

in Permafrostböden wird die weitere Verwesung der zu diesem Zeitpunkt im Boden enthaltenen Pflanzenreste unterbunden. Insgesamt betrachtet wird wieder der Atmosphäre CO_2 entzogen.

3. Das Einfrieren der Photosynthese: Mit zunehmender Vereisung und mit dem Absinken der mittleren Jahrestemperatur kommt die Photosynthese in immer größeren Anteilen der Erde nahezu zum Erliegen und damit die Bindung von atmosphärischem CO_2 .
4. Die Überflutung von Moor-Gebieten durch einen starken Anstieg des Meeresspiegels als Folge eines Rückgangs der globalen Vereisung. Enthalten diese Mooregebiete bereits ausreichend dicke Torfschichten, werden diese nun über die nun wirksamen Gezeitenströme mit Sauerstoff versorgt und biologisch abgebaut, so dass der über lange Zeiträume gespeicherte Gehalt an C als CO_2 an die Atmosphäre abgegeben wird. Da bei diesem Prozess C -Mengen freigesetzt werden, die vorher über sehr lange Zeit eingelagert wurden, kann er den Treibhauseffekt in relativ kurzen Zeiten deutlich verändern.
5. Das Auftauen bisheriger Permafrostböden durch den Rückgang der Vereisung. So entstehen Sumpf-Gebiete, in denen die Verwesung der über lange Zeit angesammelten biologischen Reste massiv einsetzt. In relativ kurzer Zeit werden so große Mengen an CO_2 und CH_4 an die Atmosphäre abgegeben. Auch dieser Prozess setzt in relativ kurzen Zeiten C -Mengen frei, die vorher über sehr lange Zeit eingelagert wurden. Er kann also ebenfalls den Treibhauseffekt in relativ kurzen Zeiten deutlich verändern.

Von den oben geschilderten Mechanismen haben die Mechanismen 1, 2, 4 und 5 einen die jeweils aktuell vorherrschende Vereisungsrichtung **verstärkenden** Effekt. Sie entsprechen also einer **positiven** Rückkopplung des Wirkungskreises. Der Mechanismus 3, zusammen mit dem durch den Vulkanismus bedingten ständigen Eintrag von CO_2 in die Atmosphäre, könnte für die Vorzeichenumkehr der Vereisungsveränderung am Punkt **maximaler** Vereisung verantwortlich sein.

Der Umfang, in dem diese Mechanismen wirken können, beeinflusst also maßgeblich Form, Amplitude und Frequenz dieser Vereisungs-Oszillationen.

8.7.7 Eine Deutungs-Hypothese des globalen Klimas (-)

In diesem Abschnitt werde ich versuchen, eine Deutung für die wichtigsten Entwicklungen des Erdklimas zu geben. Es geht dabei insbesondere um eine schlüssige Erklärung für folgende Fakten:

1. Die erdgeschichtlich relativ frühe Erwärmung der Erdoberfläche auf Temperaturen der Größenordnung $300 \cdot K$, obwohl die Sonne zu dieser Zeit erst etwa $80 \cdot \%$ ihres heutigen Strahlungs-Energiestroms erreicht hatte;

2. das mehrmalige Auftreten von mehrere $10^7 \cdot y$ andauernden Eiszeitaltern innerhalb des ansonsten meist relativ warmen Klimas während einer Zeitspanne von insgesamt etwa $3,3 \cdot 10^9 \cdot y$; diese Zeitspanne umfasste das gesamte Archaikum und das sich daran anschließende Proterozoikum; sie dauerte also etwa bis zur Zeit vor $5,4 \cdot 10^8 \cdot y$;
3. der Beginn einer fast periodischen Abfolge von Warm- und Kaltzeiten zu Beginn des Pleistozäns vor etwa $1,8 \cdot 10^6 \cdot y$; und schließlich
4. das Einrasten in den Zustand nahezu konstanter Temperatur mit Beginn des Holozäns vor etwa $1,2 \cdot 10^4 \cdot y$.

Alle diese Fakten sind durch Messdaten belegt und in den vorausgegangenen Absätzen bereits ausführlich diskutiert worden. Mit der nun folgenden zusammenfassenden Interpretation verfolge ich auch das Ziel, dem Leser klar zu machen, dass man die Aussagekraft und Verlässlichkeit einer jeden Theorie des **aktuellen** globalen Erdklimas insbesondere dadurch bewerten kann, dass man ihre Verlässlichkeit bei der Interpretation erdgeschichtlich **früherer** Klimasituationen betrachtet.

Um dem Leser eine ausgewogene Wertung meiner nun folgenden Deutungshypothese zu ermöglichen, weise ich darauf hin, dass es für die oben aufgeführten Phänomene noch keine von den Experten bereits weitgehend **einheitlich akzeptierten** Deutungen gibt. Vielmehr findet hierzu in vielen Details noch eine engagierte, oft kontroverse wissenschaftliche Auseinandersetzung statt. Es blieb mir daher gar nichts anderes übrig, als im Folgenden meine ganz persönliche Interpretation zu schildern. Allerdings habe ich zu deren Formulierung im Rahmen meiner Möglichkeiten intensiv die Literatur zu Rate gezogen. Nahezu alle Fakten und Zahlenwerte, die ich im folgenden zitieren oder verwenden werde, habe ich in den vorausgegangenen Abschnitten bereits ausführlich behandelt und ihre Herkunft belegt. Ich werde sie nun lediglich verbal zusammenfassen und zu einer einheitlichen Deutungshypothese komprimieren.

Wir diskutieren zunächst die Bandbreite an Veränderungen der Oberflächentemperatur der Erde, die allein über den für die solare Einstrahlung geltenden Absorptionskoeffizienten $\langle \varepsilon_a \rangle$ der Erdoberfläche möglich sind. Die Größe $\langle \varepsilon_a \rangle$ lässt sich in signifikantem Umfang nur durch eine Veränderung des Vereisungsgrades der Erdoberfläche verändern. Selbst eine Änderung des Land/Masse-Verhältnisses z.B. durch Veränderung des Meeresspiegels oder eine Bewaldung oder umgekehrt eine Verstepung großer Landbereiche ändert den Absorptionskoeffizienten nur wenig (s. Abschnitt 8.11). Nehmen wir den aktuell geltenden Wert von $\langle \varepsilon_a \rangle = 0,63$ zusammen mit dem aktuellen Wert $0,039$ für den Anteil der vereisten Erdoberfläche (Land und Meer) an der gesamten Erdoberfläche als Orientierung, so schätzen wir daraus für die eisfreie Erde einen Wert ab von

$$\langle \varepsilon_a \rangle_{\text{eisfreie Erde}} \approx \frac{0,63 - 0,1 \cdot 0,039}{0,961} = 0,65 \quad (8.602)$$

Ein weiterer signifikanter Anstieg von $\langle \varepsilon_a \rangle_{\text{Erde}}$ über den angenommenen Wert 0,65 hinaus ist völlig unrealistisch. Eine völlig vereiste Erde dagegen hat einen mittleren Absorptionskoeffizienten von etwa

$$\langle \varepsilon_a \rangle_{\text{vereiste Erde}} \approx 0,1 \quad (8.603)$$

Dieser Variationsbreite

$$0,1 \leq \langle \varepsilon_a \rangle_{\text{Erde}} \leq 0,65 \quad (8.604)$$

entspricht eine Veränderung der von der Erdoberfläche absorbierten Strahlungsenergie um den Faktor 6,5! Aus dieser Veränderung von $\langle \varepsilon_a \rangle$ resultiert (bei konstantem Treibhauseffekt) eine Veränderung der Temperatur der Erdoberfläche von ca. (s. Gl. 8.490)

$$-79^\circ\text{C} \leq \langle T_{\text{Erdoberfl.}} \rangle \leq +17^\circ\text{C} \quad (8.605)$$

Die mittlere Temperatur der Erdoberfläche reagiert also äußerst empfindlich auf eine Veränderung des (über ein Jahr gemittelten) Vereisungsgrades der Erdoberfläche.

Die zweitwichtigste Stellgröße für die Temperatur der Erdoberfläche ist der *Treibhauseffekt* mit einem aktuellen Wert von $33 \cdot K$. Eine Bandbreite für die unter realistischer Betrachtung in den jeweiligen Extremfällen zu erwartenden Werte dieser Größe ist schwer anzugeben. Ich gehe davon aus, dass der Wert sich im Vergleich zur aktuellen Situation bereits durch moderate Veränderungen der Zusammensetzung der Erd-Atmosphäre zumindest halbieren und auch verdoppeln lässt.

Leichte Veränderungen der Intensität der Sonnen-Einstrahlung, wie sie z.B. durch Variationen in dem von der Sonne insgesamt abgestrahlten Energiestrom auftreten, haben im Vergleich zu den vorgenannten Effekten nur vergleichsweise geringe Auswirkungen. Z.B. ist durch Messungen abgesichert, dass die in diesem Zusammenhang in der öffentlichen Diskussion des öfteren angeführten Sonnenflecken mit einer Schwankung des solaren Energiestroms um lediglich ca. $0,1 \cdot \%$ verbunden sind!

Die Erde kann also selbst bei einer gegenüber der aktuellen Sonnen-Intensität unveränderten solaren Einstrahlung zum einen auch in einem **relativ kalten Zustand** existieren mit einer mittleren Temperatur der Erdoberfläche **deutlich unter 0°C** ! Voraussetzung hierfür ist ein mittlerer Absorptionskoeffizient für sichtbare Strahlung von deutlich unter 0,65 und ein nicht zu hoher Treibhauseffekt. Die Atmosphäre muss also stark verarmt an Treibhausgasen sein, das sind insbesondere Wasser, Kohlenstoffdioxid und Methan. Der Zustand einer Erde mit weitgehend vereister Oberfläche war also während der gesamten erdgeschichtlichen Zeiträume grundsätzlich energetisch möglich.

Die Erde kann aber auch in einem Zustand **relativ hoher Oberflächen-Temperatur** und damit einer weitgehend oder vollkommen eisfreien Oberfläche existieren. Auch dieser Zustand ist energetisch möglich! Voraussetzung ist nun ein relativ hoher mittlerer Absorptionskoeffizient für sichtbare Strahlung (z.B. 0,65) **und** ein ausreichend hoher Treibhauseffekt. Die Erdoberfläche muss also weitgehend eisfrei sein, und die Atmosphäre muss in ausreichender Konzentration Treibhausgase

enthalten. In beiden Fällen ist die Frage *lediglich*, ob der jeweilige Zustand auch stationär ist, d.h. ob es einer ausreichend **starken** Störung bedarf, um die Erde aus diesem Zustand herauszuholen, oder ob sie *von alleine* (z.B. bereits als Folge einer relativ *schwachen* Störung) in einen Zustand deutlich höherer bzw. tieferer Oberflächen-Temperatur übergehen kann. Nun setzt aber eine Vereisung außer in den Gipfelregionen ausreichend hoher Gebirge insbesondere in den Polregionen ein. Außerdem sind hierfür Landflächen gegenüber dem offenen Meer bevorzugt, da letzteres immer einen besseren Wärmekontakt zwischen der oberflächen-nahen Schicht und den tieferen Schichten des Meeres herstellt. Daher ist für die Möglichkeit des Übergangs der Erde in einen relativ kalten Zustand insbesondere die Position und Verteilung der Kontinente auf dem Globus von Bedeutung. Ist ein Pol oder sind gar beide Pole mit Landfläche bedeckt, oder befinden sich zumindest ausreichend große Landflächen in den jeweiligen ausreichend hohen nördlichen oder südlichen Breitengraden, so begünstigt dies beträchtlich eine Vereisung eines signifikanten Anteils der Erdoberfläche. Um diese Neigung der Erde zur selbsttätigen Veränderung ihres Vereisungsgrades zumindest in groben Näherung quantitativ zu erfassen, habe ich im Absatz S. 1011 die sog. Temperatur-Kreisverstärkung V eingeführt. Das zu einem Zeitpunkt vorliegende mittlere globale Klima der Erde wird in dieser Näherung instabil, sobald an dem Breitengrad, an dem aktuell im Mittel die Vereisungsgrenze positioniert ist, diese Größe V deutlich über dem Wert 1,0 liegt.

Die aktuell geltende Verteilung der Landmasse über die Breitengrade zeigt die Abb. 33. Die Südpol-Region wird vollständig von dem als *Antarktis* bezeichneten Kontinent bedeckt. Dieser trägt alleine bereits 90·% der aktuell vorhandenen Menge an Festlandeis. Da dieser Kontinent aktuell jedoch vollständig vereist ist, bewirken leichte Veränderungen der auf ihm abgelegten **Menge** an Eis keine Veränderung des Wertes $\langle \varepsilon_a \rangle$.

Die Konfiguration der Kontinente seit Beginn des Pleistozäns zeichnet sich auf folgende Weise aus:

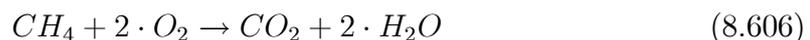
1. die Landmasse ist stark im Bereich der nördlichen Erd-Halbkugel konzentriert;
2. die Nordpol-Region ist frei von Festland; dagegen enthält der nachfolgende Bereich hoher nördlicher Breiten einen relativ großen Flächenanteil an Festland;
3. die Südpol-Region wird vollständig von dem antarktischen Kontinent bedeckt; dagegen enthält der nachfolgende Bereich hoher südlicher Breiten nahezu kein Festland;
4. der amerikanische Kontinent und ebenso der durch Europa und Afrika gebildete Kontinentalstreifen sind bevorzugt in Nord-Süd-Richtung orientiert; sie zerteilen dadurch das Weltmeer in mehrere Streifen und begünstigen hierdurch die Bildung von in Nord-Süd-Richtung (und entgegengesetzt) orientierten **vertikalen** Meeresströmungen. Für überwiegend horizontal orientierte Zirkularströmungen

ist zumindest der nördliche Teil des Atlantik nicht mehr breit genug, so dass für einen effektiven Wärmetransport bis in hohe geographische nördliche Breiten zwangsweise ein Mechanismus benötigt wird, der vertikale Meeresströmungen ermöglicht.

Ich werde nun versuchen, für jede der in dieser Einleitung aufgezählten klimatischen Phänomene eine konsistente Deutungs-Hypothese zu formulieren.

Die frühe Erwärmung der Erde im Archaikum (-)

Die bereits im späten Archaikum, etwa vor $2,8 \cdot 10^9 \cdot y$ aufgetretene Erwärmung der Erdoberfläche auf eine Temperatur, die um mindestens $30 \cdot K$ bis $50 \cdot K$ über der Temperatur lag, die man aus der Gl. 8.587 (also unter Vernachlässigung eines jeden Treibhauseffektes) abschätzt, lässt nach Meinung vieler Experten (und auch meiner Einschätzung nach) nur eine Deutung zu: Die Erdatmosphäre enthielt zu dieser Zeit Treibhausgase in einer Konzentration, die diesen Temperaturunterschied bewirkten. Wollte man hierfür das in der Atmosphäre enthaltene CO_2 verantwortlich machen, hätte es nach allgemein akzeptierten Abschätzungen einer Konzentration von mehreren % bedurft. Da jedoch die aus dieser Zeit stammenden Sedimentgesteine wohl Eisen(III)-Oxid (Fe_2O_3), aber nahezu kein Siderit ($FeCO_3$) enthalten, das sich oberhalb einer Konzentration von $3,2 \cdot \%$ an CO_2 aus Fe_2O_3 bildet, scheidet CO_2 als dominierendes Treibhausgas für diese Zeit aus. Es liegt also nahe anzunehmen, dass Methan (CH_4) zu dieser Zeit diese Funktion übernommen hat. Hierzu bedurfte es einer Konzentration von etwa $100 \cdot ppm$ ([36]). In der heutigen sauerstoff-reichen Atmosphäre ist Methan nur relativ kurzlebig, es zersetzt sich über diverse Zwischenreaktionen mit Hilfe von Radikalen (H^+ , HO^- , O_3) gemäß der Brutto-Reaktions-Gleichung



Die mittlere Lebensdauer von Methan in der heutigen Atmosphäre schätzt man auf

$$\tau_{CH_4, \text{Atm.}} \approx 12 \cdot y \quad (8.607)$$

In einer Atmosphäre ohne Sauerstoff hat Methan dagegen eine um mehrere Größenordnungen höhere Lebensdauer, so dass es einer wohl ständigen, aber nur moderat ergiebigen Methan-Quelle bedurfte, um diese Methan-Konzentration für eine längere Zeit aufrecht zu erhalten. Man geht heute davon aus, dass diese Quelle von Mikro-Organismen gebildet wurde, die ihren Energiebedarf über einen Prozess der Photosynthese deckten, der keinen Sauerstoff benötigt und als Verbrennungsprodukt Methan ausstößt. An dieser Stelle ist interessant anzumerken, dass in der weitgehend sauerstoff-freien Umgebung heißer Tiefseequellen heute noch derartige Mikro-Organismen existieren.

Die Eiszeiten der frühen Erde (-)

Als Erklärung für das Auftreten lang andauernder Eiszeiten mit nahezu vollständig vereister Erdoberfläche bietet sich folgendes Szenario an: Die Erdatmosphäre war weitgehend frei von Treibhausgasen. Allein dadurch bedingt lag die geographische Vereisungsgrenze bereits bei relativ niedrigen Breitengraden der Größenordnung 40° , s. Abschnitt 8.7.2. In diesem Bereich ist aber andererseits die Kreis-Verstärkung bzgl. der weiteren Vereisung (Gl. 8.600) bereits wieder $> 1, 0$. Der Zustand ist also instabil und die Vereisung der Erde setzt sich selbsttätig fort, bis praktisch die gesamte Erdoberfläche vereist ist. M.a.W. ohne jeden Treibhauseffekt ist der Zustand der sog. *Schneeball-Erde* ([25]) der stabile Zustand des globalen Klima-Systems. Aus diesem Zustand kann sich die Erde erst befreien, wenn (durch andere, bisher nicht in die Diskussion einbezogene Mechanismen) die Erdatmosphäre wieder einen signifikanten Anteil an Treibhausgasen enthält. Der wahrscheinlichste Mechanismus hierfür ist die Freisetzung von CO_2 durch den Vulkanismus der Erde.

Als Ursache für den nahezu vollständigen Ausfall des Treibhauseffektes zum Ende des Archaikums wird heute weitgehend folgendes Szenario angenommen: In geeigneten Nischen der Biosphäre hatten sich Sauerstoff produzierende Bakterien gebildet. Mit deren Vermehrung nahm der Gehalt an dem für die anaeroben Mikroben toxischen Sauerstoff in der Atmosphäre signifikant zu und vernichtete diese letztlich nahezu vollständig. Damit aber brach auch die Methan-Produktion in sich zusammen und der Methan-Gehalt der Atmosphäre nahm relativ schnell drastisch ab. Der zu dieser Zeit vorherrschende Gehalt an CO_2 in der Atmosphäre reichte aber nicht aus, um dieser Entwicklung bzgl. des Treibhauseffektes entgegen zu wirken. Als Folge dieses Vorgangs trieb die Erde in ihre erste Phase der globalen Vereisung.

Über die während des Proterozoikums und des frühen Phanozoikums vermutlich aufgetretenen Eiszeiten gibt es aktuell nur wenig verlässlich belegte Daten und Fakten. Es ist jeweils weder sicher, ob es sich um partielle oder um vollständige Vereisungen gehandelt hat, noch ist bekannt, ob sie jeweils aus einer Folge von Warm- und Kaltzeiten bestanden oder nicht. Lediglich bei der permo-karbonischen Vereisung ist man ziemlich sicher, dass diese sich aus einer Abfolge von mehreren Warm- und Kaltzeiten zusammensetzte. Vermutlich waren es verschiedene Arten von Ereignissen, die diese Eiszeiten ausgelöst haben. Zumindest zum Teil sind es vermutlich auch extraterrestische Ereignisse gewesen, insbesondere Einschläge großer Asteroide mit der Folge, dass die aktuelle Biosphäre nahezu vollständig zerstört wurde.

Das Eiszeitalter des Pleistozaen (-)

Das Pleistozaen umfasst erdgeschichtlich betrachtet eine relativ kurze Zeitspanne von noch nicht einmal $2 \cdot 10^6 \cdot y$. Während dieser Zeit hat sich die Konfiguration der Kontinente nur unwesentlich verändert. Wir können für die nun folgende Diskussion also durchgehend die aktuell gegebene Landmassenverteilung verwenden.

Wir betrachten nun eine Ausgangssituation, in der die Erdatmosphäre Treibhausgase in einem Umfang enthält, dass die Vereisungsgrenze bei sehr hohen Breitengraden liegt. Verschiebt sich nun diese Grenze z.B. durch eine von außen aufgeprägte Störung soweit zu niedrigeren Breitengraden, dass die Vereisungs-Kreisverstärkung den Grenzwert $V = 1,0$ überschreitet, so setzt sich dieser Prozess selbsttätig fort, bis die Vereisungsgrenze einen Breitengrad erreicht, bei dem die Kreisverstärkung wieder den Wert $1,0$ unterschreitet. In unserer im Absatz S. 1011 durchgeführten Näherungsrechnung ist dies der Wert $\varphi = 68^\circ$. Die Nordküste Islands z.B. liegt etwas südlich von diesem Breitengrad. Aus diesem Zustand kann sich das System nun wieder in die entgegen gesetzte Richtung bewegen, sobald es in einen Zustand leicht erniedrigter Temperatur gebracht worden ist, bei der die Verstärkung bereits wieder $> 1,0$ ist. Dann verschiebt sich die Vereisungsgrenze solange zu höheren Breitengraden, bis wieder $V < 1,0$ gilt.

Wir erwarten also, dass in dieser durch Landmassenverteilung und mittleren Treibhauseffekt gegebenen Konfiguration das Klima-System der Erde Kippschwingungen ausführt, bei denen es zwischen einem Zustand sehr geringer und einem mit deutlich stärkerer, aber weiterhin nur partieller Vereisung oszilliert. Genau dieses Verhalten ist heute für das Pleistozän durch Messdaten belegt, s. Abb. 28: Der Übergang von einer Warmzeit in eine Kaltzeit verläuft offensichtlich immer relativ langsam, die Temperatur sinkt während nahezu der gesamten Dauer der Kippschwingung von ca. $1 \cdot 10^5 \cdot y$ annähernd monoton und gleichmäßig. Danach schnellte sie innerhalb von ca. $1 \cdot 10^4 \cdot y$ wieder auf den Maximalwert. Für dieses Verhalten, das zu einem sägezahn-ähnlichen Verlauf der Kenngrößen Temperatur und Meeresspiegel führt, biete ich dem Leser folgende, aus meiner Sicht plausible Deutungshypothese an:

Der relevante Prozess ist eine monotone Zunahme bzw. Abnahme des Vereisungsgrades der Erdoberfläche. Dieser Vereisungsgrad nimmt zu, wenn die gemittelte Strahlungsbilanz der Erde einen *Mangel* an Energie ergibt, der dadurch kompensiert wird, dass eine entsprechende Menge an Wasser gefriert. Hierzu muss Niederschlag als Schnee auf Bereiche der Erdoberfläche fallen, für die aktuell ein lokales Klima vorherrscht, bei dem dieser Niederschlag während des Sommers nicht mehr vollständig wieder schmilzt. Wegen der vorherrschenden globalen Ausgleichsströme (s. Abschnitt 8.7.4) fallen diese Niederschläge jedoch vorwiegend auf die bereits ganzjährig vereisten Teile der Erdoberfläche und lassen dort die bereits vorhandenen Eisschichten an Stärke anwachsen. Der Vereisungsgrad nimmt daher nur moderat zu, nämlich durch eine langsame Wanderung der Vereisungsgrenze in Richtung niedrigerer Breitengrade. Daher sinkt auch der Meeresspiegel stetiger und evtl. schneller als die mittlere Temperatur der Erdoberfläche.

Befindet sich dagegen das Klimasystem der Erde im Prozess der abnehmenden Vereisung, so kann der nun jeweils verfügbare **Überschuss** an Energie unmittelbar (und unabhängig von der geographischen Verteilung der Niederschlagsmengen) zum Abschmelzen der Vereisungsschichten verwendet werden. Dies wird ganz überwiegend

dort stattfinden, wo sich am leichtesten eine Temperatur $T > 0^\circ\text{C}$ einstellen kann, also jeweils an der Vereisungsgrenze. Dieser Prozess wird daher i.a. deutlich schneller ablaufen als der umgekehrte Prozess der Vereisung.

Viele populär-wissenschaftliche Darstellungen dieser Problematik nennen als Auslöser der Eiszeitzyklen die unter dem Stichwort *Milankoviç-Zyklen* (Absatz S. 1009) zusammengefassten Störungen der Erdbahn bzw. ihrer Position relativ zur Sonne. Wir haben jedoch bereits nachweisen können, dass diese nur einen indirekten Einfluss auf diese Kippschwingung haben können: Sie verändern nämlich primär die Intensität der **jahreszeitlichen** Oszillationen der Sonneneinstrahlung insgesamt und insbesondere ihrer Verteilung über die Erdoberfläche, jedoch nicht die über das Jahr gemittelte Gesamt-Einstrahlung der Sonne auf die Erde. Dadurch beeinflussen sie lediglich die Intensität der jahreszeitlichen **Klima**-Oszillationen. Da jedoch die jahreszeitlichen Klima-Oszillationen einen unmittelbaren Einfluss auf die momentane Geschwindigkeit der klimatischen Veränderungen im Zuge einer langfristigen Klima-Kippschwingung haben (z.B. durch Veränderung der lokalen Niederschlagsmengen), ist es absolut naheliegend anzunehmen, dass diese Erdbahn-Störungen in der Lage sind, die ansonsten *quasi frei* ablaufenden Kippschwingungen zu *synchronisieren* (zu diesem Begriff s. z.B. Abschnitt 14.9.4), wenn nur eine ihrer Perioden genügend nahe an der Eigenfrequenz dieser Kippschwingung liegt. Genau dies scheint seit Beginn des Pleistozäns der Fall zu sein.

Die nahezu synchron mit diesen Klima-Oszillationen auftretenden Oszillationen des Treibhausgases CO_2 sehe ich primär als deren **Auswirkung** und weniger als deren **Auslöser** an. Allerdings sind sie, wie bereits erläutert (Absatz S. 1011), u.a. in der Lage, die Geschwindigkeiten dieser Veränderungen signifikant zu beeinflussen. Ich vermute, dass sie es sind, die in Zusammenwirken mit der aktuellen Landmassenverteilung dafür sorgen, dass die Eigenfrequenz dieser Kippschwingung nahe bei einer der Frequenzen der Milankoviç-Zyklen liegt.

Die Auswirkung der aktuellen Konfiguration der Kontinente sehe ich insbesondere in folgendem:

- Die Bedeckung der Südpol-Region durch den als Antarktis bezeichneten Kontinent entzieht durch seine vollständige Vereisung den Weltmeeren eine Menge an Wasser, die einer Absenkung des Meeresspiegels um $72 \cdot m$ entspricht. Hierdurch befinden sich ein Großteil der sog. *Festlandsöckel* (s. Absatz S. 10.2.9) auf einem Niveau nahe dem aktuellen Meeresspiegel. Diese Konfiguration entspricht einer weiteren positiven Rückkopplung im Vereisungs-Kreislauf: Mit jeder zusätzlichen Vereisung sinkt der Meeresspiegel und stellt nun weitere erhebliche Landflächen zur nachfolgenden Vereisung bereit.
- Die bevorzugte Nord-Süd-Orientierung der Kontinente bevorzugt die Ausbildung vertikaler Meeresströmungen und unterstützt so den vom Äquator zu den Polen gerichteten Wärmeausgleich. Dadurch entsteht aber auch eine Ab-

hängigkeit der meridialen Lage der Vereisungsgrenze von der Stärke dieser Meereströmungen.

- Die Aufkonzentrierung der Landmasse in hohen nördlichen Breiten unterstützt ebenfalls die Klima-Kippschwingungen.

Die aktuell gegebene Struktur und Form der Landmassenverteilung begünstigt also in mehrfacher Weise die Ausbildung von klimatischen Kippschwingungen.

Das Klima im Holozän (-)

In diesem Absatz geht es nun um die Frage, welcher neuartige Regelungs-Mechanismus die Ursache dafür ist, dass das Klima seit Beginn des Holozäns eine zu keiner Zeit davor gegebene Stabilität zeigt. Diese Stabilität zeigt sich primär in der mittleren Temperatur der Erdoberfläche, etwas weniger deutlich im Niveau des Meeresspiegels, und noch weniger deutlich in der CO_2 -Konzentration, s. Abb. 29. Ich sehe mich aktuell nicht in der Lage, für diesen Prozess eine plausibel begründbare Deutungshypothese anzubieten. Wahrscheinlich ist jedoch meiner Einschätzung nach, dass hierfür Veränderungen des Treibhauseffektes von untergeordneter Bedeutung sind. Das muss jedoch keinesfalls bedeuten, dass die Menschheit nicht in der Lage wäre, durch eine ausreichend starke Veränderung des Treibhauseffektes diesen Mechanismus zu verändern oder gar ganz außer Kraft zu setzen!

Da die kurzfristigen Veränderungen von mittlerer Bodentemperatur und Meeresspiegel im betrachteten Zeitraum offenbar sehr eng mit einander korreliert sind, liegt es nahe, als Ursache für den gesuchten Regelungsmechanismus ein Zusammenwirken von Vereisungsveränderung und Meereströmung zu vermuten etwa in folgendem Sinne: Mit einem weiteren Rückgang der Vereisung ist eine Veränderung der Meereströmungen verknüpft, die eine Abnahme des longitudinalen Wärmetransportes vom Äquator zu den Polen bewirkt. Hierdurch reduziert sich die Kreisverstärkung der Vereisung und die weitere Vereisung kommt zum Stillstand. Trifft diese Deutung zu, dann handelt es sich letztlich nicht um einen völlig neuartigen Rückkopplungsmechanismus, sondern um eine Regelung auf den Zustand, in dem die Vereisungsgrenze genau auf dem Breitengrad mit der Kreisverstärkung $V = 1,0$ liegt. Der Golfstrom und seine Empfindlichkeit gegenüber den Süßwassereinträgen subpolaren Ursprungs (St.-Lorenzstrom etc.) könnte zumindest z.T. diese Funktion wahrnehmen. Je nach dem Umfang dieser Einträge ändert sich nämlich das Aufteilungsverhältnis des Golfstroms in den sog. Grönlandzweig und in den Europazweig.

Der Unterschied zu den vorangegangenen Gegebenheiten am Ende einer Erwärmungsphase bestünde dann lediglich darin, dass damals dieser Mechanismus für ein sicheres Einrasten in diesen stabilen Zustand des globalen Klimas nicht ausreichte und die Erwärmung sich daher bis zu einer Situation mit vollständig oder zumindest weitgehend vollständig enteister Erdoberfläche fortsetzte.

Zusammenfassende Schlussfolgerungen (-)

Meiner Einschätzung nach ist es uns gelungen, durch die Verknüpfung

- der durch Messdaten belegten Deutung der erdgeschichtlichen Entwicklung des globalen Klimageschehens mit den jeweiligen geophysikalischen Gegebenheiten einerseits
- mit den Ergebnissen der sich ausschließlich auf die Bilanzierung der Energieströme stützenden Modellrechnungen andererseits

die zentralen Regeln herauszuarbeiten, denen das globale Klima gehorcht. Um diese in den bisherigen Abschnitten des Kapitels 8.7 bereits enthaltenen Ergebnisse klar herauszustellen, wiederhole ich sie an dieser Stelle in Form von einigen wenigen Sätzen:

1. Die zu einem bestimmten erdgeschichtlichen Zeitpunkt t vorliegende über einige Jahre und über die gesamte Erdoberfläche gemittelte Oberflächentemperatur $\langle T \rangle(t)$ der Erde ist primär und weitgehend festgelegt durch die **aktuellen** Werte des Vereisungsgrades $\gamma(t)$ der Erdoberfläche und durch den aktuellen Gehalt $n_{TG}(t)$ an Treibhausgasen in der Atmosphäre,

$$\langle T \rangle(t) = f(\gamma(t); n_{TG}(t)) \quad (8.608)$$

2. Das aktuelle Klima, ausgedrückt z.B. als die Abhängigkeit der an einem beliebig herausgegriffenen Breitengrad φ herrschenden über einige Jahre gemittelten Bodentemperatur $\langle T \rangle(\varphi)$ vom Breitengrad φ , ist im wesentlichen bestimmt durch den aktuellen Wert der gerade definierten Temperatur $\langle T \rangle(t)$, die aktuell vorliegende Festlandverteilung $\gamma(t)$ und durch den aktuellen Gehalt $n_{TG}(t)$ der Atmosphäre an Treibhausgasen.
3. Der aktuelle Gehalt an Treibhausgasen $n_{TG}(t)$ jedoch resultiert aus den **zeitlich kumulierten** Auswirkungen der hierfür relevanten geophysikalischen (Vulkanismus/Plattentektonik) und biologischen Prozesse (Stoffwechsel der Pflanzen- und Tierwelt in den Meeren und auf dem Festland). Zu diesen sog. *natürlichen* Prozessen gesellt sich (spätestens) seit Beginn der Industrialisierung der durch den Menschen betriebene Eintrag von CO_2 und anderen Treibhausgasen in die Atmosphäre.
4. Die gesamte Historie des Erdklimas belegt eindeutig die relativ zu den geophysikalischen Vorgängen zumindest gleichgewichtige Bedeutung der biologischen Prozesse für das Klima.

5. Etwa seit der Mitte des Pleistozäns, also seit $9 \cdot 10^5 \cdot y$ befindet sich das Klimasystem der Erde in einem Zustand quasi-stationärer Kippschwingungen. Deren wichtigste Daten sind:

Periode	$1,1 \cdot 10^5 \cdot y$
Amplitude der mittleren Temperatur	$10 \cdot K$
Amplitude des Meeresspiegels	$110 \cdot m$
Amplitude der CO_2 -Konzentration	$100 \cdot ppm$

(Unter der *Amplitude* verstehe ich an dieser Stelle den *Hub* der jeweiligen Kippschwingung, also den Unterschied zwischen dem höchsten und dem niedrigsten innerhalb einer Periode dieser Kippschwingung auftretenden Wert)

6. Relativ bald nach Beginn des Holozäns vor ca. $1,1 \cdot 10^4 \cdot y$ hat das Klimasystem diesen Zustand der Kippschwingung verlassen und ist in einen quasi-stabilen zeitlich konstanten Zustand eingertet. Die verbleibenden stochastischen Schwankungen bewegen sich im Bereich der Werte:

Schwankungen der mittleren Temperatur	$2 \cdot K$
Schwankungen des Meeresspiegels	$20 \cdot m$

7. Die aktuell vorliegende Konzentration des wichtigsten Treibhausgases CO_2 von $380 \cdot ppm$ liegt um den Faktor 1,9 über dem höchsten Wert, den die CO_2 -Konzentration während des gesamten bisherigen Pleistozäns jemals angenommen hat.
8. Ein Anstieg der Konzentration an Treibhausgasen in der Atmosphäre bewirkt primär einen Anstieg des Widerstandes der Atmosphäre gegenüber einem durch **Strahlungsprozesse** dominierten Wärmetransport. Daher steigt zwangsläufig der relative Anteil der **Konvektionsströme** an dem gesamten vertikalen Wärmetransport. Entsprechend steigt die Intensität der **vertikal** orientierten atmosphärischen Zirkularströme (s. Absatz S. 972). Bei diesen konvektiven Wärmeströmen ist der Transport von Wasserdampf besonders effektiv. M.a.W. die Intensität der gesamten Wettertätigkeit nimmt zu, insbesondere die integralen Niederschlagsmengen und die räumliche Ausdehnung der Luftströmungsstrukturen. Der Gradient der mittleren bodennahen Temperatur entlang der Längengrade nimmt dagegen ab.

Diese Fakten sprechen für sich und bedürfen eigentlich keiner weiteren Interpretation: Die von der antropogen erzeugten CO_2 -Erhöhung ausgehende Gefahr ist offensichtlich, wenn auch in ihrer Stärke und Veränderungs-Geschwindigkeit schwer abschätzbar.

Ich nehme mir die Freiheit und schließe diesen Abschnitt mit einer kurzen Darstellung meiner ganz persönlichen Sicht des gesellschaftlich-politischen Status-quo dieser sog. *Klima-Diskussion*:

Ein zunehmender Teil der Weltbevölkerung, zumindest der sog. öffentlichen Meinung teilt die Befürchtung, dass der Mensch durch sein Verhalten die klimatischen Bedingungen auf der Erde insgesamt stark verändert. Diese Veränderungen könnten die Lebensbedingungen zukünftiger Generationen ernsthaft beeinträchtigen, vielleicht sogar zumindest in Teilen der Erde unerträglich machen. Als wissenschaftliche Stütze dieser Befürchtungen dienen primär

1. Die meteorologischen Aufzeichnungen der letzten ca. 150 Jahre, insbesondere die der letzten 30 Jahre.
2. Die Simulationsrechnungen der Klimaforscher. Bei diesen Rechnungen wird ein Modell der Erdoberfläche (Topographie der Meere und der Kontinente) sowie der Atmosphäre in ihrer aktuellen Zusammensetzung erstellt. Sodann wird die orts- und zeitabhängige Sonneneinstrahlung bestimmt, und es werden auf Basis der strömungsmechanischen Gleichungen die Luft- und Meeresströmungen berechnet. Das sich dabei ergebende Klimageschehen wird sodann mit den aktuell geltenden, über einige Jahre gemittelten Werten verglichen. Ist die Übereinstimmung zufrieden stellend, sieht man das Modell als *richtig* an.

Das Ergebnis dieser beiden wissenschaftlichen Arbeitsrichtungen ist insbesondere in den IPCC-Berichten zusammengefasst. Ich habe keinerlei Grund, die Seriösität und Qualität dieser Arbeiten anzuzweifeln. Meiner Einschätzung nach hat diese Vorgehensweise jedoch ernsthafte gesellschafts-psychologische Schwächen. Denn sie liefert den sog. *Klima-Skeptikern*, also der Lobby, die die Gefahren des anthropogen bedingten Klimawandels leugnen oder zumindest in ihrer Relevanz herunter diskutieren will, und ihrer Gefolgschaft die jeweiligen Gegenargumente gleich mit:

- Eine Zeitspanne von 30 Jahren sei viel zu kurz für eine statistisch verlässliche Antwort auf die Frage nach der realen Existenz des Klimawandels. Als Schlussfolgerung der sog. Klima-Skeptiker kann man oft lesen oder hören: *Lasst uns besser noch 100 Jahre warten, bis wir über das weitere Vorgehen entscheiden.*
- Woher nehmen die Klimaforscher die Zuversicht, dass in den bisher entwickelten Modellen zur ab-initio-Simulation des globalen Klimas nicht eine wichtige Größe, ein fundamentaler Mechanismus vergessen wurde? Die dennoch gute Übereinstimmung zwischen den Ergebnissen der Modellrechnungen und der Realität wurde vielleicht nur durch entsprechende Anpassung der noch unsicheren Parameter innerhalb des Modells erreicht. Eine **verlässliche** Vorhersage, in welcher Weise sich das globale Klima verändert, wenn sich gewisse grundlegende Parameter des Systems verändern, z.B. die CO_2 -Konzentration in der Atmosphäre, sei daher über diese Modellrechnungen gar nicht möglich.

Deshalb sehe ich es gerade für die Diskussion innerhalb der nicht-naturwissenschaftlich vorgebildeten Gesellschaft für außerordentlich hilfreich an zu zeigen,

dass die Grundmechanismen des globalen Klima-Geschehens bereits aus einfach nachvollziehbaren, daher weniger strittigen Rechnungen auf Basis der Bilanzierungen der beteiligten Energieströme gefolgert werden können. Die in den IPCC-Berichten zusammengefassten Ergebnisse der aktuellen Klimaforschung dienen dann nur noch zur Präzisierung und besseren Quantifizierung der auch schon ohne sie unstrittigen Fakten und Trends.

Völlig unverständlich ist mir, dass die heute bekannten und durch Messdaten belegten Fakten über das Regelungsverhalten des globalen Klimas, insbesondere

- der relativ ruhige Klimaverlauf seit ca. 11000 · y und im Vergleich dazu
- die während des gesamten übrigen Pleistozäns dem generellen Verlauf des Wechsels von Kalt- und Warmzeiten überlagerten kurzzeitigen Klima-Kapriolen

von den Klimaforschern wohl auf ihren Konferenzen diskutiert werden, bisher aber von ihnen nicht in das Bewusstsein der Öffentlichkeit getragen wurden. Die grundsätzliche Gefahr, die durch die antropogenen Einflüsse auf das globale Klima heraufbeschworen werden, sind also nicht alleine eine Erhöhung der mittleren Jahrestemperatur der Erdoberfläche um einige °C und ein weiterer Anstieg des Meeresspiegels um einige Meter. Vielmehr besteht die reale Gefahr, dass das Regulationssystem des globalen Klimas wieder in den Zustand der kurzzeitigen quasi-chaotischen Klimasprünge zurückfällt.

Meiner Einschätzung nach ist es naheliegend, hieraus die nachfolgend skizzierten Hypothesen zu entwickeln:

1. Nach dem Ende der letzten Eiszeit gelang der Menschheit der kulturelle Sprung vom nomadisierenden Steinzeitmenschen, der sich primär durch die Jagd ernährte, zum sesshaften, Ackerbau und Viehzucht betreibenden Kulturmenschen. Dieser Kultursprung ereignete sich auf allen Kontinenten in etwa derselben Zeitspanne, obwohl die verschiedenen Völker keine Möglichkeit hatten, ihre jeweiligen Erfahrungen innerhalb dieser Zeitspanne über die Kontinente hinweg auszutauschen. Ursache für diese zeitgleiche Entwicklung ist das seit dieser Zeit relativ stabile Klima. Nur unter diesen Bedingungen war es möglich, Schritt für Schritt die hierfür erforderlichen Erfahrungen zu sammeln, die neuen Techniken zu entwickeln und die bereits erzielten Teilerfolge jeweils an die nachfolgenden Generationen weiter zu geben.
2. Bereits die auch in dieser Periode gelegentlich aufgetretenen **moderaten** Klimaveränderungen bewirkten jeweils weltweite tiefgreifende politische Bedrohungen und Veränderungen:
 - das sog. 8.2-Ereignis vor ca. 8.200 · y, eine relativ rasche weitere globale Erwärmung, die den Ackerbau im sog. fruchtbaren Halbmond nahe unmöglich machte;

- die mittelalterliche *kleine Warmzeit* etwa von 900 bis 1200 n.Chr., die zur Besiedelung Grönlands führte;
- die sog. *kleine Eiszeit* zum Ende des Mittelalters etwa vom 15. bis zum 19. Jahrh., die zu Hungersnöten in weiten Teilen Europas führte.

3. Sollte diese Periode des relativ ruhigen Klimaverlaufs durch den Menschen in der Tat beendet werden, ist es fraglich, ob die heutige, hochtechnisierte und auf Besitzstand und territoriale Ansprüche fixierte Menschheit in der Lage sein wird, sich auf die dann völlig veränderten Lebensbedingungen einzustellen.

D.h. nicht nur unser Lebensstandard, sondern das **Überleben** der Menschheit ist durch den Klimawandel in Frage gestellt.

Ich schließe diesen Abschnitt mit einem aktuellen (2012) Hinweis:

Neuesten Forschungsergebnissen zufolge ([56]) schmilzt das Eis der Halbinsel Grönland aktuell (2012) etwa um den Faktor 5 schneller ab als noch im Jahr 1990. Auch das Eis der Antarktis schmilzt wesentlich signifikanter und rascher, als es in den voran gegangenen Untersuchungen den Anschein hatte. Eine unmittelbare Folge wird sein, dass bereits bis zum Jahr 2100 der Meeresspiegel nicht um 18 ... 59 · cm ansteigen wird ([21]), sondern eher um 75 ... 190 · cm. Zur Erinnerung: Sofern das **gesamte** Festlandeis der Antarktis im Laufe der nachfolgenden Jahrhunderte abschmelzen sollte, würde dies zu einem Anstieg des Meeresspiegels um 56 · m führen. Das bedeutete **Land-unter** u.a. für:

- Dänemark / Schleswig-Holstein, einen Großteil von Niedersachsen / die baltischen Staaten und Großteile Polens;
- große Teile von Großbritannien, den Niederlanden und Belgien;
- einen breiter Streifen entlang der französischen Westküste;
- Florida, Texas und einen Großteil der Ostküstenstaaten der USA etwa bis zu den Apalachen;
- einen Großteil der Landbarriere zwischen Atlantik und Pazifik im Bereich des Staates Panama;
- einen Küstenstreifen Indiens und große Teile Pakistans;
- alle aktuell besiedelten Teile Japans;
- einen Streifen entlang der Südostküste Chinas.

Ich denke, diese Aufzählung bedarf keiner weiteren Kommentierung.

Als sehr eindrucksvolle Darstellung dieser alles andere als abwegigen Perspektive der weiteren klimatisch bedingten Entwicklung unserer Erde verweise ich auf eine

populärwissenschaftliche Darstellung in dem Magazin *National Geographic* vom Januar 2013 und die darin enthaltenen Graphiken der Struktur der Kontinente, die als Landmassen verbleiben, wenn der überwiegende Teil des antarktischen Festlandeises geschmolzen ist.

(XXX: Diese Abb.-en sind für dieses Lehrbuch noch nicht verfügbar, da ich die Reproduktionsgenehmigung des Verlags noch nicht erhalten habe)

Die in dem zitierten Artikel genannte Zeitperiode von ca. $5 \cdot 10^3 \cdot y$ für diesen Vorgang sehe ich als eher optimistisch lang geschätzt an. Denn zum Ende der vorletzten Eiszeit hat dieser Vorgang nur ca. $2 \cdot 10^3 \cdot y$ (s. wieder [35]) gedauert, obwohl während dieses Vorgangs die CO_2 -Konzentration der Erdatmosphäre nur von $200 \cdot ppm$ auf $280 \cdot ppm$ anstieg. Bei dem aktuell geltenden Wert von $380 \cdot ppm$ müssen wir wohl eher mit einer Zeitperiode von $1 \cdot 10^3 \cdot y$ für diesen Vorgang rechnen. Ein wichtiges, wenn nicht sogar essentielles Detail dieses Schmelzprozesses ist das Abschmelzen des Festlandeises der Antarktis. Über die Mechanismen, die hierbei dominieren werden, ist heute (2014) nur sehr wenig bekannt. In den diesbezüglichen wissenschaftlichen Publikationen mehren sich jedoch die Hinweise, das dieser Prozess oder zumindest eine Reihe von Prozessen, die diesen Vorgang einleiten, bereits in vollem Gang sind, s. z.B. [59].

Immerhin kann diese Hiobs-Botschaft als Argument dienen gegen die fatalistische Haltung des *Tanzens auf dem Vulkan*:

Man kann sowieso nichts mehr machen; also machen wir so weiter.

Wie weit auch immer der Klimawandel durch die Gesamtheit der antropogenen Beeinflussungen bereits fortgeschritten sein mag, zumindest die Zeitspanne bis zu dem Zeitpunkt, an dem diese Veränderungen komplett vollzogen sein werden, kann immer noch deutlich verlängert werden, indem man möglichst schnell und möglichst stark den aktuellen CO_2 -Gehalt der Atmosphäre wieder reduziert.

Meine persönlichen Überlegungen zu den Möglichkeiten, diese Reduzierung des CO_2 -Gehalt der Atmosphäre nicht nur technisch möglich zu machen, sondern sie auch politisch durchsetzen zu können, gehören sicher nicht in ein allgemeines Lehrbuch der Physik. Ich habe mir dennoch die Freiheit genommen, einige dieser Überlegungen im Rahmen des Kapitels Tipps, Tricks und Spezialitäten vorzutragen, s. Abschnitt 8.9.7.

8.8 Thermodynamik des täglichen Lebens (-)

Wie wir in den vorausgegangenen Kapiteln gelernt haben, bestimmt die Thermodynamik, in welcher gewichteten Mischung wir die verschiedenen von der Quantenmechanik als zulässig festgelegten Zustände der physikalischen Objekte in der makroskopischen Welt wiederfinden. Sie bestimmt maßgeblich die Ausgleichsprozesse, mit deren Hilfe die makroskopische Welt versucht, sich ihrem Gleichgewichtszustand zu nähern. Thermodynamische Grundkenntnisse sind daher äußerst hilfreich bei jedem