

# KLIMATOLOGIE (A. Ohmura)

## I. Einführung

- Klimatologie: Atmosphäre interagiert mit anderen Sphären (= Hydro-, Bio-, Kryosphäre)
- *Klima* = mittl. physischer Zustand des Klimasystems; statistische Charakteristik der Erde; enthält Angaben über mittl. Wetter, Infos über typische Variabilität, typische Abfolgen innerhalb Klimasystems; Mittelungsperiode: **30 a** (alternativ: **8 a**)
- Momentane Erscheinung der Atmosphäre = kurzzeitig = *Wetter* ⇔ *Klima* = langfristig = statistische Behandlung; Klima resultiert aus Wetterlagen
- *Klimanorm* = Temp./Niederschlagskurven pro Jahr
- Mittelwerte Temp.: **-55°C** (= Antarktis) bis **33°C** (= Rotes Meer); *mittl. globale Temp.* ≈ **15°C ± 0.1**
- Messfehler Niederschlag: **960 mm** bis **1100 mm**; *mittl. globaler Niederschlag* ≈ **1 m ± 10%**
- *Luft* = Gasgemisch aus Stick-, Sauerstoff, Argon; Zus.setzung in untersten **20 km** konstant; in kleinen Mengen auch Neon, Helium, Krypton, Xenon, Wasserstoff, Methan, Ozon, Stickoxide; enthält räumlich/zeitlich untersch./variable Wasser-Anteile (= gasförmig/flüssig/fest); *Konvektion* = Aufsteigen der Luft
- *Klimaelemente* = Bedingungen, die zus. physikalischen Zustand der Atmosphäre beschreiben
 

<i>Hauptklimaelemente:</i>	<i>indirekte Klimaelemente:</i>
Strahlung	Sonnenscheindauer
Lufttemp.	Sichtweite
Luftfeuchtigkeit	Schneedecke
Niederschlag	Vegetation
Wind	
Luftdruck	
Wolken (Betrag, Typen)	
- *Klimafaktoren* = Randbedingungen/Begebenheiten, die Klima bestimmen; Ursprung des Klimas
  - *externe* = werden durch Veränderung des Klimas selbst nicht beeinflusst
    - i. Elemente der Erdbahn um die Sonne
    - ii. Drehung der Erde um eigene Achse (Richtung der Drehachse, Drehgeschw.)
    - iii. Land-Wasser-Verteilung
    - iv. Topographie
    - v. Vulkanausbrüche (Art/Zus.setzung des Rauches)
  - *interne* = klimatische Änderungen können zurückwirken (= *Rückkoppelung*)
    - i. best. Bestandteile der Atmosphäre (Wasserdampf = Wolken)
    - ii. Art/Ausdehnung vereister Flächen (Gletscher, Eisschilder, Meereis)
    - iii. Vegetation (Art/Bedeckungsgrad)
    - iv. Meeresströmungen
- *differentielle Erwärmung* = nicht gleichviel Sonnenenergie/Erwärmung auf jeder Breite; Unterschiede durch atmosphärische/ozeanische Strömungen auszugleichen
- *allg. Zirkulation* = globale atmosphärische Strömungen; zentrales Problem der Atmosphärenphysik
- *Proxidaten* = indirekte Daten aus Untersuchung vergangener Klimazustände; zum Verständnis der Prozesse herbeigezogen
- Aufbau der Atmosphäre (von unten nach oben): *Troposphäre* (= Wetterschicht) – *Tropopause* – *Strotosphäre* – *Stratopause* (= Ozonschicht) – *Mesosphäre* – *Mesopause* (= kältester Punkt) – *Jonosphäre* (= kosm./UV-Strahlung, nach oben zunehmende chem. Entmischung)
- System von Regelkreisen: Regelgrösse weicht durch Störeinflüsse vom Sollwert ab; Messfühler mit Regler misst Abweichung und betätigt Stellglied, das Regelgrösse wieder auf Sollwert zurückstellt; bei Klimasystem komplizierter: viele Regelgrößen, einige umgekehrt, Regelgrößen = Störgrößen, Regler mit zeitl. Veränderung, kein fester Sollwert
- „*chaotische*“ *Dynamik*: stabile Bereiche – Oszillation – Umkippen; keine Gewähr für „kleine Ursache – kleine Wirkung“
- Elemente des Klimasystems: *Exosphäre*, exogene Prozesse (= *Atmosphäre*, *Biosphäre*, *Hydrosphäre*, *Kryosphäre*), endogene Prozesse (= *Lithosphäre*)

- Wechselwirkungen zw. einzelnen Teilen des Klimasystems:
  - *Atmosphäre*: Wolken, Niederschlag, Wind
  - *Ozean*: Wellen, Meeresströmungen, Meereis
  - *Landflächen*: Vegetation, Flüsse, Seen, Gletscher
- *Sonneneinstrahlung* = Motor des Klimasystems
- Rückkopplung = Wechselwirkungen zw. Klimatelementen und -faktoren
  - *neg. Rückkopplung* = Regelkreise, die dämpfend auf Störung reagieren: Sonneneinstrahlung → höhere Wassertemp. → mehr Verdunstung → mehr Konvektion → mehr Wolken → Absorption der Sonneneinstrahlung → Verringerung der Strahlung an Meeresoberfläche → geringere Erwärmung
  - *pos. Rückkopplung* = Regler, die Störung verstärken: höhere Temp. → Verkleinerung der Schneedecke → tieferer Albedo → mehr Strahlungsabsorption → noch mehr Erwärmung
- Klimaänderungen durch *Solarkonst.* (Periode: **11 a**), Bahnparameter (= *Ekliptikschiefe*, *Präzession*, *Exzentrizität*; periodische Schwankungen: ca. **30 a**), Ozeanzirkulation
- Schwankungsperioden und deren Abhängigkeiten:
  - 1 Tag/Jahr: Erdrotation, Umlauf der Erde um Sonne
  - Tage: Dynamik der Erdatmosphäre
  - mehrere Jahre bis Jahrhunderte: Ozeane
  - 10'000 bis 100'000 Jahre (Eiszeitperioden): Schwankungen der Erdbahn
  - mehrere bis viele Mio. Jahre: hypothetisch

## II. Energiehaushalt

- *Sonneneinstrahlung* = wichtigste Energiequelle für Atmosphäre-Erde-System
- Sonnenstrahlung ausserhalb Atmosphäre > Sonnenstrahlung an Erdoberfläche > geotherm. Wärme > anthropische (= menschl.) Energieproduktion > Emission der Infrarotstrahlung (durch Vollmond) > Reflexion der Sonnenstrahlung (durch Vollmond) > Strahlung der Sterne

### Stefan-Bolthmann-Gesetz:

- *Stefan-Boltzmann-Gesetz*: therm. abgestrahlte Energie (= *Schwarzkörperstrahlung*)  $F = \sigma T^4$  (abs. Temp. T, *Stefan-Boltzmann-Konst.*  $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ ); Bestrahlungsstärke der Sonne: *Solarkonst.*  $S = 1368 \text{ W/m}^2 = \sigma T_{\text{Sonne}}^4$  ( $T_{\text{Sonne}} \approx 5700 \text{ K}$ );  $S(1-A) / 4 = \sigma T^4$  (planetarer Erd-Albedo  $A = 0.3$ ) → *effektive Erd-Temp.*  $T = 255 \text{ K} = -18^\circ\text{C}$
- *Lapse-Rate*  $\Gamma = -dT/dz$  (Temp. T, Höhe z)
  - Wüsten:  $\Gamma = 8^\circ\text{C/km}$
  - mittl. Troposphäre:  $\Gamma = 6^\circ\text{C/km}$
  - Tropen:  $\Gamma = 3^\circ\text{C/km}$

### Energieflüsse auf der Erde:

- *kurzwellige elektromagn. Strahlung* (= EMS) = von der Sonne; sichtbares Licht und lichtnaher ultravioletter (= UV) und infraroter Bereich
- *langwellige EMS* = irdische therm. Strahlung in Weltraum = *infrarote Strahlung* (= IR):  $\approx 10 \mu\text{m}$
- *Treibhauseffekt* = Fähigkeit der Atmosphäre, langwellige Strahlung zu absorbieren und emittieren
- *Bestrahlungsstärke*  $F = S \cdot \cos z$  (Strahldichte S, Zenitwinkel z)
- *meridonal* = entlang einem Meridian vom Nord- bis Südpol
- *zonal* = entlang einem Breitenkreis
- *Polarnacht* = ohne Sonnenschein
- *Tropopause* = Obergrenze der *Troposphäre*
- *Stratosphäre* = oberhalb der Tropopause
- *Inversion* in Stratosphäre = durch Absorption von UV-Strahlung durch Ozon

### III. Klimaklassifikationen

- *Klimaklassifikation* = gibt rel. einfachen und logischen Überblick über Vielfalt der Klimatypen

Klimaklassifikation von Köppen:

- *Vegetationstyp* = widerspiegelt Charakter eines Klimatyps
- 5 Hauptgruppen der Klimate:
  - *trop. Regenklimate*:
    - i. ohne Trockenzeit Af
    - ii. Trockenzeit im Sommer As
    - iii. Trockenzeit im Winter Aw
  - *trockene Klimate*:
    - i. Steppenklima BS
    - ii. Wüstenklima BW
  - *warm-gemässigte Regenklimate*:
    - i. ohne Trockenzeit Cf
    - ii. Trockenzeit im Sommer Cs
    - iii. Trockenzeit im Winter Cw
  - *boreale/Schnee-Wald-Klimate*:
    - i. ohne Trockenzeit Df
    - ii. Trockenzeit im Sommer Ds
    - iii. Trockenzeit im Winter Dw
  - *Schnee-/polare Klimate*:
    - i. Tundrenklima ET
    - ii. Frostklima EF
- *Baumklimate*: A, C, D

Klimaklassifikation nach Thornthwait:

- beruht auf Betrachtungen der Leistungsfähigkeit des Pflanzenwachstums
- *Niederschlagswirksamkeit* P-E = monatl. Regenmenge P geteilt durch monatl. Verdunstung E
- *P-E-Index* =  $10P/E \approx 11.5 * (P/(T-10))^{10/9}$  (Monats-Mitteltemp. T in °F, monatl. Regenmenge P in inches):
  - > 128: A – *feucht* (= Regenwald)
  - 64-127: B – *humid* (= Wald)
  - 32-63: C – *subhumid* (= Grasland)
  - 16-31: D – *semiarid* (= Steppe)
  - < 16: E – *arid* (= Wüste)
- *Temp.leistung* T-E = Einfluss der Temp. auf Pflanzenwachstum
- *T-E-Index* =  $\sum(T-32)/4$  = Jahressumme der monatl. T-E-Werte (monatl. Mittel T in °F):
  - > 128: A' – *tropisch*
  - 64-127: B' – *mesothermal*
  - 32-63: C' – *mikrothermal*
  - 16-31: D' – *Taiga*
  - 1-15: E' – *Tundra*
  - neg.: F' – *Frost*

### IV. Wasserkreislauf

- gesamte *Wassermenge* der Erde  $\approx 1.408 \text{ Mia. km}^3 \rightarrow$  Wasserschicht = 2718 m
- Wasserreservoirs:
  - Ozean: 97%
  - Eis (Polkappen, Gletscher): 3%
  - Grundwasser
  - Süsswasser (Flüsse, Seen)
  - Atmosphäre (Wolken, gasförmig)
  - Biosphäre

- Süswasser-Anteil: 2.53%
- Wasserkreislauf = Transport von Wasser aus Meer über Atmosphäre auf Landoberfläche und von dort über Oberflächen-/Grundwasserabfluss zurück ins Meer = Wasseraustausch zw. Meer und Land
- grösster Teil der *Wasserbewegungen* in Ozeanen

### Ozeane

- Ozane:
  - bedecken ca. 70% der Erdoberfläche
  - enthalten 97.3% des gesamten Wassers der Erde
  - tragen 0.02% zur Masse der Erde bei
- versch. *Land-Wasser-Verteilung* auf beiden Hemisphären ist wichtig für Erdklima
- *Nordhemisphäre* hat viel mehr Landflächen als *Südhemisphäre*
- gemittelte Höhen:
  - global gemittelte Höhe der *festen Oberfläche* der Erde = 3795 m u.M.
  - mittl. Höhe des *Meeresbodens* = 3795 m u.M.
  - mittl. Höhe der *Kontinentalflächen* = 840 m ü.M.
- gemittelte Werte des Meerwassers:
  - mittl. *Salzgehalt* = 3.5%
  - mittl. *Temp.* = 5.9°C
  - Dichte hängt von Temp. und Salzgehalt ab → mittl. *Dichte* =  $1.028 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$
- *Erdkruste* = unter Ozeanen dünner als unter Kontinenten; statischer Druck am Unterrand (= *Moho*) überall etwa gleich gross (= *Isostasie*)

### Klima und Ozeane:

- Wasser in Ozeanen kann viel mehr Wärme aufnehmen als Atmosphäre → Ozeane reagieren weniger stark und langsamer auf externe Änderungen:
  - *maritimes Klima* = Meere wirken auf benachbarten Landflächen dämpfend auf tages-/jahreszeitliche Variationen
  - *kontinentales Klima* = im Innern der Kontinente
- *aktive Schicht* = Wasserschicht in Ozeanen, die wesentlich mit Atmosphäre wechselwirkt; ca. 100 m dick; Schichten mit grösseren Variationen innerhalb der Schicht:
  - *Halokline* = grössere Variation des Salzgehaltes
  - *Thermokline* = grössere Variation der Temperatur
  - *Pycnokline* = grössere Variation der Dichte
- der grösste Teil der *Strahlungsenergie* im obersten Meter absorbiert
- kleinerer Salzgehalt in oberster Schicht durch *Verdünnung* mit Regenwasser
- nur oberste Schicht wird durch *Windschub und Wellen* umgerührt

### Meeresströmung:

- Winde v.a. durch temperaturinduzierte Druckunterschiede angetrieben; Polar-Ostwind (*Polarfront*, T), Westwindzone (*Rossbreiten*, H), Passat (*InnerTropischeConvergenzzone*, T)
  - *antitriptischer Wind* = Kräftegl.gewicht zw. Druckgradientkraft und Reibungskraft (= 0); nur in unteren Schichten, da weiter oben kaum Reibung; z.B. Berg-Tal-Wind
  - *geostrophischer Wind* = parallel zu Isobaren/-hypsien, senkrecht zum Druckgefälle; Höhe > 1-2 km; nicht am Äquator
  - *Oberflächenwind*
- Meeresströmungen = Transport von Masse, Wärme, Stoffen, kin. Energie; durch versch. Kräfte angetrieben:
  - *Triftstrom* = durch Schubspannung von Atmosphäre (= Wind) angetrieben; in obersten ca. 100 m
  - *Staustrom* = durch Gravitationskraft angetrieben; in obersten ca. 100 m
  - *geostropher Strom* = durch *thermohalin* (= Temp. und Salzgehalt) bestimmte Dichteunterschiede angetrieben; fliesst unter Gl.gewicht zw. Druckgradient und Corioliskraft; in tieferen Schichten

- *nordatlantischer Strom* bringt warmes Wasser vom Golfstrom nach Norden → höherer Salzgehalt durch Verdunstung und höhere Dichte durch Abkühlung → Oberflächenwasser beginnt im nördl. Atlantik abzusinken (= *Tiefenwasserbildung*)
- durch Tiefenwasserbildung, Reibung der Ströme der Oberflächenschicht und thermohalin bewirkte Dichteunterschiede entstehen *Tiefenströme* (→ *geostrophe Bewegungen* = komplizierte 3-dim. Strömungsmuster; wie geostrophe Winde)
- *Isobaren* = Flächen gleichen Drucks

### Gezeiten:

- *Gezeiten* werden zu ca.  $\frac{2}{3}$  durch Mond und zu ca.  $\frac{1}{3}$  durch Sonne bewirkt
- *Gezeitenkraft* = aus Zentrifugalkraft und Mondanziehung resultierend
- *Energiedissipation* = durch Brechen der Gezeitenwellen an Küsten wird Bewegungsenergie in Wärme umgewandelt; ausserdem wird Erdrotation gebremst → Erde verliert Rotationsdrehimpuls → Mond gewinnt an Bahndrehimpuls → Tageslänge wird um  $1.5 \cdot 10^{-5}$  s/a länger und Mondabstand nimmt um  $3.5$  cm/a zu
- mit *Sonnenfinsternissen* und Messungen an Schichtungen in *fossilen Korallenstöcken* kann Verlangsamung der Erdrotation berechnet werden
- in Zukunft:
  - Erde und Mond werden sich dauernd die gleiche Seite zuwenden
  - Mondentfernung =  $450'000$  km
  - Tageslänge =  $48$  d

### Wellen:

- *Wellen* transportieren keine Masse, sondern kin. Energie; an Ozeanoberfläche v.a. durch lokale Druckunterschiede und Windschub verursacht
- Wasserteilchen bewegen sich ca. auf *kreisförmigen Bahnen*; bei Oberflächenwellen nimmt Grösse der Kreise mit Tiefe ab
- in  $50$  m Tiefe ist Wellenbewegung weitgehend abgeklungen
- *Wellengeschwindigkeiten* (= grösser als Geschw. der Wasserteilchen, sonst bricht Welle):
  - im freien Ozean:  $v = \sqrt{g\lambda/2\pi}$  (Wellenlänge  $\lambda$ , Schwerebesch.  $g$ )
  - in ufernahem Gebiet (Wassertiefe  $< 25$  m):  $v = \sqrt{gh}$  (Wassertiefe  $h$ , Schwerebesch.  $g$ )
- *Rippelmarken* = feinkörniges Material sedimentiert, wird durch Wellenbewegungen angelegt
- Wellenzüge werden in ufernaher Zone durch Tiefenabhängigkeit der Wellenbewegung parallel zur Strandlinie ausgerichtet: *Wellenenergie*  $E = \frac{1}{2} \rho v \omega^2 a^2 L$  (= prop. zur Breite  $L$  des Wellenzugs; Dichte  $\rho$ , Wellengeschw.  $v$ , Frequenz  $\omega$ , Wellenamplitude  $a$ )

## V. Kryosphäre

- *Kryosphäre* = antarktische/grönländische Eisschilde, Gletscher in Bergen, Meereis, Permafrostregion in hohen Breitengraden/Hochgebirgen, jahreszeitliche Schneedecke; wichtig, da sie kurzwellige Strahlung (= Sonnenstrahlung) am stärksten reflektiert; Energieesenke für Atmosphäre, da grosse Wärmemengen durch Schmelzen verbraucht werden
  - *Schneedecke*:  $17.1-58.7 \cdot 10^6$  km<sup>2</sup>     $3-12 \cdot 10^3$  km<sup>3</sup>
  - *Meereis*:  $19-25.4 \cdot 10^6$  km<sup>2</sup>     $19-25 \cdot 10^3$  km<sup>3</sup>
  - *Gletscher*:  $15.9 \cdot 10^6$  km<sup>2</sup>     $33 \cdot 10^6$  km<sup>3</sup>
  - *Permafrost*:  $21 \cdot 10^6$  km<sup>2</sup>     $4 \cdot 10^6$  km<sup>3</sup>
- $2\%$  des gesamten Wassers auf der Erde ist gefroren; beinhaltet  $80\%$  des Süsswasservorrates
- Änderung der globalen Schnee-/Eisverteilung hätte grossen Einfluss auf lokales/globales Klima

### Meereis:

- *Meereis* = schwimmt auf Wasser; kontrolliert Energiebilanz über Meeresfläche; wie Isolation; reduziert Energiefluss aus Meerwasser in kalte Atmosphäre darüber
- *Risse/Spalten* durch starke Spannungen
- *Polynya* = Stelle im Meer, wo Eis durch Risse/Spalten/Wind/Meeresströmungen ständig wegtransportiert und freie Wasseroberfläche zurückgelassen wird
- Arktis ↔ Antarktis

## Schnee:

- *Schnee* = beeinflusst stark lokales Klima
- Schneedecke:
  - hohe, aber stark variable *Albedo* ( $< 0.4-0.9$ ) → beeinflusst *globale Albedo* um **0.01**
  - verbraucht Energie zur *sommerlichen Schmelze*
  - *max. Ausdehnung* (= **59 Mio. km<sup>2</sup>**) im Februar = **12%** der Erdoberfläche
  - *min. Ausdehnung* (= **17 Mio. km<sup>2</sup>**) im Juli = min. Meereisbedeckung auf Nordhemisphäre

## Gletscher:

- Gletscher = in Gegenden, wo Schnee mehrere Jahre überleben kann:
  - *Antarktis*: **13.59\*10<sup>6</sup> km<sup>2</sup>** **30.11\*10<sup>6</sup> km<sup>3</sup>**
  - *Grönland*: **1.76\*10<sup>6</sup> km<sup>2</sup>** **2.65\*10<sup>6</sup> km<sup>3</sup>**
  - *Gebirgsgletscher*: **0.51\*10<sup>6</sup> km<sup>2</sup>** **0.05-0.11\*10<sup>6</sup> km<sup>3</sup>**
- *Fliessgeschw.* = einige m/a bis einige km/a
- in höheren Lagen überlebt Winterschnee → *Massegewinn* ⇔ *Masseverlust* ← in tieferen Lagen schmilzt auch älteres Eis
- Volumenänderung hat direkte Änderung des Meeresspiegels zur Folge; z.B. zur Zeit der *grössten Vergletscherung* (vor **20'000 a**): Meeresspiegel = **120 m** tiefer als heute
- Eisschilde bilden *hohe topograph. Erhebungen*, die allg. Zirkulation der Atmosphäre und reg. Wettergeschehen beeinflussen → kalte atmosphärische *Grenzschicht*, die als *Fallwind* die Hänge der Eisschilde/Gletscher hinunterströmt

## VI. Treibhauseffekt

### strahlungsaktive Bestandteile der Atmosphäre:

- *natürlicher* Treibhauseffekt ⇔ *anthropogene Verstärkung* des Treibhauseffektes
- *globale Energiezufuhr* durch mittl. Strahlungsfluss der Sonne und Albedo der Erde bestimmt
- *effektive Temp.* = **-15°C**; in Praxis aber höher, da *Treibhauseffekt* Strahlungsbilanz an Erdoberfläche modifiziert
  - *langwellige Gegenstrahlung* aus Atmosphäre v.a. vom Wasserdampf wegen seinen breiten Absorptionsbanden
  - *latenter Energiefluss* durch Verdunstung/Kondensation von Wasser

### Kohlenstoffkreislauf:

- 2 Arten von Kohlekreisläufen:
  - Kreislauf zw. *Atmosphäre und Biosphäre* = auf Land und in Mischungsschicht der Ozeane; hohe Flussraten, kurze Verweilzeiten
  - Kreislauf von Kohle zw. *erstem Kreislauf und tiefer Lithosphäre* = kleinere Flussraten, sehr lange Verweilraten in Lithosphäre (Mio. a): Auflösung der Kohle (= CO<sub>2</sub>) in Atmosphäre durch Regenwasser → Transport der Kohlensäure in Erde/Gesteine/Flüsse → Verwitterung von Silikaten → Transport der Verwitterungsprodukte ins Meer → Einbau der gelösten Kohle in Kalkschalen durch Mikroorganismen → Sedimentation nach Tod der Organismen in Lithosphäre → Transport der Kohle aus Lithosphäre in Atmosphäre durch Vulkanismus oder Abbau/Förderung
- Erdradius = **6'350 km** → Erdoberfläche = **5.07\*10<sup>8</sup> km<sup>2</sup>**
- mittl. Atmosphärendruck am Erdboden = **10<sup>5</sup> N/m<sup>2</sup>** → Masse der Atmosphäre = **5\*10<sup>15</sup> t**
- CO<sub>2</sub>-Konzentration = **360 ppm** → CO<sub>2</sub>-Gehalt = **1.8\*10<sup>12</sup> t**
- Ozeane/Biosphäre = *Senke* für CO<sub>2</sub>
- *indirekte Kohlenstoffemission* durch Vernichtung von Biomasse

### Klimamessreihen:

- Schätzung der Zunahme von langwelliger Gegenstrahlung: **4-5 W/m<sup>2</sup>** → Temp.erhöhung der Atmosphäre → erhöhte langwellige Strahlung der Atmosphäre um ca. **4 W/m<sup>2</sup>**
- Rückkopplung wegen erhöhten Wassergehaltes in wärmerer Atmosphäre → **+ 4 W/m<sup>2</sup>**
- diese Zunahme in **50 a** → Wachstum der langwelligen Gegenstrahlung = **1 W/m<sup>2</sup> pro 3 a**
- Steigung des Meeresspiegels in den letzten **100 a** = **12 cm**

## Geschichte des Klimas

### Entstehung der Atmosphäre:

- Zerfall eines riesigen *Gasnebel* durch kleine räuml. Unterschiede der Dichte in versch. Teile → unter eigener Schwerkraft kollabiert → rotierender *präsolarer Gasnebel* mit Sonne als Zentrum → weiterer Zerfall des solaren Gasnebels: innen (= wärmer) zu *Staub*, aussen (= kälter) zu „*Schneeflocken* → grössere Teile durch *Akkretion* (= Zus.stoss/-kleben): *Planetesimale* (= Vorläufer der Planeten) → Einfangen von kleineren Teilen → Säuberung des Raums → Planeten
- *erste Atmosphäre* in früher Phase der Akkretion: Wasserstoff, Helium → verschwand, da zu leicht
- *leichtflüchtige Substanzen* (= Wasser, Kohlendioxid, Methan, Stickstoff) durch Meteoriten/Kometen auf Erde gebracht → Aufheizung der Erde durch *Einschlagsenergie* → *Absinken* der schweren Bestandteile (= Metalle) ins Erdzentrum → *Gesteine* bildeten äussere Schichten, *Gase* bildeten dichte Atmosphäre, Oberfläche aus *Magmaozean* (> 1'500 K)
- *Abkühlung* der Atmosphäre nach Akkretion → *Kondensation* des Wasserdampfs → *heisser Ozean* (= 500-600 K), Atmosphäre = *Decke* → *Treibhauseffekt* der Atmosphäre (= v.a. Kohlendioxid) dominiert → weitere *Abkühlung* durch Auflösen des Kohlendioxids im Ozean und Sedimentation von Karbonaten
- 2 stabile Extremzustände:
  - *externes Treibhaus* (wie Venus)
  - *Eishaus* (wie Mars): Energiebilanzmodellierung durch Albedo-Rückkoppelungsmodell
- zu Beginn:
  - effekt. Temp. = sehr tief (< 200 K)
  - Albedo der Wolkendecke = hoch
  - Helligkeit der Sonne = 30% kleiner als heute

### Klima des Präkambrium (4.5 Mia.-570 Mio. a):

- schwierige Rekonstruktion, da die meisten Spuren verschwunden
- *Blualgen* = Spuren des ersten Lebens auf der Erde vor 3.8 Mia. a: Temp. unter 60-70°C
- erste grosse Vergletscherungen im späten Präkambrium (= Proterozoikum, 2.5 Mia.-570 Mio. a)

### Klimaentwicklung in Phanerozoikum (seit 570 Mio. a):

- Entwicklung *mehrzelliger Lebewesen* im Ozean und später an Land in Atmosphäre
- ähnliche Atmosphäre wie heute
- Zeiten mit Vergletscherungen und Warmzeiten
- Variationen des Meeresspiegels

### Klima der mittl. Kreidezeit (150-65 Mio. a):

- sehr mildes Klima
- Auflösung des Grosskontinents
- *Thetis-Ozean* in Ost-West-Richtung

### Klima des Neozoikums:

- allmähliche Abkühlung
- kürzerfristige Modulationen von Warm-/Kaltzeiten
- einsetzende Vergletscherung der Antarktis

### Eiszeitzyklen im Pleistozän:

- Entdeckung von 5 Eiszeiten durch *geomorphologische Spuren* (= Kratzer, Moränen, Findlinge)
- Vereisungen v.a. auf Nordhemisphäre
- Meeresspiegel ca. 120 m tiefer als heute, da seit damals Temp.anstieg
- Zyklen von Kalt-/Warmzeiten durch *spektrale Analyse* gezeigt

### Theorie der Eiszeiten:

- Zus.hänge durch numerische Modellrechnungen (= globale Klima-, Eisschildmodelle) untersucht
- Sonnenbestrahlung der Erde abhängig von Erd-Bahn um Sonne und Achse/Rate der Erdrotation
- *Perihellänge* = Jahreszeit des Periheldurchgangs
- *Milankovitch*: astronomische Theorie der Eiszeiten