wird.

Chart 7 Convective Column Heat Rejection
0 to 30N for Daily Solar > 425 W/m²



Diese jährliche Schätzung ist ein Flächendurchschnitt, der auf einem Schwellenwertansatz basiert: Für jede Hemisphäre wird die „Abweisung“ kurzweiliger Strahlung nur an Tagen und in Breitengraden gezählt, an denen der tägliche mittlere ToA-Fluss einen angenommenen Schwellenwert für Konvektion/Reflexion von 425 W/m^2 überschreitet. Hier orientieren sich die Schwellenwerte an (i) Beobachtungen von Bojen in Warmwassergebieten (SST nahe $28\text{--}30 \text{ }^\circ\text{C}$, wo anhaltende Konvektion häufig ist) und (ii) typischen tropischen Werten für reflektierte kurzweilige Strahlung (die unter konvektiven Wolkenbedingungen oft $\sim 80 \text{ W/m}^2$ überschreiten). Breitengrade nördlich von 30° werden ausgeschlossen, da diese Regionen selten SSTs aufweisen, die hoch genug für anhaltende zyklische Konvektion sind.

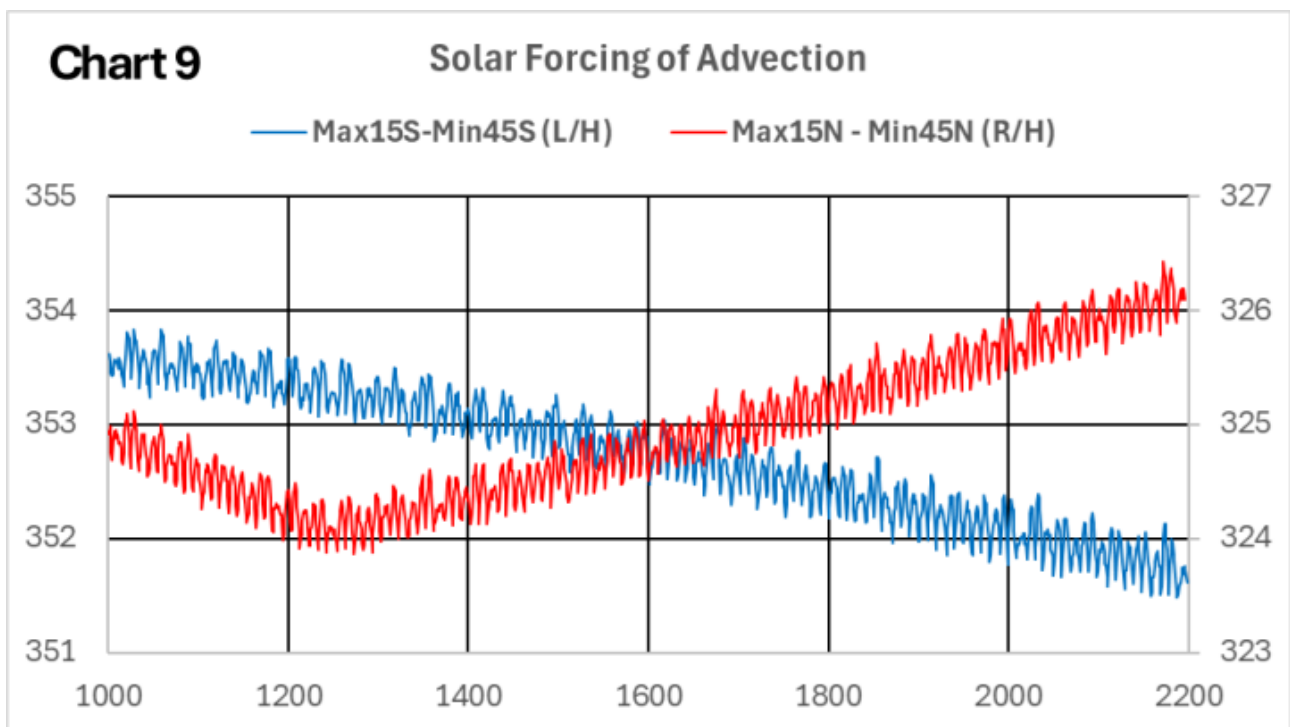
Basierend auf dieser Schätzung wies die nördliche Hemisphäre (NH) um 1600 n. Chr. ihre geringste Wärmeabgabe auf und zeigt nun einen leicht steigenden Trend. Im Gegensatz dazu ist der in Abbildung 8 dargestellte Trend für die südliche Hemisphäre (SH) seit vor 1000 n. Chr. stetig rückläufig, ohne dass in der nördlichen Hemisphäre eine Trendwende zu beobachten ist:



Da tropische Wirbelstürme für ihre Entstehung eine Umgebung benötigen, die aufgrund feuchter Konvektion potenziell instabil ist (d. h. in der Lage ist, hoch reichende Konvektion zu unterstützen) (Gray, 1968; NOAA, o. J.), ist es wahrscheinlich, dass die Zyklon-Aktivität in beiden Hemisphären im Jahr 1000 n. Chr. höher war als heute (z. B. Mann, Woodruff, Donnelly & Zhang, 2009). Beobachtungsdaten für den australischen Raum deuten auf einen Rückgang der Gesamtzahl tropischer Wirbelstürme seit Beginn zuverlässiger Beobachtungen im Satellitenzeitalter hin, wobei große Schwankungen durch ENSO zu verzeichnen sind (Nicholls, Landsea & Gill, 1998; Dowdy, 2014).

Wärme-Transport aus den Tropen zu den Polen

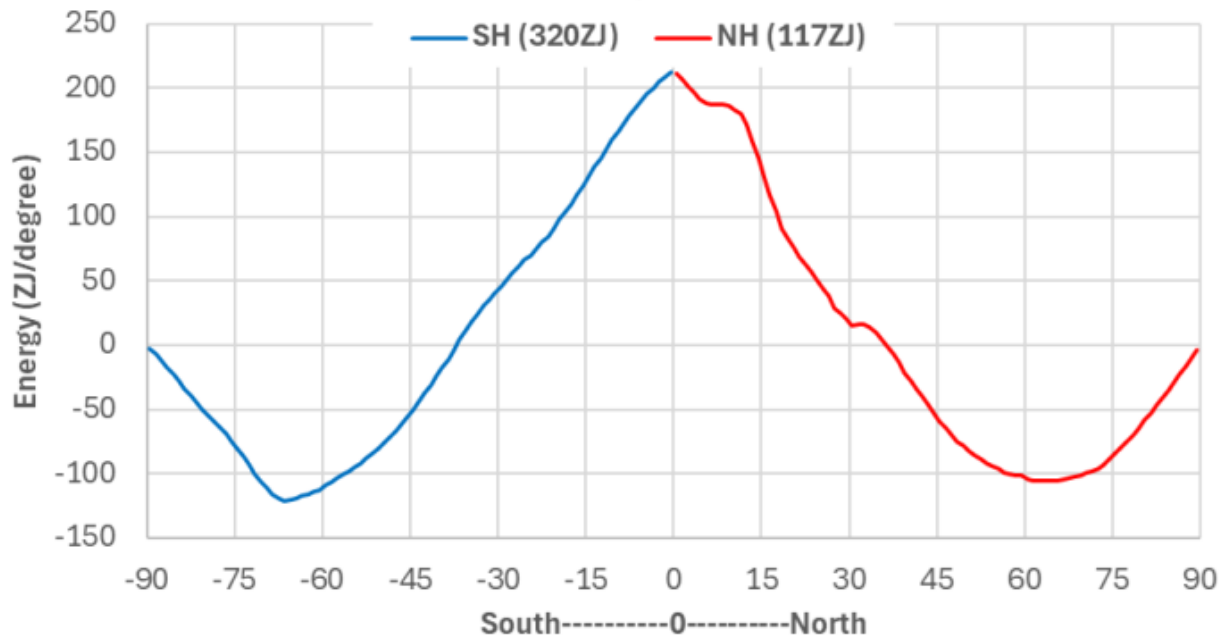
Konvektive Gewitterwolken, die sich über tropischen Warmwassergebieten bilden, sind die Hauptantriebskräfte der globalen Zirkulation. Sie erzeugen in jeder Hemisphäre den atmosphärischen Druckgradienten in Breitenrichtung, der Wärme aus den Tropen zu den Polen transportiert. Dieser Wärmetransport weist aufgrund der stärkeren jährlichen Schwankungen des Sonnenstrahlungsflusses in höheren Breiten sowohl eine räumliche als auch eine zeitliche Komponente auf. Abbildung 9 kombiniert die Breiten- und Zeitaspekte, indem sie die Differenz zwischen dem maximalen Tagesdurchschnitt bei 15 Grad und dem Minimum bei 45 Grad für beide Hemisphären berücksichtigt:



Es ist offensichtlich, dass sich die nördliche Hemisphäre (NH) nach einem Tiefpunkt um 1300 n. Chr. in einem starken Aufwärtstrend befindet, während die südliche Hemisphäre (SH) nach einem Höchststand um 1000 n. Chr. einen Rückgang verzeichnet, wenngleich die Schwankungen in der SH größer sind als in der NH.

Die Projekte CERES und ARGO liefern seit Beginn des 21. Jahrhunderts hoch auflösende Daten zur ToA-Strahlung und zur Ozeanwärme (OHC). Abbildung 10 basiert auf den CERES-Nettostrahlungsdaten und zeigt das kumulative Bild der über die Breitengrade hinweg in den letzten 21 Jahren gespeicherten oder verlorenen Wärme.

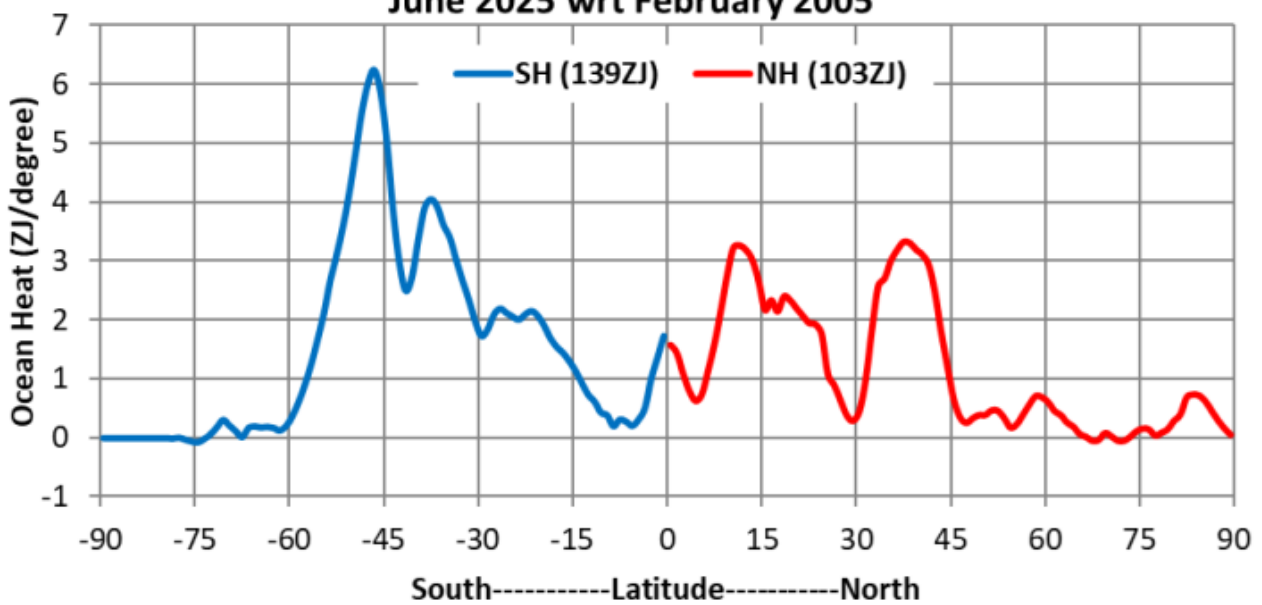
Chart 10 Global Net Radiant Heat by Latitude 2005 to 2025



Der für die südliche Hemisphäre (SH) berechnete Wärmetransport von den Tropen zu den Polen (4044 ZJ) ist höher als der der nördlichen Hemisphäre (NH) (3856 ZJ), und die SH hat mehr Wärme zurückgehalten (320 ZJ) als die NH (117 ZJ). Diese Asymmetrie steht im Einklang damit, dass die SH in der heutigen Zeit eine höhere tropische Sonneneinstrahlung erhält.

Die ARGO-Daten zur Meereswärme sind in Abbildung 11 ebenfalls über die Breitengrade hinweg dargestellt:

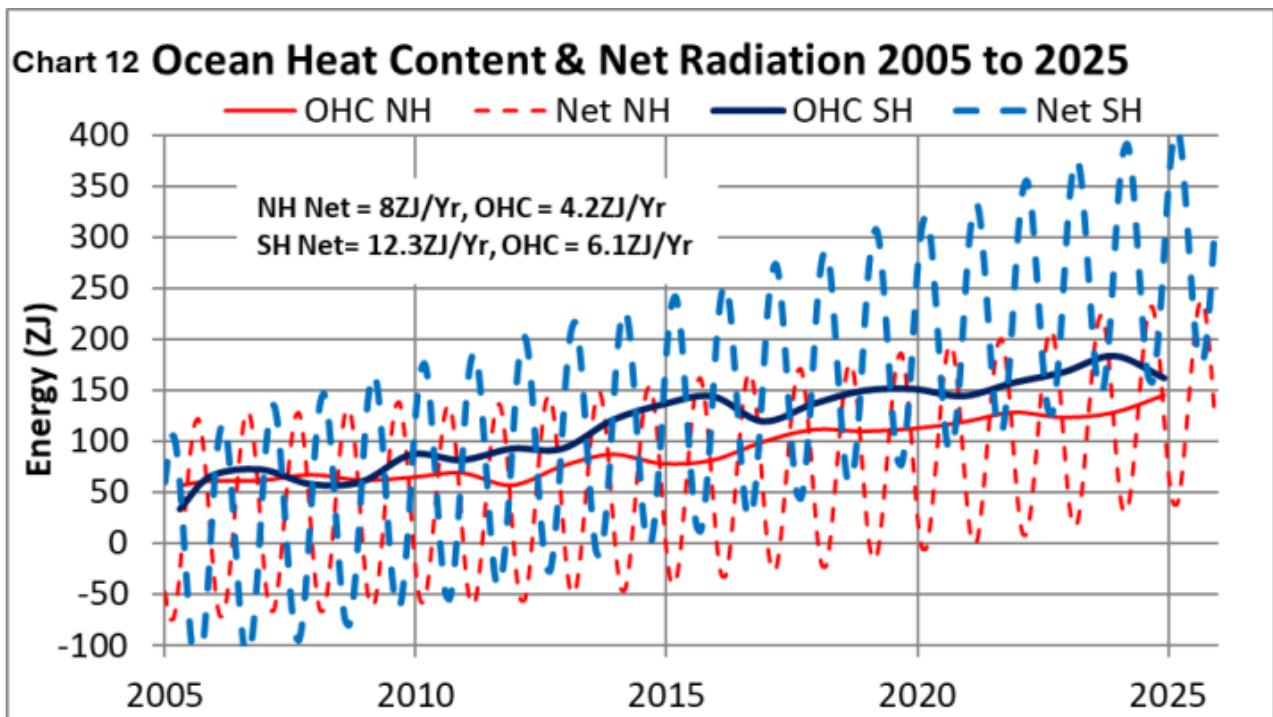
Chart 11 Ocean Heat Anomaly by Latitude
June 2025 wrt February 2005



Die beiden Hemisphären unterscheiden sich deutlich voneinander, wobei

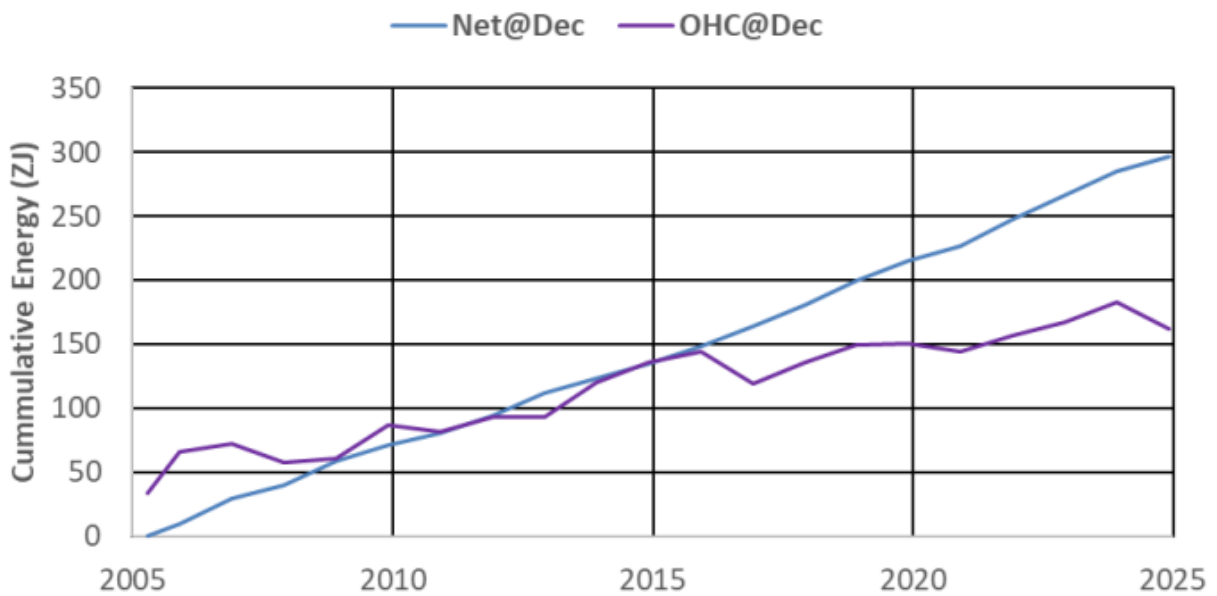
die nördliche Hemisphäre (NH) ausgeprägte Spitzenwerte in den Tropen und in der Advektionszone nördlich von 30° N aufweist. Die südliche Hemisphäre (SH) weist einen hohen, deutlichen Spitzenwert bei 45° S auf, mitten in der starken Advektionszone. Zudem hat die südliche Hemisphäre mehr Meereswärme gespeichert als die nördliche Hemisphäre.

Abbildung 12 vergleicht (i) die akkumulierte monatliche Nettostrahlung (CERES) und (ii) die OHC im Dezember (Argo/abgeleitetes OHC-Produkt) für jede Hemisphäre über den gesamten Argo-Zeitraum. Da die Beobachtungssysteme und die Erfassung konsistent sind, sollten mehrjährige Veränderungen der Nettostrahlung im Großen und Ganzen den mehrjährigen Veränderungen der Ozean-Wärmeaufnahme folgen (wobei zu berücksichtigen ist, dass Wärme auch in der Atmosphäre, im Land und in der Kryosphäre gespeichert werden kann und dass zeitliche Verzögerungen zu erwarten sind).



Die Werte der NH-Reihe verlaufen weitgehend parallel, während die Werte der SH-Reihe ab 2015 voneinander abweichen. Diese Abweichung wird in Abbildung 12A deutlicher, in der die Jahresendwerte (Dezember) sowohl für die Nettostrahlung als auch für die OHC verglichen werden.

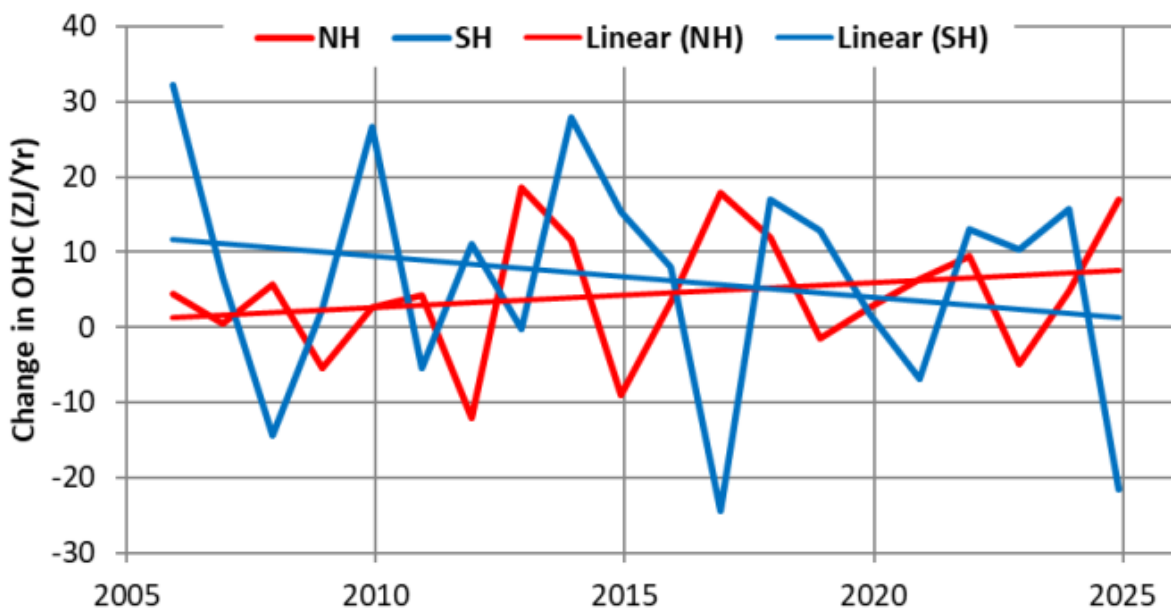
Chart 12A SH Divergence of Net Radiation and OHC



Die Abweichung betrug Ende 2025 140 ZJ.

Die jährliche Veränderung des OHC für beide Hemisphären zeigt laut Abbildung 13 entgegengesetzte Trends.

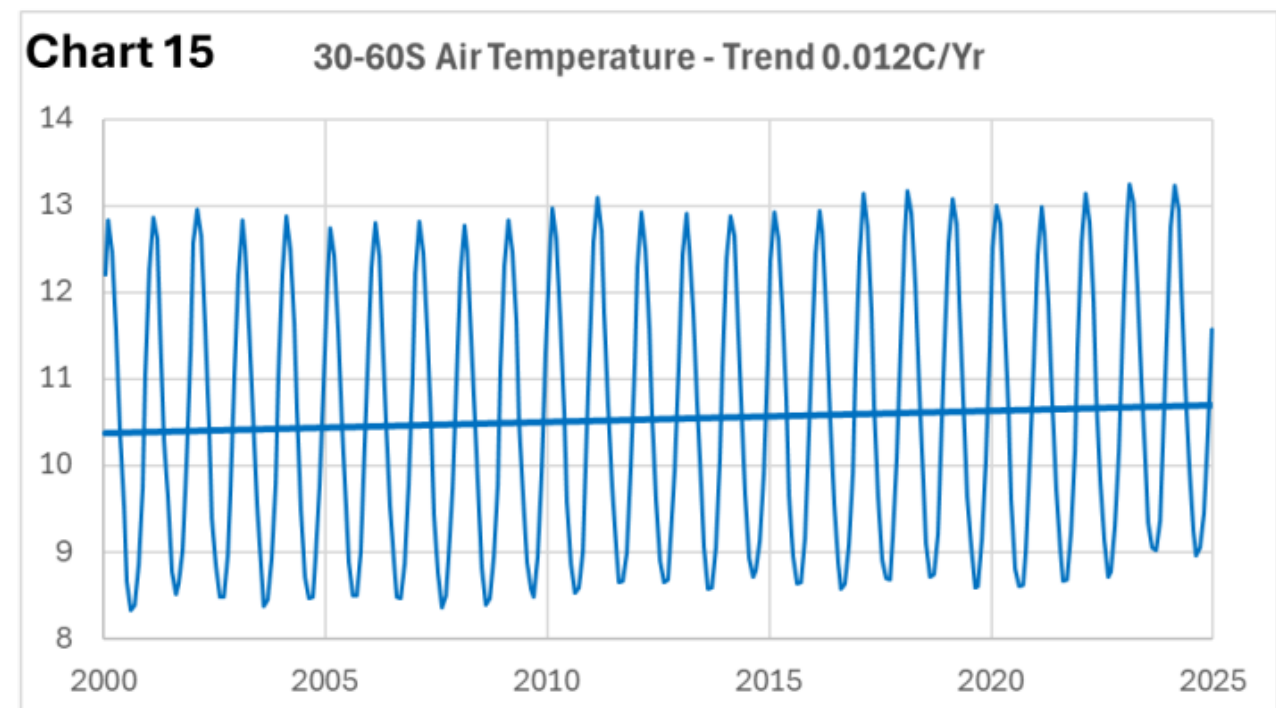
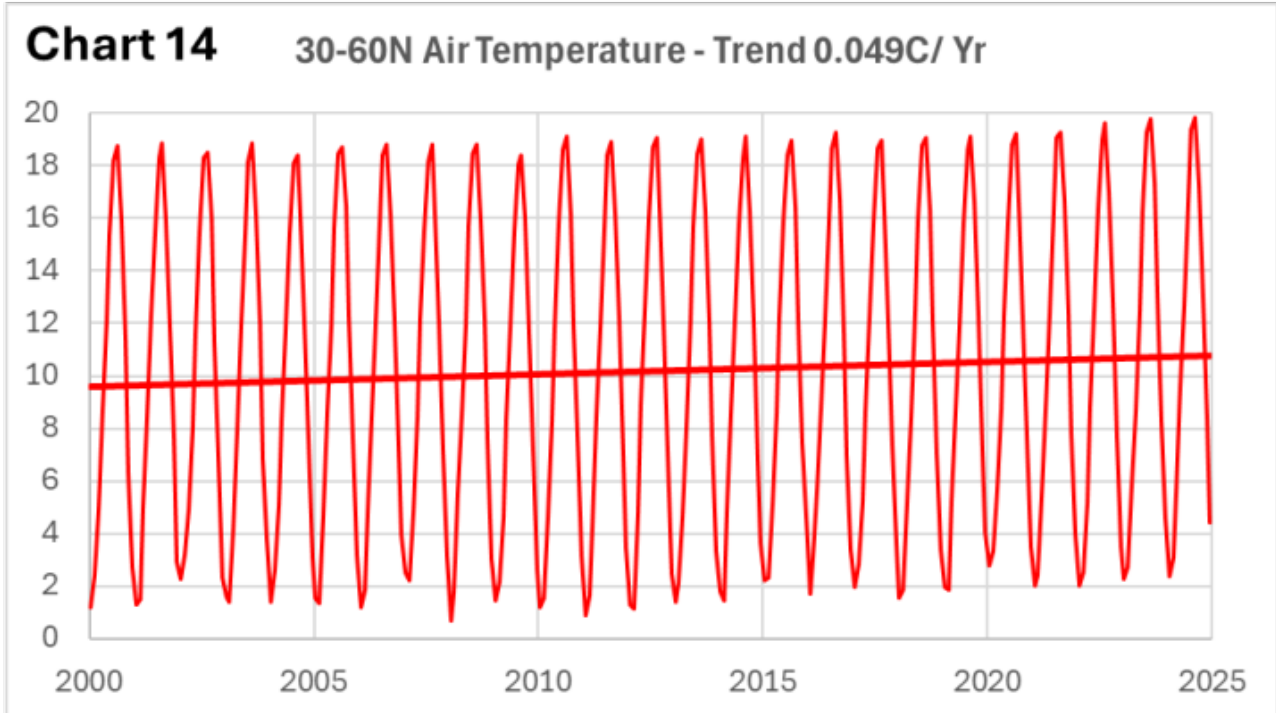
Chart 13 Yearly Change in Ocean Heat Content



Die jährliche Veränderung in der südlichen Hemisphäre nähert sich Null. Während sich die Veränderung in der nördlichen Hemisphäre weiter beschleunigt. Unter Berücksichtigung erheblicher Zeitverzögerungen stehen beide Trends im Einklang mit den Veränderungen der solaren Antriebskraft der Advektion.

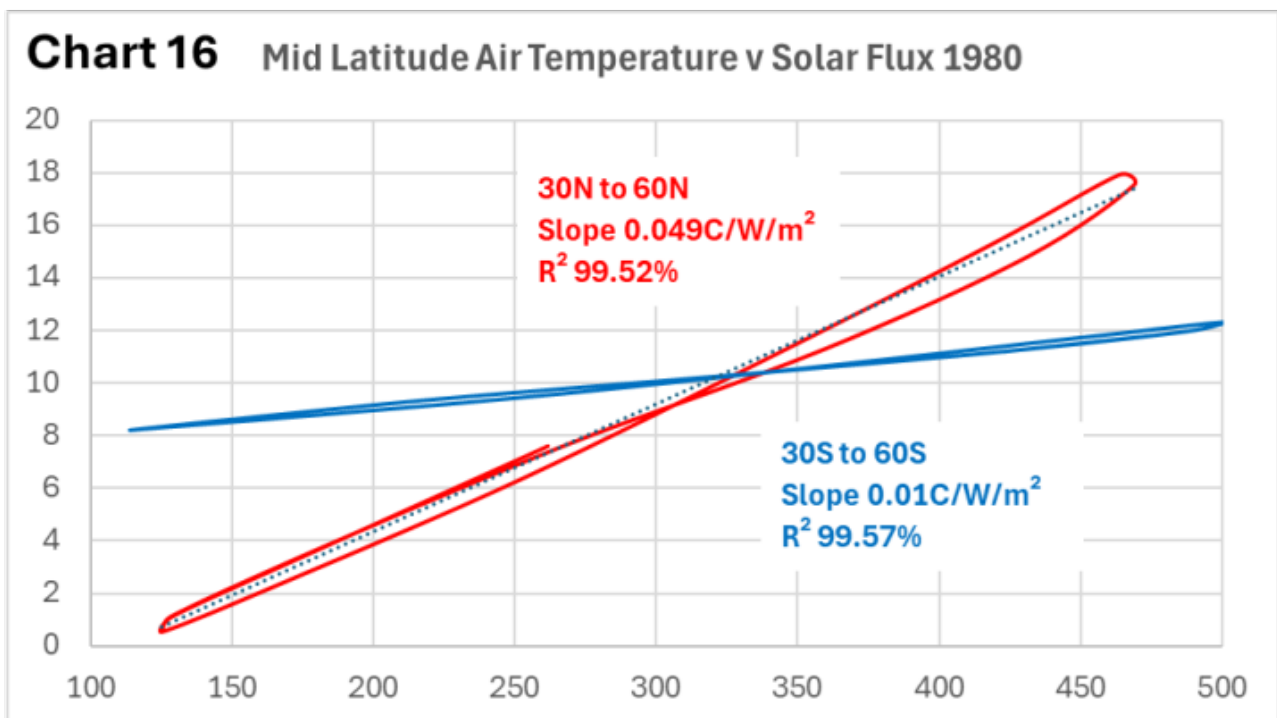
Temperaturreaktion in den mittleren Breiten auf solare Antriebskräfte

Es ist offensichtlich, dass sich der Sonnenfluss nicht symmetrisch über die beiden Hemisphären hinweg verändert. Es ist zudem ersichtlich, dass die thermische Reaktion der beiden Hemisphären recht unterschiedlich ausfällt. Die Abbildungen 14 und 15 zeigen die monatlichen Temperaturen für die mittleren Breiten der beiden Hemisphären im Zeitraum von 2000 bis 2025. Die Daten stammen aus der globalen Gitterdatenbank für 2-Meter-Lufttemperaturen von Berkeley.



Beide mittlere Breitengrade weisen im Zeitraum 2000–2025 einen Aufwärtstrend auf, doch die nördliche Hemisphäre erwärmt sich in diesem Zeitraum schneller als die südliche Hemisphäre. Wenn sich die jüngsten Trends fortsetzen, werden die mittleren Breitengrade der nördlichen Hemisphäre ab 2026 im Durchschnitt durchgehend wärmer sein als die der südlichen Hemisphäre.

Beide Temperaturaufzeichnungen korrelieren stark mit dem Sonnenfluss, doch die Reaktion der südlichen Hemisphäre ist langsamer und beträgt nur ein Fünftel der Reaktion der nördlichen Hemisphäre. Abbildung 16 zeigt X-Y-Diagramme der monatlichen Temperatur im Vergleich zum 30-Tage-Durchschnitt des täglichen Sonnenflusses, wobei die nördliche Hemisphäre um 36 Tage und die südliche Hemisphäre um 61 Tage verzögert ist:

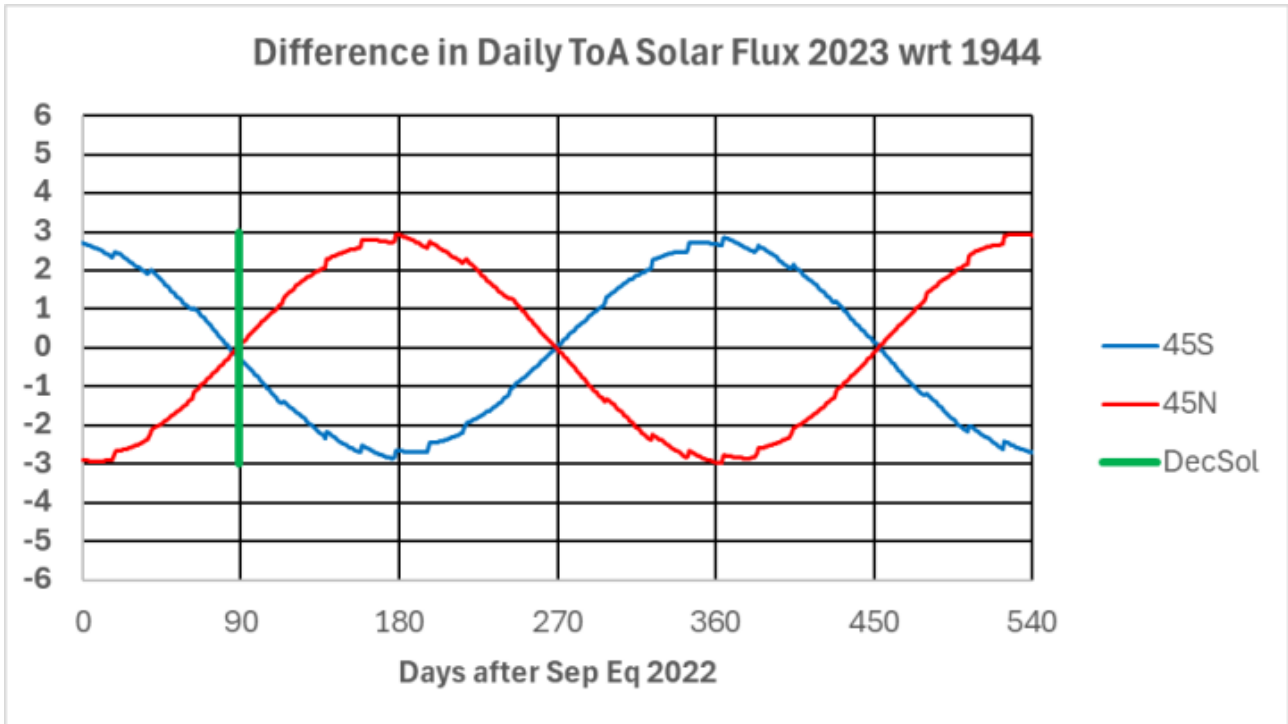


Änderungen des solaren Antriebs von Jahr zu Jahr

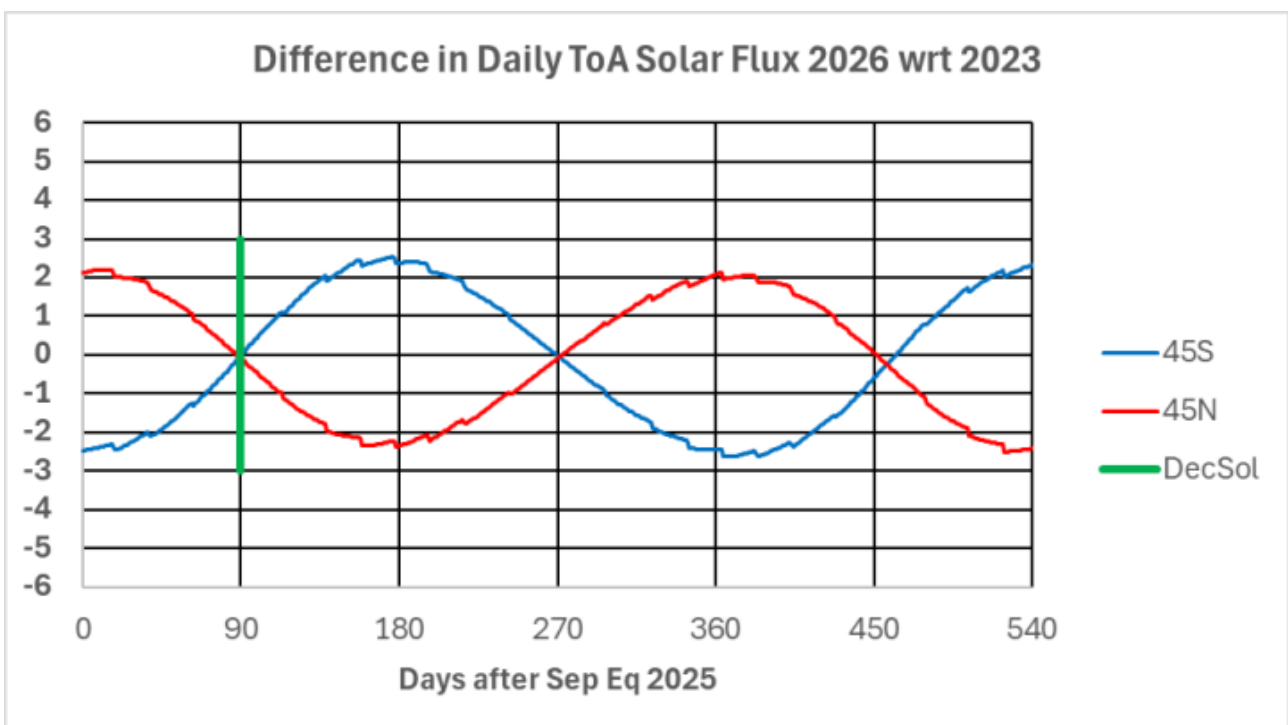
Die saisonale Sonneneinstrahlung unterliegt von Jahr zu Jahr erheblichen Schwankungen. Die Veränderungen in den Tropen treiben die Konvektion an und stehen in Zusammenhang mit dem Konvektionspotenzial und der Zyklon-Aktivität. Die Wärmeregulierung in den Tropen begrenzt den Einfluss der Sonneneinstrahlung auf die Temperatur. Sobald sich an den Polen Eis auf der Oberfläche bildet, verläuft die thermische Reaktion auf die Sonneneinstrahlung stark nichtlinear. Im Gegensatz dazu zeigen die mittleren Breiten gemäß Abbildung 16 oben eine fast lineare Reaktion auf die solare Strahlung. Dementsprechend geben die Schwankungen der täglichen solaren Strahlung in den mittleren Breiten von Jahr zu Jahr Aufschluss über die zu erwartenden Temperaturänderungen von Jahr zu Jahr.

Die folgende Reihe von Diagrammen zeigt anhand ausgewählter Beispiele,

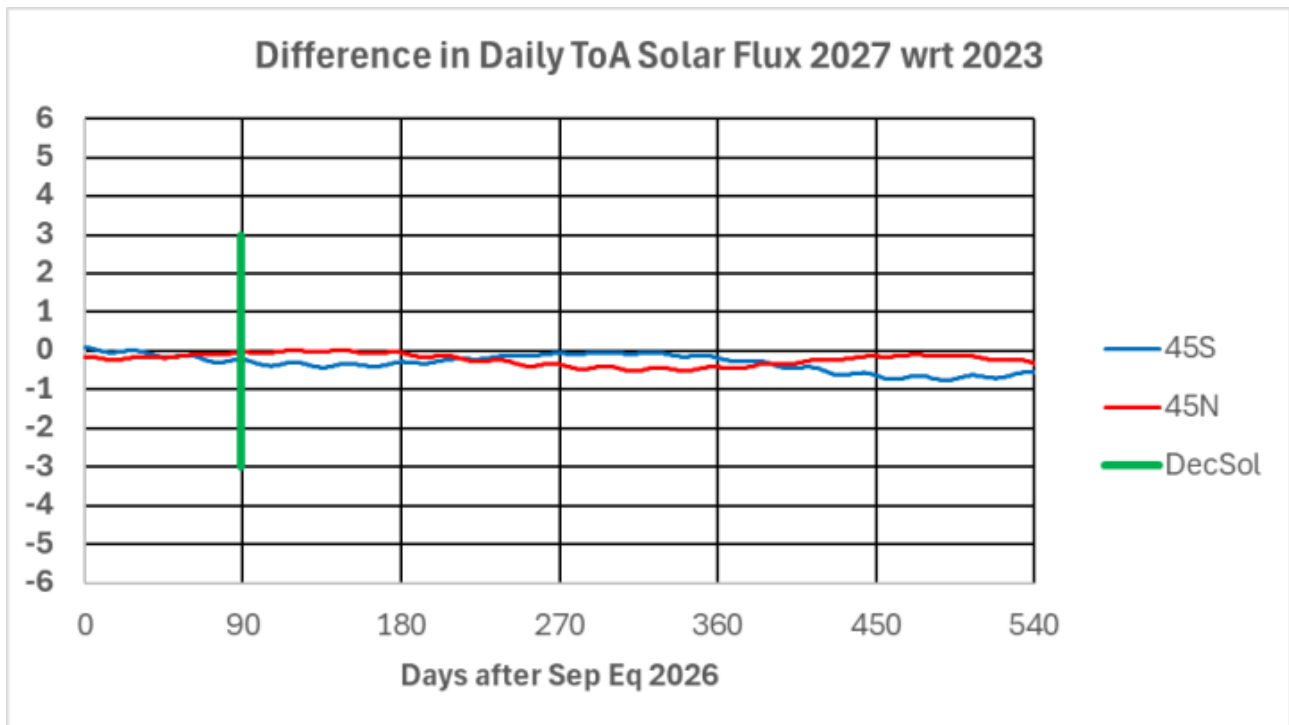
wie die tägliche Sonneneinstrahlung in einem Jahr im Vergleich zu einem gewählten Basisjahr für 45° N und 45° S variiert. Die Tage sind vom September-Äquinoktium des Jahres vor dem betrachteten Jahr bis nahe zum März-Äquinoktium des folgenden Jahres nummeriert. Die vertikale grüne Linie markiert die Wintersonnenwende im Dezember, die etwa eine Woche vor Beginn des betrachteten Jahres stattfindet.



Das Jahr 2023 verzeichnete in beiden Hemisphären den höchsten Sonnenfluss vom Frühling bis zum Sommer in der jüngeren Geschichte. Der Unterschied gegenüber 1944 beträgt an den Tagen mit der größten Abweichung bis zu 3 W/m^2 .



Vergleicht man das Jahr 2026 mit 2023, so ist die Sonneneinstrahlung vom Frühling bis zum Sommer in beiden Hemisphären um 2 W/m^2 zurückgegangen. Tatsächlich unterscheidet sich die Sonneneinstrahlung in den mittleren Breiten beider Hemisphären im Jahr 2027 nicht wesentlich von der im Jahr 2023.



Das nächste Jahr, in dem die Sonneneinstrahlung in den mittleren Breiten fast identisch mit der von 2023 sein wird, ist 2052. Es liegt geringfügig näher an 2023 als 2027.

Diskussion

Diese Erörterung fasst die Erkenntnisse aus den Diagrammen zusammen und bewertet anschließend, ob das Gesamtmuster – Veränderungen der Sonneneinstrahlung, das Reflexionsverhalten in den Tropen sowie hemisphärische Unterschiede bei Advektion und Wärmeaufnahme – eine schlüssige Erklärung für die oben hervorgehobenen beobachteten Trends liefert.

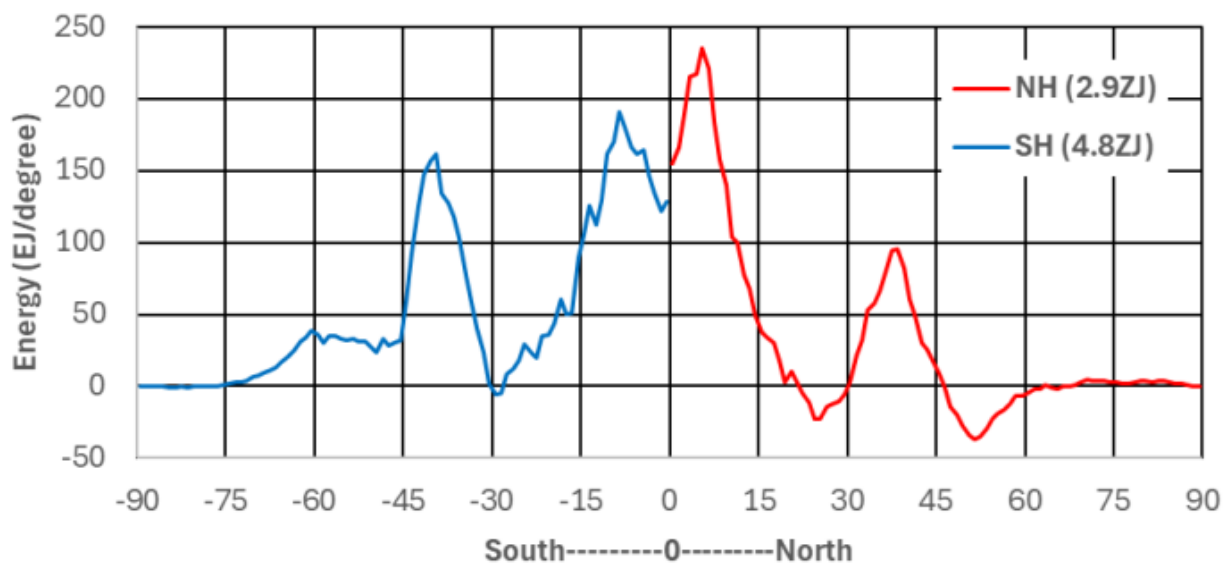
Schwankungen der Sonneneinstrahlung – Die Analyse reicht weit genug zurück, um Wendepunkte in der durch die Präzession bedingten Entwicklung der saisonalen und latitudinalen Sonneneinstrahlung zu identifizieren. Die Diagramme zeigen deutliche hemisphärische und latitudinale Asymmetrien: Maxima und Minima treten in der nördlichen und südlichen Hemisphäre nicht zur gleichen Zeit auf, und verschiedene Breitengrade weisen unterschiedliche langfristige Tendenzen auf. So erreicht beispielsweise der maximale tägliche Sonnenfluss bei 45° N um 1640 n. Chr. ein flaches Minimum und steigt dann langsam, während er bei 45° S um ~ 1000 n. Chr. seinen Höchststand erreicht und danach abnimmt. Niedrige Breitengrade (z. B. $\sim 10^\circ \text{ N}$) zeigen um ~ 1200 n. Chr. eine

Wendung und steigen in den folgenden Jahrhunderten um mehrere W/m^2 an. Zusätzlich zu diesen über mehrere Jahrhunderte reichenden Trends sind die in den nachfolgenden Diagrammen dargestellten jährlichen Schwankungen der saisonalen Sonneneinstrahlung groß genug (in der Größenordnung von $1\text{--}3 \text{ W/m}^2$ zu bestimmten Jahreszeiten), um die interannuelle Variabilität der Zirkulation und der Temperatur dort zu beeinflussen, wo die Systemreaktion nahezu linear ist.

Abgegebene Wärme (kurzwellige Reflexion) – Die Abbildungen 4–6 zeigen einen Regimewechsel im tropischen Ozean, sobald der tägliche mittlere ToA-Fluss hoch genug ist, dass sich die Meerestemperatur (SST) der Obergrenze des Warmpools nähert: Die Konvektion wird beständig, und die kurzwellige Reflexion über den gesamten Himmel nimmt mit weiterem Anstieg des ToA-Flusses rasch zu. In diesem Rahmen trägt eine zusätzliche ToA-Anregung oberhalb eines Schwellenwerts stärker zu Reflexions- und Zirkulationsänderungen bei als zu einem weiteren Anstieg der SST. Die Anwendung der Schwellenwertmethode in den Abbildungen 7–8 ergibt für die heutige Zeit eine höhere geschätzte „Abweisung“ kurzweiliger Strahlung in den Tropen der Nordhalbkugel als in denen der Südhalbkugel, trotz eines höheren ToA-Flusses in Teilen der Südhalbkugel. Sind die Schwellenwerte angemessen, wäre zu erwarten, dass Veränderungen in diesem Term der abgewiesenen Energie mit Veränderungen des konvektiven Potenzials korrelieren und somit für die Zyklon-Energie relevant sind.

Diskrepanz zwischen Nettostrahlung und OHC – Das Energie-Ungleichgewicht der Erde lässt sich nicht direkt messen; es wird vielmehr aus Satelliten-Strahlungsdaten abgeleitet und anhand der Veränderungen der Wärmeaufnahme des Ozeans auf Konsistenz überprüft. In den Abbildungen 12–13 verlaufen die kumulierte Nettostrahlung der nördlichen Hemisphäre (NH) und der OHC der NH weitgehend parallel, während die Reihen der südlichen Hemisphäre (SH) ab etwa 2015 auseinanderlaufen und bis Ende 2025 eine kumulative Differenz von $\sim 140 \text{ ZJ}$ erreichen. Die Interpretation einer solchen Diskrepanz erfordert die Berücksichtigung einer Reihe von Möglichkeiten: Sie kann auf Unsicherheiten des Beobachtungssystems, auf zeitliche/verzögerungsbedingte Unterschiede zwischen den Hemisphären und/oder auf Wärme zurückzuführen sein, die außerhalb der für den OHC verwendeten $0\text{--}2000 \text{ m}$ tiefen Ozeanschicht gespeichert wird (z. B. in tieferen Ozeanschichten, der Kryosphäre, an Land und in der Atmosphäre). Im weiteren Verlauf dieser Erörterung werden daher mögliche Faktoren betrachtet und geprüft, ob deren Größenordnung plausibel groß genug ist, um die beobachtete Abweichung – beginnend mit Abbildung 17 – sowie die Akkumulation von Energie in der Atmosphäre zu erklären.

Chart 17 Increase in Atmospheric Energy by Latitude - Dec 2015 to Dec 2025
Both Latent & Sensible Heat associated with Increasing TPW



Der berechnete Beitrag der atmosphärischen Feuchtigkeit von ~4,8 ZJ über das Jahrzehnt hinweg macht nur einen kleinen Bruchteil der Divergenz von ~140 ZJ aus, so dass er die Diskrepanz allein nicht erklären kann. Dennoch ist es bemerkenswert, dass der Feuchtigkeitsanstieg in der Nähe von ~10° N seinen Höhepunkt erreicht, wo der langfristige maximale tägliche Sonnenfluss am stärksten angestiegen ist.

Die Feuchtigkeitsmaxima in den mittleren Breiten stehen auch qualitativ im Einklang mit einem verstärkten Transport in Richtung der Pole in beiden Hemisphären.

Weitere Möglichkeiten dafür, dass die Nettostrahlung in der südlichen Hemisphäre schneller steigt als der OHC sind:

- Latente Schmelzwärme der Südhalbkugel, die jedoch für das vergangene Jahrzehnt auf weniger als 1 ZJ geschätzt wird.
- Es gibt einige Gletscher in der Südhalbkugel, die sich ausdehnen, doch die damit verbundene Wärme beträgt weniger als 1 ZJ.
- Weltweit hat die Biomasse zugenommen, doch während die Nordhalbkugel einen deutlichen Anstieg verzeichnet, sprechen die Daten nicht für einen wesentlichen Anstieg der Biomasse auf der Südhalbkugel, einschließlich der Ozeane.
- Es hat einen Wärmeaustausch von der südlichen Hemisphäre zur nördlichen Hemisphäre gegeben, doch die Ozean-Wärmespeicherung (OHC) und die Nettostrahlung in der nördlichen Hemisphäre zeigen derzeit eher ein Gleichgewicht als ein Defizit, das einen verstärkten Wärmeaustausch aus der südlichen Hemisphäre erfordern würde.

- Eine mögliche Fehlerquelle besteht darin, dass die Grundlage für die Angleichung der Jahre 2005 bis 2015 aufgrund der hohen thermischen Trägheiten im Klimasystem fehlerhaft war. Im Wesentlichen ist das System niemals statisch, sondern verändert sich zwangsläufig aufgrund der sich ändernden solaren Antriebskräfte.

Thermische Reaktion – In diesem Rahmen reagiert die tropische Meerestemperatur (SST) nur schwach auf zusätzliche Strahlungsantriebe an der ToA, sobald sich hoch reichende Konvektion etabliert hat, weil die reflektierte kurzwellige Strahlung und der Abfluss latenter Wärme stark steigen. Im Gegensatz dazu zeigen die mittleren Breiten in den Abbildungen 14–16 eine annähernd lineare Beziehung zwischen der monatlichen Temperatur und der jüngsten (30-Tage-)Durchschnittsstrahlung, mit verzögerten Reaktionen von ~36 Tagen (NH) und ~61 Tagen (SH) in den dargestellten illustrativen Anpassungen. Die geringere Amplitude in der südlichen Hemisphäre (SH) und die längere Verzögerung stehen im Einklang mit einem höheren Meeresanteil und einer größeren effektiven Wärmekapazität in den mittleren Breiten der südlichen Hemisphäre.

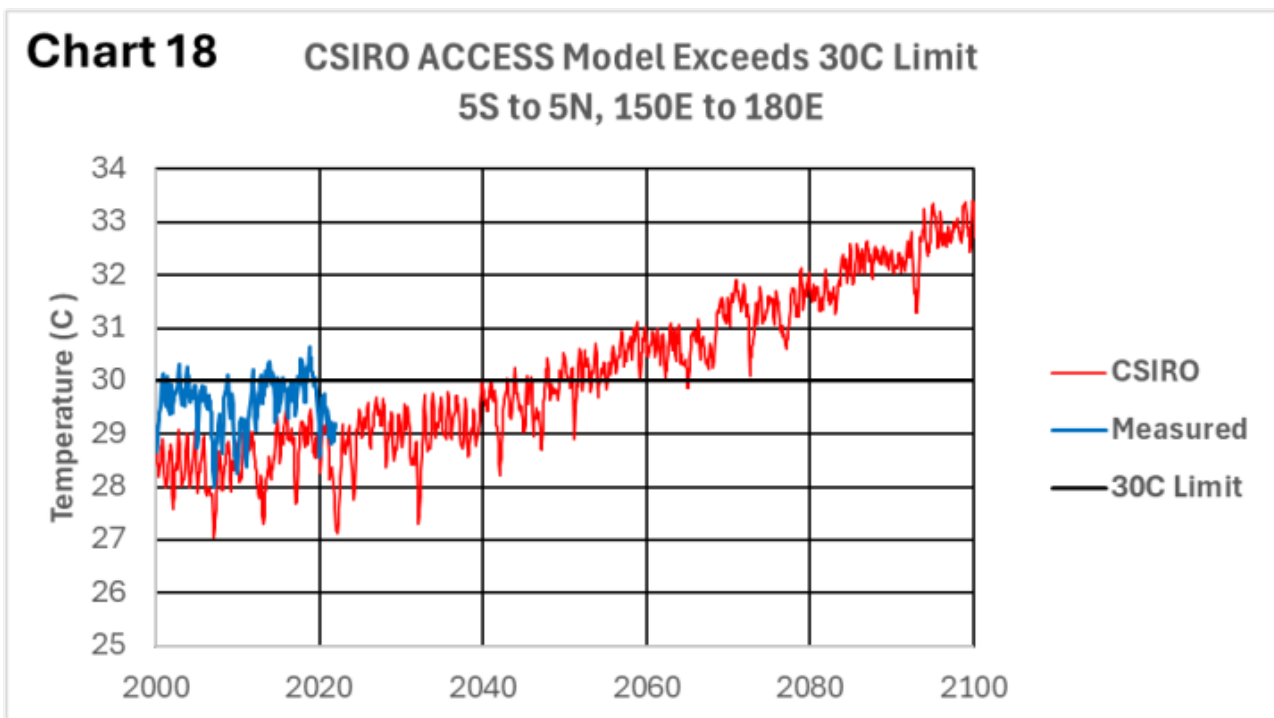
Schlussfolgerungen

Die Zeitreihen der täglichen maximalen Sonneneinstrahlung am Boden zeigen im letzten Jahrtausend eine hemisphärische Asymmetrie. In der heutigen Zeit ist die maximale tägliche Sonneneinstrahlung auf der Südhalbkugel höher als in den entsprechenden Breitengraden der Nordhalbkugel, doch die langfristigen Trends unterscheiden sich: In mehreren Breitengraden der Südhalbkugel (z. B. 45° S) ist sie seit etwa 1000 n. Chr. rückläufig, während sie in mehreren mittleren Breitengraden der Nordhalbkugel (z. B. 45° N) seit Erreichen eines Minimums um 1640 n. Chr. langsam zunimmt. In den niedrigen Breitengraden folgt auf eine Wendung um ~1200 n. Chr. ein allmählicher Anstieg der maximalen täglichen Sonneneinstrahlung.

Unter Verwendung der im Abschnitt „Abgeworfener ToA-Solarfluss“ vorgestellten Schwellenwertmethode legt die Analyse nahe, dass langfristige Veränderungen die Häufigkeit und Intensität tropischer konvektiver Wolkenregime beeinflussen und wie viel zusätzlicher ToA-Antrieb reflektiert statt absorbiert wird. In diesem Rahmen führt ein Rückgang der maximalen täglichen Sonneneinstrahlung in der südlichen Hemisphäre südlich von ~10° S zu einer Verringerung der konvektiven „Abweisung“ in diesem Gebiet, während die nördliche Hemisphäre eine geringere Veränderung aufweist, nun aber von ihrem Tiefststand aus wieder steigt. Da konvektives Potenzial eine Voraussetzung für Zyklone ist, steht dies im Einklang mit der beobachteten Abnahme der Zyklone in der südlichen Hemisphäre im Vergleich zu früheren Zeiträumen. Dass die Intensität der Zyklone in der nördlichen Hemisphäre im Jahr 1000 n. Chr. höher war als heute, steht im Einklang damit, dass in diesem Zeitraum mehr Wärme abgestrahlt wurde.

Im Zeitalter der Satellitenbeobachtung zeigen die hier verwendeten Temperaturreihen für die mittleren Breiten bei Anwendung einer angemessenen Verzögerung einen starken, nahezu linearen Zusammenhang mit der jüngsten Sonneneinstrahlung, was mit einer relativ direkten Reaktion des Strahlungsantriebs in diesen Bändern übereinstimmt. Die gleichen Temperaturen in den mittleren Breiten werden auch von Veränderungen der Advektion beeinflusst, die den zeitlichen Verlauf der Jahreszeiten und die geografische Verteilung der Erwärmung verschieben können. In diesem Rahmen wirken sich Veränderungen der tropischen Sonneneinstrahlung und Konvektion auf den Feuchtigkeits- und Wärmetransport in Richtung der Pole aus, was je nach Jahreszeit und Hemisphäre die lokalen Strahlungsantriebsreaktionen verstärken oder dämpfen kann.

Viele Klimamodelle weisen anhaltende Verzerrungen bei der tropischen Konvektion, der Bewölkung und der Darstellung von Prozessen im Warmwasserbecken auf, und diese Verzerrungen beeinflussen die simulierten Trends in Regionen, in denen die Meerestemperatur (SST) stark durch Konvektion bestimmt wird (einschließlich Teilen des tropischen Westpazifiks). Abbildung 18 dient hier als Beispiel für ein Szenario, in dem die beobachtete Meerestemperatur nahe der Obergrenze des Warmwasserbeckens begrenzt ist, und verdeutlicht, warum die korrekte Darstellung konvektiver Wolkenrückkopplungen für die Ursachenanalyse und die Prognosen von Bedeutung ist.



Diese Einschränkung bedeutet, dass Prognosen für tropische Warmwassergebiete (und für die mit diesen Gebieten verbundenen Zirkulationsreaktionen) mit Vorsicht interpretiert werden sollten und dass bei der Modellbewertung der Schwerpunkt auf beobachteten Einschränkungen hinsichtlich Konvektion, Wolkenreflexion und Wärmeabfluss liegen sollte.

Der langfristige Rückgang der maximalen täglichen Sonneneinstrahlung in hohen südlichen Breiten steht im Einklang mit den Abkühlungstrends in Regionen südlich von $\sim 55^\circ$ S während der Satellitenära (Kang et al., 2023) sowie mit der dokumentierten multidekadischen Abkühlung in Teilen der Antarktis, wie beispielsweise auf der Antarktischen Halbinsel, seit Ende der 1990er Jahre (Turner et al., 2016).

Insgesamt bietet das sich verändernde saisonale und Breitengradabhängige Muster der Sonneneinstrahlung an der Erdoberfläche einen schlüssigen, physikalisch begründeten Rahmen, der mit vielen der in diesem Artikel hervorgehobenen hemisphärischen und regionalen Asymmetrien übereinstimmt (einschließlich der Unterschiede im Reflexionsverhalten in den Tropen, beim Transport in Richtung der Pole und bei der Temperaturreaktion in den mittleren Breiten). Auf dieser Grundlage wird hier argumentiert, dass Veränderungen der Sonnenintensität über Breitengrade und Jahreszeiten hinweg ein Haupttreiber der beobachteten Muster und ein nützlicher Anhaltspunkt für die Vorhersage künftiger regionaler Trends sind. Allgemein gesehen weist die Nordhalbkugel starke Temperaturanstiege auf, während sich die Südhalbkugel in den hohen Breitengraden abkühlt, was sich schließlich auf die mittleren Breiten ausweiten wird, da sowohl die maximale tägliche Sonneneinstrahlung als auch die polwärts gerichtete Advektion abnehmen.

Autor

Richard Willoughby ist ein pensionierter Elektroingenieur, der 30 Jahre lang in der australischen Bergbau- und Mineralverarbeitungsindustrie tätig war, wo er Aufgaben in Großbetrieben, in der betrieblichen Forschung und Entwicklung sowie in der Minenerschließung wahrnahm. Weitere zehn Jahre verbrachte er in der globalen Versicherungsbranche als technischer Risikoberater, wo er ein anhaltendes Interesse an Naturkatastrophen und dem Klimawandel entwickelte.

Referenzen und Datenquellen

Datensätze und Verfahren

- NASA Jet Propulsion Laboratory (JPL) Solar System Dynamics. *HORIZONS System* (online ephemeris and solar system data service). Documentation: *HORIZONS System Manual*, version 4.98d (21 Nov 2025). NASA/JPL-Caltech.
- NASA Langley Research Center. *Clouds and the Earth's Radiant Energy System (CERES) Energy Balanced and Filled (EBAF) Edition 4.x*, monthly mean TOA flux products (Level 3b). Product description and data quality summaries available via CERES data portal.
- Loeb, N. G., Doelling, D. R., Kato, S., Su, W., Mlynczak, P. E., & Wilkins, J. C. (2024). Continuity in top-of-atmosphere Earth radiation budget observations. *Journal of Climate*, 37(23), 6093–6108.
- International Argo Program and national partners. *Argo* (global

profiling float observations of temperature/salinity, upper 2000 m). General program documentation available via Argo data portals.

- NOAA National Centers for Environmental Information (NCEI). *Global Ocean Heat Content Climate Data Record (CDR)*, 1955–present. Configuration Item ID: 01B-41. Dataset DOI: 10.7289/V53F4MVP.
- Riser, S. C., Freeland, H. J., Roemmich, D., et al. (2016). Fifteen years of ocean observations with the global Argo array. *Nature Climate Change*, 6, 145–153.
- Rohde, R. A., & Hausfather, Z. (2020). The Berkeley Earth land/ocean temperature record. *Earth System Science Data*, 12, 3469–3479.
- Berkeley Earth. *Berkeley Earth temperature data: gridded and time-series products* (land and land–ocean; includes gridded near-surface air temperature over land and sea surface temperature over oceans; see Berkeley Earth data portal for product notes and licensing).

Supporting scientific literature (selected)

- Ramanathan, V., & Collins, W. (1991). Thermodynamic regulation of ocean warming by cirrus clouds deduced from observations of the 1987 El Niño. *Nature*, 351, 27–32.
- Fu, R., Del Genio, A. D., Rossow, W. B., & Liu, W. T. (1992). Cirrus-cloud thermostat for tropical sea surface temperatures tested using satellite data. *Nature*, 358, 394–397.
- Lau, K.-M., Sui, C.-H., Chou, M.-D., & Tao, W.-K. (1994). An inquiry into the cirrus-cloud thermostat effect for tropical sea surface temperature. *Geophysical Research Letters*, 21(12), 1157–1160.
- Tompkins, A. M. (2001). On the relationship between tropical convection and sea surface temperature. *Journal of Climate*, 14(5), 633–637.
- Sud, Y. C., Walker, G. K., & Lau, K.-M. (1999). Mechanisms regulating sea-surface temperatures and deep convection in the tropics. *Geophysical Research Letters*, 26(8), 1019–1022.
- Stephens, G. L., Shiro, K. A., Hakuba, M. Z., Takahashi, H., Pilewskie, J. A., Andrews, T., Stubenrauch, C. J., & Wu, L. (2024). Tropical deep convection, cloud feedbacks and climate sensitivity. *Surveys in Geophysics*, 45, 1903–1931.
- Johnson, G. C., Lyman, J. M., & Loeb, N. G. (2016). Improving estimates of Earth’s energy imbalance. *Nature Climate Change*, 6, 639–640.
- Loeb, N. G., Ham, S.-H., Allan, R. P., Thorsen, T. J., Meyssignac, B., Kato, S., Johnson, G. C., & Lyman, J. M. (2024). Observational assessment of changes in Earth’s energy imbalance since 2000. *Surveys in Geophysics*, 45, 1757–1783.
- Villalba-Pradas, A., & Tapiador, F. J. (2022). Empirical values and assumptions in the convection schemes of numerical models. *Geoscientific Model Development*, 15, 3447–3518.
- Martin, E. R., & Schumacher, C. (2012). The relationship between tropical warm pool precipitation, sea surface temperature, and large-scale vertical motion in IPCC AR4 models. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 69(1), 185–194.

- Kim, H., Kang, S. M., Takahashi, K., Donohoe, A., & Pendergrass, A. G. (2021). Mechanisms of tropical precipitation biases in climate models. *Climate Dynamics*, 56, 17–27.
- Gray, W. M. (1968). Global view of the origin of tropical disturbances and storms. *Monthly Weather Review*, 96(10), 669–700.
- National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). (n.d.). Tropical Cyclone Introduction (JetStream–Online School for Weather). NOAA.
- Nicholls, N., Landsea, C., & Gill, J. (1998). Recent trends in Australian region tropical cyclone activity. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 65, 197–205.
- Dowdy, A. J. (2014). Long-term changes in Australian tropical cyclone numbers. *Atmospheric Science Letters*, 15, 292–298.
- Mann, M. E., Woodruff, J. D., Donnelly, J. P., & Zhang, Z. (2009). Atlantic hurricanes and climate over the past 1,500 years. *Nature*, 460, 880–883.
- Turner, J., Lu, H., White, I., King, J. C., Phillips, T., Hosking, J. S., Bracegirdle, T. J., Marshall, G. J., Mulvaney, R., & Deb, P. (2016). Absence of 21st century warming on Antarctic Peninsula consistent with natural variability. *Nature*, 535, 411–415.
- Kang, S. M., Yu, Y., Deser, C., Zhang, X., Kang, I.-S., Lee, S.-S., Rodgers, K. B., & Ceppi, P. (2023). Global impacts of recent Southern Ocean cooling. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 120(30), e2300881120.

Link:

<https://wattsupwiththat.com/2026/04/29/changing-sunlight-weather-climate-2/>

Übersetzt von Christian Freuer für das EIKE