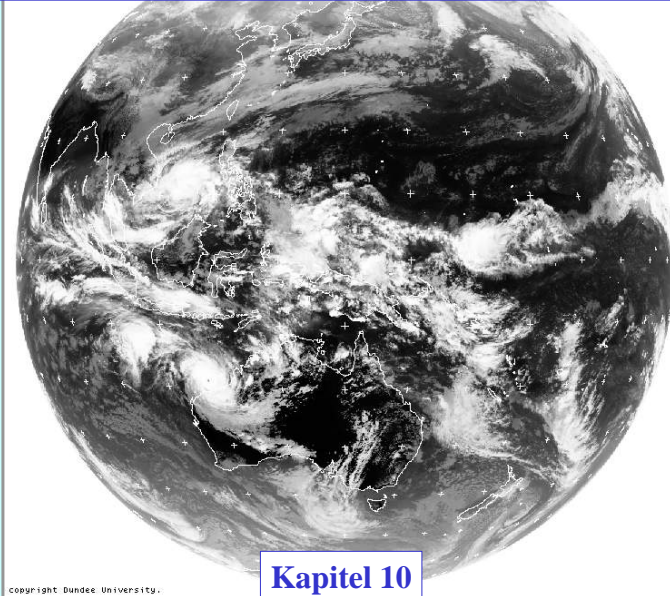


Die globale Energiebilanz - Teil II



Kapitel 10

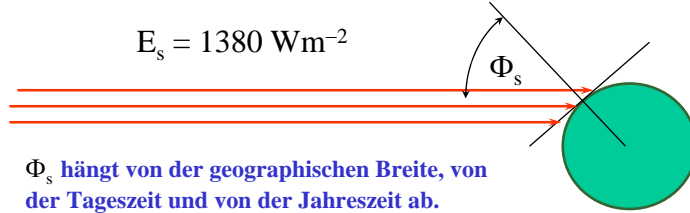
Zeitliche Veränderungen in der Energiebilanz

- Man kann einen Teil der zeitlichen Veränderungen im Aufbau der Atmosphäre direkt in Zusammenhang mit Änderungen in der Verteilung der Energiequellen und Senken bringen.
- Ich werde drei spezielle Beispiele für sehr unterschiedliche Zeiträume betrachten:
 - der Tagesgang,
 - jahreszeitliche Zeiträume, und
 - Klimaveränderungen.

Jahreszeitliche Schwankungen



$$E_s = 1380 \text{ Wm}^{-2}$$



Φ_s hängt von der geographischen Breite, von der Tageszeit und von der Jahreszeit ab.

- Die einfallende solare Strahlung, die auf eine horizontale Fläche an der Obergrenze der Atmosphäre einfällt, kann man als parallele Strahlung mit einer Bestrahlungsstärke von $E = E_s \cos \Phi_s (R/R_m)^{-2}$ betrachten.

der solare Zenitwinkel

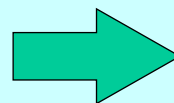
die solare Bestrahlungsstärke die auf eine Fläche senkrecht zur Strahlrichtung im Abstand R_m von der Sonne einwirkt

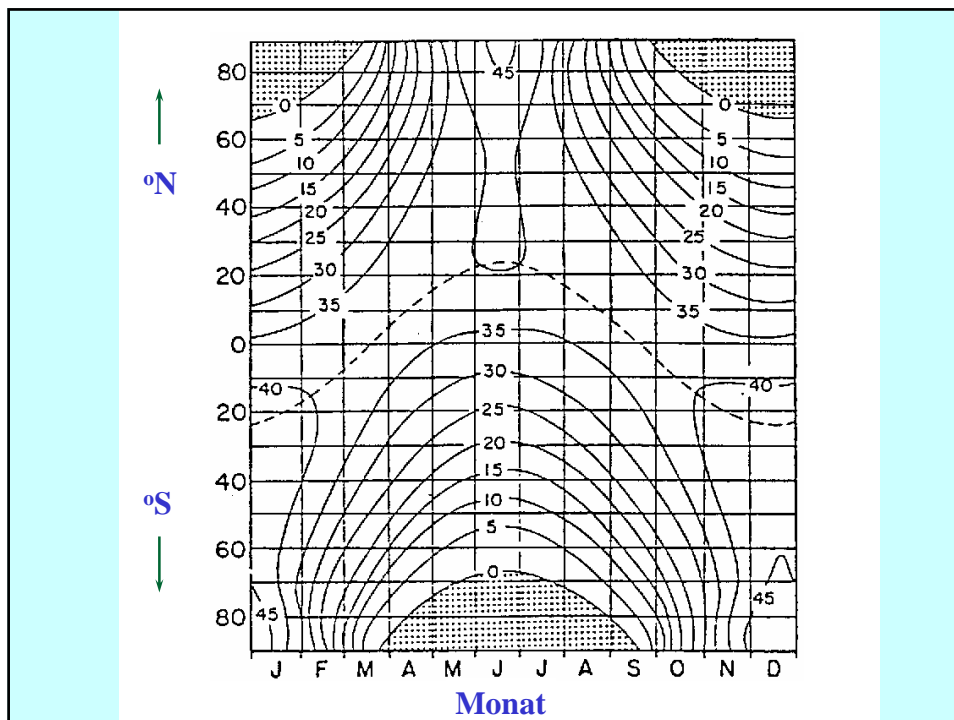
die mittlere Entfernung von der Sonne

die tatsächliche Entfernung von der Sonne

Die Tagessumme der Bestrahlungsstärke

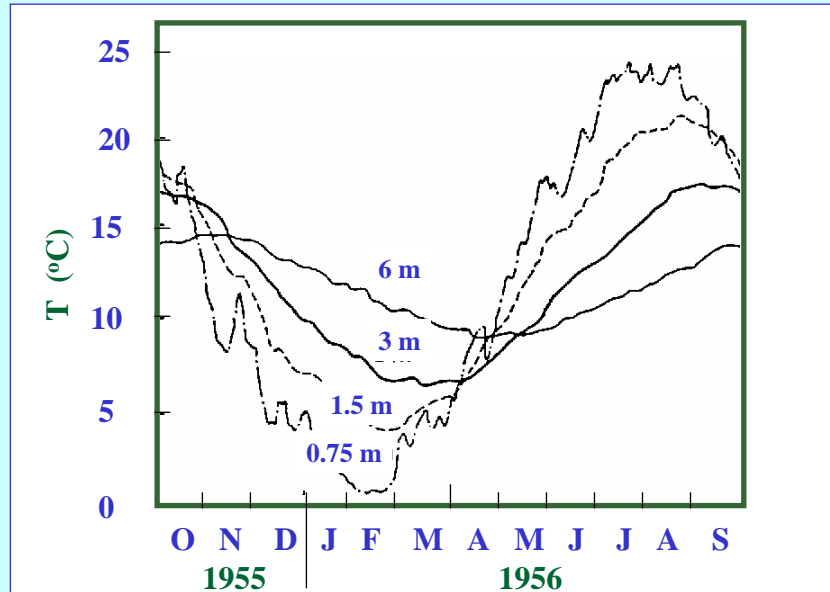
- Der augenblickliche Wert der Bestrahlungsstärke E kann über die gesamte Tageslänge integriert werden.
- Dadurch bekommt man die **gesamte tägliche Energie** die von der Sonne ankommt - d.h. die **Tagessumme der Bestrahlungsstärke**.
- **Das nächste Bild** zeigt diese Tagessumme in Abhängigkeit der Breite und Jahreszeit:





Auswirkungen der Jahrgang der Bestrahlungsstärke

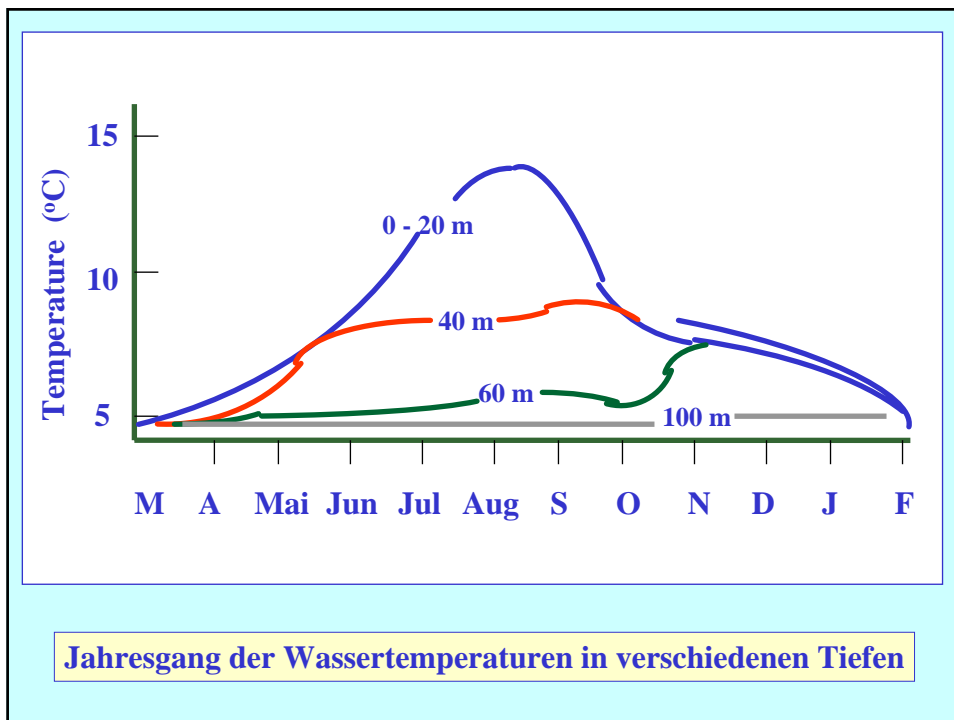
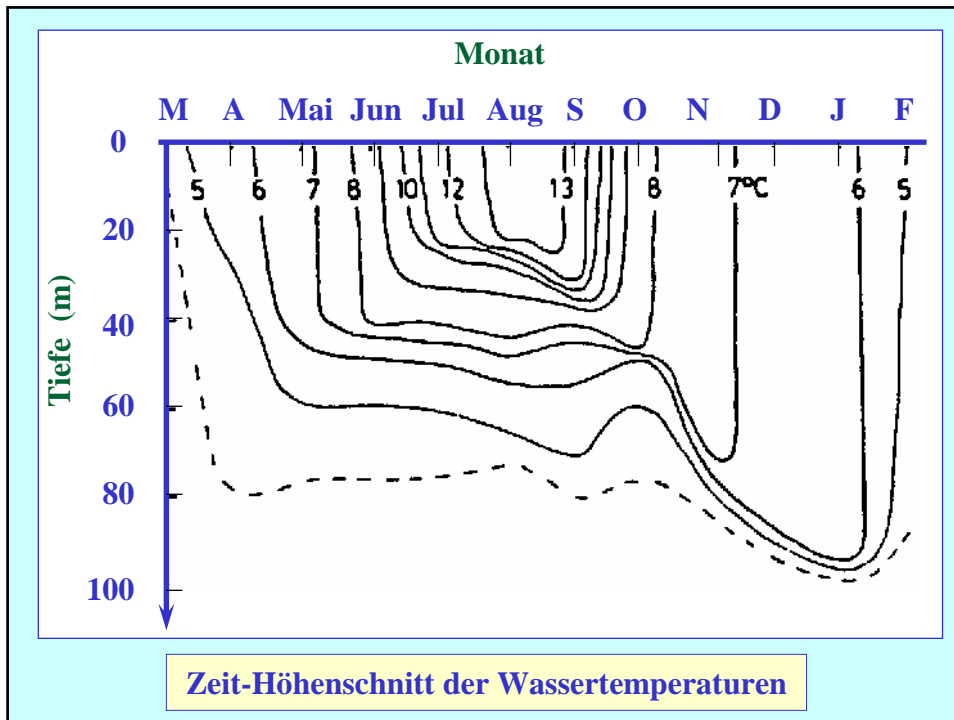
- Der Jahrgang der Bestrahlungsstärke hat verschiedene Auswirkungen auf der Erdoberfläche zur Folge:
- Auf den **Landoberflächen** gibt es im Verlauf eines Jahres in mittleren und hohen Breiten **starke Temperaturschwankungen**.
- Zwischen Minimum- und Maximumtemperatur können in hohen Breiten auf den Kontinenten 50 K liegen (z. B. in **Sibirien**).
- Die jährliche Temperaturschwankung im Erdboden wird mit zunehmender Tiefe schnell gedämpft.



Die jährliche Temperaturschwankung im Erdboden

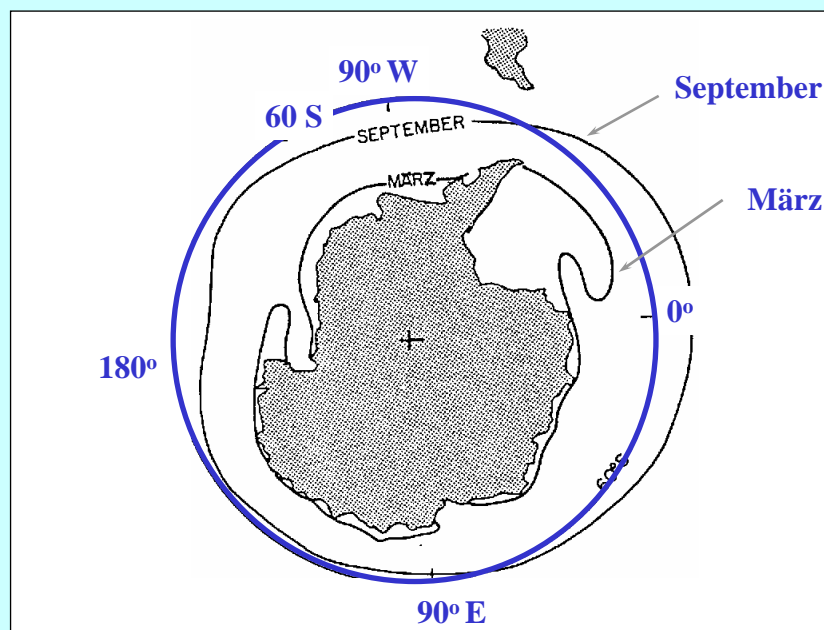
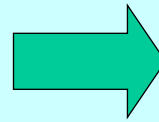
Meeresoberflächentemperaturen

- Die **Meeresoberflächentemperaturen** zeigen wesentlich **kleinere** aber immer noch **signifikante Temperaturschwankungen**.
- Die **Maxima** und **Minima** treten erst ungefähr sechs Wochen nach den Solstitien auf.
- Die **Absorption** von solarer Strahlung während des Sommers verursacht die Entstehung von einer **flachen, warmen Mischungsschicht**.
- Dies wird mit der Zeit immer tiefer.



Schnee und Eis Bedeckung

- Die Größe der Gebieten, die von Schnee und Eis bedeckt sind, hängt stark von der Jahreszeit ab.
- Diese Gebiete schließen die **Polargebiete** und **Gebirgsregionen** ein.
- Das nächste Bild zeigt ein Beispiel dafür.

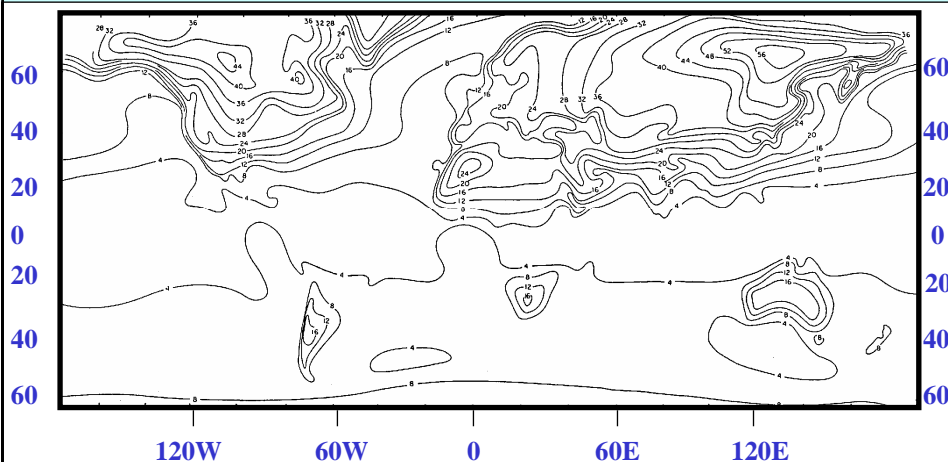


Die Ausdehnung des **antarktischen Packeises** zwischen **März** und **September**

Landflächen und Meeresoberflächen

- Die unterschiedliche Reaktion der Land- und Meeresoberflächen auf die jährlichen Schwankungen der Bestrahlungsstärke hat großen Einfluß auf das globale Klima.
- Während des **Sommers** sind die **Kontinente** wesentlich **wärmer** als die angrenzenden Ozeane - während des **Winters** sind sie **kälter**.
- Der **Temperaturkontrast** zwischen Land und Meer ist kurz nach den Solstitien am größten.
- Die starken **Monsun-Zirkulationen** in den Tropen und Subtropen werden durch die jahreszeitliche Umkehr der horizontalen Temperaturgradienten angetrieben.

Die Stärke der jährlichen Temperaturschwankungen in Abhängigkeit mit der Länge und Breite

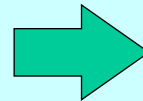


Ursachen für klimatologische Anomalien

- Die Ursachen für die Entstehung von großen jahreszeitlichen **Temperatur- und Niederschlagsanomalien** sind noch nicht vollständig verstanden.
- Solche Anomalien sind Abweichungen vom klimatologischen Mittelwert
- Es steht aber fest, daß die **Kopplung der Zirkulation von Ozeanen und Atmosphäre** bei der Erhaltung der Anomalien über einen längeren Zeitraum eine wichtige Rolle spielt.
- Wenn, z. B. die bodennahen Winde aus irgendeinem Grund vom normalen Wert abweichen, hat dies Folgen für die Meeresströmungen, die vom Wind angetrieben werden.

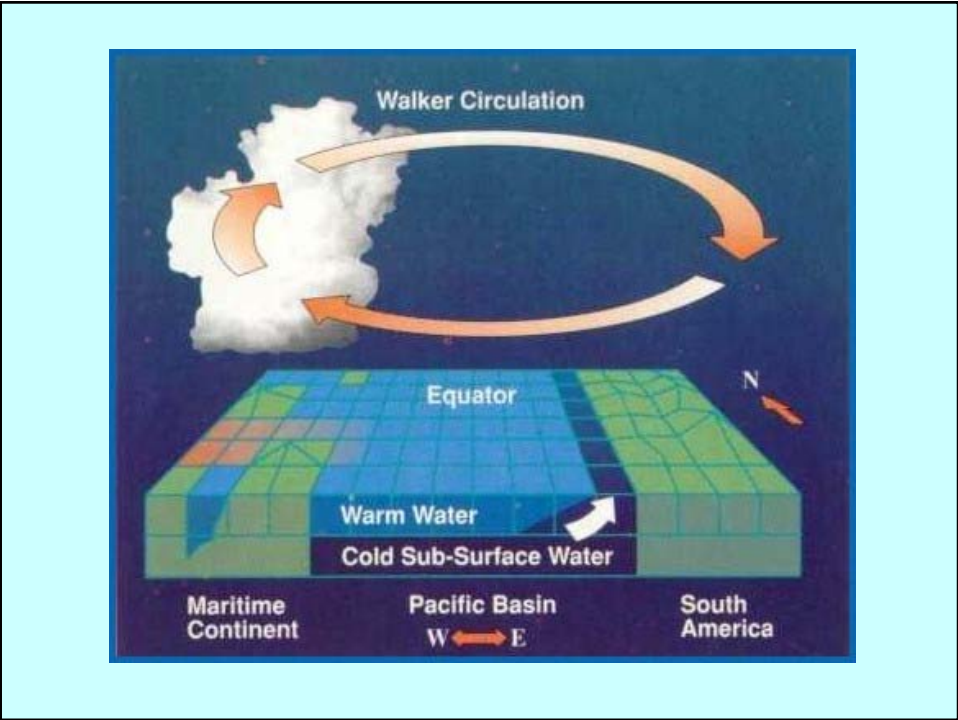
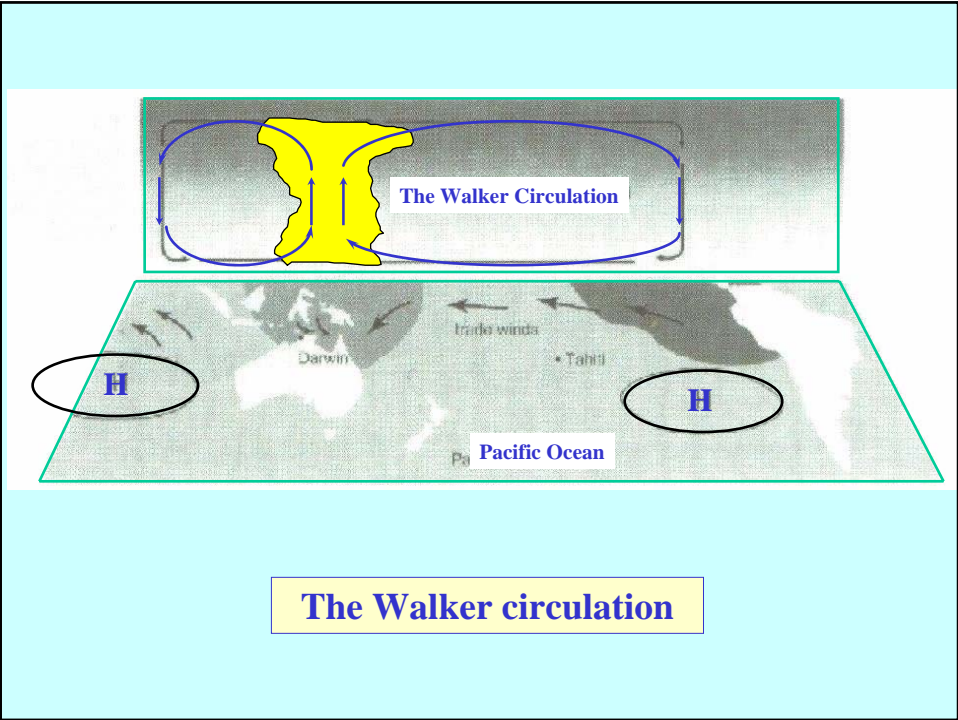
- Unter bestimmten Voraussetzungen können sogar relativ geringfügige Änderungen der Meeresströmungen große Auswirkungen auf die Meeresoberflächentemperaturen haben.
- Dies ist besonders in Äquatornähe und an den Küsten, wo kaltes Tiefenwasser nach oben gelangt.
- Die Anomalien in der Verteilung der Meeresoberflächentemperaturen beeinflussen umgekehrt die atmosphärische Zirkulation durch die Änderung der Energieflüsse an der Grenzfläche Meer-Luft.
- Es handelt sich um eine **positive Rückkopplung**.

- Z. B. angenommen, daß sich eine Anomalie der Meeresoberflächentemperaturen in einem größeren Gebiet etabliert hat.
- Dann, kann diese Anomalie über eine Jahreszeit oder länger bestehen bleiben, weil sich die Zirkulation im Ozean nur sehr langsam an Veränderung in der Atmosphäre anpaßt.
- Ein Beispiel für großräumige Wechselwirkungen zwischen Atmosphäre und Ozean ist das **El-Niño-Phänomen**.



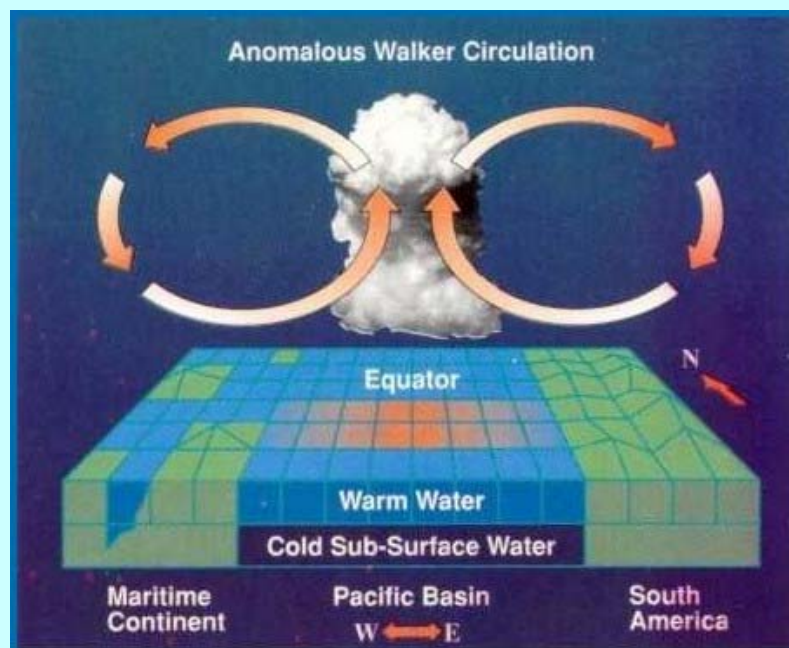
El-Niño-Phänomen

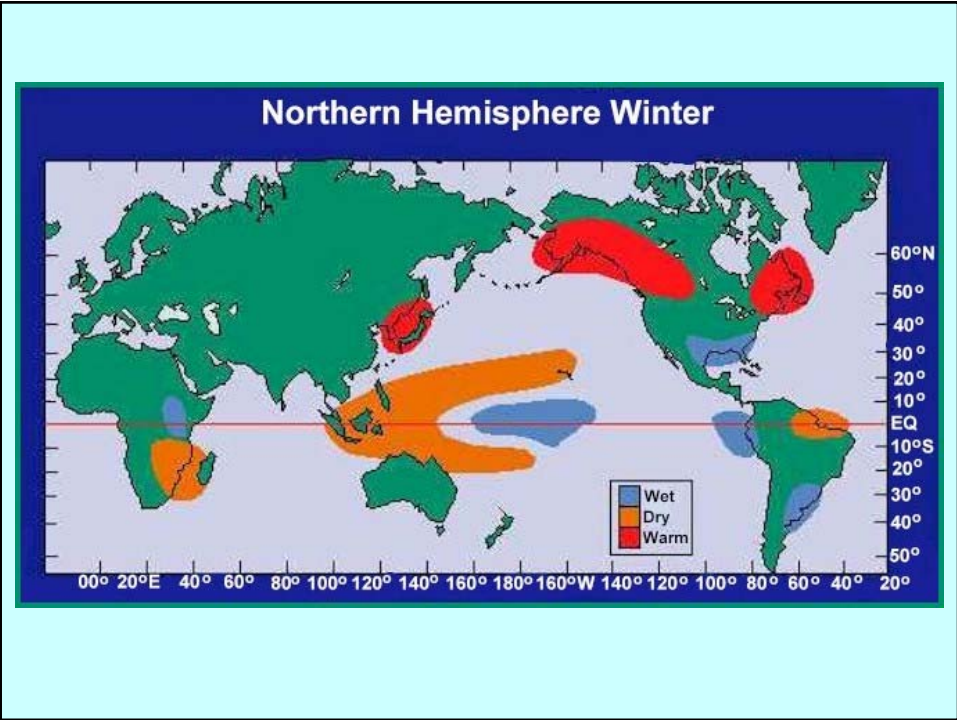
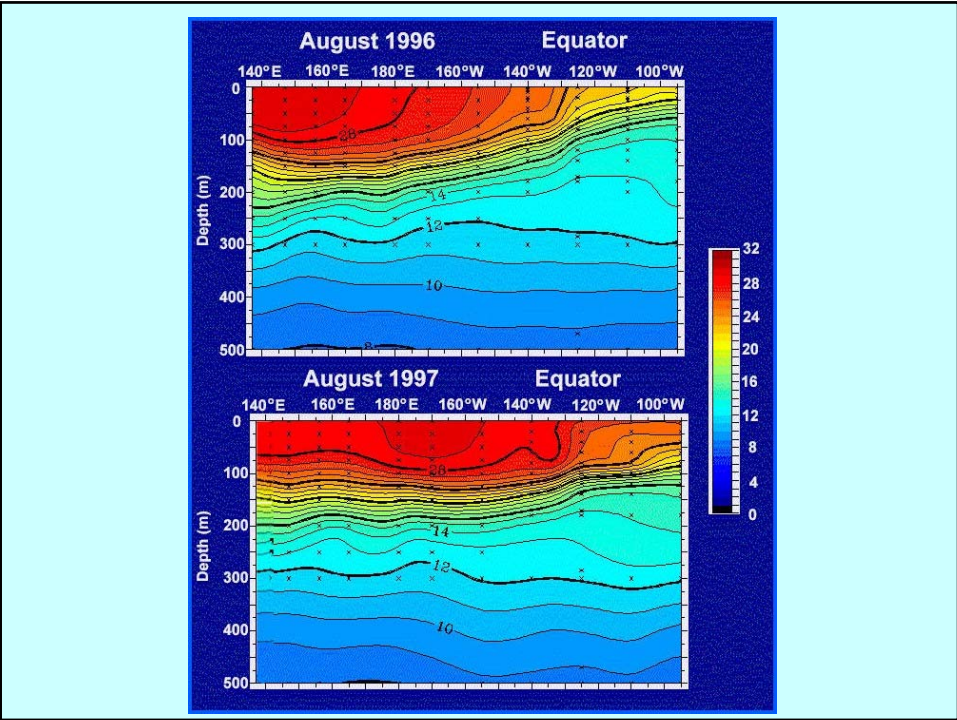
- **El-Niño** bezieht sich auf eine **Anomalie der Meeresoberflächen-temperatur**, die in Abständen von einigen Jahren an der Küste von **Peru** und **Equador** um die Weihnachtszeit auftritt.
- Im **Normalzustand** treibt der **Südostpassatwind** die oberflächennahen Wassermassen des Pazifiks von **Südamerika** **Richtung Indonesien**.
- Dadurch wird die Schicht warmen Oberflächenwassers im Westen mächtiger und an der Küste von Peru und Ecuador dünner.
- Hier steigt kälteres Tiefenwasser nach oben und schafft die Lebensgrundlage für zahlreiche Fische und Seevögel.



El-Niño-Phänomen

- Mit einer Periode von etwa **drei bis fünf Jahren** schwächen sich die äquatorialen Ostwinde ab - die sogenannte **Southern Oscillation**.
- Dabei läßt die Windschubspannung der Passate nach.
- Die warmen Wassermassen, die im Westen angestaut sind, setzen sich nach Osten in Bewegung und breiten sich bis zur südamerikanischen Küste aus.
- Das kältere nahrungsreiche Tiefenwasser bleibt dann aus und es kommt zu einem verbreitetem Sterben und Abwandern von Fischen und Seevögeln.
- Das bringt einen entsprechenden Schäden für das Ökosystem der Küste und für die Fischindustrie von Peru und Ecuador.





Ein extreme El-Niño-Ereignis

- Das extreme El-Niño-Ereignis 1982/83 war mit Temperatur-anomalien im äquatorialen Ostpazifik von teilweise über 5°C verbunden.
- Die **innertropische Konvergenzzone** hat sich ihre Lage nach Osten verlagert.
- Die Folge waren ergiebige Niederschläge in den sonst trockenen Gebieten des zentralen und östlichen äquatorialen Pazifik und die ungewöhnlichen Trockenheit in Südostaustralien und Indonesien.
- In den nördlichen Provinzen von Peru gab es große Überschwemmungen.

Klimaänderungen

- Klimaänderungen ist eine zeitgenössische viel diskutierte Frage
 - auf Grund der zunehmenden Anwendung von fossilen Brennstoffen und der dabei freigesetzten Mengen von **CO₂**,
 - wegen der Produktion anderer strahlungsaktiver Gase, z. B. die **FKCW's**.
- Andere Fragen sind:
 - Wie definiert man Klima und Klimaänderung? und**
 - Wie unterscheiden sich Klimaänderung und Klimaschwankung?**

Klimaänderung und Klimaschwankung

- Jedes Jahr ist der Sommer in Bayern verschieden:
 - manchmal wie 1984 ist es wochenlang warm und sonnig,
 - manchmal ist es kalt, windig und regnerisch.
- Das ist aber normal!
- Diese Schwankungen von Jahr zu Jahr sind ein Zeichen von Klimaschwankungen nicht von Klimaänderung.
- Wenn für drei Jahre hintereinander der Sommer heiß ist, bedeutet es nicht, daß es eine Klimaänderung gibt.
- Offensichtlich, was man unter **Klimaänderung** und **Klimaschwankung** versteht, hängt von der **Mittelungszeit** ab.
- In dieser Vorlesung werde ich diese Ausdrücke anwenden, ohne eine präzise Definition.

Paläoklimatologische Forschung

- Eine wichtige Voraussetzung für das Verständnis von gegenwärtigen oder zukünftigen Klimaänderungen ist die Kenntnis des Klimas in der Vergangenheit der Erde.
- Instrumentelle Beobachtungen liegen jedoch erst seit 250-300 Jahren vor.
- Dies, gemessen am Alter der festen Erde von 2,6 Mrd. Jahren, macht einen winzigen Bruchteil der Klimageschichte aus.
- Beispielsweise liegt die letzte Eiszeit rund 15,000 Jahre zurück.
- Der Zweig der Klimatologie, in dem das vorgeschichtliche Klima erforscht wird, nennt man **Paläoklimatologie**.

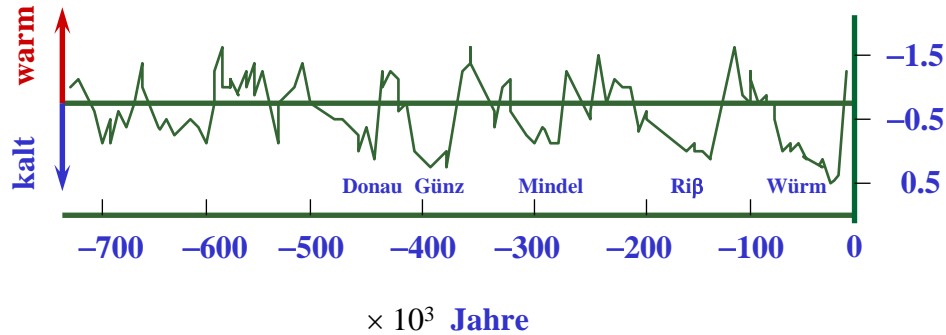
Paläoklimatologische Forschung

- Die paläoklimatologische Forschung ist auf indirekte Methoden angewiesen, d. h. auf Rückschlüsse über den Zusammenhang zwischen der Entstehung geologischer Erscheinungen und dem Klima.
- Die verschiedenen Methoden werden näher in dem Skriptum beschreiben.

Paläoklima

- Das frühgeschichtliche Klima der Erde läßt sich auf Grund dieser indirekten Methoden für etwa 500 Mio. Jahre abschätzen.
- Jedoch kann man erst den Beginn des Quartärs von rund 1 Mio. Jahren den Klimaverlauf genauer angeben.
- Seit 1 Mio. Jahren herrscht ein ständiger Wechsel von **Eiszeit** und wärmeren **Zwischeneiszeiten**.
- Auf Grund der einzelnen Eisvorstöße von Norden unterscheidet man in **Norddeutschland** die **Elster-**, **Saale-** und als jüngste vor 20000 Jahren die **Weichselzeit**
- In **Süddeutschland** auf Grund der Alpen **Vergletscherung** in den letzten 450000 Jahren unterscheidet man zwischen **Donau-**, **Günz-**, **Mindel-**, **Riß-** und **Würmeiszeit**.
- Das **nächstes Bild** zeigt die Klimaveränderungen der letzten 750,000 Jahre

Klimaveränderungen der letzten 750,000 Jahre



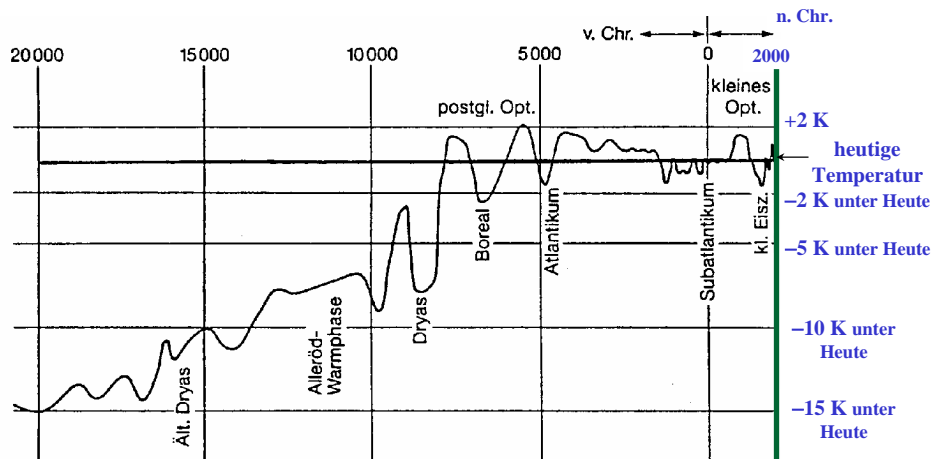
- Diese Kurve wurde von **Sauerstoffisotopendaten** von einzelligen Kleinlebewesen der Ozeane konstruiert.
- Die Reste dieser Lebewesen wurden in einem **Tiefseebohrkern** aus dem äquatorialen Atlantik gefunden.

Temperaturveränderung

- Die **gesamte Temperaturveränderung** zwischen dem **Höhepunkt einer zwischenzeitlichen Wärmewelle** und der **vollentwickelten Eiszeit** beträgt rund 10°C.
- Dabei sind die **Änderungen in den niedrigen Breiten**, u. a. über den **tropischen und subtropischen Ozeanen**, deutlich kleiner als dieser Wert.
- Die **Abkühlung bzw. Erwärmung in den höheren und den mittleren Breiten** ist dagegen wesentlich größer.
- Deshalb gab es dort die **stärksten Auswirkungen** auf die **Tier- und Pflanzenwelt**.

Paläoklima

- Der Höhepunkt der **letzten Eiszeit** war etwa 18000 v. Chr.
- Zu diesem Zeitpunkt betrug die Masse der **Kyrosphäre** etwas mehr als das Doppelte der heutigen Masse.
- Die **Kyrosphäre** umfaßt die **gesamte Masse von gefrorenem Wasser auf der Erdoberfläche** (d. h. Schnee, Gletscher, Packeis, polare Eisgebiete).
- Über den nördlichen Teilen von **Europa und Nordamerika** lag eine ungefähr 2 km dicke **Eisschicht**.
- Die meisten Gebirgsregionen (einschließlich der Anden auf der Südhalbkugel), waren wesentlich stärker vergletschert als heute und der Meeresspiegel war etwa 100 m tiefer.



Verlauf der Mitteltemperaturen in Zentraleuropa von der letzten Eiszeit (etwa 20 000 v. Chr.) bis heute.

Ursachen der Klimaänderungen

- Viele Theorien wurden aufgestellt, um die in der Vergangenheit beobachteten Klimaschwankungen zu erklären, und auch um die zukünftigen Klimatrends vorherzusagen.
- Prinzipiell kann man diese Theorien in zwei Kategorien einteilen:
 - Theorien, die die Klimaschwankungen als Antwort des gekoppelten Systems Atmosphäre-Ozean-Kryosphäre-Biosphäre) auf Änderungen in der globalen Strahlungsbilanz sehen,
 - Theorien, nach denen im System Atmosphäre-Ozean-Kryosphäre auch ohne externe Einflüsse physikalische Prozesse ablaufen können, die durch positive Rückkopplung Klimaänderungen produzieren.

Mögliche Ursachen

- Es gibt zahlreiche mögliche Ursachen für langfristige Änderungen in der globalen Strahlungsbilanz:
 - Schwankungen der Solarkonstanten (z. B. durch chemische Reaktionen im Sonneninneren),
 - Änderungen der Erdbahnelemente (z. B. periodische Änderung der Elliptizität der Erdbahnen, der Präzessionsbewegung der Erdachse oder des Winkels zwischen Ekliptik und Äquatorebene der Erde),
 - Schwächung der Einstrahlung (z. B. durch Vulkanausbrüche).

- **Schwankungen der langwelligen Strahlungsflüsse können durch Änderungen der Spurengaskonzentration verursacht werden.**
- **Die Änderungen in der Strahlungsbilanz wären allein zu gering, um große Klimaschwankungen auszulösen, wenn es keine Wechselwirkung mit der **Kyrosphäre** gäbe.**
- **Wenn die von der Erdoberfläche absorbierte solare Energie über einen längeren Zeitraum abnimmt, kommt es zu einer Vergrößerung der von Schnee und Eis bedeckten Flächen.**
- **Dadurch erhöht sich die planetare Albedo, d. h. es wird noch weniger solare Energie von der Erdoberfläche absorbiert.**
- **Diese Rückkopplungsmechanismus führt dazu, daß eine kleine Änderung der solaren Strahlung wichtige Auswirkungen auf das globale System haben kann.**

Klimaschwankungen ohne externe Einflüsse

- **Die Theorien, nach denen es auch ohne externe Einflüsse zu Klimaschwankungen kommen kann, gehen davon aus, daß auch bei gleichbleibender solaren Strahlung unterschiedliche Zustände des **Systems Atmosphäre-Ozean-Kyrosphäre** möglich sind.**
- **Beispielsweise könnte die globale Energiebilanz gegenwärtig auch von einer völlig mit Eis bedeckten Erde erfüllt werden.**
- **Dann hätte die Erde eine viel höhere Albedo und damit eine wesentlich niedrigere Strahlungsgleichgewichtstemperatur, so daß die Eisdecke in den Tropen nicht abschmelzen würde.**

Klimasystem nicht stationär

- Das Klimasystem befindet sich nach dieser Theorie in **keinem stationären Zustand**, sondern ständig im Wechsel zwischen den zahlreichen möglichen Zuständen.
- Wodurch der Wechsel zwischen Kalt- und Warmzeiten letztendlich verursacht wird, ist noch umstritten.
- Wahrscheinlich spielen mehrere Faktoren eine Rolle.

Antropogene Klimabeeinflussung

- In der Diskussion über die Bedrohung unserer Umwelt durch menschliche Aktivitäten spielt die Frage möglicher Klimaveränderungen eine wichtige Rolle.
- Es wäre falsch, Abweichungen vom normalen Klimaverlauf grundsätzlich dem menschlichen Einfluß im Industriezeitalter zuzuschreiben.
- Klimaschwankungen und -veränderungen auf Grund natürlicher Ursachen hat es in der Erdgeschichte gegeben.
- Sie sind auch in der Zukunft zu erwarten!

- **Unbestritten ist, daß die zunehmende Industrialisierung mit ihrem steigenden Energieverbrauch und bestimmte Maßnahmen der Landnutzung weltweit auf das Klima einwirken können.**
- **Bei Schwankungen oder Veränderungen des Klimas der Gegenwart handelt es sich daher stets um Überlagerungen natürlicher und anthropogen beeinflusster Prozesse, die nur schwer voneinander zu trennen sind.**

- **Die anthropogen Klimabeeinflussung kommt dadurch zustande, daß sich der sogenannte Treibhauseffekt verstärkt.**
- **Unter den zahlreichen Spurengasen sind neben dem Wasserdampf (H₂O) vor allem Kohlendioxid (CO₂), Methan (CH₄), Distickstoffoxid (N₂O), Fluor-Chlorkohlenwasserstoffe (FKCW) u. a. als klimawirksame Treibhausgase bekannt.**
- **Diese lassen die einfallende kurzwellige Sonnenstrahlung weitgehend bis zur Erdoberfläche durchdringen.**
- **Sie absorbieren aber die von der erwärmten Erdoberfläche abgestrahlte langwellige Infrarotstrahlung, erwärmen dadurch die Atmosphäre und strahlen die Wärme zum Teil wieder zur Erdoberfläche zurück, so daß diese weiter erwärmt wird.**

Rolle von CO₂

- Wir haben schon gesehen: ohne diesen Treibhauseffekt läge die mittlere Temperatur der Erdoberfläche bei 18°C (statt wie gegenwärtig bei 15°C).
- Unter den anthropogen erzeugten Treibhausgasen muß das **Kohlendioxid** als besonders klimawirksam angesehen werden, weil sein Volumenanteil in der atmosphärischen Luft von etwa 280 ppm im vorindustriellen Zeitalter auf etwa 347 ppm im Jahr 1987 angestiegen ist.
- Wenn der Kohlendioxidgehalt der Atmosphäre, der wesentlich durch den Reservoiren **Ozean (die größte Kohlendioxidsenke)**, **Biosphäre** und der **Atmosphäre** bestimmt sind, weiterhin so stark ansteigt wie in den letzten Jahren, so muß es zu einer Verstärkung des Treibhauseffekts kommen - d. h. zu einer globalen Erwärmung.

Rolle andere Treibhausgasen

- Da neben dem Kohlendioxid die anderen Treibhausgasen ebenfalls stark zugenommen haben und vermutlich weiter zunehmen werden, ist ein entsprechen verstärkter Treibhauseffekt zu erwarten.
- Das genaue Ausmaß der daraus folgenden globalen Erwärmung der Atmosphäre läßt sich aufgrund verschiedener Modellrechnungen heute nicht mit Sicherheit angeben.
- Das Problem ist, daß in den Modellsätzen wesentliche Faktoren im gesamten **Klimasystem Atmosphäre-Ozean-Kyrosphäre-Biosphäre** nur unzureichend berücksichtigt werden können:
 - z. B. die Einfluß der Bewölkung, Kohlendioxidsenken und Quellen.

Globale Erwärmung

- **Erwärmungsraten des gesamten Treibhauseffekts von etwa 2-7 K bis zum Jahr 2100 wären denkbar, wenn die Wirkung notwendiger Gegenmaßnahmen bis dahin ausbliebe.**
- **Unklare Vorstellungen herrschen aber über die klimatischen Auswirkungen (regional, jahreszeitlich) und die sonstigen Folgen einer solchen globalen Erwärmung.**

