

Der Sonne-Klima-Effekt: Die Winterpförtner-Hypothese VI

geschrieben von Chris Frey | 9. September 2022

Meridionaler Transport ist der Haupt-Klimatreiber

Javier Vinós & [Andy May](#)

„Keinem Philosophen ist es aus eigener Kraft gelungen, diesen Schleier zu lüften, den die Natur über alle ersten Prinzipien der Dinge gespannt hat. Der Mensch argumentiert, die Natur handelt.“ – Voltaire (1764)

6.1 Einführung

Das Klima ist ein thermodynamischer Prozess, der durch den Energiefluss von seinem Eintrittspunkt, meist am oberen Ende der Atmosphäre (TOA) in den Tropen auf der Tagseite des Planeten, bis zu seinem Austrittspunkt, der über den TOA des gesamten Planeten verteilt ist, bestimmt wird. Die Infrarotstrahlung der Erde hängt von der absoluten Temperaturskala ab, und auf dieser Skala bewegen sich die Oberflächentemperaturen des Planeten in einem engen Bereich. Die durchschnittliche ausgehende langwellige Strahlung (OLR) des Planeten liegt bei ca. 240 W/m^2 , und der Gesamtdurchschnitt für den Großteil der Oberfläche liegt in einem relativ engen Bereich von $200\text{-}280 \text{ W/m}^2$ (Dewitte & Clerbaux 2018). Die OLR wird eher durch die unregelmäßige Verteilung des atmosphärischen Wassers (Wolken und Feuchtigkeit) als durch die Oberflächentemperatur bestimmt. Der Wolkeneffekt auf die OLR kann in einigen äquatorialen Gebieten -80 W/m^2 erreichen (negative Werte bedeuten Abkühlung). Während also 62 % der Energie über 25 % der TOA-Fläche der Erde (die 30°N -S-Tagesseite) in das Klimasystem eintritt, ist ihr Austritt viel gleichmäßiger über die gesamte TOA-Fläche verteilt.

Aus thermodynamischer Sicht ist das Hauptmerkmal des Erdklimas der Transport von Energie. Der Energietransport ist die Ursache für jedes Wetter. Der größte Teil der Sonnenenergie, die nicht reflektiert wird, wird in den Ozeanen gespeichert, in denen der größte Teil der Energie des Klimasystems gespeichert ist. Aber die Ozeane sind nicht gut darin, Energie zu transportieren (siehe [Abb. 3.4](#)). Unterschiede in der Wassertemperatur führen eher zu vertikalen Bewegungen durch veränderten Auftrieb als zu lateralen Bewegungen, und die Ozeane sind temperaturgeschichtet, was den vertikalen Energietransport stark einschränkt. Der größte Teil der Energie im Klimasystem wird von der Atmosphäre transportiert, und sogar ein großer Teil der von den Meeresströmungen an der Oberfläche transportierten Energie ist windgetrieben, da die Ozeanzirkulation nicht thermisch, sondern

mechanisch angetrieben wird (Huang 2004). Der Fluss der nicht-solaren Energie an der Grenze zwischen Atmosphäre und Ozean (einschließlich über Meereis) erfolgt fast immer und überall vom Ozean in die Atmosphäre (Yu & Weller 2007; Schmitt 2018).

Vereinfacht kann das Klima so verstanden werden, dass der Ozean Sonnenenergie aufnimmt und speichert, die dann zum Transport in die Atmosphäre übertragen und schließlich in den Weltraum abgegeben wird. Diese Energieübertragung treibt den Wasserkreislauf an, der Wolken, Regen, Schnee, Stürme und Allwetterphänomene hervorbringt. Das System ist nie im Gleichgewicht, und das ist auch nicht zu erwarten. Im Laufe eines Jahres erwärmt sich die Erdoberfläche um ca. 3,8 °C und kühlt um ca. 3,8 °C ab (siehe [Abb. 3.1](#)), wobei die Schwankungen von Jahr zu Jahr etwa 0,1-0,2 °C betragen. Die Erde erwärmt oder kühlt sich ständig auf allen Zeitskalen.

Thermodynamisch gesehen beinhaltet der Klimawandel Veränderungen im Energiegewinn, Energieverlust oder beides. Eine rasche Änderung der Energieverteilung innerhalb des Klimasystems kann ebenfalls eine Ursache für Klimawandel sein, und es ist bekannt, dass dies in der Vergangenheit unter besonderen Umständen geschehen ist, wie die abrupte Freisetzung von Schmelzwasser aus dem Ausbruch des Agassiz-Sees vor 8.200 Jahren (Lewis et al. 2012) oder die [Dansgaard-Oeschger-Ereignisse](#), als im Nordseebecken während der letzten Eiszeit gespeicherte Energie abrupt an die Atmosphäre abgegeben wurde (Dokken et al. 2013). Diese Veränderungen waren vorübergehend, da sich das Klima nur durch eine Änderung des Energiehaushalts des Systems langfristig verändern kann.

Die moderne Theorie des Klimawandels versteht die Thermodynamik des Klimas, verkennt aber die Rolle der Energieumverteilung. Bei der Untersuchung von Klimavariablen arbeiten Wissenschaftler normalerweise mit so genannten „Anomalien“; sie sind das Ergebnis der Subtraktion der „Klimatologie“ oder der durchschnittlichen Veränderungen der untersuchten Variablen über 24-Stunden-Tage und Jahreszeiten. Diese Sichtweise vergrößert kleine zwischenjährliche Schwankungen, verbirgt aber die viel größeren saisonalen Veränderungen. Das Ergebnis ist, dass wichtige saisonale Veränderungen in der atmosphärischen und ozeanischen Energieumverteilung in der Regel ignoriert werden. Der Fehler wird noch dadurch verstärkt, dass der Netto-Energietransport innerhalb des Klimasystems, wenn er für den gesamten Planeten integriert wird, gleich Null ist (Energie, die an einem Ort verloren geht, wird an einem anderen gewonnen). Die Umverteilung von Energie durch Transportprozesse spielt für die meisten Wissenschaftler im Hinblick auf die Veränderung des globalen Klimas keine Rolle. Für sie ist der TOA über dem dunklen Pol im Winter nicht anders als der tropische TOA bei Tageslicht, außer in der absoluten Größe des jährlich gemittelten Energieflusses. Diese verengte Sichtweise behindert das richtige Verständnis des Klimawandels.

Veränderungen der atmosphärischen Treibhausgase (THG) verändern die TOA-Energieflüsse und sind eine Ursache des Klimawandels. Konzeptionell wird

davon ausgegangen, dass der Klimawandel entweder auf eine externe Ursache (Forcing) oder auf interne Variabilität zurückzuführen ist. Abb. 6.1 zeigt eine schematische Darstellung des Klimasystems mit vielen wichtigen Subsystemen und Prozessen. Alles, was nicht vom Klimasystem der Erde beeinflusst wird, gilt als extern, wobei diese Unterscheidung nicht absolut ist. So werden beispielsweise Vulkane oft als außerhalb des Klimasystems liegend betrachtet, obwohl bekannt ist, dass ihre Häufigkeit auf Veränderungen des Meeresspiegels und die Entladung des Eisschildes während der Deglaziale reagiert (Huybers & Langmuir 2009). Antriebe verursachen Klimaveränderungen, und Rückkopplungen können dazu führen, dass die Amplitude der Veränderungen zunimmt oder abnimmt. Wenn die Rückkopplung den Antriebseffekt verstärkt, ist sie positiv, wenn sie die Klimaänderung dämpft, ist sie negativ. Es wird verwirrend, weil ein und derselbe Faktor sowohl eine Rückkopplung sein kann, wenn er auf natürliche Weise als Reaktion auf den Klimawandel entsteht, als auch gleichzeitig ein Antrieb, wenn er vom Menschen verursacht wird. Bei mehreren Treibhausgasen ist das der Fall.

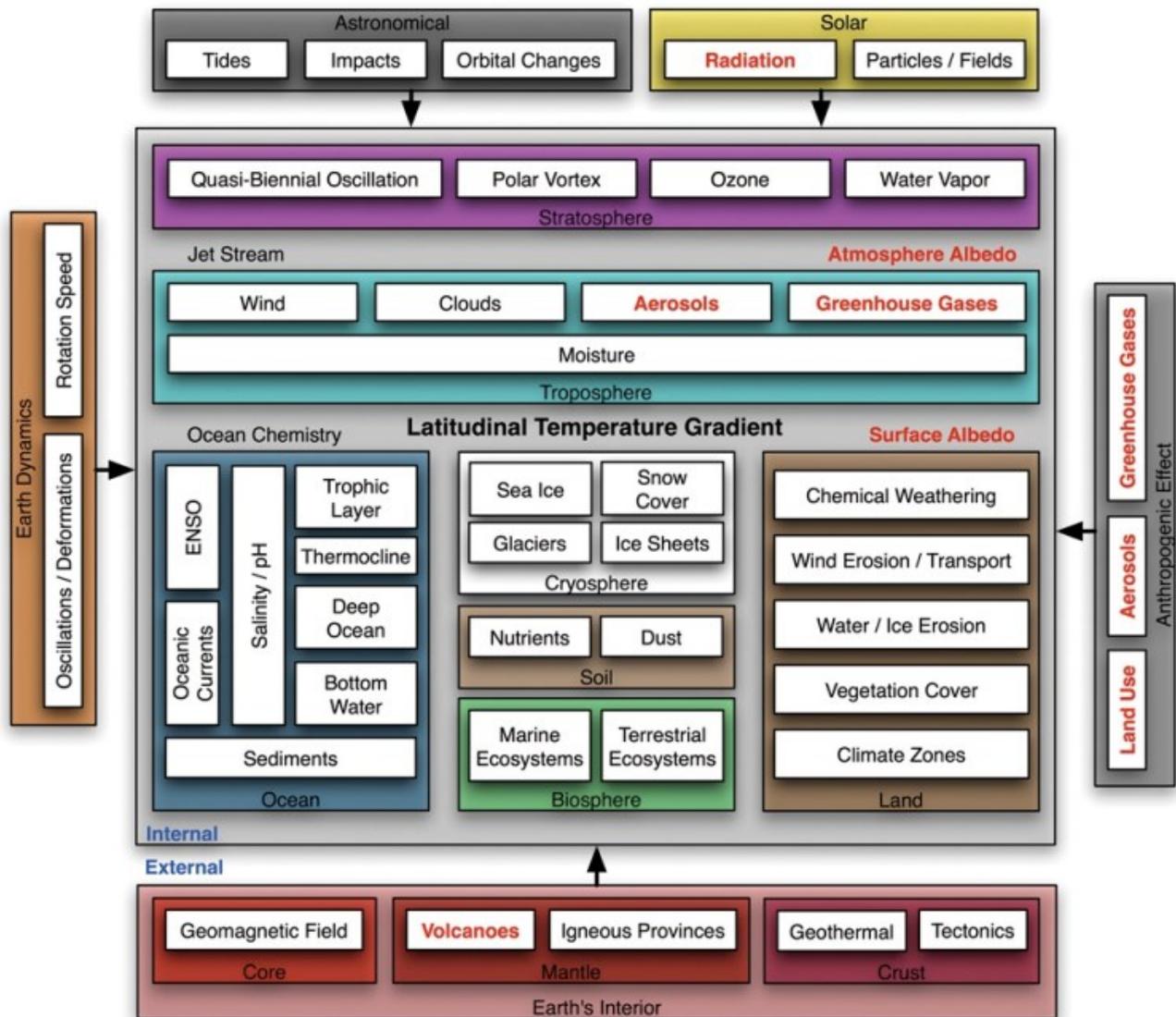


Abb. 6.1. Vereinfachte schematische Darstellung des Klimasystems der

Erde. Die verschiedenen Teilsysteme sind mit unterschiedlichen Hintergrundfarben dargestellt. Klimaphänomene und Prozesse, die das Klima beeinflussen, sind in weißen Kästen dargestellt. Die Teilsysteme und Phänomene innerhalb des zentralen perlfarbenen Kastens werden im Allgemeinen als internes Klimasystem betrachtet.

In Abbildung 6.1 wird alles, was sich außerhalb des perlfarbenen Kästchens „Intern“ befindet, normalerweise nicht vom Klima beeinflusst (mit einigen Ausnahmen) und gilt als extern. Einige wichtige Eigenschaften oder Phänomene an der Schnittstelle zwischen Teilsystemen sind in den äußeren Kästchen untergebracht. Der latitudinale (Äquator-zu-Pol) Temperaturgradient ist eine zentrale Eigenschaft des Klimasystems, der sich kontinuierlich ändert und den thermischen Zustand des Planeten definiert (Scotese 2016). Zur Vereinfachung wurden Linien, die zusammengehörige Kästen verbinden, weggelassen. Die fettgedruckten Namen in Rot sind Variablen, die das Strahlungsbudget beeinflussen und laut IPCC fast ausschließlich für die moderne globale Erwärmung verantwortlich sind. Die Abbildung stammt aus Vinós 2022.

Das wichtigste Treibhausgas ist aufgrund seiner Häufigkeit der Wasserdampf. Im Gegensatz zu CO₂ oder Methan ist Wasserdampf ein kondensierendes Treibhausgas und wird nicht gut vermischt. Wasserdampf ist sehr ungleichmäßig über den Planeten verteilt, und seine Verteilung ändert sich mit der Zeit. Die geringste Wasserdampfkonzentration ist in den Polarregionen im Winter zu verzeichnen. Die Strahlungseigenschaften der verschiedenen Regionen des Planeten können nicht gleich sein, wenn ihr Treibhausgasgehalt unterschiedlich ist. Daraus folgt, dass der Transport von Energie aus einer Region mit höherem THG-Gehalt in eine Region mit niedrigerem THG-Gehalt die Effizienz der ausgehenden Strahlung erhöht, und daher müssen Änderungen des Transports das globale Energieflussbudget am TOA verändern und infolgedessen einen Klimawandel verursachen. Diese Ursache wird derzeit nicht in Betracht gezogen. Es gibt Hinweise darauf, dass sie die Hauptursache für den Klimawandel auf allen Zeitskalen von Jahrzehnten bis zu Millionen von Jahren ist. Die planetarische Thermodynamik erfordert, dass der Energietransport hauptsächlich von der Äquatorialregion in Richtung der beiden Pole und der Meridiane erfolgt, weshalb der Fluss als meridionaler Transport (MT) bezeichnet wird.

6.2 Meridionaler Transport ist geographisch bedingt und gradientengetrieben

Die Energie, die die Atmosphäre aus den Ozeanen gewinnt, liegt hauptsächlich in Form von latenter Wärme vor. Die langwellige Strahlungsübertragung ist etwa halb so groß, und der fühlbare Wärmefluss ist um eine Größenordnung geringer (Schmitt 2018). Der atmosphärische Transport dieser Energie wird durch das Vorhandensein von Kontinenten und Gebirgsketten durch Niederschlag und die Verringerung der Windgeschwindigkeit stark vermindert. Infolgedessen findet der MT

hauptsächlich über den Ozeanbecken statt und ist daher geografisch bedingt. Dies hat enorme Auswirkungen auf das Wetter, das Klima und den Klimawandel.

Im physikalischen Universum neigen Prozesse dazu, spontan entlang von Gradienten zu verlaufen, sei es ein Massen- oder Energiegefälle oder eine andere Ausprägung davon, wie Schwerkraft, Druck oder Temperatur. Der Gradient, der MT antreibt, ist der latitudinale Temperaturgradient (LTG), ist die Hauptursache. Der LTG ist ein Produkt des Breitengradienten der Sonneneinstrahlung *LIG (Latitudinal Insolation Gradient)*, die ungleiche Verteilung der einfallenden Sonnenstrahlung nach Breitengrad, moduliert durch die Wirkung geografischer und klimatischer Faktoren. Das *LIG* ist zum Südpol hin steiler (siehe [Abb. 3.3b](#)), trotz eines jährlich symmetrischen *LIG* in Bezug auf den Äquator. Aufgrund der einzigartigen geografischen und klimatischen Bedingungen in der Antarktis und der großen Fläche, die von den Ozeanen der südlichen Hemisphäre bedeckt wird, ist die südliche LTG steiler als die nördliche. Cionco et al. (2020a; 2020b) erörtern vernachlässigte Veränderungen des *LIG* in verschiedenen Breitengraden während des Holozäns sowie hochfrequente Schwankungen des *LIG* aufgrund des 18,63-jährigen Mondknotenzyklus, die wahrscheinlich das Klima beeinflussen.

Milankovićs Vorschlag aus dem Jahr 1920, dass das Klima der Erde durch Orbitalveränderungen beeinflusst wird, beruht auf Unterschieden in der Energiemenge, die der Planet empfängt (Exzentrizität), aber vor allem auf Unterschieden in der Breiten- und Jahreszeitenverteilung der Energie (Schiefe und Präzession). Diese Veränderungen in der Energieverteilung verändern die *LIG*, was wiederum die LTG verändert, was wiederum den MT der Energie verändert. Es ist seit langem umstritten, wie sich das Schiefstandssignal, das die Interglaziale durchläuft (Huybers & Wunsch 2005), auf die Tropen auswirkt (Rossignol-Strick 1985; Liu et al. 2015), wo die durch den Schiefstand bedingten Energieänderungen sehr gering sind. Die Antwort scheint darin zu liegen, dass durch die Schiefe verursachte Veränderungen im *LIG* (Bosmans et al. 2015) MT beeinflussen.

Das Sommer-*LIG* wird durch Änderungen der axialen Neigung der Erde beeinflusst, die durch den 41-Kyr-Schiefstand-Zyklus und den 18,6-Jahres-Mondzyklus verursacht werden. Das Winter-*LIG* variiert mit der Höhe der Sonneneinstrahlung, die auf niedrige Breitengrade fällt, da die Sonneneinstrahlung in hohen Breitengraden, in der Nähe des Winterpols, minimal ist (Davis & Brewer 2011). Die Änderungen der Sonneneinstrahlung in den niedrigen Breiten sind auf die Erddrehung (21-kyr-Präzessionszyklus), die Entfernung zur Sonne (95- und 125-kyr-Exzentrizitätszyklen) und auf Änderungen der Sonnenaktivität (11-jährige und längere Sonnenzyklen) zurückzuführen. Davis und Brewer (2011) haben gezeigt, dass das LTG sehr empfindlich auf Veränderungen des *LIG* reagiert. Es ist unbekannt, warum diese Überempfindlichkeit besteht. Die Autoren erörtern den Vorschlag von Kleidon und Lorenz (2005), dass sich der MT so anpasst, dass sie ein Maximum an Entropie erzeugt (Abb. 6.2).

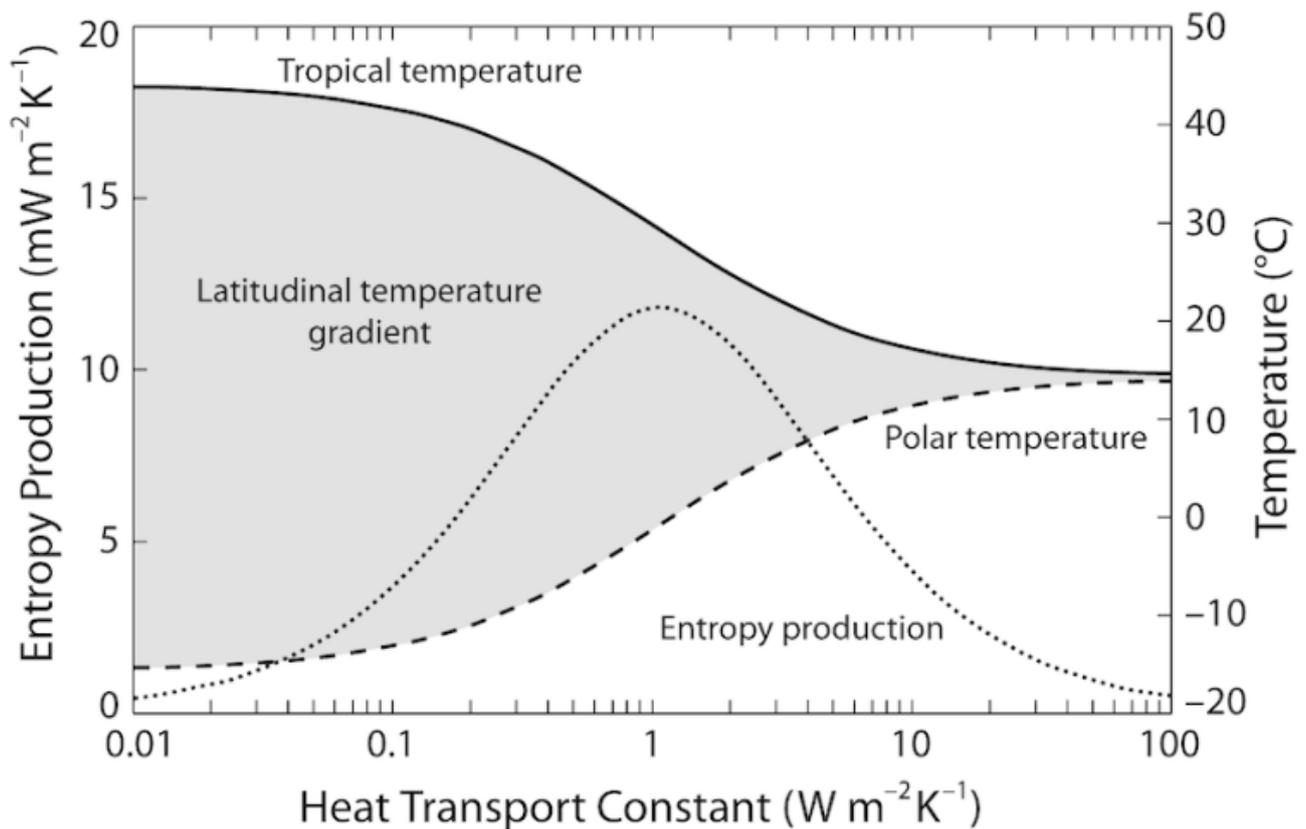


Abb. 6.2. Die These, dass sich der meridionale Transport so einstellt, dass ein Maximum an Entropie entsteht. Der latitudinale Temperaturgradient, der sich aus der Differenz zwischen tropischen (durchgezogene Linie) und polaren (gestrichelte Linie) Temperaturen ergibt, wird durch die graue Fläche dargestellt. Die Entropieproduktion (gestrichelte Linie) ist minimal, wenn kein Energietransport stattfindet (linke Seite der Abszisse), oder wenn der Transport so effizient ist, dass es keinen Temperaturunterschied gibt (rechte Seite der Abszisse), und maximal an einem Punkt dazwischen. Nach Kleidon und Lorenz (2005).

Kleidon und Lorenz (2005) behaupten, dass die Abhängigkeit des MT von der maximalen Entropieproduktion durch Simulationen mit allgemeinen Zirkulationsmodellen bestätigt worden sei. Das ist offensichtlich falsch, denn Computermodelle sind nur ein wissenschaftlicher Beweis für menschliche Programmierfähigkeiten. Dass sich der MT automatisch an die maximale Entropieproduktion anpasst, erfordert eine sehr große Anzahl von Freiheitsgraden (mögliche Ergebnisse), und wie in [Teil V \(Abschnitt 5.2\)](#) dargelegt, wird der MT durch mehrere Faktoren moduliert, die in Computermodellen nicht gut dargestellt werden, wodurch sich die Freiheitsgrade verringern. Es ist sehr wahrscheinlich, dass die Anpassung des LTG an das LIG zum Teil durch Entropie gesteuert wird, aber die Winter-Gatekeeper-Hypothese (WGK-h; siehe Teil V) erklärt, wie das LIG das LTG durch direkte Einwirkung auf MT beeinflussen kann. Es ist wichtig zu bedenken, dass, wenn das LTG den MT verändern kann, auch das Gegenteil passieren muss, so dass die Kausalität der Veränderungen schwer zu bestimmen sein könnte.

Die WGK-h liefert eine Erklärung für die Überempfindlichkeit des LTG gegenüber Veränderungen des LIG aufgrund von Veränderungen der Sonnenaktivität, nicht aber aufgrund anderer Ursachen wie Mond- oder Orbitalveränderungen. Angesichts der Tatsache, dass der LIG auf den 18-Jahres-Zyklus des Mondes und den 11-Jahres-Zyklus der Sonne reagiert (Davis & Brewer 2011), ist es interessant zu sehen, dass die multidekadische Oszillation der Stadiumwelle im MT in dem Rhythmus pulsieren könnte, der durch die Interferenz zwischen dem 9-Jahres-Halbzyklus des Mondes und dem 11-Jahres-Zyklus der Sonne gekennzeichnet ist (Vinós 2022; siehe Abb. 4.8f). Wenn dies tatsächlich der Fall ist, stellen die aus dieser Interferenz resultierenden Veränderungen des LIG einen Mechanismus dar, durch den die Periode und die Stärke der Stadiumwelle bestimmt werden, d. h., die Veränderungen des LIG führen zu Veränderungen in MT, die letztlich die Stadiumwelle formen.

Während der LIG die Verteilung des Energieinputs in das Klimasystem an der TOA bestimmt, werden 29 % dieser Energie durch die Albedo der Atmosphäre und der Oberfläche in den Weltraum zurückgeführt. Die reflektierte Sonnenenergie ist in den Monaten Januar bis März aufgrund der SH-Wolkenalbedo am höchsten, während die OLR in den Monaten Juni bis August aufgrund der höheren Emission im NH-Sommer am höchsten ist (Abb. 6.3). Das Ergebnis dieser Unterschiede ist, dass der Planet während des borealen Winters kälter ist, wenn er der Sonne am nächsten ist und 6,9 % mehr Energie empfängt (siehe Abschnitt 3.1 und Abb. 3.1).

Es gibt sehr große Unterschiede zwischen den Hemisphären in Bezug auf Klimaenergie und Transport. Wie Abbildung 6.3a zeigt, folgt die OLR außerhalb der Tropen im Wesentlichen der Temperatur. Innerhalb der Tropen zeigen OLR und Temperatur eine umgekehrte Korrelation, da eine höhere Temperatur zu einer stärkeren Bewölkung und weniger Emissionen führt. Nach der modernen Theorie des Klimawandels führt die Zunahme der Treibhausgase dazu, dass die gleiche IR-Emission in den Weltraum aus einer höheren, kälteren Höhe erfolgt, was eine Erwärmung der Oberfläche erfordert, um das Energiegleichgewicht aufrechtzuerhalten. Die Erde muss die gleiche Energie ausstrahlen, die sie empfängt, nicht mehr, es sei denn, sie kühlt sich ab. Nach diesem Modell sollte sich die interannuale OLR vom TOA aus nicht ändern, es sei denn, es gibt eine Änderung der einfallenden Sonnenenergie oder der Albedo.

Die Albedo ist sehr konstant, seit wir sie mit ausreichender Genauigkeit messen können, mit einer zwischenjährlichen Variabilität von 0,2 W/m² (0,2 %; Stephens et al. 2015), und die Sonnenenergie, die als Solarkonstante bezeichnet wird, schwankt nur um 0,1 % (Lean 2017). Dennoch sind die zwischenjährlichen OLR-Änderungen zehnmal höher als die Änderungen des THG-Strahlungsantriebs. Schlimmer noch: Die zwischenjährlichen OLR-Änderungen sind weder global, noch folgen sie den Temperaturänderungen (Abb. 6.3b). Während die außertropische SH-OLR in den letzten vier Jahrzehnten keinen Trend aufweist und die tropische OLR einen kleinen und unbedeutenden Trend zeigt, weist die außertropische NH-OLR einen sehr starken Anstieg auf. Ist dieser Anstieg auf die

stärkere Erwärmung in der NH zurückzuführen? Den Daten zufolge ist dies nicht der Fall, denn in den 1980er und 90er Jahren, als die Erwärmung beschleunigt wurde, stieg die OLR nicht signifikant an, während zwischen 1997 und 2007, als die Pause stattfand, die außertropische NH-OLR den größten Teil des Anstiegs der letzten vier Jahrzehnte erfuhr (Abb. 6.3b grauer Bereich). Daraus folgt logischerweise, dass die negative Anomalie der außertropischen NH-OLR vor dem Jahr 2000 zur Erwärmung beigetragen hat, während die positive Anomalie danach zur Pause beitrug. Natürlich kann die Zunahme der Treibhausgase nichts davon erklären, aber die Änderungen des MT, die während der Klimaverschiebung 1997-98 stattfanden, können die gleichzeitigen Änderungen der OLR in der außertropischen NH problemlos erklären (siehe [Teil IV](#)).

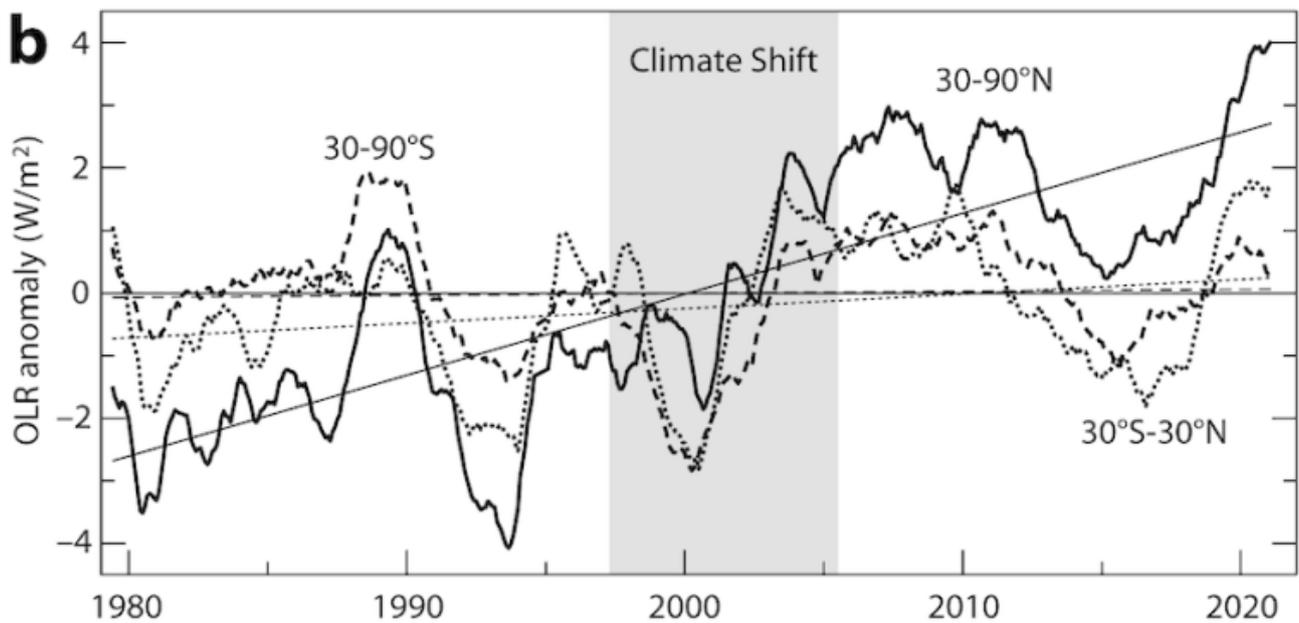
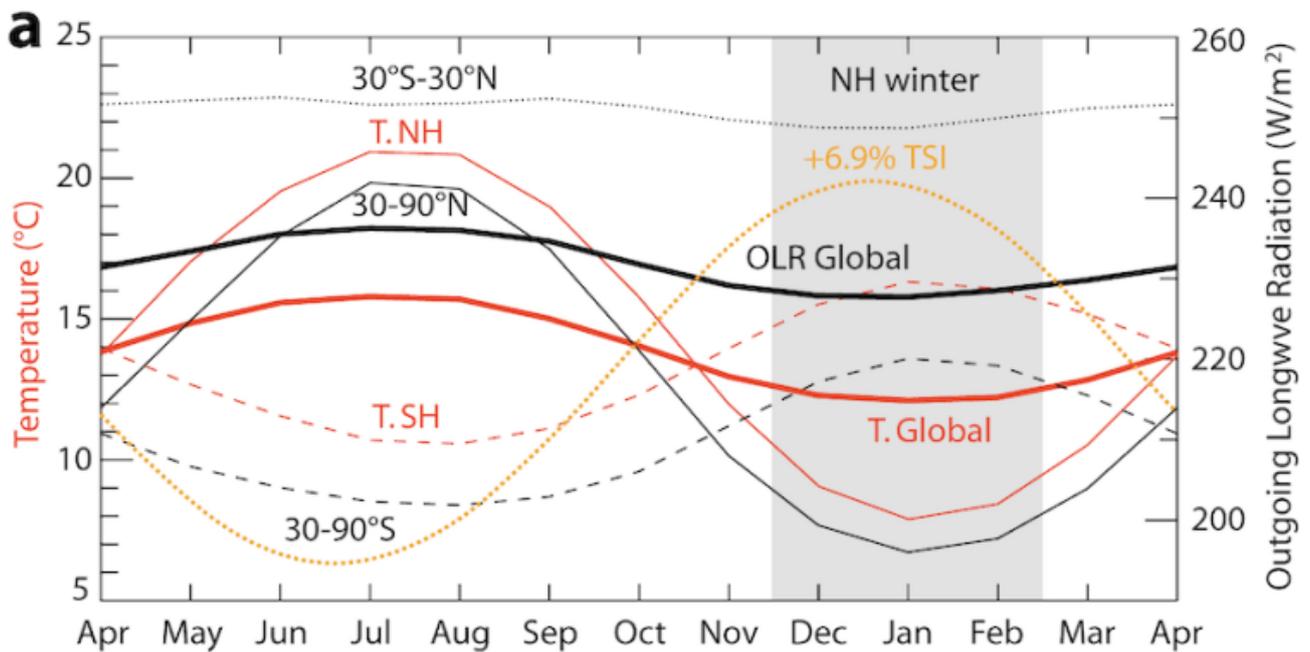


Abb. 6.3. Ausgehende langwellige Strahlung – jährliche und zwischenjährliche Änderungen.

In Abbildung 6.3 zeigt (a) die monatlichen Änderungen der TSI (gestrichelte orangefarbene Kurve ohne Skala); die Daten stammen aus Carlson et al. 2019. Die monatlichen Änderungen der Durchschnittstemperatur werden anhand roter Kurven dargestellt (linke Skala); die globale Durchschnittstemperatur ist die dicke durchgehende rote Kurve, die NH ist die dünne durchgehende rote Kurve und die SH ist die dünne gestrichelte rote Kurve. Die Daten stammen von Jones et al. 1999. Die monatlichen Veränderungen der OLR sind als schwarze Kurven dargestellt und verwenden die richtige Skala; die globale Abstrahlung ist die dicke durchgehende schwarze Kurve, 30-90°N ist die dünne durchgehende schwarze Kurve, 30-90°S ist die dünne gestrichelte schwarze Kurve, 30°S-30°N ist die dünne gepunktete schwarze Kurve. Die Daten stammen vom KNMI-Explorer. Der graue Bereich ist die NH-Winterperiode.

Abbildung 6.3 (b) zeigt die Veränderungen der OLR-Anomalie von 1979 bis 2021 für die Regionen 30-90°N (dicke durchgehende schwarze Kurve), 30-90°S (dicke gestrichelte schwarze Kurve) und 30°S-30°N (dicke gepunktete schwarze Kurve). Die entsprechenden dünnen Linien sind die Trends der kleinsten Quadrate. Der graue Bereich entspricht dem Zeitraum 1997-2006, in dem sich der Klimawandel in der Arktis beschleunigt hat, wie in Abschnitt 4.5 beschrieben. Die Daten stammen aus dem KNMI-Explorer-Bereich für NOAA OLR.

Einer der rätselhaftesten Aspekte des Klimas ist, dass beide Hemisphären trotz sehr unterschiedlicher Ausdehnung der Land-, Meeres- und Schnee-/Eisflächen im Wesentlichen die gleiche Albedo aufweisen. Dieses Phänomen ist als hemisphärische Albedo-Symmetrie bekannt (Datseris & Stevens 2021). Modelle sind nicht in der Lage, einen solch entscheidenden Aspekt des Klimas zu reproduzieren, weil niemand weiß, wie er entsteht und erhalten wird (Stephens et al. 2015). Datseris & Stevens (2021) haben Wolkenasymmetrien über außertropischen Sturmbahnen als ausgleichenden Faktor der Oberflächen-Albedo-Asymmetrien identifiziert. Sturmbahnen sind MT-Autobahnen über bereits MT-begünstigten ozeanischen Becken. Stürme sind das Produkt barokliner Instabilität entlang der LTG und transportieren eine große Menge an Energie als latente Wärme. Sie sind auch für einen erheblichen Teil der globalen Bewölkung verantwortlich, wodurch MT mit der Wolkenbedeckung verbunden ist. Änderungen des MT müssen zwangsläufig zu Änderungen der Bewölkung führen und das Klima verändern. Wenn die Albedo der Erde durch Veränderungen der Bewölkung in den Sturmbahnen symmetrisch gehalten wird, ist die Albedo wahrscheinlich eine weitere grundlegende Klimaeigenschaft, die mit der Stärke des MT verbunden ist.

6.3 ENSO: Die Schaltzentrale des tropischen Ozeans

Das Klimasystem setzt sich aus den Ozeanen, der Landoberfläche, der

Biosphäre, der Kryosphäre und der Atmosphäre zusammen (Abb. 6.1). Diese verschiedenen Komponenten tauschen Masse und Energie aus, aber für das Klimasystem als Ganzes finden die Energiegewinne und -verluste an der TOA statt. Teile der TOA, in denen das Verhältnis zwischen Energiegewinn und -verlust positiv ist, hauptsächlich über den Tropen, stellen eine Energiequelle für das Klimasystem dar, während der Rest des TOA als Energiesenke wirkt. Die größte Energiesenke ist die TOA oberhalb des Winterpols. Im Durchschnitt tritt die Energie an der Quelle in das System ein und wird von Klimakomponente zu Klimakomponente weitergegeben, während sie zur Senke transportiert wird. Der Energiefluss durch das Klimasystem ist sowohl durch zeitliche als auch räumliche Variabilität gekennzeichnet. Infolgedessen ändert sich die Energiemenge, die durch ein beliebiges Element des Transportsystems fließt, im Laufe der Zeit, wodurch sich die Enthalpie (der gesamte „Wärme“-Gehalt) des Elements ändert, was häufig als Temperaturänderung beobachtet wird. Wir gehen davon aus, dass der MT durch bestimmte Kontrollzentren reguliert wird, die Energietore in und aus dem Klimasystem darstellen. Diese MT-Kontrollzentren sind der Polarwirbel (PV), das ENSO-System und die Ozonschicht. Ihre Bedingungen ändern sich als Reaktion auf Veränderungen bei den Hauptmodulatoren von MT, was zu Veränderungen im globalen Energietransport führt.

Die Absorption der Sonnenenergie in den Tropen ist spektral differenziert. Der Teil des Spektrums von 200-315 nm wird in der Ozonschicht der Stratosphäre absorbiert, während der Teil von 320-700 nm hauptsächlich in der photischen Schicht der tropischen Ozeane absorbiert wird. Die vom Ozean absorbierte Energie wird auf drei verschiedene Arten polwärts transportiert (Abb. 6.4). Ein Teil davon gelangt durch Konvektion in die Stratosphäre und bildet den aufsteigenden Zweig der Brewer-Dobson-Zirkulation, ein anderer Teil wird in der Troposphäre durch die Hadley-Zirkulation transportiert, und der letzte Teil wird durch den Ozean transportiert. Der ENSO-Zustand bestimmt die relative Verteilung der zu transportierenden Energie. La Niña begünstigt den ozeanischen Transport, während ENSO Neutral den atmosphärischen Transport verstärkt. Zu bestimmten Zeiten übersteigt die Menge der zu transportierenden Energie die Kapazität und ein El Niño wird ausgelöst.

El Niño lenkt eine große Menge an Energie in die Stratosphäre und Troposphäre, entzieht sie dem Ozean und erwärmt dabei die Oberfläche des Planeten. Während des holozänen Klimaoptimums (9-5,5 ka) war der Planet wärmer, der MT wurde infolgedessen reduziert, und dies führte zu einer sehr geringen Häufigkeit von El Niños (Moy et al. 2002). Während der Neoglazialzeit (seit 5,2 ka) nahmen Häufigkeit und Intensität der Los Niños zu. In Perioden planetarer Abkühlung muss als Teil des Abkühlungsprozesses mehr Energie polwärts transportiert werden, was die Zunahme von Los Niños von 1000-1400 n. Chr. erklärt, als die Welt in die Kleine Eiszeit (LIA; Moy et al. 2002) abglitt. In den letzten zwei Jahrhunderten war die Häufigkeit von El Niño gering und nimmt tendenziell ab, weil sich der Planet erwärmt, was durch einen geringeren MT erreicht wird. Gegenwärtig werden El-Niño-Bedingungen durch die

Akkumulation von warmem Wasser unter der Oberfläche (der wichtigste El-Niño-Prädiktor, siehe Abb. 2.4c) oder durch eine Abnahme der Brewer-Dobson-Zirkulation als Reaktion auf eine stärkere PV während des ersten borealen Winters nach tropischen oder NH-Stratosphären-reichenden Vulkanausbrüchen erzeugt (Kodera 1995; Stenchikov et al. 2002; Liu et al. 2018).

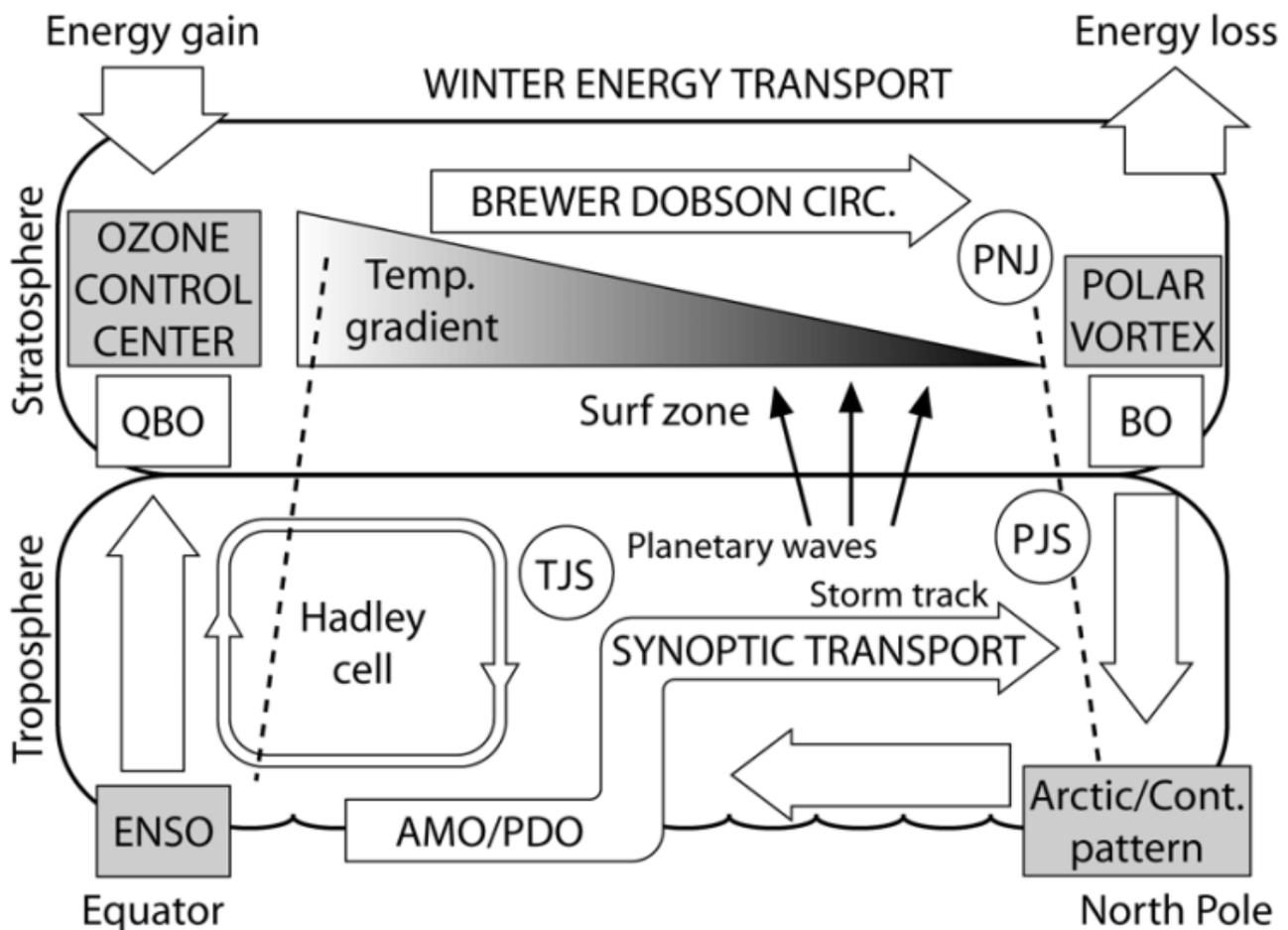


Abb. 6.4. Überblick über den meridionalen Wintertransport auf der Nordhalbkugel.

Wie in Abbildung 6.4 dargestellt, bestimmt das Verhältnis zwischen Energiegewinn und -verlust an der TOA die maximale Energiequelle im tropischen Band und die maximale Energiesenke in der Arktis im Winter. Die eintreffende Sonnenenergie wird in der Stratosphäre und der Troposphäre/Oberfläche verteilt, wo sie einer unterschiedlichen Transportmodulation unterliegt. Die Energie (weiße Pfeile) steigt von der Oberfläche in die Stratosphäre am tropischen Rohr (linke gestrichelte Linie) und wird durch die Brewer-Dobson-Zirkulation zum Polarwirbel (rechte gestrichelte Linie) transportiert. Der stratosphärische Transport wird durch die UV-Erwärmung in der tropischen Ozonschicht bestimmt, die einen Temperaturgradienten erzeugt, der die zonale Windstärke durch die thermische Windbilanz beeinflusst, sowie durch die QBO. Diese doppelte Steuerung bestimmt das Verhalten der

planetarischen Wellen (schwarze Pfeile) und bestimmt, ob der Polarwirbel eine zweijährige Kopplung mit der QBO erfährt (B0).

In der Mischschicht des tropischen Ozeans ist ENSO der wichtigste Modulator der Energieverteilung. Die Hadley-Zelle ist zwar am Energietransport beteiligt und reagiert auf dessen Intensität, indem sie sich ausdehnt oder zusammenzieht, doch der größte Teil des Energietransports in den Tropen erfolgt über den Ozean. Änderungen in der Transportintensität führen zu den wichtigsten Variabilitätsmodi, der AMO und der PDO. Außerhalb der Tropen wird der größte Teil der Energie in die Troposphäre übertragen, wo synoptischer Transport durch Wirbel entlang von Sturmbahnen für den Großteil des Transports in hohe Breiten verantwortlich ist. Die Stärke des Polarwirbels bestimmt das winterliche Klimaregime in hohen Breiten. Ein schwacher Wirbel begünstigt ein warmes Winterregime in der Arktis und auf den kalten Kontinenten, bei dem mehr Energie in die Arktis gelangt, die durch den Abtransport kalter Luftmassen ersetzt wird. Jetstreams (PJS, polar; TJS, tropisch; PNJ, Polarnacht) bilden die Grenzen und begrenzen den Transport. Abbildung 6.4 stammt aus Vinós 2022.

Es ist klar, dass ENSO den MT der Energie stark beeinflusst. Es ist daher überraschend, dass es als Klimaschwankung betrachtet wird (Timmermann et al. 2018). Seine Lage am Eintrittspunkt des größten Teils der Energie in das Klimasystem macht es zu einer Schaltzentrale für den MT, die durch die Sonnenaktivität moduliert wird (siehe Abb. 2.4). Es ist bekannt, dass ENSO auf stratosphärische Bedingungen (z. B. Vulkanausbrüche) und unterirdische Bedingungen (warmes Wasservolumen) reagiert und damit den MT auf verschiedenen Ebenen verbindet. Die Paläoklimatologie zeigt, dass ENSO auf die planetarische Thermodynamik reagiert, d.h. dass es damit zusammenhängt, wie sich der Planet erwärmt und abkühlt. Moy et al. (2002) sagen:

„Wir beobachten, dass Bond-Ereignisse in der Regel in Perioden geringer ENSO-Aktivität auftreten, die unmittelbar auf eine Periode hoher ENSO-Aktivität folgen, was darauf hindeutet, dass eine Verbindung zwischen den beiden Systemen bestehen könnte.“ – Moy et al. (2002)

Bond-Ereignisse sind jahrhundertelange Kälteperioden, wie die LIA, die zum Teil durch eine stark zunehmende ENSO-Aktivität (häufige, starke Niños) verursacht werden. Nachdem die Abkühlung des Planeten beendet ist, nimmt die ENSO-Aktivität ab.

6.4 Ozon: Die Schaltzentrale der tropischen Stratosphäre

Der 200-315 nm große Teil des Sonnenenergiespektrums wird in der stratosphärischen Ozonschicht absorbiert und hat dort einen großen Einfluss auf Temperatur und Zirkulation. Obwohl die Energie in diesem Wellenlängenbereich nur etwas mehr als 1 % der Gesamtenergie ausmacht (Lean 2017), schwankt sie zehnmals stärker mit der Sonnenaktivität als der Bereich >320 nm und ist für die strahlungsbedingten und dynamischen

Veränderungen verantwortlich, die in der Stratosphäre während des Sonnenzyklus' stattfinden. Die UV-Energieabsorption in der Stratosphäre beträgt im Durchschnitt $3,85 \text{ W/m}^2$ (Eddy et al. 2003; ein Viertel von $15,4 \text{ W/m}^2$). Dies ist keine geringe Menge. Sie macht 5 % der von der Atmosphäre absorbierten Sonnenenergie aus (Wild et al. 2019). Die Ozonzentrale verarbeitet einen erheblichen Teil der vom Klima aufgenommenen Energie, obwohl es sich nur um den UV-Energieanteil handelt.

Die Stratosphäre ist etwa 5 mal größer als die Troposphäre und enthält etwa 5 mal weniger Masse. Bei einer um mehr als eine Größenordnung geringeren Dichte ist die Wirkung der absorbierten Sonnenenergie auf die Stratosphärentemperatur enorm. Ohne Ozon wäre die Stratosphäre 50 K kälter und die Tropopause würde nicht existieren (Reck 1976). Die Ozonschicht ist eine Besonderheit der Erde, eine Folge der Sauerstoffanreicherung in der Atmosphäre, die sich wahrscheinlich im Ediacaran oder Kambrium (600-480 Mio. Jahre) entwickelte.

Die Absorption der Sonnenenergie durch das Ozon in der Stratosphäre ermöglicht die Bildung eines stratosphärischen Temperaturgradienten, der von der UV-Energie, der Ozonmenge und der Ozonverteilung abhängt. Der Gradient bildet sich durch kurzwellige Erwärmung von Ozon und langwellige Strahlungsübertragung, an der hauptsächlich CO_2 und Ozon beteiligt sind. Entlang dieses Gradienten wird die zonale Windzirkulation durch das Gleichgewicht zwischen dem Druckgradienten und dem Coriolis-Faktor (geostrophisches Gleichgewicht) bestimmt. Infolgedessen ist die stratosphärische Zirkulation in beiden Hemisphären entgegengesetzt, wobei die winterhemisphärische Zirkulation durch Westwinde und die Bildung eines Polarwirbels gekennzeichnet ist (siehe Abb. [3.7](#)).

In der Troposphäre erzeugte planetarische Wellen können sich nur dann nach oben ausbreiten, wenn die stratosphärischen Winde westlich sind und einen bestimmten Geschwindigkeitsbereich aufweisen (Charney-Drazin-Kriterium). Diese Bedingungen sind im Winter gegeben, so dass die stratosphärische Zirkulation im Winter stärker gestört ist (Haynes 2005), was zu höherem MT führt. Planetarische Wellen werden durch die Orographie (die Lage der Berge) und die Land/Ozean-Kontraste effizienter erzeugt und treten im borealen Winter häufiger auf. Planetarische Wellen deponieren Energie und Impuls in der Stratosphäre, wenn sie brechen, und werden gelegentlich nach unten in die Troposphäre abgelenkt, was die dortige Zirkulation beeinflusst. Ihre Wirkung in der Stratosphäre besteht darin, die meridionale Zirkulation anzutreiben, die westliche Zirkulation zu verringern und den Polarwirbel zu schwächen. Folglich hängt der stratosphärische MT, die so genannte Brewer-Dobson-Zirkulation, vom Wellenfluss ab.

In extremen Fällen schwächen planetarische Wellen die winterliche Westzirkulation so stark ab, dass die zonale Zirkulation östlich wird, was zu einer plötzlichen Erwärmung der Stratosphäre führt, da die Luft

nach unten gedrückt wird und sich adiabatisch erwärmt, während sich der Wirbel aufspaltet oder vom Pol weg verlagert wird. Dies geschieht etwa jedes zweite Jahr in der NH, aber selten in der SH, und hat große Auswirkungen auf das Wetter in der Troposphäre. Veränderungen in der Winterstratosphäre wirken sich aufgrund der Abwärtskopplung zwischen Stratosphäre und Troposphäre auf einer längeren Zeitskala auf das Wetter an der Oberfläche aus. Eindeutige Beobachtungen der stratosphärischen Variabilität, die sich auf die Oberfläche auswirkt, zeigen sich in der Arktischen Oszillation (Nördlicher Annularmodus), dem nordatlantischen Meeresspiegeldruck, extremen Wetterereignissen, der Häufigkeit von Winterkälteperioden, der Position des troposphärischen Mittelbreitenjets und niederfrequenten Variationen der thermohalinen Zirkulation im Atlantik (Baldwin et al. 2019). Die stratosphärische Variabilität steuert teilweise den troposphärischen Wärmefluss in die Arktis (Baldwin et al. 2019), was zeigt, dass die Reaktion des Ozons auf die Sonneneinstrahlung in der Stratosphäre als wichtige Schaltstelle für den MT fungiert.

Die Zirkulation und die Variabilität der Stratosphäre sind das Ergebnis von Ozon und seiner Reaktion auf die Sonnenenergie. Außerdem ist die Stratosphäre selbst das Ergebnis von Ozon. Die solare UV-Energie hat in der Stratosphäre zwei verschiedene Aufgaben. Durch die Photolyse von Sauerstoff und Ozon reguliert sie die Ozonmenge, und durch die Strahlungserwärmung reguliert sie das stratosphärische LTG, das die stratosphärische Zirkulation und ihre Reaktion auf den planetarischen Wellenfluss bewirkt. Die Auswirkung des Wellenflusses auf die Brewer-Dobson-Zirkulation (d. h. der stratosphärische MT) wird als „außertropische Pumpe“ bezeichnet (Haynes 2005). Infolgedessen ist die Ozonzentrale an der Modulation der MT beteiligt und reagiert durch Photolyse und kurzweilige Strahlungsraten empfindlich auf Veränderungen der Sonnenaktivität (Bednarz et al. 2019). Die Zahl der Belege für die Auswirkungen der solaren Variabilität auf das troposphärische Klima durch Veränderungen des Zustands der Stratosphäre hat in den letzten Jahrzehnten erheblich zugenommen (Haigh 2010).

6.5 Das Polarwirbel-Schaltzentrale

Zusammen mit dem Meereis bildet der PV eine negative Rückkopplung zur planetarischen Abkühlung. Er entsteht durch die starke Abkühlung im polaren Herbst aufgrund der sehr geringen Sonneneinstrahlung und der Meereisbildung. Durch die atmosphärische Abkühlung erhöht sich die Luftdichte, und wenn die kalte Luft absinkt, entsteht ein Tiefdruckzentrum mit zyklonaler (gegen den Uhrzeigersinn in der NH) Zirkulation um den Pol. Wenn die Westwinde stärker werden, isolieren sie das Innere des Wirbels, wo die Abkühlung durch Strahlung weitergeht. Der starke winterliche Temperaturkontrast treibt die zonale Windzirkulation an, die den Wirbel bis zur Rückkehr der Sonne stabilisiert. Ohne PV (und Meereis) würde der Planet jeden Winter viel mehr Energie verlieren. Es ist daher trivial, dass ein starker PV die Erwärmung des Planeten begünstigt und ein schwacher PV die Abkühlung des Planeten. Die PV ist

ein Produkt der zonalen Winterzirkulation. Da der MT durch die meridionale Zirkulation angetrieben wird, die auf Kosten der zonalen Zirkulation stattfindet, stellt der PV eine der wichtigsten MT-Kontrollzentren dar. Er regelt den Energiezugang zur größten Energiesenke des Planeten, der winterlichen polaren TOA (siehe Abb. [3.2](#)).

Die Entdeckung der Reaktion des PV auf die äquatoriale Quasi-Biennial-Oszillation (QBO; Holton & Tan 1980) zeigt, dass der PV nicht nur das Ergebnis der atmosphärischen Bedingungen in hohen Breitengraden ist. Später wurde festgestellt, dass die PV-Bedingungen auch auf den Sonnenzyklus reagieren (Labitzke 1987), auch wenn die Sonne im Winter nicht über dem Pol scheint. Nach dem Ausbruch des Pinatubo wurde deutlich, dass der PV auch von stratosphärenweiten Vulkanausbrüchen beeinflusst wird (Stenchikov et al. 2002; Azoulay et al. 2021), was zu einer vulkanischen Wintererwärmung in mittleren bis hohen Breiten führte, anstatt der erwarteten Abkühlung aufgrund der Verringerung der Sonnenenergie durch stratosphärische Aerosole. Es ist nun klar, dass der PV auf Veränderungen der stratosphärischen LTG und auf Veränderungen bei der Ausbreitung planetarer Wellen in der Stratosphäre reagiert. Planetarische Wellen lagern Energie und Impuls in der Nähe des Wirbels in der Winterstratosphäre ab, wodurch der starke potentielle Wirbelgradient des Wirbels geschwächt wird. Die Wirbeldynamik führt dazu, dass sich die Wellenstörungen nach unten ausbreiten, wodurch der Wirbel anfälliger für nachfolgende Wellen aus niedrigeren Höhen wird und sich der Effekt bis in die Troposphäre ausbreitet (Scott & Dritschel 2005). Dies ist eine Erklärung für die Abwärtskopplung zwischen Stratosphäre und Troposphäre in hohen Breitengraden.

Somit ist die PV-Stärke das Ergebnis äquatorial-polarer Gradienten in Temperatur, zonaler Windgeschwindigkeit und potenzieller Wirbelstärke, die den Einfluss planetarer Wellen auf die zonale Strömung bestimmen (Monier & Weare 2011). Die Stärke des PV hängt auch von der Aufwärtswellenaktivität ab (Lawrence et al. 2020). Wie wir gesehen haben (Abschnitte [4.7](#) & [5.4](#); Christiansen 2010), unterliegt die PV-Stärke interannuellen und multidekadischen Oszillationen, die die Arktische Oszillation und Oberflächenwetterereignisse wie die Häufigkeit schwerer winterlicher Kaltluftausbrüche beeinflussen (Huang et al. 2021).

Multidekadische Veränderungen der PV-Stärke verwirren die Atmosphärenforscher schon seit langem (Wallace 2000). Multidekadische Perioden, in denen der Polarwirbel stärker als im Durchschnitt ist, führen dazu, dass sich der arktische, atlantische und pazifische Sektor wie ein echter NAM (Northern Annular Mode; Abb. 6.5a & c) verhalten, mit einer Schaukelbeziehung zwischen dem Aleuten- und dem Islandtief (Shi & Nakamura 2014), wodurch der Wärme- und Feuchtigkeitstransport in die Arktis eingeschränkt wird. Im Gegensatz dazu führen multidekadische Perioden, in denen der Polarwirbel schwächer als im Durchschnitt ist, zu einer Situation, die am besten durch die Nordatlantische Oszillation (NAO; Abb. 6.5b) beschrieben wird, mit einer schwachen

zwischenjährlichen Variabilität des Aleutentiefs und einem weniger eingeschränkten arktischen Transport. Die in der wissenschaftlichen Literatur geführten Diskussionen darüber, ob das NAO- oder das NAM-Paradigma den wichtigsten außertropischen atmosphärischen Modus der Variabilität im Nordatlantik besser beschreibt (Wallace 2000), scheinen zu ignorieren, dass seine sich verändernde Natur mit den für den Klimawandel charakteristischen Verschiebungen des Klimaregimes verbunden ist (siehe Teil IV).

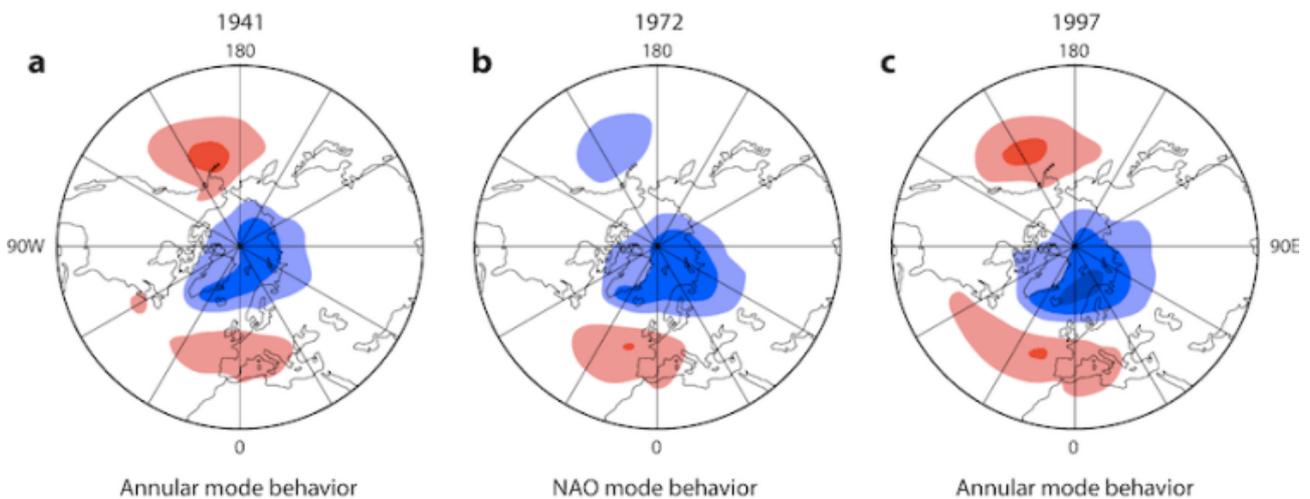


Abb. 6.5. Die sich verändernde Natur des Nördlichen Annularmodus/Nordatlantische Oszillation.

Die drei Karten in Abbildung 6.5 sind die erste empirische orthogonale Funktion der durchschnittlichen SLP-Winteranomalien über der außertropischen Nordhemisphäre (polwärts von 20°N) für drei 25-Jahres-Perioden, deren zentrale Jahre über den Karten vermerkt sind. Das Farbintervall bezieht sich auf 1,5 hPa (positiv in rot), und die Nulllinien sind weggelassen. Die Polarität entspricht der positiven Phase der Arktischen Oszillation. Ein echter nördlicher ringförmiger Modus erfordert die Koordination der drei Aktionszentren, andernfalls kann er besser als nordatlantische Oszillation beschrieben werden. Abbildung 6.5 ist nach Shi und Nakamura 2014.

Der PV regelt den Austausch von Luftmassen, Feuchtigkeit und Energie zwischen den mittleren Breiten und den polaren Breiten. Er reagiert auf Klimaverschiebungen in der Troposphäre und in der Stratosphäre und wird durch die Ausbreitung und Reflexion/Absorption planetarischer Wellen beeinflusst. Er wird durch die Sonnenaktivität, ENSO, die QBO und Vulkanausbrüche moduliert und stellt ein Kontrollzentrum für den MT dar.

6.6 Multidekadische Modi: Der Zustand des meridionalen Transports

Der Transport der nahezu gesamten Energie und Feuchtigkeit in Richtung Pole findet in der Troposphäre und im oberen Ozean statt. Da die

Intensität dieses Transports im Laufe der Zeit geografisch variiert, führt dies zu den so genannten Modi der Klimavariabilität. Diese Variabilitätsmodi haben im 20. Jahrhundert mit einer etwa 65-jährigen multidekadischen Oszillation geschwankt, die zu den beobachteten Verschiebungen der Klimaregime führt. Diese Oszillation, die hier als Stadiumwelle (Wyatt & Curry 2014) bezeichnet wird, wurde bei der globalen Wassertemperatur (SST) festgestellt ebenso wie beim Luftdruck auf dem Nordatlantik und den Winden (Kushnir 1994), der nordpazifischen und nordamerikanischen Temperatur (Minobe 1997), der Tageslänge und dem Kerndrehimpuls (Hide et al. 2000), Fischpopulationen (Mantua et al. 1997; Klyashtorin 2001), Temperatur und Meereisausdehnung in der Arktis (Polyakov et al. 2004), die relative Häufigkeit von ENSO-Ereignissen (Verdon & Franks 2006) und den globalen mittleren Meeresspiegel (Jevrejeva et al. 2008).

Die Stadium-Welle spiegelt die globale Variabilität des MT-Systems wider. Die Oszillation wirkt sich hauptsächlich auf die beiden Ozeanbecken aus, die direkt mit beiden Polen in Verbindung stehen, insbesondere vom Äquator (ENSO) bis zu den hohen Breiten der NH, und sie beeinflusst die Erdrotation durch Änderungen des Drehimpulses der Atmosphäre (Hide et al. 2000; Klyashtorin & Lyubushin 2007), was die gekoppelte Reaktion von Ozean und Atmosphäre zeigt. Die multidekadischen Schwankungen der SST (atlantische multidekadische und pazifische dekadische Schwankungen, AMO und PDO) sind einfach ein Spiegelbild des MT-Energieflusses durch diese Elemente. Da die jährlich in das Klimasystem eintretende Energiemenge nahezu konstant ist, spiegeln die warmen Phasen der AMO und der PDO lediglich eine Verlangsamung des MT wider, die zu einem Stau der Energieflüsse führt. Zu dieser Zeit befindet sich mehr Energie in diesen Elementen, vielleicht aufgrund eines verringerten Ozean-Atmosphären-Flusses, der durch ein überwiegend zonales Windmuster in den mittleren Breiten verursacht wird. Das räumliche Muster der AMO, das durch Regression der nordatlantischen SST-Anomalien nach Abzug der globalen SST-Anomalien ermittelt wurde, zeigt, dass die AMO der atlantische Teil eines globalen MT-Systems ist, das die Wärme polwärts bewegt. Das globale System umfasst das pazifische und das indische Becken, wie in Abb. 6.6 dargestellt. Sie zeigt, dass die NH-SST-Oszillation der AMO mit anderen globalen SST-Oszillationen phasengekoppelt ist, was koordinierte Veränderungen im globalen MT-System widerspiegelt.

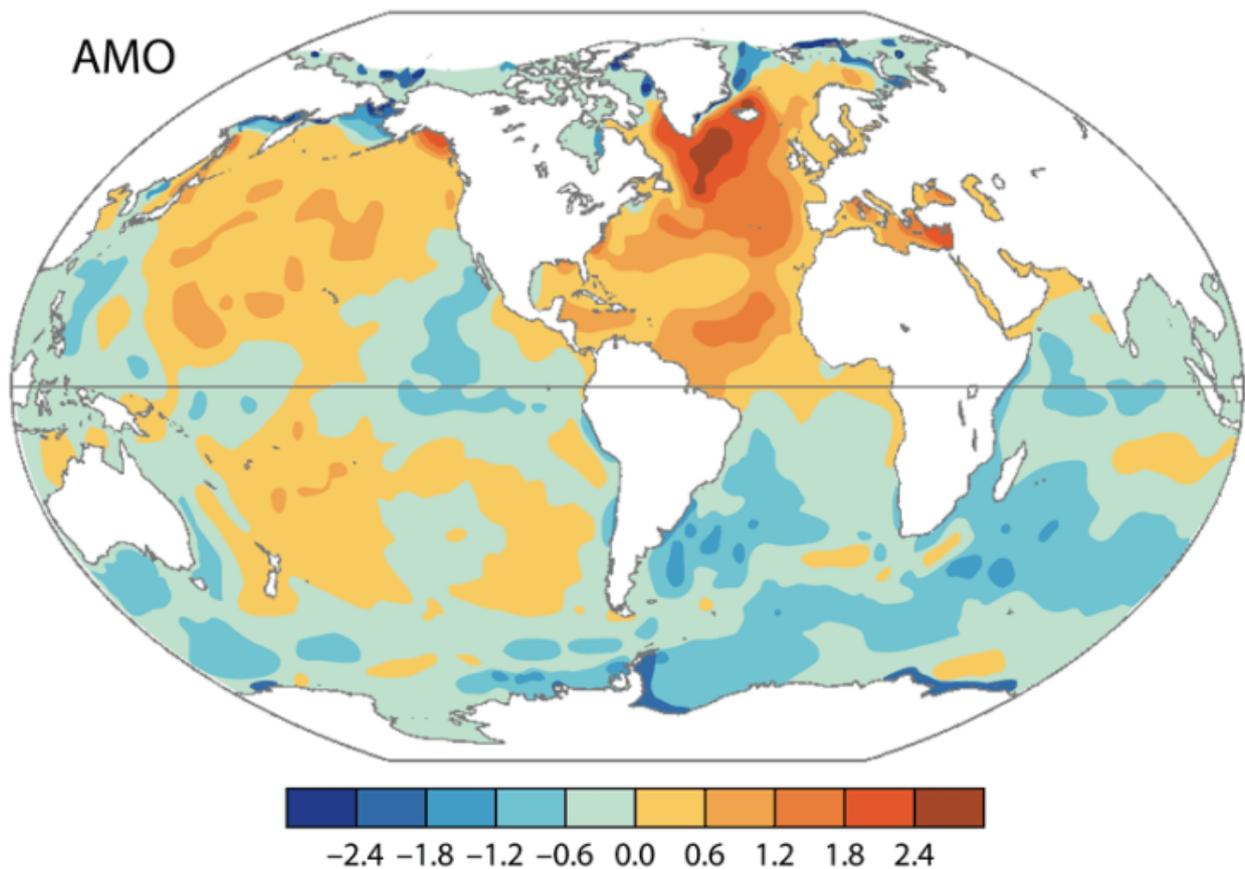


Abb. 6.6. Räumliches Muster der atlantischen multidekadischen Oszillation. Einheitenloses ($^{\circ}\text{C}/^{\circ}\text{C}$) Regressionsmuster der monatlichen SST-Anomalien (HadISST 1870-2008), nach Subtraktion der globalen mittleren Anomalie von der nordatlantischen SST-Anomalie.

Abb. 6.6 zeigt die SST-Änderung in $^{\circ}\text{C}$ pro $^{\circ}\text{C}$ des AMO-Index. Sie zeigt nicht nur das AMO-Muster, sondern auch, dass die AMO mit dem globalen Oberflächen-MT-System zusammenhängt, das Wärme aus den Tropen in die großen Ozeanbecken abzieht. Abbildung 6.6 ist nach Deser et al. 2010.

Dieses globale MT-System ist das komplexe Ergebnis der geografisch bedingten gekoppelten Atmosphäre-Ozean-Zirkulation auf einem rotierenden Planeten, dessen Achse gegenüber der Ekliptik geneigt ist und der den Großteil seiner Energie in den Tropen erhält. Da die Intensität des Transports zeitlich und räumlich variiert, konzentrieren sich die Autoren in der Regel auf die Beschreibung seiner regionalen Variabilität und sprechen von Telekonnectionen und atmosphärischen Brücken, um zu erklären, was im Grunde genommen Elemente eines einzigen sehr komplexen Prozesses sind (Abb. 6.7). Die Bedeutung des MT für das Klima der Erde kann gar nicht hoch genug eingeschätzt werden, und multidekadische Veränderungen des MT sind ein wichtiger und übersehener Faktor des Klimawandels. Es ist eine gängige Annahme, dass die Summe der Auswirkungen der multidekadischen Variabilität im Laufe der Zeit gegen Null tendiert. Studien über die Veränderung der AMO-Amplitude in den letzten sechs Jahrhunderten (Moore et al. 2017) zeigen, dass diese

Annahme falsch ist.

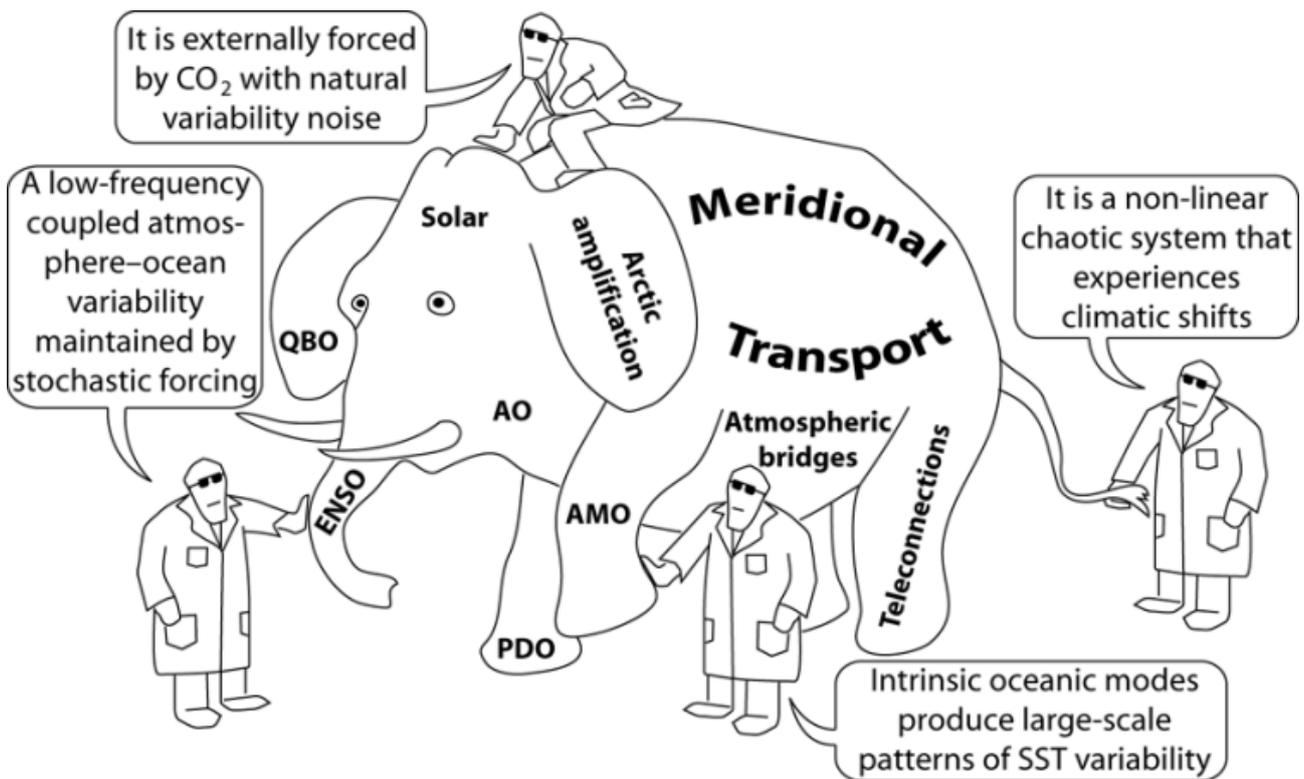


Abb. 6.7. Der meridionale Transport ist der übersehene Klimafaktor.

Der meridionale Transport ist sowohl der Elefant im Raum, den alle als Erklärung für den Klimawandel ignorieren, als auch der Elefant aus dem indischen Märchen, den Blinde als ein anderes Tier beschreiben, wenn sie verschiedene Teile davon berühren.

Die Stadium-Welle hat einen ausreichend langen Zeitraum, um einen wichtigen Beitrag zur modernen globalen Erwärmung zu leisten. Laut Chylek et al. (2014) ist ein Drittel der globalen Erwärmung nach 1975 auf die positive Phase der AMO zurückzuführen, und die Modelle überschätzen die Erwärmung der Treibhausgase, kompensieren dies aber durch eine Überschätzung der Aerosolabkühlung. Ungeachtet der Beweise ist das IPCC nicht der Ansicht, dass die interne Variabilität wesentlich zum Klimawandel zwischen 1951 und 2010 beigetragen hat (siehe Abb. 5.1). Eine alternative Sichtweise ist, dass eine Kombination aus Sonnenaktivität und 65-Jahres-Oszillation einen großen Teil des Anstiegs der globalen Erwärmungsrate im 20. Jahrhundert erklären kann, wobei die verbleibenden Veränderungen dem CO₂-Anstieg und der vulkanischen Aktivität zuzuschreiben sind, wenn ein uneingeschränkter Beitrag zugelassen wird. Diese Sichtweise setzt voraus, dass wir zugeben, dass unsere derzeitige Schätzung der Klimaempfindlichkeit gegenüber den verschiedenen bekannten Einflüssen falsch ist. Dies ist eine Möglichkeit, die durch die Identifizierung dynamischer Systeme unterstützt wird (de Larminat 2016).

Wie aus dem Flussdiagramm in Abb. 5.2 hervorgeht, wirkt sich die Sonnenaktivität direkt auf den stratosphärischen Transport und indirekt auf den troposphärischen Transport aus, hauptsächlich durch ENSO. Die Stadium-Welle steuert den troposphärischen Transport als ein emergentes Resonanzphänomen. Wenn beide in die gleiche Richtung wirken, ist die Wirkung maximal, wie im Zeitraum 1976-1997, als beide zur Verringerung des MT und zur Erwärmung des Globus' beitrugen. Während des Zeitraums 1890-1924 wirkten beide auf die Erhöhung des MT hin, was zu einer globalen Abkühlung führte. In diesen Zeiträumen hat die Stadium-Welle eine größere Wirkung, weil der troposphärische Transport viel stärker ist. Während des Zeitraums 1924-1935 war die Sonnenaktivität gering, aber die Stadium-Welle befand sich im wärmenden Teil ihres Zyklus, was zu einer Erwärmung zu Beginn des 20. Jahrhunderts führte. Während des Zeitraums 1945-1976 war die Sonnenaktivität hoch, aber die Stadium-Welle befand sich in der Abkühlungsphase, was zu einer Abkühlung aufgrund des hohen MT führte. In den Perioden, in denen die Sonnenaktivität und die Stadium-Welle entgegengesetzt wirken, überwiegt der Effekt der Stadium-Welle, weil er größer ist, aber der Effekt ist nicht so stark, wie wenn sie bei der Erhöhung oder Verringerung des MT zusammenwirken. MT ist der eigentliche „Dreh- und Angelpunkt“ des Klimawandels.

Im 20. Jahrhundert wies die 65-jährige Stadium-Welle zwei Erwärmungsperioden auf, so dass insgesamt etwa 65 Jahre lang ein warmer Zustand herrschte. Die Sonnenaktivität wies das etwa 70 Jahre dauernde moderne Sonnenmaximum (1935-2005) auf. Das bedeutet, dass sowohl der natürliche Antrieb als auch die interne Variabilität die meiste Zeit des Jahrhunderts zur beobachteten Erwärmung beigetragen haben. Das ungewöhnliche Zusammentreffen solch langer Perioden natürlicher Beiträge erklärt, warum sich das frühe 20. Jahrhundert ohne nennenswerte Treibhausgasemissionen erwärmt hat und warum in diesem Jahrhundert eine so starke Erwärmung beobachtet wurde, dass ein Alarm ausgelöst wurde. Der natürliche Beitrag zur beobachteten Erwärmung geht auf Kosten einer Verringerung des anthropogenen Beitrags.

6.7 Meridionaler Transport als Haupttreiber des Klimawandels

Die Suche nach dem Einfluss der Sonne auf das Klima führt uns zu einer unerwarteten Schlussfolgerung darüber, wie sich das Klima verändert. Damit die Sonnenschwankungen den Klimawandel beeinflussen können, muss der Klimaregler MT sein. Die beiden gigantischen polaren Kühlstrahler der Erde werden durch MT mit Energie versorgt. Daher ist MT für die meisten Klimaänderungen auf allen Zeitskalen verantwortlich. Die Triebkräfte der MT ändern sich je nach dem betrachteten Zeitrahmen.

- Auf der zwischenjährlichen Skala ist das Rauschen groß, aber der Wandel wird von ENSO und kurzfristigen Phänomenen wie Vulkanausbrüchen durch ihre Auswirkungen auf die PV-Stärke und MT bestimmt.
- Auf der multidekadischen Skala wird der Klimawandel durch die Stadium-Welle und alle ihre Teile bestimmt, was zu Klimaverschiebungen des MT

führt.

- Die hundertjährige bis tausendjährige Skala ist der Bereich der Sonne. Die Sonne steuert den Klimawandel durch ihre säkularen Zyklen der Sonnenaktivität und wirkt durch langfristige Veränderungen des MT, insbesondere während solarer Minima, aber auch während ausgedehnter Maxima wie dem heutigen Sonnenmaximum.
- In der Multimillenniums-Skala gelten die Milankovitch-Regeln. Die durch die Umlaufbahn bedingten Änderungen des LTG führen zu Änderungen der MT. Wenn die Schiefe abnimmt, erhöht sich die Sonneneinstrahlung in den Tropen, während sie an den Polen abnimmt. Dadurch wird der LTG während des Sommers steiler, was zu einer Erhöhung des MT führt, die die erforderliche erhöhte Feuchtigkeit in die hohen Breiten treibt. Die Feuchtigkeit bleibt dort in Form von Eis und Schnee gebunden, bis sich der Prozess umkehrt. Auf diese Weise gelangt die notwendige Feuchtigkeit während der Eiszeiten in die hohen Breiten (Masson-Delmotte et al. 2005). Später, wenn die Schiefe zunimmt, wird MT stärker eingeschränkt und trägt zur Erwärmung der mittleren Breiten während der Deglaziale bei. Die starke klimatische Signatur der Schiefe in den Tropen wurde mit dem meridionalen Transport in Verbindung gebracht (Bosmans et al. 2015).
- Auf der größten Zeitskala ist es die Plattentektonik, die den Klimawandel bestimmt, indem sie den Zugang der tropischen Wärme zu den beiden polaren Strahlern erleichtert oder einschränkt. Eine mehrere Millionen Jahre andauernde Abkühlung der Erde ist die Folge, wenn die meridionale Zirkulation zwischen Ozean und Atmosphäre begünstigt wird und die zonale Zirkulation eingeschränkt ist. Beschränkungen der zonalen Winde werden durch die Lage von Kontinenten, Ozeanpforten und Gebirgszügen verursacht, die den polwärts gerichteten (meridionalen) Wärmetransport verstärken. Wenn das Gegenteil der Fall ist, kommt es zu einer mehrere Millionen Jahre andauernden Erwärmung der Erde.

Es ist allgemein anerkannt, dass MT die Pole wärmer hält, als sie es sonst sein sollten. Ohne MT wären die Pole im Durchschnitt 100 °C kälter als der Äquator, statt 40 °C (Lindzen 1994). In Teil III (Abschnitt 3.2) haben wir jedoch das „Low-Gradient-Paradoxon“ untersucht und gesagt, dass in diesem Teil eine mögliche Lösung angeboten wird. Dieses Paradoxon ergibt sich aus dem Klima des frühen Eozäns, der Kreidezeit und des frühen Paläogens, das durch eine warme Welt mit einem reduzierten LTG und geringer Saisonalität gekennzeichnet war (Huber & Caballero 2011). Solche gleichmäßigen Klimate können von der modernen Klimatheorie nicht erklärt werden, ohne auf extreme CO₂-Werte und unplausibel hohe tropische Temperaturen zurückzugreifen. Die Wurzel des Problems des gleichmäßigen Klimas liegt im Paradoxon des geringen Gradienten (Huber & Caballero 2011). Damit die Pole das ganze Jahr über warm sind, wird mehr Energie aus den Tropen benötigt. Da die Pole jedoch das ganze Jahr über warm sind, muss das LTG sehr flach sein, was zu einem geringeren Energietransport führt.

Das Paradoxon ist nur deshalb so offensichtlich, weil, wie wir in den Teilen III bis V gesehen haben, der Planet umso kälter wird, je mehr Energie zu den Polen geleitet wird, so dass es eigentlich der niedrige Gradient war, der den Planeten und die Pole während gleichmäßiger Klimaepochen warm hielt. Der Planet befindet sich seit 34 Mio. Jahren in der späten känozoischen Eiszeit, weil er am Winterpol Wärme von zwei gigantischen Kühlern abzieht. Im frühen Eozän wurde der Wärmeverlust am Winterpol durch eine intensive Wolken-, Nebel- und Wasserdampf-GHE während der Polarnacht begrenzt. Warme polare Bedingungen waren nicht das Ergebnis von mehr Wärmetransport aus dem tropischen Bereich. Der Übergang vom gleichmäßigen Klima des frühen Eozäns zum Eishausklima des Pleistozäns lässt sich durch Veränderungen des MT erklären, die zu einem Anstieg der zu den Polen gerichteten Energiemenge führten.

Im frühen Eozän (52 Mio. Jahre) war die Weltgeographie sehr günstig für die zonale Zirkulation. Es gab einen gut entwickelten zirkunglobalen Seeweg, der durch das Tethysmeer, die Panamapassage und die Indonesische Passage gebildet wurde (Abb. 6.8a). Die Verbindungen zur Arktis verliefen durch Flachwasserseewege und über Kontinente hinweg, was den MT in Richtung einer ganzjährig warmen Arktis über dem Gefrierpunkt stark einschränkte. Der MT in Richtung Antarktis war ungehindert, aber sie war eisfrei und von Vegetation bedeckt, mit einem stärkeren GHE aufgrund von reichlich Wasserdampf und Wolken sowie aufgrund der globalen warmen Bedingungen.

Die Arktische Pforte zwischen dem Nordatlantik und dem Arktischen Ozean begann sich um 55 Ma zu öffnen und ermöglichte einen erhöhten MT in Richtung Nordpol (Abb. 6.8c roter Kasten; Lyle et al. 2008). Diese Öffnung wurde als Ursache für die lange eozäne Abkühlung vorgeschlagen (Vahlenkamp et al. 2018). Als sich der Planet abkühlte, vertiefte sich das LTG und trieb mehr Energie in Richtung beider Pole, was eine positive Rückkopplung zur globalen Abkühlung darstellte. Das Tasmanische Tor öffnete sich zwischen 36 und 30 Ma. Um 34 Ma fielen mehrere Schiefstands-Schwingungen mit geringer Amplitude in einer sehr ungewöhnlichen Konfiguration zusammen (Abb. 6.8d, Kasten), die 200 kyr lang kühle Sommer begünstigten. Die Antarktis hatte bereits mehrere Eisschilde in höheren Lagen entwickelt. Ein Kipppunkt wurde erreicht, als eine niedrige Exzentrizität das Eiswachstum förderte, während eine niedrige Schräglage das Überleben des Sommereises erleichterte, was die antarktische Vergletscherung in nur 80 kyr auslöste (Coxall et al. 2005). Die Vergletscherung wurde 400 kyr später während einer weiteren Periode geringer Exzentrizität abgeschlossen. Siehe die grauen Streifen in Abb. 6.8d.

Die Antarktis verfügte während des größten Teils des Oligozäns über einen ausgedehnten Eisschild, aber nach dem mitteloligozänen Glazialintervall (ca. 26 Mio. Jahre) und bis zum Ende des mittelmiozänen Klimaoptimums (ca. 14 Mio. Jahre) trat der Planet in eine Warmzeit ein, die offenbar niemand erklären kann. Gleichzeitig brach der CO₂-Gehalt laut Proxies (Beerling und Royer 2011) von 450 auf 200 ppm ein. Siehe

das blaue Dreieck in Abb. 6.8c. Dieses sehr niedrige CO₂-Niveau blieb während des gesamten Zeitraums erhalten, mit Ausnahme der Zeit der Columbia River Flood Basaltströme, die zum Zeitpunkt des CO₂-Höchststandes bei 16-15 Ma stattfanden. Während der Warmzeit vom späten Oligozän bis zum mittleren Miozän erklären die CO₂-Veränderungen also nicht die Temperaturveränderungen. Neuere Forschungen deuten darauf hin, dass der größte Teil dieses Zeitraums durch ein stark reduziertes LTG gekennzeichnet war (Guitián et al. 2019), was auf einen reduzierten MT hinweist.

Die Drake-Passage öffnete sich zu Beginn dieser Warmzeit, zwischen 30 und 20 Ma (Lyle et al. 2008), und ermöglichte die Entwicklung des antarktischen Zirkumpolarstroms und des Südlichen Annularmodus'. Die klimatische Isolierung der Antarktis muss den MT der Wärme aus den Tropen behindert haben, was zu einer regionalen Abkühlung führte, doch global gesehen erwärmte sich der Planet aufgrund des verringerten MT, und obwohl das Eisschild der Antarktis weiterhin existierte, trat es in eine lange Periode ein, in der es entsprechend den orbitalen Veränderungen zu- und abnahm (Liebrand et al. 2017). Als sich der Planet erwärmte, entwickelte die isolierte Antarktis also einen wärmeren und wechselhafteren Zustand als während des mittleren Oligozäns. MT-Änderungen können die mehrere Millionen Jahre dauernde Erwärmung vom späten Oligozän bis zum mittleren Miozän innerhalb der langfristigen känozoischen Abkühlung erklären.

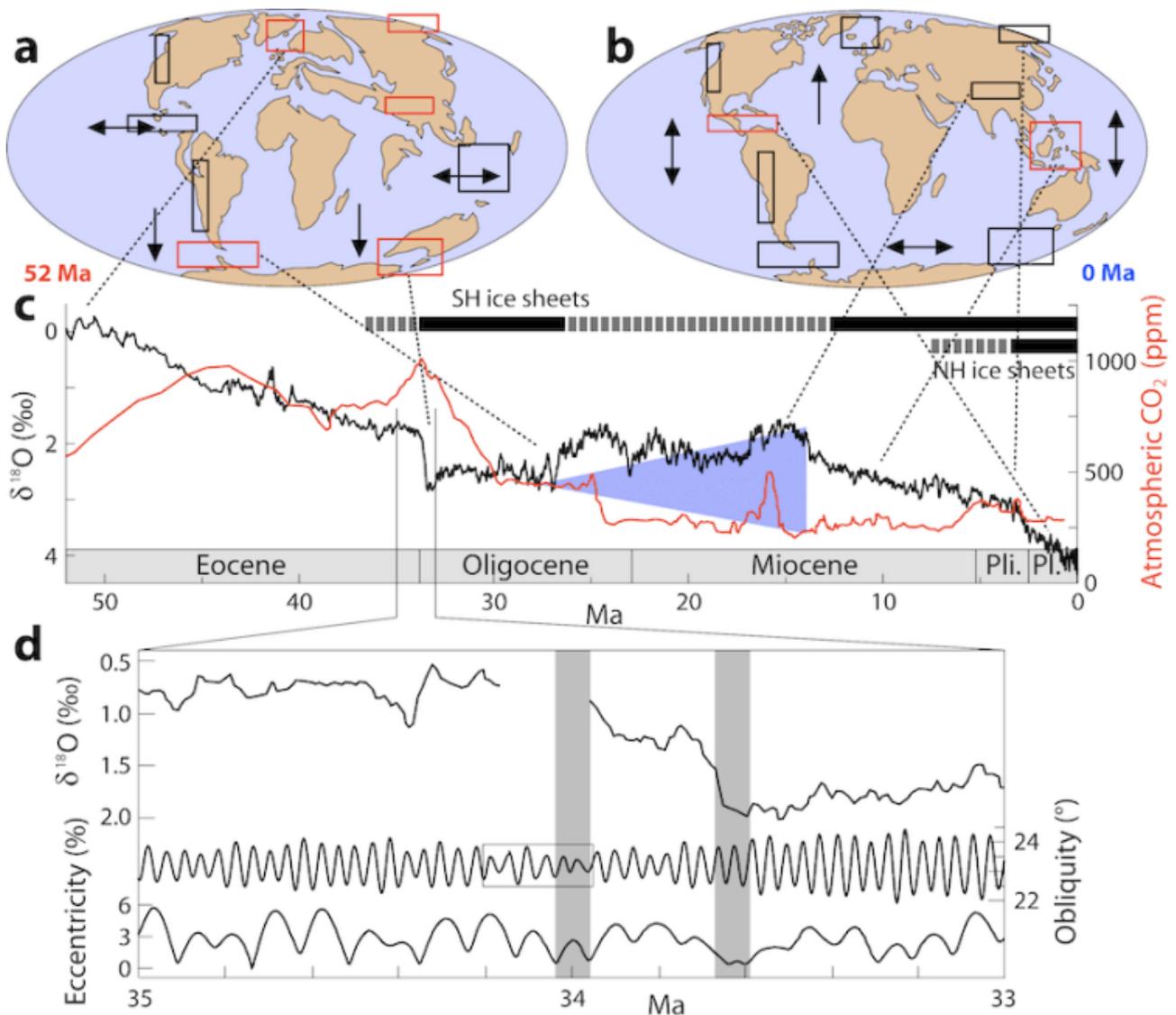


Abb. 6.8. Meridionaler Transport als Hauptdeterminante für die Klimaentwicklung.

Tafel (a) in Abb. 6.8 zeigt, wie Gebirgszüge und Ozeantore den meridionalen Transport im Känozoikum beeinflussen. Schwarze Kästen zeigen die aktiven, gut entwickelten geologischen Merkmale, die den Meridionaltransport beeinflussen. Rote Kästen zeigen Merkmale, die sich in der Entwicklung befinden. Vertikale Pfeile zeigen an, dass der meridionale Transport (globale Abkühlung) begünstigt wird, und horizontale Pfeile, dass der zonale Transport (globale Erwärmung) begünstigt wird.

In Abb. 6.8 (b) sehen wir, dass die Welt des Pleistozäns bedeutende geologische Merkmale entwickelt hat, die den meridionalen Transport begünstigen. Der Himalaya erreichte seine heutige Höhe vor etwa 15 Mio. Jahren. Die indonesische Passage ist immer noch offen, aber seit etwa 11 Mio. Jahren gibt es erhebliche Einschränkungen. Die Beringstraße ist seit etwa 5,3 Mio. Jahren offen, während die Panamapassage seit etwa 3 Mio. Jahren vollständig geschlossen ist. Die Abbildung ist nach Lyle et

al. 2008. Rote Kästen zeigen geologische Veränderungen an, die den meridionalen Transport beeinflussen.

In Abb. 6.8, Feld (c) zeigt die schwarze Kurve globale $\delta^{18}O$ -Daten aus der Tiefsee als Proxy für Temperatur und Kontinentaleis. Wenn der obere Balken voll ist, repräsentiert er ein Eisvolumen von mehr als 50 % des heutigen Volumens, und wenn er gestrichelt ist, ist das Eisvolumen ≤ 50 %. Die Abbildung ist nach Zachos et al. 2001. Die rote Kurve zeigt durchschnittliche CO_2 -Daten nach Beerling & Royer 2011. Das blaue Dreieck zeigt eine Erwärmung von 14 Myr, während die CO_2 -Werte abnehmen.

In Tafel (d) zeigen hoch auflösende $\delta^{18}O$ -Änderungen im Kalzit benthischer Foraminiferen (schwarz), dass die Vergletscherung der Antarktis schneller als bisher angenommen und in zwei Schritten stattfand. Der Kasten markiert eine Periode mit geringer Schräglage und Amplitudenschwankungen. Die grauen Balken sind Perioden mit geringer Exzentrizität während der antarktischen Vergletscherung. Diese Tafel ist nach Coxall et al. 2005.

Änderungen des globalen MT-Zustandes erklären leicht die Klimaänderungen, die vom frühen Eozän bis zum späten Pliozän stattfanden, die CO_2 -Änderungen aber nicht. Die Isolierung der Antarktis durch die Öffnung der Tasman- und Drake-Passage war schlecht für die Antarktis, aber gut für den Planeten, da sie den Energieverlust am Südpol durch die Schaffung einer starken zonalen Zirkulation um die Antarktis begrenzte. Infolgedessen erwärmte sich der Planet. Auch heute noch geht in der Südpolregion trotz viel niedrigerer Temperaturen und einer steileren LTG weniger Energie verloren als in der Arktis (Peixoto & Oort 1992). Seit dem frühen Miozän gab es eine Reihe von Ereignissen, die den Planeten in Richtung seines heutigen strengen Eishausklimas trieben. Die Arktische Pforte öffnete sich weiter, und um 17,5 Millionen Jahre herum vertiefte sich die Framstraße so weit, dass eine Tiefenwasserzirkulation möglich wurde (Jakobsson et al. 2007). Der Himalaya erreichte seine heutige Höhe vor etwa 15 Mio. Jahren, die Indonesische Passage wurde in 11 Mio. Jahren erheblich eingeschränkt, die Beringstraße öffnete sich in etwa 5,3 Mio. Jahren, und die Panamapforte schloss sich in etwa 3 Mio. Jahren (Lyle et al. 2008). Das Ergebnis war ein Wandel von einem Planeten mit zonaler Zirkulation (Abb. 6.8a) zu einem Planeten mit meridionaler Zirkulation (Abb. 6.8b), bei dem mehr Energie von den Polen verloren geht.

6.8 Epilog

Das Klima ist eines der komplexesten Phänomene, die Gegenstand einer populärwissenschaftlichen Debatte sind. Feynman (1981) sagte einmal über die Wissenschaft, dass:

„Wir wissen nicht, was wahr ist, wir versuchen, es herauszufinden, alles ist möglicherweise falsch.“ – Feynman (1981)

Dies gilt insbesondere für die Klimawissenschaft, ein sehr langfristiges Phänomen, bei dem ein großer Teil der entscheidenden Daten erst seit einigen Jahrzehnten verfügbar ist. Wie unausgereift die Klimadaten sind, zeigt sich an den regelmäßigen Änderungen der Temperaturdaten, die die registrierte Erwärmung im Laufe der Zeit stets erhöhen, obwohl sie auf denselben ursprünglichen Daten beruhen.

Als Beispiel zeigt Abb. 6.9 drei verschiedene Veröffentlichungen der globalen Temperatur-Datensätze des Hadley Centre des Met Office über die letzten 10 Jahre (HadCRUT 3, 4 & 5) für den Zeitraum 1997-2014 (13-Monats-Mittelwerte). Während HadCRUT 3 keine steigende Tendenz aufwies, zeigte jede Wiederholung einen stärkeren Trend, und die Änderungen führten zu einer zusätzlichen Erwärmung von fast 0,2 °C in nur 17 Jahren auf der Grundlage derselben Rohdaten. Das gibt der vom Menschen verursachten Erwärmung eine neue Bedeutung. Am Ende dieses Zeitraums liegen die älteren Datensätze außerhalb der Konfidenzgrenzen der neuesten, so dass diesen Grenzen kein Vertrauen geschenkt werden kann. Wir wissen nicht einmal, wie stark sich der Planet über einen so kurzen Zeitraum erwärmt hat, geschweige denn über das letzte Jahrhundert.

Wissenschaftliche Studien, die auf der Grundlage dieser Daten durchgeführt werden, verfallen in dem Moment, in dem die alten Daten periodisch überholt und veraltet sind. Dies ist eine beispiellose Situation in der Wissenschaft, einem systematischen Unternehmen, das sich auf solide, nicht auf fluide Daten stützt. Die Abhängigkeit der Klimawissenschaft von Computermodellen führt zu einem ähnlichen Effekt, da auch sie veralten und jedes Mal ersetzt werden, wenn ein neues „verbessertes“ Modell herauskommt. Sobald die neuen Modelle herauskommen, werden die alten Projektionen und die „Erkenntnisse“, die sie einst stützten, ungültig.

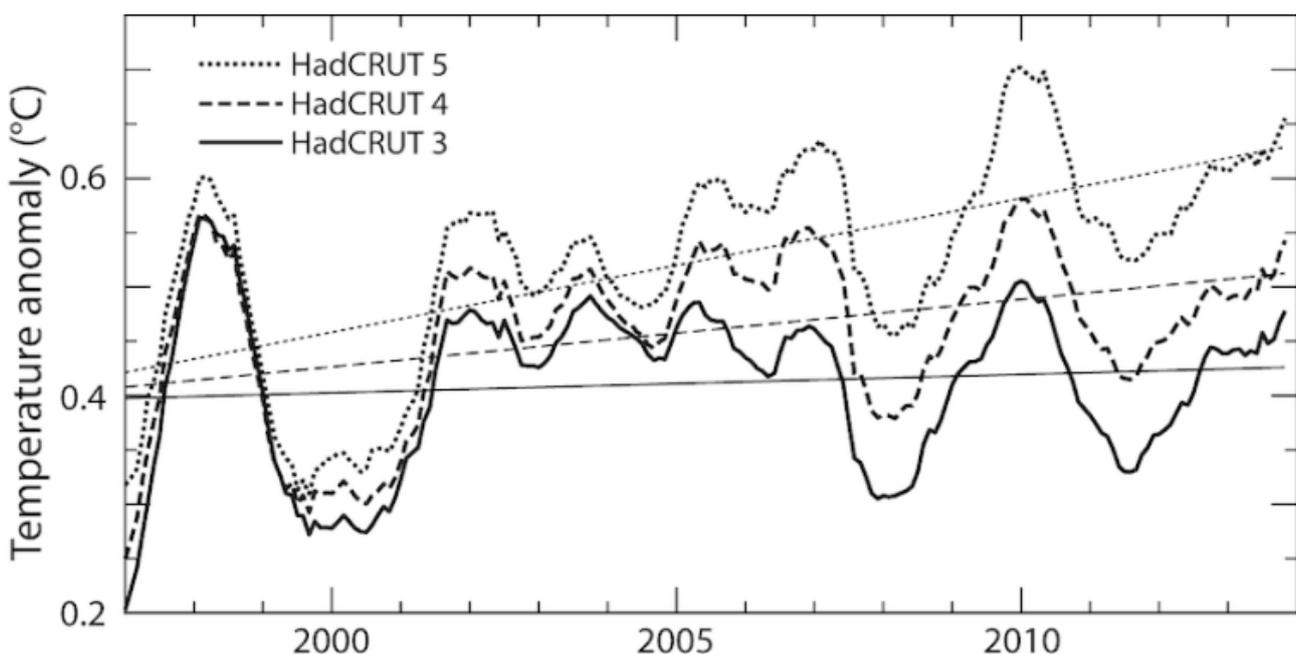


Abb. 6.9. Drei Temperaturrekonstruktionen aus denselben Temperaturdaten.

Zu der Graphik: Bei allen handelt es sich um 13-monatige zentrierte Mittelwerte der monatlichen globalen durchschnittlichen Temperatur-Anomalien aus drei Datensätzen für den Zeitraum von Juli 1996 bis Mai 2014. Die HadCRUT-3-Daten sind als dicke, kontinuierliche Kurve mit einem Least-Squares-Trend (dünne, kontinuierliche Linie) dargestellt. Die HadCRUT 4.6-Daten sind als dicke gestrichelte Kurve mit einem Least-Squares-Trend als dünne gestrichelte Linie dargestellt. Die HadCRUT 5.0-Daten sind als dicke gepunktete Kurve dargestellt, mit einem Least-squares-Trend als dünne gepunktete Linie. Die Daten stammen alle vom Hadley Centre des britischen Met Office.

Zweifellos beschäftigt diese Situation die Klimaforscher, da die Studien immer wieder mit neuen Daten und Computermodellen durchgeführt werden müssen. Die sich ständig weiter entwickelnden Modelle und die ständig steigenden Temperaturtrends tragen nicht dazu bei, das Ansehen der Klimastudien unter den seriöseren Wissenschaften zu verbessern, in denen die Wiederholung vergangener Experimente das gleiche Ergebnis liefert.

Die moderne Klimawissenschaft hat sich ohne Protest vom Aktivismus anstecken lassen. Aktivistische Klimawissenschaftler erweisen der Wissenschaft einen großen Bärendienst, indem sie Karl Poppers Ziel der objektiven Erkenntnis aufgeben und es zulassen, dass sie sich emotional auf ihr Thema einlassen und mit einem bestimmten Ergebnis verbunden werden. Die Geschichte der Wissenschaft ist nicht freundlich zu Wissenschaftlern, die sich zu fehlgeleiteten Dienern sozialer oder politischer Ziele machen lassen. Der Lysenkoismus und die Eugenik fallen mir als dunkle Beispiele ein. Joel Hildebrand (1957) sagte über die wissenschaftliche Methode:

„Es gibt keine Regeln, sondern nur die Grundsätze der Integrität und Objektivität, wobei jede Autorität außer derjenigen der Tatsachen abgelehnt wird.“ – Joel Hildebrand (1957)

Die Frage ist: Erfüllt die Forschung in der Klimawissenschaft die Standards der wissenschaftlichen Objektivität? Dies ist für die öffentlichen Debatten über Wissenschaft und Wissenschaftspolitik zunehmend wichtig (Tsou et al. 2015).

In dieser Serie haben wir einige der Beweise dafür vorgestellt, dass die Sonnenaktivität einen übermäßigen Einfluss auf den Klimawandel hat, zusammen mit einem Erklärungsvorschlag für den beobachteten Effekt. Die wissenschaftliche Literatur ist voll von zusätzlichen Beweisen für einen solaren Effekt auf das Klima. Diese Beweise zu leugnen, kann den Fortschritt in der Klimawissenschaft nur verzögern. Die Suche nach einem Sonnen-Klima-Effekt hat zu dem unerwarteten Ergebnis geführt, dass der modernen Klimatheorie eine entscheidende Komponente fehlt. Änderungen des polwärts gerichteten Energietransports bewirken, dass der Planet seinen Klimazustand ändert. Er scheint der Hauptantrieb für den Klimawandel zu sein.

Im Gegensatz zu der allgemeinen Annahme wird der Planet wärmer, wenn weniger Energie polwärts transportiert wird. Die Erwärmung des Planeten nach 1850 ist auf eine Verringerung des MT zurückzuführen, gefolgt von der Zunahme der Treibhausgase seit Mitte des 20. Jahrhunderts. Zwar wird sich die globale Erwärmung im größten Teil des 21. Jahrhunderts fortsetzen, doch ist es unwahrscheinlich, dass die Erwärmung zunimmt, sie könnte sogar abnehmen, was fast alle Klimaprojektionen widerlegt. Die jüngste Erwärmung scheint multikausal zu sein und neben den Treibhausgasen auch durch Veränderungen der Sonnenaktivität und des MT verursacht zu werden. Es ist daher sehr unwahrscheinlich, dass die Dekarbonisierung der Wirtschaft irgendeine signifikante Auswirkung auf das Klima haben wird, obwohl sie einen großen Einfluss auf den Transfer von Wohlstand von einigen Akteuren in der Weltwirtschaft zu anderen haben könnte, selbst wenn ihr Gesamteffekt auf die Schaffung von Wohlstand negativ ist.

Anmerkung:

The book "[Climate of the Past, Present and Future: A scientific debate, 2nd ed.](#)" by Javier Vinós will be published on September 20th, and it is now available for pre-orders. [Kobo](#) has a preview inside the eBook. At the time of this writing, both [Barnes & Noble](#) and [Amazon](#) offer the eBook at the discounted price of \$2.99.

References

Glossar/Abkürzungen

Die vorherigen Teile dieser Serie stehen hier:

[Part 1: The Search for a solar signal. \[Deutsch\]](#)

[Part 2: Solar activity and climate, unexplained and ignored. \[Deutsch\]](#)

[Part 3: Meridional transport of energy, the most fundamental climate variable. \[Deutsch\]](#)

[Part 4: The unexplained climate shift of 1997. \[Deutsch\]](#)

[Part 5: A role for the Sun in climate change. \[Deutsch\]](#)

This post originally appeared on Judy Curry's website, [Climate, Etc.](#)

Link:

<https://andymaypetrophysicist.com/2022/09/04/the-sun-climate-effect-the-winter-gatekeeper-hypothesis-vi-meridional-transport-is-the-main-climate-change-driver/>

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