

Zusammenfassung der Vorlesung

Physikalische Klimatologie

Dr. Jochen Reuder
LMU München
WS 2003/2004

22. Juni 2005

von Christoph Moder
<http://www.skriptweb.de>

Hinweise (z.B. auf Fehler) bitte per eMail an uns: mail@skriptweb.de – Vielen Dank.

1 Statistische Beschreibung der Situation

- Die Jahresmitteltemperatur unterliegt starken Schwankungen, zumindest im 5-Jahres-Mittel ist jedoch ein Anstieg seit Anfang des 20. Jahrhunderts zu beobachten (um ca. 1 °C)
- Trend bei der Sommertemperatur weltweit (1948–1997): Die stärkste Zunahme ist in Nordamerika und Sibirien zu beobachten; im Südatlantik und Südpazifik gibt es jedoch auch Stellen, wo die Temperatur leicht sinkt.
- CO₂: Seit ungefähr 1800 ist eine Zunahme der Kohlendioxid-Konzentration zu beobachten (Messungen seit Mitte des 20. Jahrhunderts in verschiedenen Observatorien wie z.B. Mauna Loa; frühere Werte stammen aus Eisbohrkernen); dabei ist ein deutlicher Zusammenhang mit der Kohlendioxid-Emission aus fossilen Quellen zu beobachten.
- Messungen auf dem Hohenpeißenberg (seit 1781): Das Temperaturmittel im Sommer unterliegt starken Schwankungen (teilweise 5 °C innerhalb weniger Jahre), Rekordsommer hat es immer wieder gegeben, allerdings ist der Sommer 2003 mit Abstand der heißeste. Während die Jahre 1990–2002 tatsächlich im Bezug auf die Temperatur im oberen Mittelfeld waren, zeigten ihre Niederschlagsmengen keine Besonderheiten.
- Seit der letzten Eiszeit (Würm-Eiszeit) gab es immer wieder kleinere Kalt- und Warmzeiten; bis zum Optimum im Holozän (vor 7000 Jahren) erhöhte sich die Temperatur, während man für die Zeit danach einen langsamen Abwärtstrend feststellen kann (allerdings über starke Schwankungen gemittelt, z.B. das mittelalterliche Optimum oder die „kleine Eiszeit“).

2 Der Begriff „Klima“

- In erster Näherung hängt das Klima vor allem vom Einstrahlungswinkel der Sonne ab, d.h. von der Neigung der Erdoberfläche. Diese reine Nord-Süd-Klassifikation des Klimas stammt bereits aus der Antike, daher auch der Begriff „Klima“ von griech. „klino“ = „ich neige“.
Problematisch: Vor allem über Kontinenten gibt es starke Abweichungen zu diesem Nord-Süd-Schema.
- Spätere Definitionen beziehen sich v.a. über den „mittleren Zustand der Atmosphäre“ (d.h. beziehen im Vergleich zur Antike mehr Dinge als nur die Temperatur ein).
Problematisch: Wie definiert man ein mittleres Wetter? Außerdem führt die Mittelung der entsprechenden Größen zu einem Informationsverlust – interessant ist nicht nur die jeweilige *Menge*, sondern auch deren *zeitliche Verteilung*. So sind z.B. die Jahresmittel von Temperatur und Niederschlag in Bonn und La Paz fast gleich, jedoch hat die Temperatur in Bonn einen deutlichen Jahresgang im Gegensatz zu La Paz; mit dem Niederschlag ist es genau umgekehrt.
- Einbeziehung von Extremwerten und Variabilität neben den Durchschnittswerten: Damit ist das Wetter immer noch der einzig bestimmende Klimafaktor, was unzureichend ist.
- Das Klima ist ein komplexes System; man kann es aufteilen in das *Klimasystem* und den *Klimazustand*. Das Klimasystem umfasst die Atmosphäre, Hydrosphäre (Ozeane, Binnengewässer, Grundwasser), Kryosphäre (Gletscher, Meereis, Schnee, Permafrostboden) Lithosphäre (bis 100 km Tiefe; besonders wichtig: die Oberfläche) und Biosphäre; jeder dieser Bestandteile hat dabei seine eigenen Gesetzmäßigkeiten und wechselwirkt über viele verschiedene Prozesse mit den anderen Bestandteilen (z.B. Energietransfer durch Massenaustausch, Impulsaustausch, Strahlung).
Der Klimazustand ist eine rein statistische Beschreibung des Klimas, gebunden an einen bestimmten Zeitpunkt; dabei muss einerseits über einen ausreichend langen Zeitraum gemittelt werden, andererseits dürfen dadurch neue Trends nicht herausgemittelt werden. Dafür entscheidend ist, welchen räumlichen Bereich man betrachtet (lokal, regional, global), welchen Zeitraum (Jahre bis Jahrtausende) und welche Daten man dafür heranzieht (Beobachtungen, Messdaten, Klimamodelle, ...)
⇒ Die Zusammenhänge sind sehr komplex, darum muss man neben der statistischen Entwicklung auch die zugrunde liegenden Gesetzmäßigkeiten beachten, was die Klimatologie hochgradig interdisziplinär macht.

- Verwandte Begriffe:
 - Wetter: Der Zustand der Atmosphäre zu einem bestimmten Zeitpunkt an einem bestimmten Ort (Zeitskala: kürzer als 1 Tag).
 - Witterung: Der vorherrschende Charakter des Wetterablaufs, gemittelt über einige Tage bis zu einer Jahreszeit.
- Verschiedene Bedeutungen des Klimas:
 - Geologie: Verwitterung von Gesteinen
 - Biologie: Standortfaktor für Ökosysteme
 - Archäologie: Standortfaktor für Kulturen
 - Landwirtschaft: Hintergrundnorm für jahreszeitliche Schwankungen
 - ...
- Externe Variablen, die das Klima beeinflussen:
 - Strahlungsintensität der Sonne (je größer die Sonnenaktivität ist, desto größer ist sowohl die durchschnittliche Stärke der Strahlung selbst als auch ihrer Schwankungen (etwa $1 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$))
 - Entfernung von der Sonne, Bewegung der Erde auf ihrer Bahn
 - Dauer der Erdumdrehung (vergrößert sich wg. Gezeitenreibung)
 - Vulkanismus, geothermischer Wärmefluss
 - Plattentektonik: Position der Kontinente relativ zur Erdachse
 - Schwerefeld und Magnetfeld der Erde
- Interne Variablen:
 - Zustand der Biosphäre (Vegetation)
 - Masse, Zusammensetzung und Zirkulation bei Atmosphäre und Hydrosphäre
 - Masse und Ausdehnung der Kryosphäre (beeinflusst Albedo und Meeresspiegel)
 - Zustand der Erdoberfläche

3 Statistisches zum Aufbau der Erde

- Durchschnittliche Höhe des Festlands: 875m (höchster Punkt Mount Everest 8882m)
- Durchschnittliche Wassertiefe der Ozeane: 3790m (tiefster Punkt Marianengraben –10900m)
- Durchschnittliche Höhe der Erdkruste (Land und Ozean): 2430m unter dem Meeresspiegel
- Durchschnittliche Oberflächenhöhe (Land und Ozean): 250m
- Durchschnitts-Albedo (ohne Wolken): 13% (mit Wolken: etwa 30%)

$$\varrho = \int_{\lambda} \varrho(\lambda) \cdot I(\lambda) d\lambda$$

I : normierte Strahlungsflussdichte

Je stärker die Strahlung, desto größer ist der Einfluss der Albedo. Die Albedo verändert sich v.a. durch

das Vorhandensein von Schnee (wobei frischer Schnee eine noch einmal deutlich höhere Albedo (+50 %) als alter Schnee hat). Schnee spielt vor allem auf der Nordhalbkugel eine Rolle, weil die Antarktis sowieso mit Eis/Schnee bedeckt ist (d.h. keine jahreszeitlichen Änderungen) und auf nördlicheren Breiten der Südhalbkugel kein Land ist. Weitere Faktoren, die die Albedo bestimmen, ist Vegetation, Feuchtigkeit und Rauigkeit (z.B. gepflügter Boden) der Erdoberfläche (alle drei senken die Albedo) sowie durch Wellen auf dem Wasser (erhöhen die Albedo). Bei manchen Pflanzen ist die Albedo im Infrarotbereich deutlich höher als im sichtbaren Bereich.

- mittlerer Bedeckungsgrad mit Wolken: 54 %
- Anteil von Meer an der Gesamtfläche: 70,8 % (Nordhalbkugel: 60,6 %, Südhalbkugel 80,9 %)
- Verteilung Landoberfläche – Wasser: Auf der Nordhalbkugel ist der Land-Anteil deutlich größer; speziell bei 60° südlicher Breite ist überhaupt kein Land \Rightarrow keine Hindernisse für Windströmungen. Am Nordpol ist zwar überhaupt kein Festland und am Südpol beträgt der Land-Anteil 100 %, aber im Vergleich zur Gesamtfläche spielen diese Stellen eine geringe Rolle.
- Durchschnittliche Verdunstung: 1000l pro Quadratmeter und Jahr

4 Die Atmosphäre

- Reflexion solarer Strahlung (kurzwellig) durch Wolken, Aerosole und Luftmoleküle
- Absorption und Emission terrestrischer Strahlung (langwellig)
- Energietransport in vertikaler und horizontaler (d.h. vom Äquator zum Pol) Richtung
- Strahlungsgleichgewicht: Die Erde empfängt im solaren Bereich Strahlung von der Sonne, die Projektion der beschienenen Fläche (Halbkugel) ist ein Kreis der Fläche $r^2\pi$, die Albedo im solaren Bereich beträgt 0,3. Im terrestrischen Bereich strahlt die Erde Energie ab, und zwar isotrop in alle Richtungen (Fläche: $4r^2\pi$) wie ein Schwarzkörper. Nach dem Stefan-Boltzmann-Gesetz (Strahlungsfluss: σT^4) ergäbe sich eine Gleichgewichtstemperatur von -18 °C ; der Treibhauseffekt (d.h. die Abstrahlung im terrestrischen Wellenlängenbereich wird behindert) sorgt dafür, dass sie tatsächlich bei $+15\text{ °C}$ liegt.
- Treibhausgase (geordnet nach Gehalt in der Atmosphäre; dahinter der Beitrag zum Treibhauseffekt in Prozent): Wasserdampf (62 %), Kohlendioxid (CO_2 ; 22 %), Methan (CH_4 ; 2 %), Ozon (O_3 ; 7 %), Stickstoffoxid (N_2O ; 4 %), Fluor-Chlor-Kohlenwasserstoffe CFC-12 und -11 (CCl_2F_2 bzw. CCl_3F)
Molekulares *Treibhauspotenzial* (*greenhouse efficiency*): Treibhaus-Wirkung pro Molekül im Vergleich zu CO_2 (wird gleich 1 gesetzt), auf einen bestimmten Zeithorizont bezogen; z.B. Methan hat ein Treibhauspotenzial von 35 bezogen auf 20 Jahre, dieser Wert sinkt jedoch auf 11, wenn man die Wirkung auf 100 Jahre bezieht, weil die Verweildauer in der Atmosphäre relativ kurz ist. FCKW-12 dagegen hat eine Verweildauer von ca. 130 Jahren und damit in beiden Fällen das gleiche Treibhauspotenzial von ca. 7100. Wichtig ist also nicht nur die Konzentration, sondern auch das Treibhauspotenzial, der Wirkungsort (Troposphäre oder Stratosphäre), die Wirkungsweise (die meisten Treibhausgase sind gleichzeitig ozon-schädigend), die Abbaumethode (in der Troposphäre oft Reaktion mit OH \Rightarrow Hydroxid-Radikale reinigen die Atmosphäre durch Oxidation, in der Stratosphäre durch die Höhenstrahlung) und damit verbunden die Verweildauer in der Atmosphäre, sowie die Anstiegsrate.
- Die Atmosphäre kann vereinfacht durch das 3-Schichten-Modell beschrieben werden. Neben der Erdoberfläche nimmt man zwei weitere virtuelle Grenzschichten in der Atmosphäre an, die als ideale Schwarzkörper betrachtet werden, d.h. an ihnen wird Strahlung absorbiert und emittiert, woraus sich nach dem Stefan-Boltzmann-Gesetz die dazugehörigen Temperaturen berechnen lassen.
- Die Kohlendioxid-Konzentration steigt um etwa 1,6 bis 1,8ppmv pro Jahr. Auch die Methankonzentration steigt, im 20. Jahrhundert hat sie sich ungefähr verdoppelt.

- Hydrostatisches Gleichgewicht: Der Druckgradient in der Atmosphäre ist gleich der Erdbeschleunigung ($dp/dz = g$); zusammen mit dem Gesetz des idealen Gases $pv = RT$ erhält man die barometrische Höhenformel $p = p_0 e^{\frac{gz}{RT}}$, und mit dem ersten Hauptsatz der Thermodynamik $dU = c_p dT + v dp$ erhält man den trockenadiabatischen ($dU = 0$) Temperaturgradient $\frac{dT}{dz} = 0,98 \frac{\text{K}}{100\text{m}}$.
- Breitenabhängigkeit der Temperaturprofile: Bis zu einer Höhe von etwa 10km nimmt die Temperatur vom Äquator zu den Polen hin ab. Oberhalb dieser Höhe ist es umgekehrt, dort nimmt die Temperatur vom Äquator zu den Polen zu.
Die Höhe der Tropopause nimmt vom Äquator zum Pol hin ab, dadurch ist es möglich, dass die Luft vom Äquator Richtung Pol „bergab“ fällt.
- Globale Zirkulation: Am Äquator steigt die Luft auf (Ausdehnung der Luft führt zu einem Druckanstieg in der Höhe; am Boden fehlt Luft, es entsteht ein Tiefdruckgebiet), regnet ab (Niederschlag größer als Verdunstung), wandert zu den Subtropen (Druckausgleich in der Höhe), sinkt ab (Hochdruckgebiet, trockene Luft, Verdunstung größer als Niederschlag), und in Form der Passatwinde wieder zurück in die Tropen (Zirkulation in Hadley-Zellen). Von den Polen her kommt Kaltluft, die nach Süden strömt; tropische Warmluft gleitet auf die Kaltluft auf, kühlt an den Polen ab und sinkt nach unten. In den mittleren Breiten bilden sich also Tiefdruckgebiete, der Niederschlag ist größer als die Verdunstung. Die Fronten dieser Tiefs sorgen für eine Durchmischung der Atmosphäre.
- Am Land ist die Verdunstung am Äquator am höchsten; am Meer ist das Maximum in den Subtropen, weil dort der Himmel meist wolkenlos ist und somit mehr Strahlung auf das Wasser trifft. (An Land gibt es dort kaum Wasser, das verdunsten könnte.)
- Durch ihre geringe Wärmekapazität hat die Atmosphäre die größte Variabilität aller Klimakomponenten. Ein Gleichgewichtszustand hat sich etwa nach einem Monat eingestellt, atmosphärische Prozesse bewegen sich im Zeitrahmen von Stunden bis Jahren.

5 Die Hydrosphäre

- Bedeutung der Ozeane:
 - Absorption solarer Strahlung: Wasser hat eine geringe Albedo (deutlich geringer als Landoberfläche). Die Albedo nimmt dabei mit dem Zenitwinkel der Sonne zu, dieser Effekt wird durch Bewölkung abgeschwächt (bei einem Winkel von ca. 55° ist die Albedo nahezu unabhängig von der Bewölkung).
 - Quelle für atmosphärischen Wasserdampf: Auf dem Land ist generell der Niederschlag höher als die Verdunstung; das dazu nötige Wasser stammt aus den Ozeanen.
 - Speicherung von CO_2 im Tiefenwasser
 - wichtiger Energiespeicher: 3,5m tiefes Ozeanwasser hat die gleiche Wärmekapazität wie die Atmosphäre; deren Wassergehalt beträgt auskondensiert nur einige Zentimeter, d.h. bestimmend ist die Wärmekapazität der Luft, weniger das in ihr enthaltene Wasser. Zwischen Atmosphäre, Ozean und Land ist das Massenverhältnis (Land: 10m Deckschicht, Ozean 200m Deckschicht) $1 : 14 : 0,6$, das Verhältnis der Wärmekapazitäten dagegen $1 : 57 : 0,45$. Vergleich: in 80cm Bodentiefe ist der Temperaturverlauf gegenüber der Oberfläche um 6 Monate phasenverschoben.
 - Strömungen sind ein wichtiger Energietransport (vgl. Land oder Eis: dort ist das überhaupt nicht möglich)
- Kaltes Ozeanwasser hat eine höhere Dichte als warmes. Die größte Dichte von Meerwasser ist bei Island zu finden, weil in Nordamerika und Sibirien das Salzwasser durch das Süßwasser der Flüsse verdünnt wird. Wenn z.B. durch eine plötzliche Erwärmung die Gletscher schmelzen würden und damit das Meerwasser stark verdünnt würde, bräche der Golfstrom zusammen.

- Sowohl die Temperatur des Dichtemaximums als auch der Gefrierpunkt nimmt mit zunehmendem Salzgehalt (*Salinität*) ab; letzterer sinkt aber langsamer, so dass sich beide Kurven bei einem Salzgehalt von 2,47% schneiden. Meerwasser ist i.A. salziger, was das Zufrieren zusätzlich behindert. Süßwasser hat nicht nur einen höheren Gefrierpunkt, sondern das an der Oberfläche abgekühlte Wasser sinkt nur bis zu einer Temperatur von 4 °C (Dichtemaximum) ab – sobald der gesamte See also eine Temperatur von 4 °C erreicht hat, ist das kältere Wasser leichter, bleibt an der Oberfläche und kann gefrieren. Bei Salzwasser dagegen sinkt das Wasser bis zum Erreichen des Gefrierpunkts ab, diese Austauschvorgänge transportieren das kalte Wasser andauernd wieder ab, wodurch das Gefrieren verzögert wird. Zudem ist der Gefrierpunkt niedriger; Salzwasser muss also komplett auf unter 0 °C abgekühlt werden, um gefrieren zu können.
- Die Wassertemperatur nimmt allgemein mit der Breite ab, unabhängig von der Tiefe. Lediglich bei den Tropen gibt es eine Ausnahme; dort ist das Wasser ab etwa 100m Tiefe kälter als in den Subtropen.
- Meeresströmungen: Antrieb durch Wind und durch Dichteunterschiede; es gibt eine weltweite Zirkulation (als Oberflächenströmung vom Pazifik über Südostasien und den Indischen Ozean um Afrika herum bis in die Karibik und von dort als Golfstrom bis in die Arktis, dort sinkt das Wasser ab und fließt als Tiefenströmung zum Südpolarmeer und von dort teils um die Antarktis, teils in den Indischen Ozean bzw. Pazifik), deren Umlaufzeit etwa 1000 Jahre beträgt.
Beispieldaten Golfstrom: 60km breit, 500m dick, Geschwindigkeit 1m/s
- Ereignisse, die die Meeresströmungen beeinflusst haben:
 - Loslösung von Südamerika von der Antarktis, dadurch wurde die zirkumpolare Strömung möglich
 - Schließung des Isthmus von Panamá (d.h. Südamerika stößt an Nordamerika an), ab dann war dem Wasser aus der Karibik der Weg nach Westen versperrt, es musste komplett Richtung Norden strömen, wodurch der Golfstrom in seiner heutigen Form entstand.
- Ekman-Transport: Wenn ein beständiger Wind über den Ozean weht, wird das Wasser in diese Richtung getrieben, und unterliegt der Corioliskraft. Auf der Nordhalbkugel wird das Wasser dadurch nach rechts abgetrieben (in Windrichtung gesehen). Weil der Wind nur an der Oberfläche angreift, das Wasser aber durch Reibung bis in einiger Tiefe mitströmt, ändert sich die Strömungsrichtung mit der Tiefe (weg vom Wind, Richtung Corioliskraft) und auch die Geschwindigkeit (wird geringer). Ein Hochdruckwirbel (Antizyklone) auf der Nordhalbkugel bewirkt, dass das Wasser nach innen strömt, was dort den Wasserstand steigen und das Wasser nach unten absinken lässt. Die Thermokline wird dadurch nach unten „verbogen“. An Küsten sorgen derartige Ekman-Transportvorgänge dafür, dass Wasser am Festlandsschelf abtaucht oder auftaucht.
- Das Verhältnis von Meereis zwischen Sommer und Winter beträgt in der Arktis etwa 1 : 2, in der Antarktis 1 : 3. Bei der Arktis geschieht das Zufrieren plötzlicher, da es dort mehr „kleine“ Buchten und Meerengen gibt, die auf einen Schlag zufrieren.
- Wasserhaushaltsgleichung: $P + E + R + S = 0$
Gesamtbilanz aus Niederschlag (precipitation), Verdunstung (evaporation), Abfluss (runoff) und Speicherung (storage) ist Null.
- Einstellzeiten: in der Deckschicht Monate bis Jahre, im Tiefenwasser Jahrzehnte bis Jahrtausend

6 Die Landoberfläche, Kryosphäre und Biosphäre

- effizienter Energieumsatz von Strahlung zu Wärmeenergie; starker Einfluss auf die Bodenluft; Energietransport im Boden durch Wärmeleitung
- Gebirgszüge sind Barrieren für die atmosphärische Zirkulation
- Zeitskala der Lithosphären-Vorgänge: Jahrtausend bis Jahrmillionen

- Das Klima wird von der Höhe über dem Meeresspiegel entscheidend beeinflusst.
- Gletscher haben nur einen lokalen Effekt auf das Klima, sind aber hervorragende Indikatoren für Klimaänderungen.
- Schnee sorgt für die größten Änderungen in der Kryosphäre.
- Permafrostboden macht etwa 20 % der Landoberfläche aus und beeinflusst dort die Vegetation.
- Auch wenn bei Eis und Schnee die Albedo (d.h. bei solarer Strahlung) sehr hoch ist, verhalten sie sich im terrestrischen Wellenlängenbereich wie Schwarzkörper.
- Neben der Auswirkung auf die Albedo ist Eis/Schnee auch ein sehr guter Isolator (zwischen Atmosphäre und Land bzw. Ozean) bzw. hat eine ausgleichende Wirkung durch Schmelz-/Verdampfungsenergie, außerdem sind Meeresspiegel und Salzgehalt eng an das Eisvolumen gekoppelt.
- Das Inlandeis befindet sich praktisch komplett in Antarktis und Grönland. Die Gebirgsgletscher sind mengenmäßig vernachlässigbar.
- Bei einer Klima-Erwärmung trägt das Abschmelzen des Grönland-Eises praktisch nicht zum Anstieg des Meeresspiegels bei; das Abschmelzen von Eis der Gebirgsgletscher und des arktischen Eises erhöht den Meeresspiegel, während das Abschmelzen der Antarktis ihn (momentan) eher zu senken scheint (weil durch die Erwärmung mehr Wasserdampf in der Luft ist). Der größte Beitrag zum Meeresspiegel-Anstieg kommt jedoch von der thermalen Ausdehnung des Wassers.
- In den letzten 100 Jahren hat sich der Meeresspiegel um ca. 15cm erhöht; während der Eiszeiten war er bis zu 120m tiefer als heute.
- Pflanzen wirken sich v.a. auf den Kohlendioxidkreislauf, den Wasserkreislauf und die Albedo aus
- Die Amplitude der Schwankung des Kohlendioxid-Gehalts nimmt mit zunehmender Breite zu, weil die Jahreszeiten stärker ausgeprägt sind. Weil in den relevanten Breiten auf der Südhalbkugel kaum Land ist (weiter nördlich ist die Schwankungsamplitude gering, weiter südlich das ewige Eis), sind die Schwankungen auf der Nordhalbkugel um ein Vielfaches höher, so dass die Gesamtbilanz ebenfalls eine deutliche Schwankung aufweist.
- Im Ozean ist die Produktion von Biomasse etwa 10 % der Produktion an Land.
- Das Verhältnis von in der Biosphäre vorhandenem und jährlich neu produziertem Kohlenstoff beträgt 10 : 1, d.h. der Kohlenstoffkreislauf hat eine Umlaufzeit von ca. 10 Jahren.
- Die Lithosphäre ist das größte CO₂-Reservoir (Speicherung in Form von Karbonaten; ca. 20 Mrd. Gigatonnen Kohlenstoff sind gespeichert, im Vergleich zu 600 Gt in der Atmosphäre). Weitere Auswirkungen: Kontinente als Hindernisse für Meeresströmungen, Berge als Hindernisse für Luftströmungen, die Höhenlage beeinflusst das Klima ebenfalls.

7 Energie

- Hauptenergiequelle für das Klima ist die Sonne mit 99,97 %, d.h. im globalen Mittel am Oberrand der Atmosphäre 239W/m².
- Weitere Energiequellen: radioaktiver Zerfall (ca. 80 %), Kristallisation (12 %), Gravitation
- Solarkonstante S_0 (englisch: TSI, total solar irradiance): Strahlungsflussdichte am Oberrand der Atmosphäre (TOA) bei senkrechtem Einfall in der durchschnittlichen Sonnenentfernung 1AE; diese Strahlungsflussdichte variiert, es ist also keine echte Konstante, Mittelwert 1366,5W/m². Langfristig (d.h. über Jahrtausende) steigt die Sonnenstrahlung an, da sich die Sonne zum roten Riesen entwickelt.

- Die Sonne kann als punktförmige Strahlungsquelle betrachtet werden; weil die Fläche mit dem Quadrat der Entfernung zunimmt (bestrahlt wird eine kugelförmige Fläche rund um die Strahlungsquelle), nimmt entsprechend die Strahlungsflussdichte mit dem Quadrat der Entfernung ab. Dadurch schwankt die Strahlungsflussdichte stärker, als es die Entfernung zur Sonne tut.
- Die Erde ist etwa am 3. Januar im Perihel (d.h. am nächsten an der Sonne (0,983 AE), größte Bahngeschwindigkeit), das Aphel wird am 4. Juli erreicht (größte Entfernung: 1,017 AE); genau eine astronomische Einheit beträgt der Abstand am 4. April und 5. Oktober. Das bedeutet, dass die Auswirkungen der Veränderung des Abstands Erde-Sonne ziemlich genau entgegengesetzt zu den Jahreszeiten auf der Nordhalbkugel sind (Unterschied: $\pm 3,5\% \hat{=} \pm 48 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$), und dass auf der Nordhalbkugel der Winter kürzer als der Sommer ist.
- Strahlungsenergie (TOA) abhängig von Zeitpunkt und Zenitwinkel Z :

$$S = S_0 \cdot \frac{r_0^2}{r(t)^2} \cdot \cos Z$$

- Zenitwinkel Z :

$$\cos Z = \sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) \cos(h)$$

mit:

φ : geographische Breite (Winkel zwischen Äquator und Breitenkreis)

δ : Deklination (Winkel zwischen Sonne und Äquatorebene, schwankt zwischen $\pm 23,4438^\circ$)

h : Stundenwinkel (Winkel zwischen Südmeridian und Sonnenmeridian, z.B. 90° um 18:00 Ortszeit)

Herleitung: Kugeldreieck zwischen Nordpol, Standort und Zenitort der Sonne; in einem Kugeldreieck gilt der Seitenkosinussatz $\cos(c) = \cos(a) \cdot \cos(b) + \sin(a) \cdot \sin(b) \cdot \cos(\gamma)$, wobei die Winkel a, b, c am Erdmittelpunkt zwischen den jeweiligen Seiten gemessen werden (a und b zwischen Nordpol und Standort bzw. Nordpol und Zenitort, c zwischen Stand- und Zenitort), und γ der Winkel zwischen den Dreiecksseiten am Nordpol ist. c ist der gesuchte Zenitwinkel, γ die Längendifferenz zwischen Stand- und Zenitort (also der Stundenwinkel), und a und b kann man als 90° minus der jeweiligen geographischen Breite ausdrücken, wodurch sich Sinus und Cosinus vertauschen.

- Stundenwinkel h , abhängig von der Uhrzeit $t_h : t_m : t_s$:

$$h = 15^\circ \cdot \frac{(t_h - 12) \cdot 3600 + t_m \cdot 60 + t_s}{86400}$$

Als Uhrzeit muss die wahre Ortszeit eingesetzt werden; diese berechnet sich aus der mittleren Ortszeit (d.h. Zonenzeit ± 4 Minuten pro Längengrad), die Zeitdifferenz zu ihr ist:

$$\Delta t = -0,123570 \cdot \sin(\alpha) + 0,004289 \cdot \cos(\alpha) - 0,153809 \cdot \sin(2\alpha) - 0,060783 \cdot \cos(2\alpha)$$

- Deklination δ , abhängig vom Tag d im Jahr:

$$\begin{aligned} \delta = & \arcsin [\sin(23,4438^\circ) \cdot \sin(279,9348^\circ + \alpha \\ & + 1,914827^\circ \cdot \sin(\alpha) - 0,07925^\circ \cdot \cos(\alpha) \\ & + 0,019938^\circ \cdot \sin(2\alpha) - 0,001620^\circ \cdot \cos(2\alpha)] \end{aligned}$$

mit $\alpha = (d - 1)/365 \cdot 360^\circ$

Vereinfachte Berechnung:

$$\delta = 23,4438^\circ \cdot \sin\left(\frac{d + 284}{365} \cdot 360^\circ\right)$$

- Energiebilanz einer Oberfläche: $G = R_s + LE + SH + F$ mit:
 G : Bodenwärmestrom (Energie in den Boden hinein oder hinaus; im Jahresmittel 0)
 R_s : Strahlungsbilanz der Oberfläche
 LE : Energietransport durch latente Wärme (latent heat)
 SH : Energietransport durch fühlbare Wärme (sensible heat)
 F : horizontaler Energietransport unter der Oberfläche

- Die Sonnenstrahlung führt in einem Bereich von $\pm 40^\circ$ rund um den Äquator zu einem Energieüberschuss (weil einfallende Strahlung v.a. auf die äquatorialen Gebiete trifft, aber in alle Richtungen gleichmäßig abgestrahlt wird); von dort wird Energie durch Atmosphäre/Wasser in Richtung polare Regionen abtransportiert.
- Energieinhalt der Atmosphäre: insgesamt ca. 2571 MW/m^2 , aufgeteilt in
 - fühlbare Wärme (70 %) – steckt in der Wärmekapazität der Gase, bezogen auf 0K
 - potenzielle Energie (27 %)
 - latente Wärme (2,7 %) – wird durch Kondensation bzw. Kristallisation
 - kinetische Energie (0,05 %) – Windenergie

Vergleich: Ein Kernkraftwerk bräuchte ca. 7 Millionen Jahre, um die Energie zu erzeugen, die in der Atmosphäre steckt.

- Energiegehalt der Ozeane: insgesamt ca. $4,58 \cdot 10^6 \text{ MW/m}^2$, davon ist der weitaus größte Teil fühlbare Wärme, und lediglich die potenzielle Energie spielt mit 1,3 % eine nennenswerte Rolle.
- Ozeane transportieren die Wärme vom Äquator in Richtung der Pole. Dabei transportiert der Atlantik Wärme v.a. nordwärts (auch auf der Südhalbkugel), und der indische Ozean v.a. südwärts (auch auf der Nordhalbkugel), so dass die Gesamtbilanz der über den Äquator transportierten Wärme 0 ist.
- Einfluss von Wolken: Vergleich der Messungen aus der „clear sky climatology“ (Satelliten messen die Strahlung im wolkenfreien Zustand, d.h. wenn die Strahlungstemperatur hoch und die Albedo niedrig ist) und dem Mittelwert am entsprechenden Ort. Der Einfluss der Wolken auf die Energiebilanz am Oberrand der Atmosphäre heißt „cloud forcing“.
- Wolken verringern die Einstrahlung im sichtbaren Bereich (d.h. kühlen ab) und erhöhen die Abschirmung im terrestrischen Bereich (d.h. erwärmen). Je größer die Albedo der Wolke, desto stärker die Abschattung im sichtbaren Bereich; je wärmer (d.h. tiefer) die Wolkenoberfläche ist, desto mehr Wärme strahlt sie im terrestrischen Bereich ab \Rightarrow dichte, tiefe Wolken wirken kühlend, dünne hohe Wolken (Cirrus) wirken wärmend. Die Erwärmung im langwelligen Bereich tritt vor allem in äquatorialen bis mittleren Breiten auf (und hat dort die stärksten Schwankungen), während die Abkühlung im kurzwelligen Bereich v.a. in hohen Breiten und über Ozeanen auftritt (und dort ihre stärksten Schwankungen hat). Etwas abweichend ist die Situation in der Antarktis: Weil die Wolken generell eine geringere Albedo als die Eis-Oberfläche haben, wirken sie immer erwärmend.
- Die Abstrahlung nimmt im Allgemeinen mit der Breite ab. Aber auch am Äquator ist ein lokales Minimum, weil die dortige Bewölkung (hohe Wolken, kalte Obergrenze) weniger abstrahlt als der heiße Boden in den Subtropen.
- Gesamteffekt der Wolken: ca. 20 W/m^2 Abkühlung (zum Vergleich: menschlicher Treibhauseffekt liegt im Bereich von $2\text{-}3 \text{ W/m}^2$). Ohne natürlichen Treibhauseffekt läge die Temperatur auf der Erde um ca. 30K niedriger.

8 Rückkopplungsmechanismen

Positive Rückkopplung: selbstverstärkender Vorgang, destabilisiert das System

Negative Rückkopplung: selbstabschwächender Vorgang, stabilisiert das System

Beispiele für Rückkopplung im Klima:

- Wasserdampf als Treibhausgas: höhere Temperatur bewirkt höhere Verdunstung, positive Rückkopplung

- Eis-Albedo: hohe Albedo von Eis bewirkt Verringerung der absorbierten Strahlung, dadurch sinkt die Temperatur weiter, Eis kann sich weiter ausbreiten – allerdings sinkt auch die Verdunstung und damit der Niederschlag, d.h. positive Rückkopplung mit Dämpfung
- Wolken: höhere Temperatur sorgt für mehr Wasserdampf in der Atmosphäre; sowohl positive als auch negative Rückkopplung, weil Wolken sowohl erwärmen als auch abkühlen können
- CO₂-Kreislauf: Erstens führt ein erhöhter CO₂-Gehalt in der Atmosphäre zu Erwärmung, wodurch sich weniger Kohlendioxid im Wasser löst und dadurch der Gehalt in der Atmosphäre weiter steigt. Zweitens führt eine Erwärmung auch zu einer Stabilisierung der ozeanischen Deckschicht, wodurch weniger Kohlendioxid ins Tiefenwasser gelangen kann, d.h. mehrfach positive Rückkopplung.

9 Klimavariabilität

Man unterscheidet externe Ursachen wie Vulkanausbrüche oder Veränderung der Sonnenaktivität, und interne Ursachen wie ENSO, NAO oder QBO, die durch Rückkopplungsprozesse verursacht werden. Dabei zeigen Prozesse mit Atmosphäre-Ozean-Wechselwirkung einen ausgeprägten Jahresgang wegen der Variation der Sonnenstrahlung, während andere Prozesse eine geringere Schwankungsamplitude und eine längere Periodendauer besitzen.

Beispiele für Klimaschwankungen:

- Wechsel von Warm- und Kaltzeiten durch Veränderung der Erdbahn (Dauer: über 100000 Jahre)
- lokale Temperaturwechsel durch plötzliche Änderungen in der ozeanischen Zirkulation (Dauer: Jahrzehnte)
- Solaraktivität des Gleissberg-Zyklus, Variabilität der ozeanischen Zirkulation (Dauer: Jahrzehnte bis Jahrhunderte)
- Temperaturschwankungen durch Veränderung der Sonnenaktivität im Schwalbe-Zyklus (Dauer: 11 Jahre)
- kurzfristige Temperaturerhöhungen durch El-Niño-Ereignisse, kurzfristige Temperaturerniedrigungen durch La-Niña-Ereignisse oder Vulkanausbrüche (Dauer: wenige Jahre)

9.1 ENSO (El Niño Southern Oscillation)

- besteht aus einer ozeanischen Komponente (El Niño) und einer atmosphärischen Komponente (Southern Oscillation)
- El Niño: Der kalte Humboldtstrom entlang der Küste von Peru und Ecuador (kommt von der Antarktis, fließt nach Norden, und wird am Äquator durch den Passat nach Westen gelenkt) wird durch eine warme Meeresströmung ersetzt. Vor allem der äquatoriale Ostpazifik wird an der Meeresoberfläche erwärmt. Dieses Phänomen tritt unregelmäßig, alle 3 bis 7 Jahre, auf; das Maximum ist stets rund um die Weihnachtszeit (daher der Name: „Christkind“). Dauer: 12–15 Monate.
- Walker-Zirkulation: Die Vertikalbewegung der Luft ist an die Wassertemperatur an der Oberfläche (SST, sea surface temperature) gekoppelt – wo es warm ist, steigt Luft auf, und wo es kalt ist, sinkt sie ab. Das ergibt ein Aufsteigen über Indien, Indonesien, Ostafrika, Amazonas, und ein Absinken über dem West-Indik, Westafrika, und v.a. über dem äquatorialen Ostpazifik.
- Man hat also eine parallele Bewegung der Luftmassen, die bei Südamerika absinken, über das Meer nach Westen wandern und bei Indonesien wieder aufsteigen, und dem Humboldt-Strom, der in die gleiche Richtung fließt. Das ergibt an der australischen Küste einen 50 cm höheren Meeresspiegel als in Südamerika.

- El-Niño-Bedingungen: Die Walker-Zirkulation ist umgekehrt, die Luft steigt über dem Ostpazifik auf und sinkt über Australien ab. Über dem Pazifik herrscht ein Westwind statt Ostwind. Der Wasserstand im Westpazifik sinkt um 20 cm, im Osten steigt er um 15 cm, und die Thermokline (d.h. Linie gleicher Wassertemperatur, fällt von Südamerika Richtung Australien) steigt am australischen Ende um 20 m. Folge: Trockenheit in Australien/Südostasien, Niederschläge in den Anden, verringerter Austausch zwischen kaltem und warmem Wasser \Rightarrow Fische wandern ab.
- La-Niña-Bedingungen: Wie bei Normalbedingungen, aber mit größerer Intensität. Der Wasserstand steigt in Australien um 10 cm und fällt in Südamerika um 5 cm, und die Thermokline ist stärker geneigt (Niveau gleicher Temperatur sinkt/steigt in Australien/Südamerika um jeweils 20 m).
- Kennzeichen: SOI (Southern Oscillation Index) = Luftdruckdifferenz zwischen der Osterinsel und Darwin (Australien); ist diese Differenz niedrig, bedeutet das eine schwache Walker-Zirkulation und damit ENSO-Bedingungen. Tatsächlich zeigen SOI und die Temperaturanomalie in Südamerika eine starke Korrelation. Der Korrelationsindex wird maximal bei einer Verschiebung um 4,5 Monate, d.h. zuerst ändert sich das Windfeld (SOI) und dann erst die Temperatur (SST).
- Wechselwirkung zwischen ostwärts laufenden Kelvin-Wellen und westwärts laufenden Rossby-Wellen im Ozean
- Auswirkungen auch auf die Malaria-Infektionsraten in Südamerika: Bei El-Niño-Bedingungen regnet es dort mehr, es gibt mehr Pfützen, und damit bessere Brutbedingungen für Mücken.

9.2 NAO (North Atlantic Oscillation)

- starke negative Korrelation zwischen Azorenhoch (rotiert im Uhrzeigersinn) und Islandtief (rotiert im Gegenuhrzeigersinn)
- positive NAO-Phase: Azorenhoch und Islandtief stärker ausgeprägt, dadurch stärkerer Westwind dazwischen, dadurch können atlantische Tiefdruckgebiete weiter nach Osten vorstoßen, kontinentale Kaltluft wird weiter nach Osten abgedrängt \Rightarrow warme feuchte Winter in Europa, intensivere Tiefdruckgebiete mit höheren Windgeschwindigkeiten auf nach Norden verschobenen Zugbahnen, mehr Polarluft in Nordkanada/Grönland, milde feuchte Winter an der Ostküste der USA.
- negative NAO-Phase: schwacher Westwind, Zugbahnen der atlantischen Tiefdruckgebiete sind nach Süden verschoben, feuchte Winter im Mittelmeerraum, Kaltlufteinbrüche in Mitteleuropa und an der Ostküste der USA möglich, milde Winter in Grönland (Westwind bläst die Luft nicht weit nach Europa).
- starke positive Korrelation zwischen NAO-Index und Temperatur in Nordeuropa und an der Ostküste der USA; negative Korrelation in Nordafrika und Nordkanada.

9.3 QBO (Quasi-Biennial Oscillation)

- Wechsel von Westwind- und Ostwindregime in der äquatornahen Stratosphäre (maximale Windgeschwindigkeit in 24 km Höhe)
- Periodendauer im Mittel 26 Monate
- Westwindphasen meist etwas länger, Ostwindphasen dafür intensiver
- Hurricanes sind in der Westwindphase etwa doppelt so häufig wie in der Ostwindphase
- In der Westwindphase gibt es eine starke Korrelation zwischen der solaren Strahlung und der Temperatur der 30 hPa-Fläche; in der Ostwindphase gibt es eine Antikorrelation.
- weitere Auswirkungen: Einfluss auf den Monsun, den Niederschlag in der Sahel-Zone, den Aerosolgehalt in der Stratosphäre nach Vulkanausbrüchen, und Wechselwirkung mit ENSO

9.4 Vulkanausbrüche

- Aerosole erhöhen die Albedo sowohl direkt als auch indirekt durch ihre Wirkung als Kondensationskeime (Wolkenbildung). Dadurch findet eine Abkühlung statt (bei starken Ausbrüchen weltweit um mehrere Zehntelgrad).
- Chemische Reaktionen in der Atmosphäre (z.B. durch chlorhaltige Stoffe).
- Im lokalen Maßstab bewirkt auch sedimentierte Asche eine Erhöhung der Albedo des Erdbodens.
- Die Abschirmung der Sonnenstrahlung durch Sulfatpartikel in der Stratosphäre steigt nach dem Ausbruch im Laufe mehrerer Monate stark an, anschließend dauert es mehrere Jahre, bis die Partikel wieder aus der Stratosphäre verschwunden sind.

10 Klimageschichte

Über die Temperatur sind am meisten Daten vorhanden; über Niederschläge usw. können wesentlich weniger Aussagen getroffen werden.

10.1 Entwicklung der Durchschnittstemperatur

Wenn man die Durchschnittstemperatur betrachtet, ergibt sich folgendes Bild (Referenztemperatur 15 °C):

- letzte 1000 Jahre: Die Durchschnittstemperatur lag insgesamt unter dem heutigen Wert. Im mittelalterlichen Optimum (bis ca. 1300) lag sie geringfügig darüber, aber in der darauf folgenden „kleinen Eiszeit“ (ca. 1300–1850) deutlicher darunter.
- letzte 10000 Jahre: Die Durchschnittstemperatur lag insgesamt über dem heutigen Wert, wofür vor allem das holozäne Optimum (vor 8000–3000 Jahren) verantwortlich ist.
- letzte 100000 Jahre: Die Durchschnittstemperatur erreichte nur in den letzten 10000 Jahren eine heutige Größenordnung, davor war sie wegen der Würm-Eiszeit um bis zu 4 °C niedriger.
- letzte Million Jahre: Starke Schwankungen sind zu beobachten, aber insgesamt lag die Durchschnittstemperatur unter dem heutigen Wert.
- letzte Milliarde Jahre: Die heutige Temperatur liegt deutlich näher am Minimum (ca. 11 °C) als am Maximum (Devon bis Tertiär, bis zu 25 °C).

10.2 Quellen für die Klima-Analyse

- Satellitenbilder, Radiosondenaufstiege: seit ca. 1970 bzw. 1950; die Anzahl der Radiosondenstationen (ca. zwei Sondenaufstiege pro Tag) nimmt in den letzten Jahren tendenziell ab (v.a. wegen Einsparungen in den ehemaligen Ostblock-Ländern); Radiosonden-Daten sind wichtig, um die Messwerte der Satelliten interpretieren zu können (Eichung);
- Wetteraufzeichnungen: Nur zwei Stationen weltweit (Hohenpeißenberg, sowie eine Station in England) bieten eine kontinuierliche Wetteraufzeichnung seit 200 Jahren. Genauso wie die Radiosondenstationen sind die Wetterstationen vor allem auf der Nordhalbkugel (und dort v.a. auf Europa, USA, Japan usw.) konzentriert, während die Südhalbkugel und vor allem die Ozeane sehr schlecht abgedeckt sind. Ähnlich bei den Schiffsbeobachtungen: Der Nordatlantik ist relativ stark abgedeckt, während im Pazifik nicht viel los ist.

- Überlieferungen: Wettertagebücher (z.B. in Klöstern: Abt Knauer schrieb den Hundertjährigen Kalender mit Hilfe von Beobachtungen aus der Zeit 1652–1658), Beginn der Kirschblüte am japanischen Kaiserhof (seit 812 n. Chr. überliefert), Datum der Weinlese, Nilfluten in Ägypten (bis 3050 v. Chr.), Berichte über Naturkatastrophen
- indirekte Überlieferungen: Bilder (z.B. Gemälde aus verschiedenen Jahrhunderten, oder auch Höhlenmalereien), Sagen und Mythen (z.B. Sintflut)
- Eisbohrkerne: Analyse der Schichtstruktur und -dicke, der eingeschlossenen Luftbläschen (Gehalt von Kohlendioxid und Methan), der Einlagerungen (Pollen, Staub, Seesalz \Rightarrow Windverhältnisse; Schwefelsäure und Spurenelemente \Rightarrow vulkanische Tätigkeit), Isotopenanalyse (Isotopenbildung durch Höhenstrahlung, Rückschlüsse auf Sonnenfleckenzyklus); seit den Eiszeiten haben sich nicht nur die absoluten Schichtdicken, sondern auch die Variabilität geändert; Zeitintervall: bis 440000 Jahre (mit hoher Genauigkeit bis 40000 Jahre); zeitliche Auflösung: je nach Tiefe (weil in der Tiefe die Schichten stark zusammengedrückt sind, ist dort die Auflösung geringer als an der Oberfläche) von jahreszeitlich bis Jahrzehnt;
- Dendrochronologie (Jahresringe von Bäumen): Die Dicke der Jahresringe ist von Temperatur und Niederschlag abhängig; man kann nicht nur die Ringe an sich betrachten, sondern z.B. auch einen Vergleich mit Holz bekannten Alters (z.B. aus alten Holzbalken von Häusern oder Schiffen) durchführen. Manchmal sind sogar saisonale Muster erkennbar, z.B. El Niño, oder besondere Ereignisse wie Waldbrände (daraus erkennbar: Häufigkeit von Waldbränden). Jahresringe sind nur bei Bäumen in den mittleren Breiten vorhanden, weil es dort ausgeprägte Jahreszeiten gibt – und wegen der Verteilung der Landmassen ist, ebenso wie bei den Wetterstationen, die Nordhalbkugel begünstigt. Im Allgemeinen kann man bei einem Baum einen zusammenhängenden Zeitraum von ca. 500–700 Jahren betrachten, durch Betrachtung mehrerer Bäume kommt man wesentlich weiter: manche Reihen kann man sogar zusammenhängend 11000 Jahre zurückverfolgen, die älteste Reihe (Dauer: 1200 Jahre) ist 50000 Jahre alt. Zeitliche Auflösung: ein Jahr
- Korallen: Methode ähnlich wie Dendrochronologie, aber für die äquatorialen Breiten; man kann schließen auf die Meeresoberflächentemperatur (schwerer Sauerstoff!), die Salinität, den Wasserkreislauf (Niederschlag, Abfluss), auch ein El-Niño-Signal ist erkennbar. Zeitraum: zusammenhängend bis 400 Jahre (Lebensdauer einer Koralle), mit einer zeitlichen Auflösung von ca. einem Monat; die ältesten Korallen sind ca. 130000 Jahre alt.
- Foraminiferen: Schwerer Sauerstoff wird in den Calcit-Schalen gebunden.
- Pollen: Betrachtung der Vegetation, deren zeitliche Variation (wobei man davon ausgeht, dass heutige und frühere Vegetation ähnlich ist); Ablagerung in Sedimentschichten; Zeitraum: mehrere Millionen Jahre; zeitliche Auflösung typischerweise 50 Jahre;
- Sedimente: in Seen oder Ozeanen; die ältesten Sedimente auf der Erde sind ca. 350 Millionen Jahre alt; Zeitintervall typischerweise mehrere hunderttausend Jahre bis Jahrtausenden; zeitliche Auflösung im Bereich von Jahrzehnt bis Jahrtausend (Sedimente wachsen an Land deutlich schneller als im Meer oder erst recht in der Tiefsee); Indikatoren: grobes Material = Eisberge, feiner Staub = Trockenheit, Tonminerale = Informationen über das Wetter an Land, Foraminiferen, schwerer Sauerstoff, radioaktiver Kohlenstoff (bei organischen Einlagerungen);
- Geomorphologie: z.B. Spuren von Vergletscherung (Endmoränen, Findlinge, Talformen, Schleifspuren am Gestein), frühere Küstenlinien (\Rightarrow Meeresspiegel), Verwitterungsspuren an Gesteinen (Art der Verwitterung: durch Wasser, Wind, Frost usw.)

10.3 Methoden zur Auswertung

- statistische Methoden; Beispiel: Spektralanalyse des Temperaturverlaufs (d.h. der Temperaturverlauf wird Fourier-transformiert, um Periodizitäten erkennen zu können; eine stets gleiche Periodendauer zeigt sich dann im Diagramm als scharfer Peak, eine schwankende Periodendauer als verbreiteter Peak, und unperiodische Vorgänge = weißes Rauschen ergibt in der Fouriertransformation eine horizontale Gerade)

- elliptische Erdbahn: Je elliptischer die Erdbahn ist, desto stärker ist der Einfluss auf die Jahreszeiten (z.B. fällt momentan Perihel und Süd-Sommer praktisch zusammen \Rightarrow Verstärkung; der Einfluss der Exzentrizität der Erdbahn auf die Jahreszeiten ist um den Faktor 10 geringer als der Einfluss durch die Erdachsenneigung), der durchschnittliche Abstand zur Sonne ist geringer, die gesamte auf der Erde auftreffende Strahlungsleistung ist damit höher (da sie quadratisch mit dem Abstand abnimmt). Die numerische Exzentrizität der Erdbahn schwankt zwischen 0 und 0,06 in zwei Perioden von 100000 und 413000 Jahren \Rightarrow zwei Peaks in der Fourieranalyse.
- Präzession der Erdbahn: Die große Halbachse dreht sich in Gegenrichtung zur Bewegung der Erde auf der Bahn \Rightarrow Rotation von Perihel bzw. Aphel.
- Schwankung der Erdachsenneigung (Winkel zwischen Erdachse und Erdbahnnormale): Je stärker die Erdachsenneigung ist, desto mehr Energie gelangt zu den Polen (und weniger an den Äquator), die Jahreszeiten sind stärker ausgeprägt. Die Neigung beträgt momentan $23^\circ 27'$, sie schwankt zwischen $22,2^\circ$ und $24,5^\circ$ mit einer Periode von 41000 Jahren.
- Präzession der Erdachse (*lunisolare Präzession*): Beeinflusst die Position des Polarsterns, des Frühlingspunkts, der *Kardinalpunkte* (*Solstitien* und *Äquinoktien*) usw. und damit die Lage der Jahreszeiten relativ zum Perihel/Aphel. Die Erdachse präzediert mit einer Periode von 25700 Jahren. Die Präzession der Erdachse läuft im Uhrzeigersinn und damit in entgegengesetzter Richtung wie die Präzession der Erdbahn.
- Dauer von Sommer/Winter: Ausgangspunkt ist das 2. Keplersche Gesetz, in gleichen Zeiten T werden vom Bahnvektor gleiche Flächen A überstrichen: $T/A = T'/A'$. Für die Fläche gilt:

$$A = \frac{1}{2} \int_{\nu}^{\nu+\pi} r^2 d\nu$$

mit

$$r^2(\nu) = \frac{b^4}{r_0^2} \sqrt{1 + \varepsilon \cos(\nu)}^{-1} \approx \frac{b^4}{r_0^2} (1 - 2\varepsilon \cos(\nu))$$

Daraus ergibt sich:

$$T_{S/W} = \frac{T}{2} \left(1 \pm \frac{4\varepsilon}{\pi} \sin \nu_0 \right)$$

mit $\nu_0 = 77^\circ 39'$, $T = 365,24$ d, $\varepsilon = 0,01675$ \Rightarrow das Sommerhalbjahr (auf die Nordhalbkugel bezogen) ist, weil der Sommer mit dem Aphel zusammenfällt (d.h. langsamere Bahngeschwindigkeit), um eine gute Woche länger als das Winterhalbjahr.

- Definitionen von Halbjahren:
 astronomisches Halbjahr: von Frühlingspunkt zu Herbstpunkt
 kalorische Halbjahr: Halbjahr, in dem die solare Einstrahlung (bezogen auf eine bestimmten Breite) komplett größer/kleiner als im anderen Halbjahr ist.
- Sonnenflecken: Zu beobachten ist eine Überlagerung von zwei Zyklen mit einer Dauer von 11 bzw. 90 Jahren.
- QBO: Macht sich in der Globaltemperatur mit einer Periode von 2,1 Jahren bemerkbar. Weil Nord- und Südhalbkugel unterschiedlich große Landmassen haben und damit unterschiedlich schnell reagieren, ergibt sich in der Fourieranalyse ein Doppelpeak.
- Tiefdruckgebiete: zeigen eine Periodizität von ungefähr 3–7 Tagen
- Die Eiszeiten lassen sich mit Einstrahlungsanomalien in Verbindung bringen, d.h. die Sonne scheint die Ursache für Eis- und Warmzeiten auf der Erde zu sein. Die Schneegrenze wird durch die Temperatur bestimmt, d.h. die Eisbedeckung nimmt zu, wenn der Zeitraum, in dem die Temperatur unter 0°C fällt, länger wird. Vor allem kalte Sommer fördern die Vereisung, und die Nordhalbkugel ist wegen der großen Landfläche anfälliger für Vereisung als die Südhalbkugel.

- Radiokarbon-Methode: Durch Höhenstrahlung wird Stickstoff (^{14}N) in radioaktiven Kohlenstoff (^{14}C ; Halbwertszeit 5780 Jahre) umgewandelt, der von allen Lebewesen inkorporiert wird (bei Tieren direkt als elementarer Sauerstoff, bei Pflanzen in Form von Kohlendioxid); mit dem Tod hört diese Kohlenstoffaufnahme auf, d.h. ab dann zerfallen die radioaktiven Atome, mit Kenntnis der Halbwertszeit kann man auf das Alter schließen (bis max. ca. 50000 Jahre). Diese Methode geht davon aus, dass die Neutronenproduktion und damit die Höhenstrahlung konstant ist, was eine konstante solare Strahlungsleistung und ein konstantes Erdmagnetfeld voraussetzt. Funktioniert nur für ältere Stoffe, weil erstens durch die vermehrte Verbrennung fossiler Brennstoffe (^{14}C -frei) in den letzten 150–200 Jahren das Gleichgewicht gestört wurde, außerdem haben die oberirdischen Kernwaffentests in den 1960er-Jahren große Mengen an radioaktivem Kohlenstoff freigesetzt.

Andere radioaktive Isotope, die zur Datierung geeignet sind (in der Klammer die Halbwertszeit und der Haupteinsatzzweck):

^{87}Rb (47 Mrd. Jahre; Granit)

^{238}U (4,5 Mrd. Jahre; div. Gesteine)

^{235}U (700 Mio. Jahre; div. Gesteine)

^{40}K (1,3 Mrd. Jahre; Basalt)

^{230}Th (75000 Jahre; Korallen)

Bei manchen Isotopen ergeben die Tochterkerne gasförmige Elemente, die entweichen. Dort kann man nicht das Verhältnis zerfallen/nicht zerfallen untersuchen, was z.B. bei radioaktivem Kohlenstoff auch gar nicht nötig ist.

- Beispiel für Isotopenanalyse: Wasser, das schweren Sauerstoff ^{18}O enthält, verdunstet nicht so leicht wie normales Wasser. Dadurch wird beim Wasserdampftransport vom Äquator zum Pol der ^{18}O -Gehalt bei jedem Schritt von Verdunstung und Kondensation geringer. Die polaren Eiskappen sind besonders arm an schwerem Sauerstoff (und die Tiefsee besonders reich), deshalb kann man bei einem hohen Gehalt von schwerem Sauerstoff z.B. in den Schalen von Meereslebewesen oder in Sedimenten auf ein kaltes Klima schließen, weil erstens das „verdünnende normale Wasser“ in Form von Polareis ausgefroren ist (d.h. Funktion des globalen Eisvolumens) und zweitens in kaltem Wasser mehr schwerer Sauerstoff gelöst ist (Temperaturerhöhung um 4,2K verringert den ^{18}O -Gehalt um ein Promille, d.h. Funktion der Wassertemperatur).
- Analyse von Schichtungen: z.B. bei Baumringen, Korallen, Eisbohrkernen, Sedimenten, Magmatiten (Ausrichtung der Magnetisierung)

11 Anthropogene Klimabeeinflussung

11.1 Stadtklima-Effekt

- weniger Sonnenstrahlungsleistung, v.a. im Winter deutlich weniger UV-Strahlung, weniger Sonnenscheindauer
- Temperaturen sind im Mittel höher (besonders an Strahlungstagen), vor allem die Minimumtemperatur ist erhöht, durch die erhöhte Temperatur ist die relative Luftfeuchtigkeit geringer
- mehr Wolken, aber weniger Nebel
- mehr Niederschlag insgesamt, aber weniger Schnee
- weniger Wind, dafür böiger
- mehr Belastung durch gasförmige Verunreinigungen und Kondensationskeime, aber weniger natürliche Verunreinigungen (z.B. Pollen)
- Die Temperaturerhöhung ist ungefähr proportional zum Logarithmus der Einwohnerzahl, wobei die Kurve in Nordamerika steiler ist als in Europa \Rightarrow in Amerika sind große Städte wärmer als in Europa

11.2 Ozon

Ozon wirkt nicht nur als UV-Schutz (bei Wellenlängen unterhalb von 300nm wirkt es absorbierend), sondern auch als Treibhausgas, und zwar bei ca. $10\mu\text{m}$ – der Wellenlängenbereich ist zwar schmal, aber liegt exakt im *atmosphärischen Fenster*, das ist ein Bereich in dem die anderen atmosphärischen Gase (v.a. Wasserdampf, das im restlichen infraroten Bereich stark absorbierend wirkt, und Kohlendioxid) nicht absorbieren.

Durch Vergleich der Absorption am Boden und in 11km Höhe kann man erkennen, wo die Absorption stattfindet. Sauerstoff und Ozon absorbiert die Strahlung bereits in der Stratosphäre, während beispielsweise Methan, Kohlendioxid und Distickstoffoxid vor allem in der Troposphäre aktiv ist. Der Einfluss von Wasserdampf ist in beiden Schichten zu sehen.

Anmerkung: Bei Angaben von Konzentrationen ist darauf zu achten, ob sie sich auf die Masse oder das Volumen beziehen; außerdem wird manchmal die Menge der Gesamtsubstanz und manchmal die Menge eines Bestandteils angegeben, d.h. 100Gt Kohlendioxid entspricht 42,9Gt reinem Kohlenstoff.

11.3 Kohlenstoffkreislauf

- Im Kohlendioxid-Kreislauf gibt es ein Missverhältnis zwischen den bekannten anthropogenen Quellen (fossile Brennstoffe, Zementherstellung, doppelter Effekt bei Waldvernichtung durch die Brandrodung selbst sowie den Verlust der gerodeten Flächen als CO_2 -Senken) und den Senken (Aufnahme in Atmosphäre und Ozean sowie Gewinn durch Wiederaufforstung v.a. auf der Nordhalbkugel) – letztere sind kleiner.
- Etwa 20 % der künstlichen Kohlendioxid-Emissionen stammen aus Abholzungsvorgängen. In Afrika ist die CO_2 -Freisetzung durch Abholzung größer als in Amerika.
- Kohlenstoff befindet sich in den Ozeanen in organischer Form (Tiere, Pflanzen, v.a. Plankton) und anorganischer Form. Sedimentiert wird Kohlenstoff v.a. als Kalziumcarbonat (anorganisch), aber auch organisch (\Rightarrow Entstehung von Erdöl).
- Je nach pH-Wert wird Kohlendioxid in verschiedener Form im Wasser gespeichert. In saurem Milieu vor allem als gelöste Kohlendioxid-Moleküle, in alkalischem Milieu als Carbonat-Ionen, und im neutralen Bereich (d.h. im Ozean und den meisten Gewässern) als Hydrogencarbonat-Ionen. Die Speicherfähigkeit des Wassers ist stark von der Temperatur abhängig; je höher die Temperatur ist, desto weniger Gas kann gespeichert werden.
- Der Kohlendioxid-Partialdruck des Ozeanwassers ist in äquatorialen Breiten höher als der der Luft, d.h. Kohlendioxid wird dort aus dem Wasser an die Atmosphäre abgegeben. In den mittleren Breiten ist es umgekehrt, dort nimmt der Ozean Kohlendioxid aus der Atmosphäre auf. Vor allem in hohen Breiten zeigen sich deutliche Unterschiede zwischen den Ozeanen; der Partialdruck ist im Pazifik über, im Atlantik dagegen deutlich unter dem Atmosphären-Partialdruck. In mittleren und äquatorialen Breiten verhalten sich beide Ozeane dagegen ähnlich.
- In Böden und Ozeanen ist ähnlich viel Kohlenstoff gespeichert wie in der Atmosphäre (als CO_2).
- Die Methan-Konzentration der Atmosphäre steigt seit etwa 200 Jahren deutlich an. Natürliche Methan-Quellen sind Feuchtgebiete, Termiten und Ozeane; anthropogene Quellen sind v.a. die fossilen Brennstoffe (Erdgas, Kohlegruben, petrochemische Industrie) sowie Gärungsvorgänge, Reisfelder, das Verbrennen von Biomasse, Mülldeponien und tierische und menschliche Abwässer. Als Methan-Senke fungiert v.a. die Atmosphäre (troposphärische Reaktion mit Hydroxid-Ionen sowie Aufstieg in die Stratosphäre) und der Erdboden.

11.4 Stickstoff- und Schwefelkreislauf

Natürliche Quellen von N_2O sind Ozeane, Wälder und Grasland; anthropogene Quellen sind Ackerflächen, Verbrennung von Biomasse, Industrie sowie Viehzucht. Als Senken fungiert die Stratosphäre sowie der Erdboden.

Entsprechend ist die Konzentration in mittleren Breiten, besonders auf der Nordhalbkugel, sowie generell über Landflächen (die keine Wüsten sind) am größten.

Die globalen Schwefel-Emissionen sind bis etwa 1970 proportional zu den Kohlendioxid-Emissionen gewachsen, weil sie aus der Verbrennung fossiler Brennstoffe stammen. Seit diesem Zeitpunkt wachsen die Schwefel-Emissionen deutlich langsamer, weil ab dann vermehrt Rauchgasentschwefelungsanlagen installiert wurden (d.h. das Wachstum von Kohlendioxid- und Schwefel-Emissionen wurde entkoppelt). Entsprechend werden die heutigen Zuwächse bei der Schwefel-Emission v.a. durch Asien verursacht. Die Größenordnung der natürlichen Schwefelemissionen wurde von den künstlichen Emissionen etwa in der Mitte des 20. Jahrhunderts überschritten.

12 Klimamodelle

- In Klimamodellen muss berücksichtigt werden: Beschaffenheit und Eigenschaften von Erdoberfläche und Ozeanen, der Strahlungshaushalt, dynamische Vorgänge (z.B. Strömung in Luft und Wasser) und chemische Reaktionen.
- Bei der Modellierung von Luftschichten über Geländeformationen muss man beachten, dass diese vom Gelände beeinflusst werden. Die z -Koordinate ist dann nicht alleine eine Funktion der Höhe, sondern auch des darunter liegenden Geländes. Die virtuelle Höhe der Luftschichten kann z.B. die Summe aus Geländehöhe und Luftschichthöhe sein, oder sich z.B. nach dem Luftdruck richten (beeinflusst durch Düseneffekt und Fallwinde).
- Bilanzgleichungen: Bei inkompressiblen Strömungen sind Zu- und Abflüsse stets gleich, bzw. an der Oberfläche führen sie zu einer Erhöhung oder Erdniedrigung des Pegels. Bei kompressiblen Strömungen führen Unterschiede zwischen den Zu- und Abflüssen zu einer Veränderung der Dichte.
- Auflösung: Mit der Auflösung steigt die benötigte Rechenleistung stark an (z.B. verdoppelte räumliche (3D) und zeitliche Auflösung \Rightarrow 16-fache Datenmenge), so dass viele geographische Details unberücksichtigt bleiben müssen (z.B. reichen die Alpen laut einem der Modelle von Nürnberg bis Florenz, mit Gipfelbereich zwischen München und Verona). Gleichzeitig sind für das Klima sehr viele Komponenten relevant, die sich auch durch ein noch so feines Raster kaum abbilden lassen (z.B. konvektive Bewölkung, Turbulenz) und entsprechend parameterisiert werden müssen.
- Problematisch dabei ist, dass die Zusammenhänge nichtlinear und außerdem z.T. noch unbekannt sind. Die Nichtlinearität wird dabei von der Advektion (= horizontaler Luftmassenaustausch) verursacht, denn dabei handelt es sich um den Transport einer Eigenschaft des Mediums (= Temperatur) durch Bewegung des Mediums selbst. Dies resultiert in einem chaotischen Verhalten – identische Wetterlagen entwickeln sich langfristig vollkommen unterschiedlich, d.h. im großen Maßstab ist keine Systematik und keine Wiederholung vorhanden.
- Erstellung von Klimaprognosen:
 - Der erste Schritt sind Annahmen über die Zunahme der Weltbevölkerung, das Wirtschaftswachstum, der Energie-Mix (d.h. welche Rohstoffe in welchem Anteil zu Energiegewinnung genutzt werden) und die Energie-Kosten (d.h. wie lohnend Energiesparmaßnahmen sind).
 - Diese Annahmen werden dann in Emissionsmengen von Treibhausgasen und Aerosolen umgerechnet.
 - Anschließend werden Klimamodelle berechnet, die Änderungen bei Temperatur, Niederschlag und Meeresströmungen liefern. Die meisten Klimamodelle sagen eine Abschwächung des Golfstroms und eine Zunahme von Stürmen voraus.
 - Daraus schätzt man die Klimafolgen ab, d.h. inwieweit sich die Klima-Änderungen auf den Menschen auswirken (Anstieg des Meeresspiegels, Zunahme von Katastrophen durch Wetterextreme), und was dagegen getan werden kann. Zur Wahl stehen Vorsorgemaßnahmen (meist unpopulär), Gegenmaßnahmen im akuten Fall (meist technische Maßnahmen, teuer), oder lernen, mit den Folgen der Klimaveränderung zu leben.

13 Klimahypothesen

- Wirkungsmechanismus:
 - Durch eine erhöhte Sonnenaktivität wird der kosmische Strahlenfluss auf der Erde reduziert, weil der stärkere Sonnenwind (= geladene Teilchen, v.a. Protonen und Elektronen) einen Strahlungsgegendruck erzeugt, der die kosmische Strahlung, die von außerhalb des Sonnensystems stammt (aus Supernova-Explosionen), besser abschirmt (Plasmablase des Sonnenwinds: *Heliosphäre*); dieser Zusammenhang gilt als sicher. Die folgenden Zusammenhänge sind dagegen hypothetisch.
 - Durch die reduzierte Höhenstrahlung verringert sich die Wolkenbedeckung der Erde. (Entsprechendes wurde zwar beobachtet, kann aber nicht zweifelsfrei in Verbindung gebracht werden. Außerdem müsste die kosmische Strahlung v.a. Cirruswolken beeinflussen, die jedoch eher zu einer Erwärmung als zu einer Abkühlung führen. Die kosmische Strahlung ist jedoch definitiv die Hauptursache für Ionisation in den höheren Schichten der Atmosphäre (Ionisation ist breitenabhängig!), wodurch möglicherweise Kondensationskeime entstehen.)
 - Durch die verringerte Wolkenbedeckung kommt es zu verringertem *cloud forcing* (d.h. Wärmeabstrahlung in den Weltraum durch Wolken).
 - Dadurch erwärmt sich das Klima auf der Erde.
- Die kosmische Höhenstrahlung scheint generell abzunehmen, weil die Sonnenaktivität langsam zunimmt (Zeitraum: Jahrhunderte).
- In den letzten 200 Jahren lässt sich eine Antikorrelation zwischen der Dauer der Vereisung des Meeres im Winter und der Länge des Sonnenfleckenzyklus beobachten; ob es einen ursächlichen Zusammenhang gibt, ist jedoch fraglich (vgl. zu beobachtende Korrelation zwischen dem Rückgang der Geburtenrate und der Anzahl der Störche in Deutschland).
- Auch die Durchschnittstemperatur (11-jähriger gleitender Durchschnitt) zeigt in den letzten 500 Jahren eine grobe Antikorrelation zur Länge des Sonnenfleckenzyklus (in den letzten 100 Jahren, wo Messwerte statt Schätzungen vorhanden sind, stimmt die Entwicklung sogar sehr gut überein).
- Im 20. Jahrhundert lässt sich auch eine Korrelation der Anzahl der Sonnenflecken mit der Temperaturanomalie (der Nordhalbkugel) beobachten – allerdings ist die Temperaturkurve etwas verschoben (um ca. 10–20 Jahre).
- Auch die Wolkenbedeckung der Erde zeigt eine Korrelation mit der kosmischen Höhenstrahlung (im Bereich 1980–1995), offenbar v.a. in den mittleren Breiten.