

# *Steuert die Sonne das Erdklima ?*



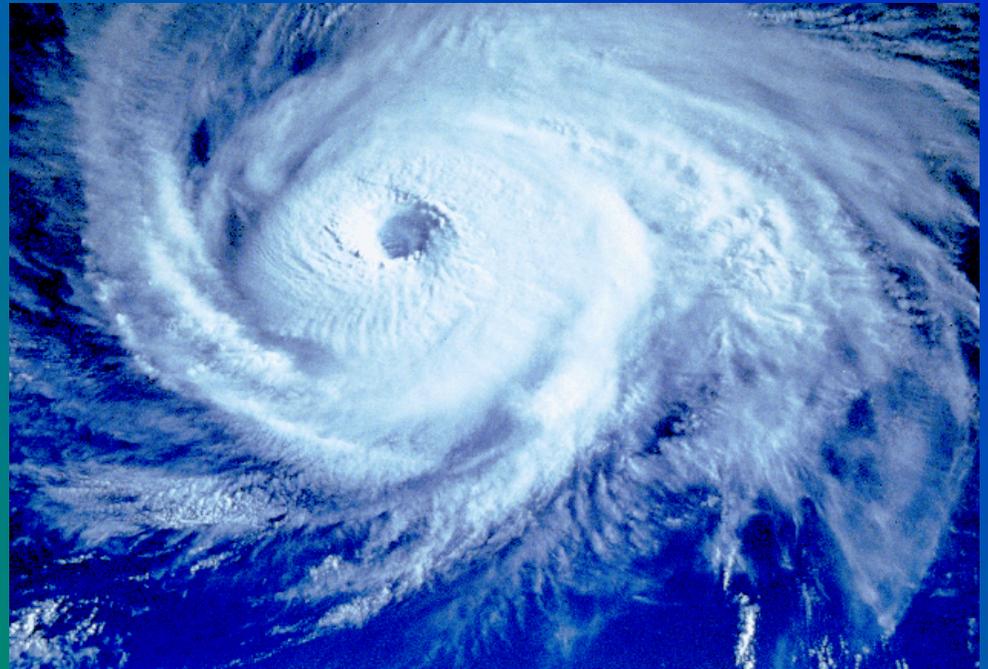
Manfred Schüssler

Max-Planck-Institut für  
Sonnensystemforschung

Katlenburg-Lindau

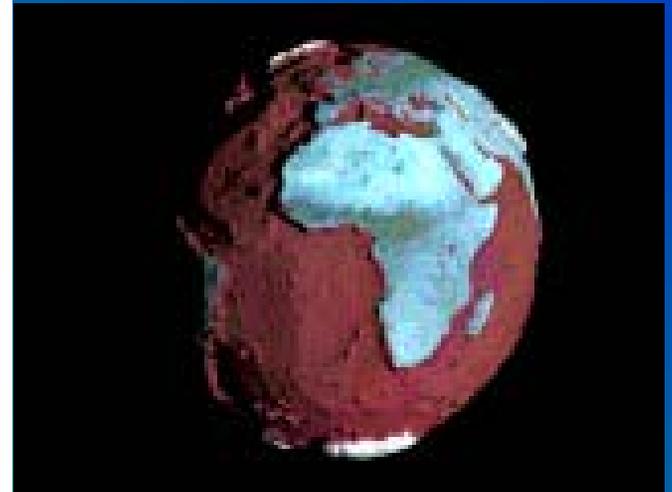
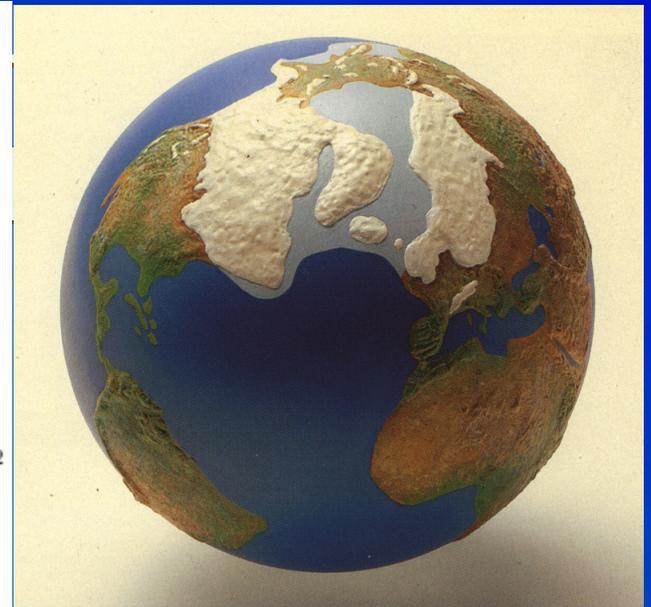
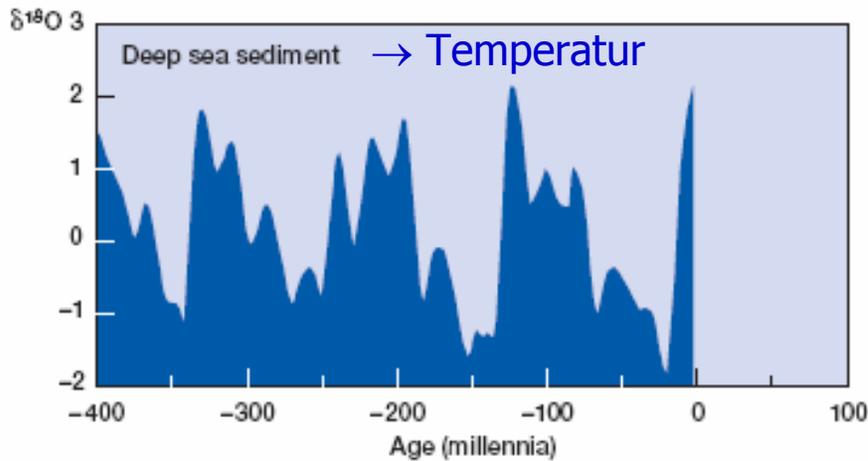
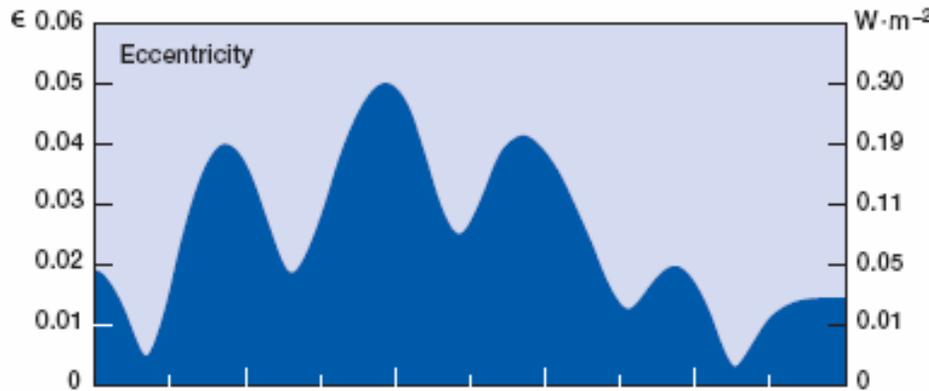
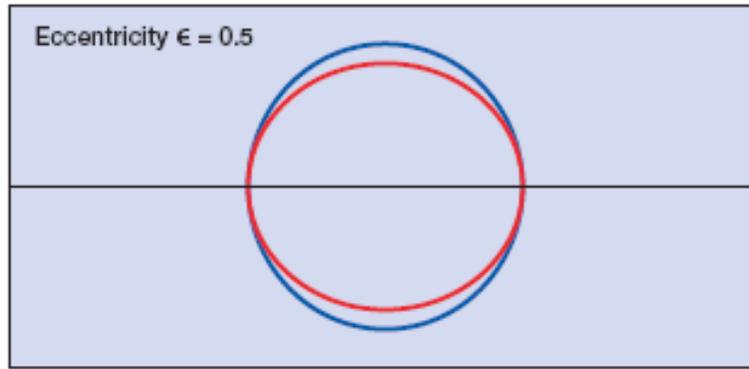
Göttingen, 6. Juni 2007

# Die Sonne als "Klima-Maschine"



Die Sonnenstrahlung als Wärmequelle treibt Winde und Meeres-Strömungen

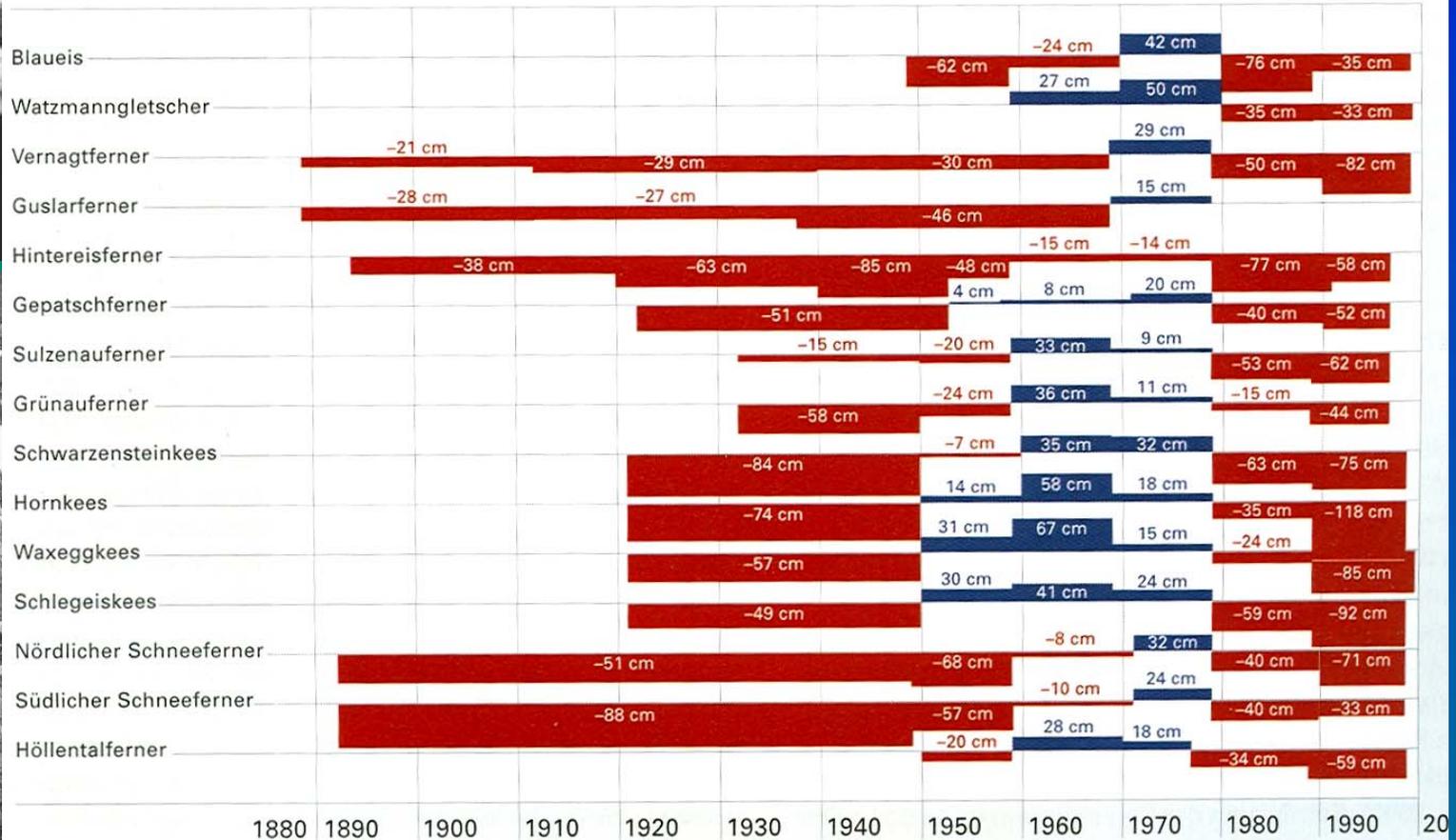
Zeit  
ein



en:  
Erdachse

# Globale Erwärmung im 20. Jahrhundert

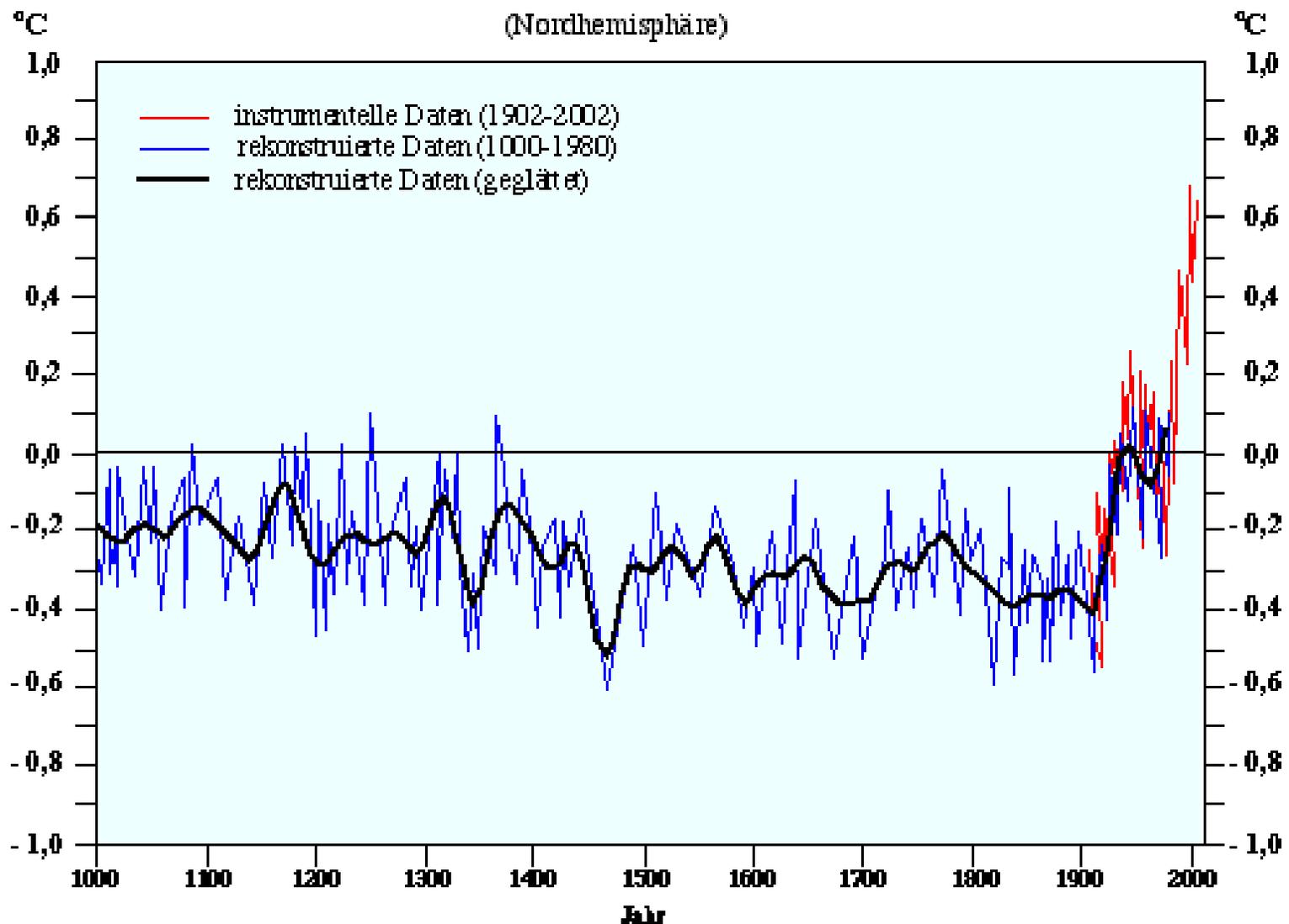
Abb. 2 Jährliche Höhenänderung ausgewählter Ostalpengletscher zwischen 1889 und 2000



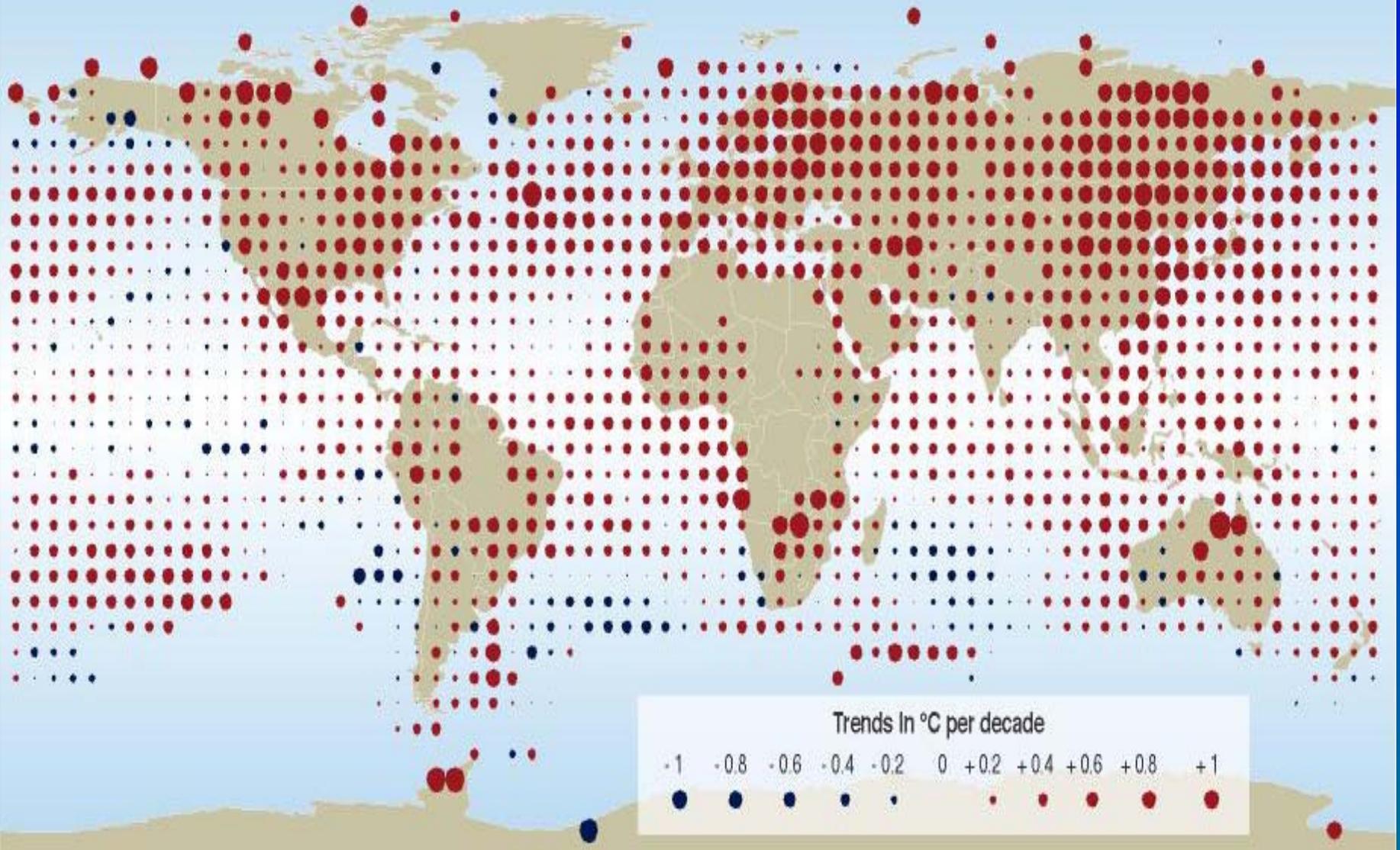
Quelle: Kommission für Glaziologie

# Die globale Erwärmung...

**Temperaturveränderung der letzten 1000 Jahre relativ zum Mittel 1961-1990**



# Annual temperature trends: 1976 to 1999



# ...und der Anstieg von CO<sub>2</sub> & Co.



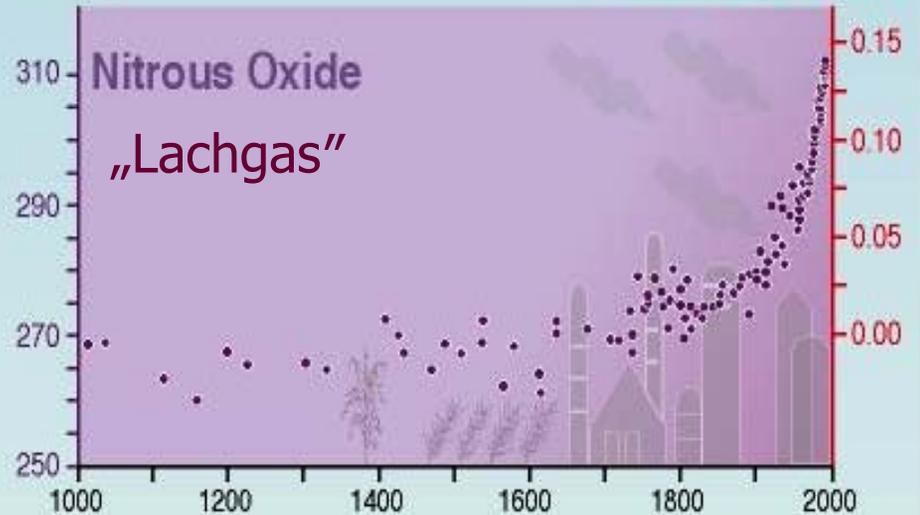
von Dioxid

CO<sub>2</sub>-Gehalt  
der Atmos



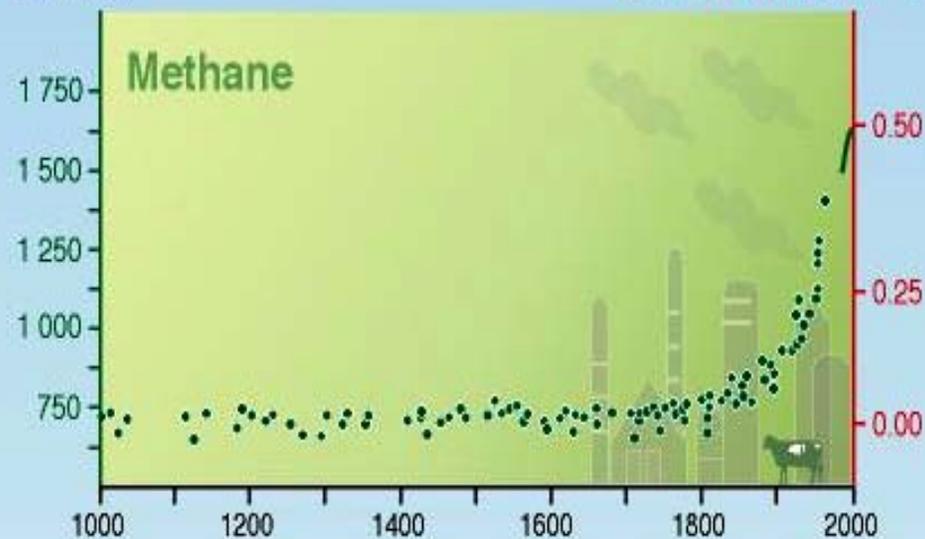
N<sub>2</sub>O (ppb)

Radiative forcing (Wm<sup>-2</sup>)



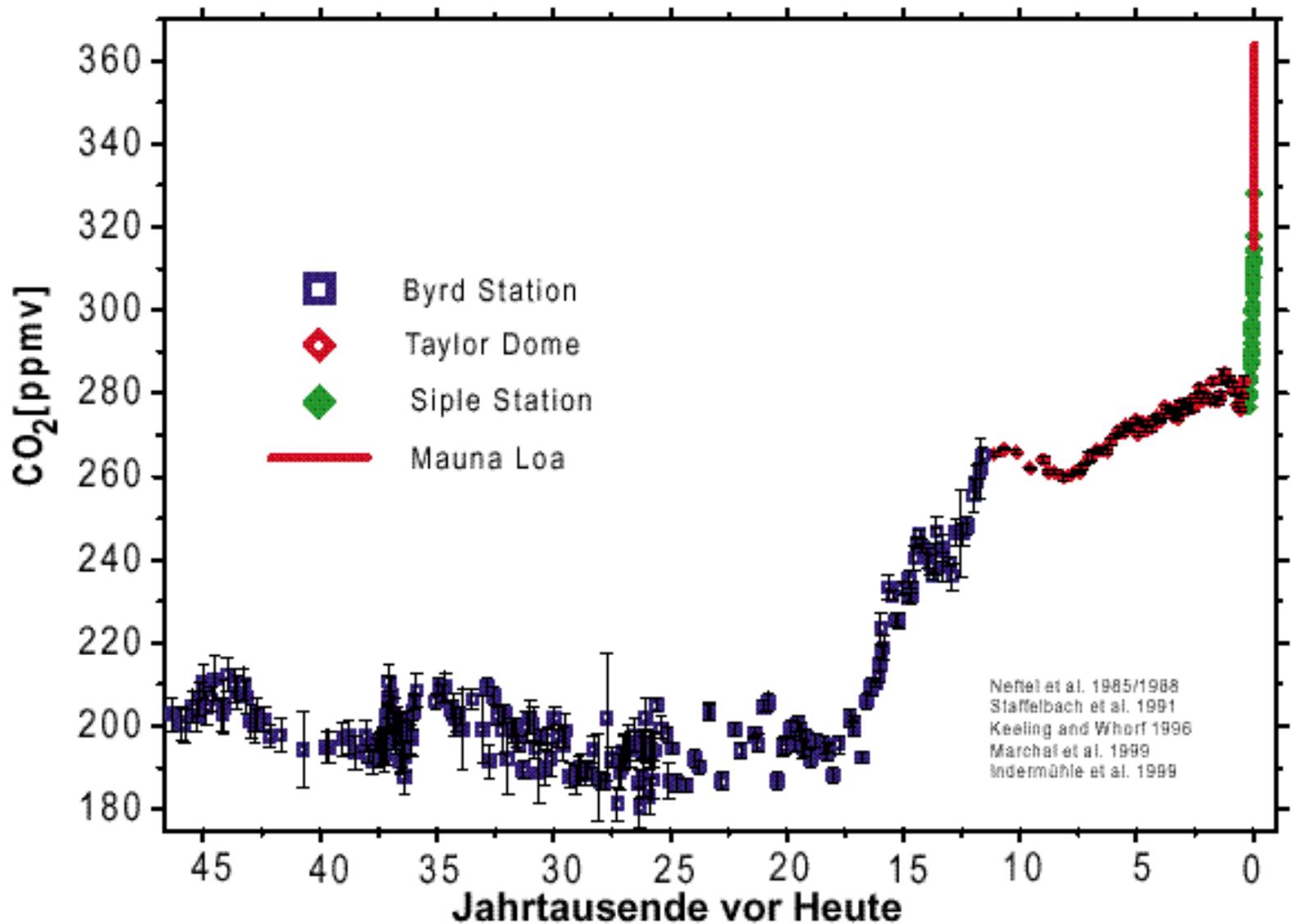
CH<sub>4</sub> (ppb)

Radiative forcing (Wm<sup>-2</sup>)

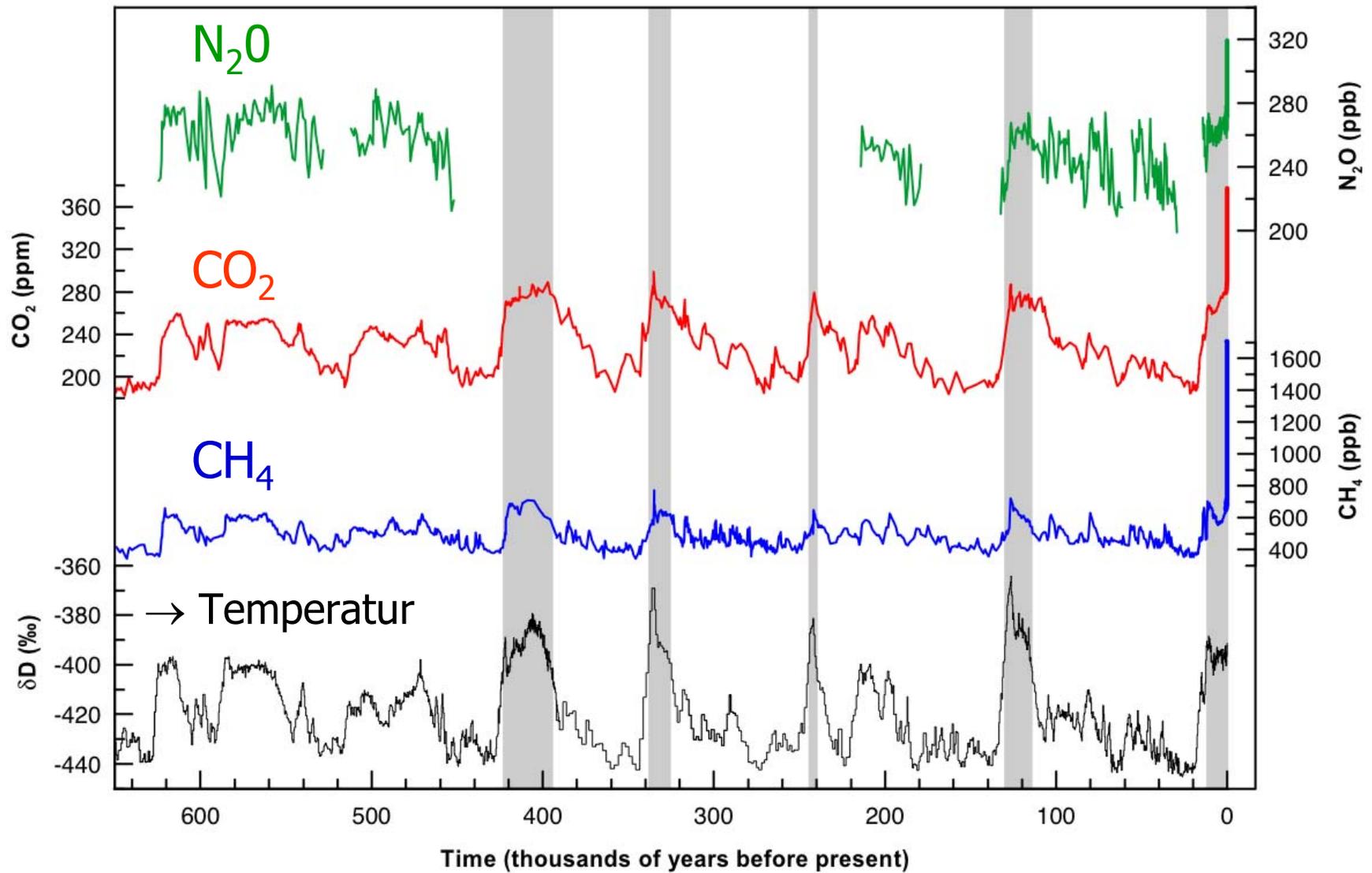


Im letzten Jahrhundert  
der Erdatmosphäre u

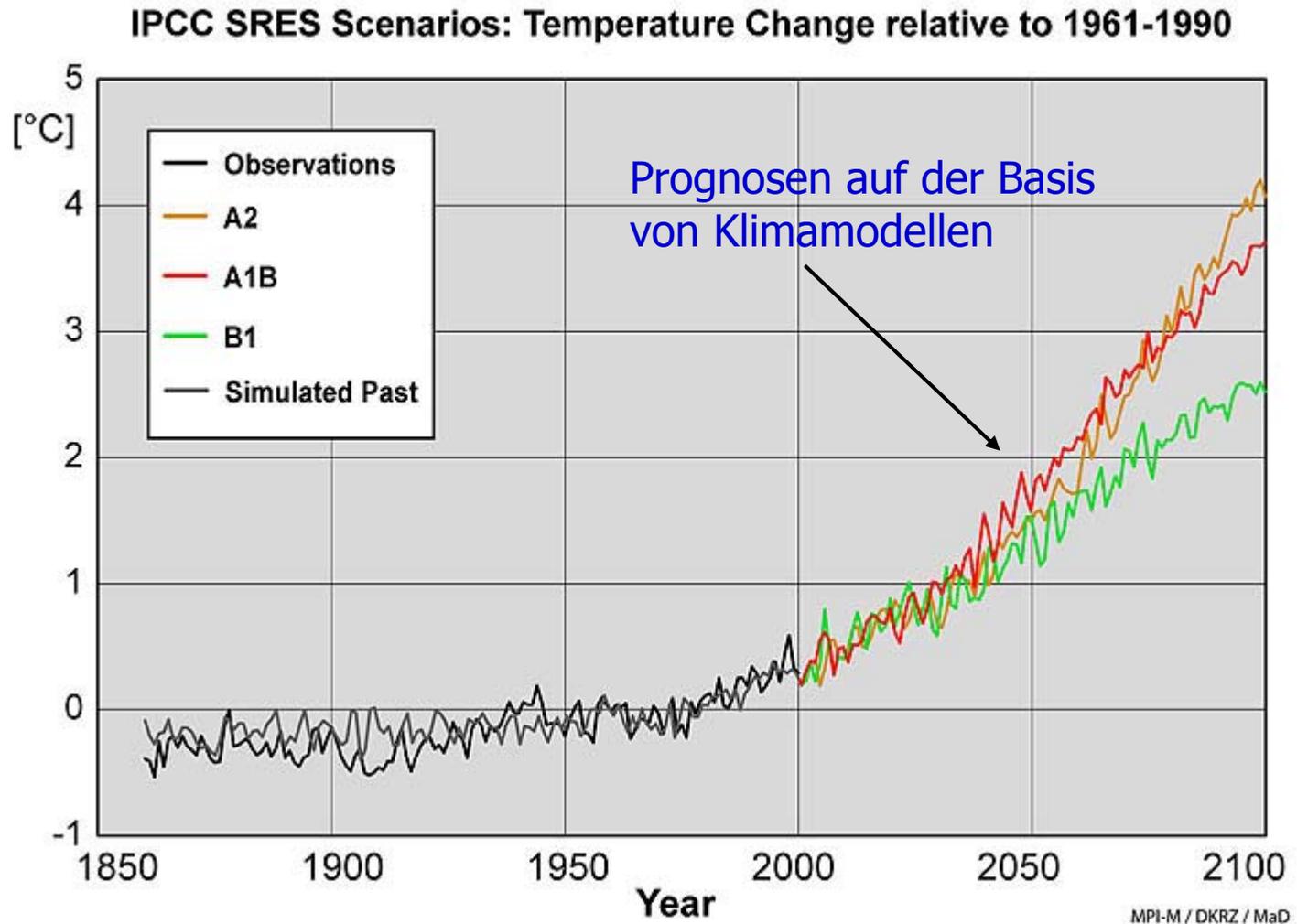
# Atmosphärische Kohlendioxid Konzentrationen von der letzten Eiszeit bis Heute



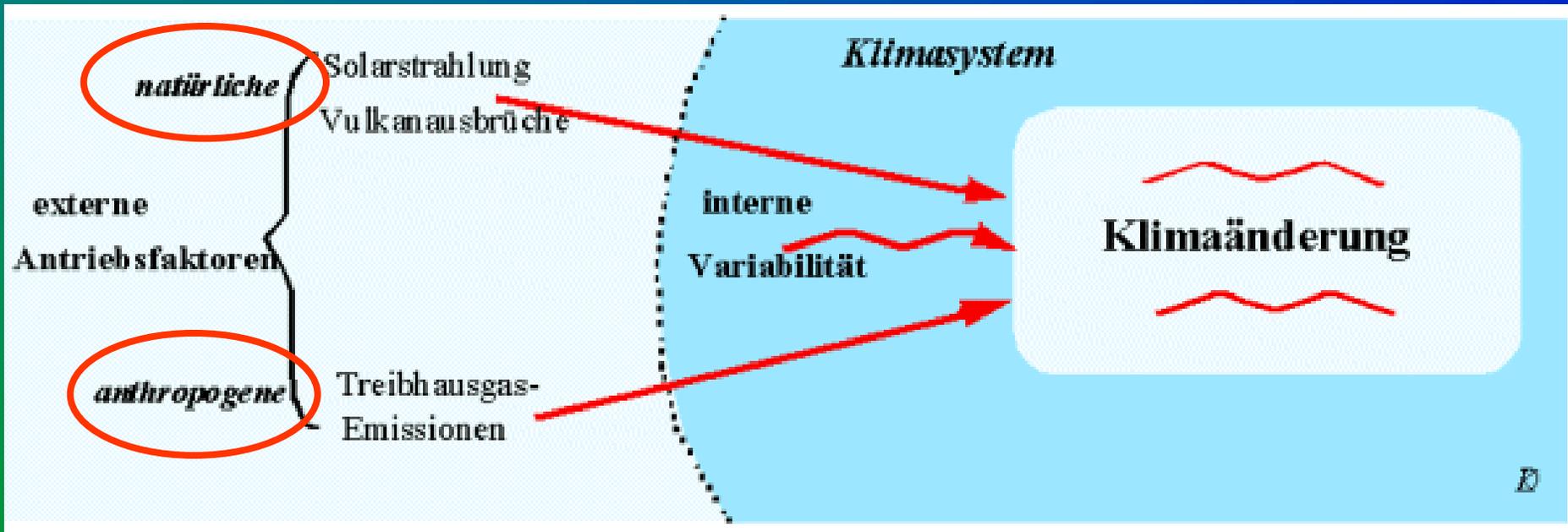
# Glacial-Interglacial Ice Core Data



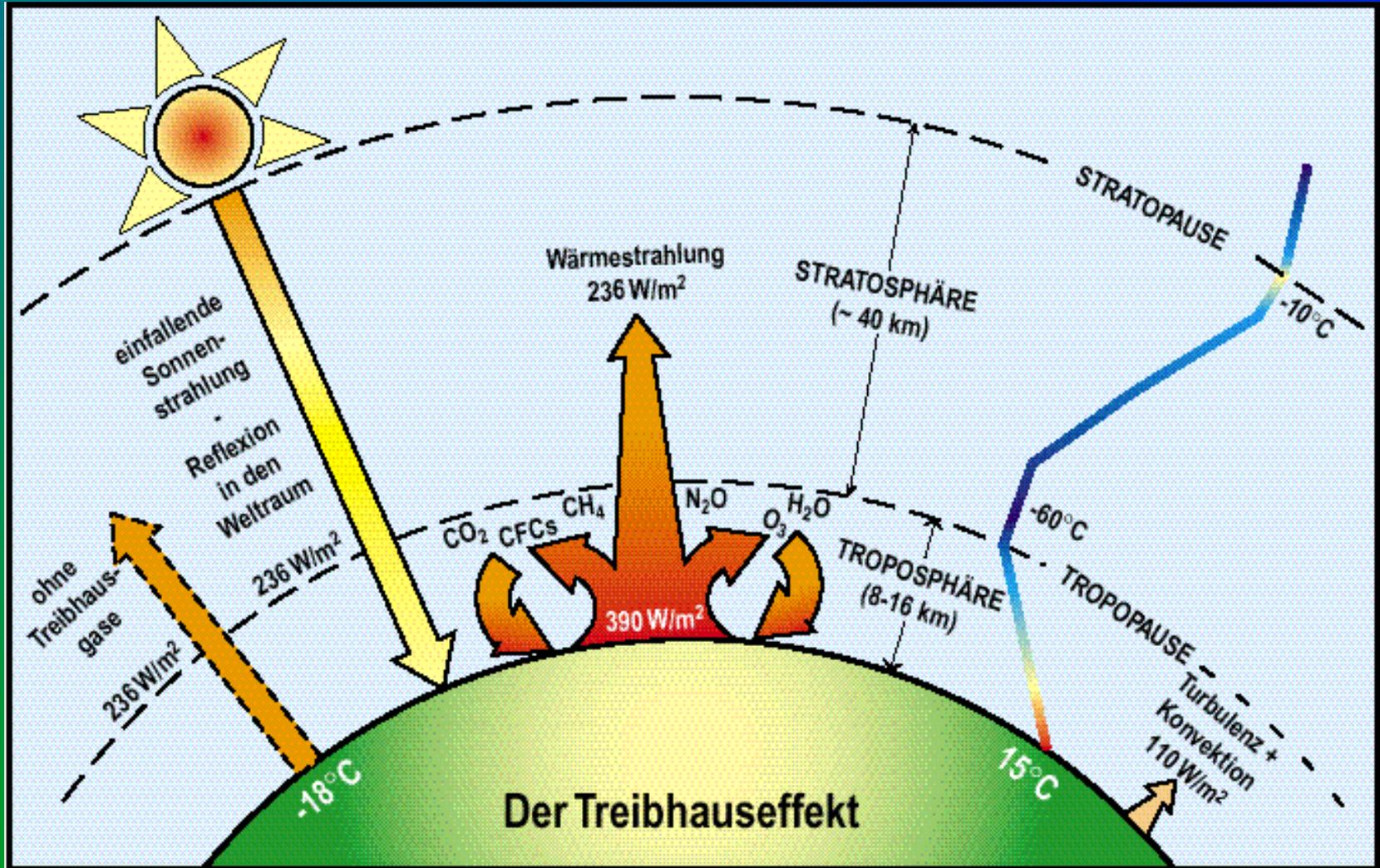
# ... und in der Zukunft ?



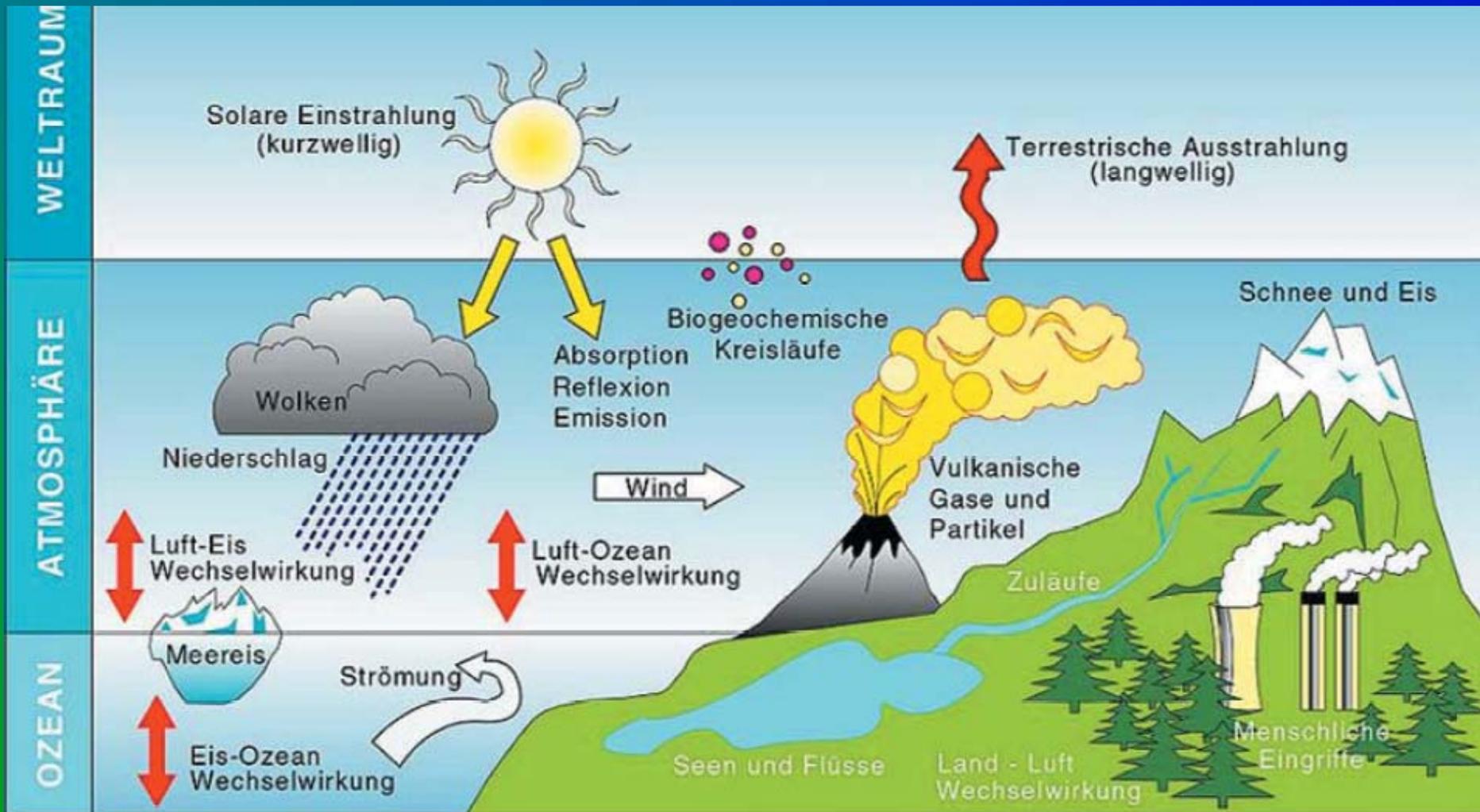
# Ursachen von Klimaänderungen



# Der Treibhauseffekt



# Das komplexe Klimasystem



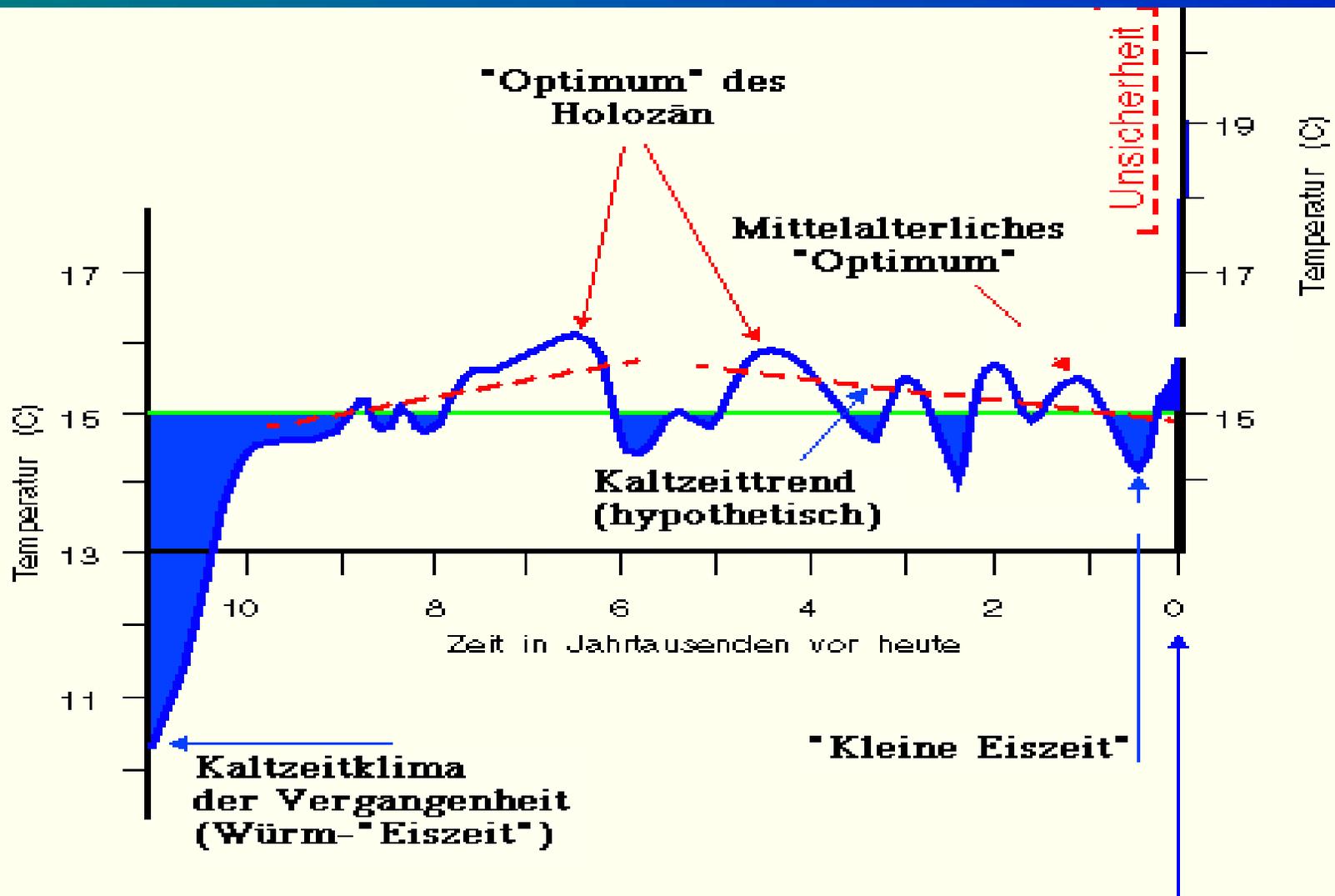
# Zweifel am Treibhauseffekt ?

der  
„an  
pro

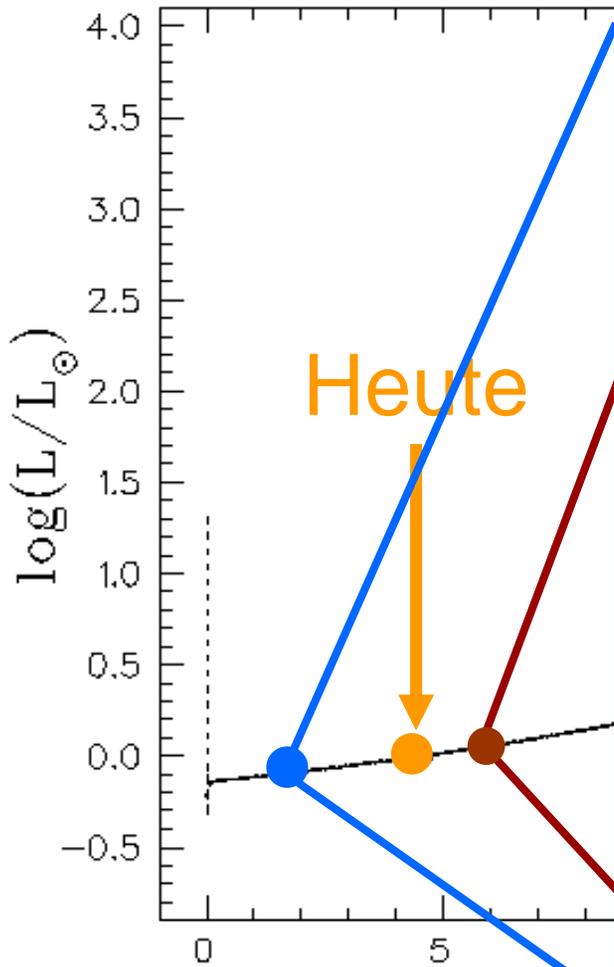


erprecht,  
der  
rand für  
die ist auch  
Ein Aus  
plan  
voraus \*

# Klimaschwankungen in der "jüngeren" Vergangenheit



# Ist die Sonne selbst veränderlich?

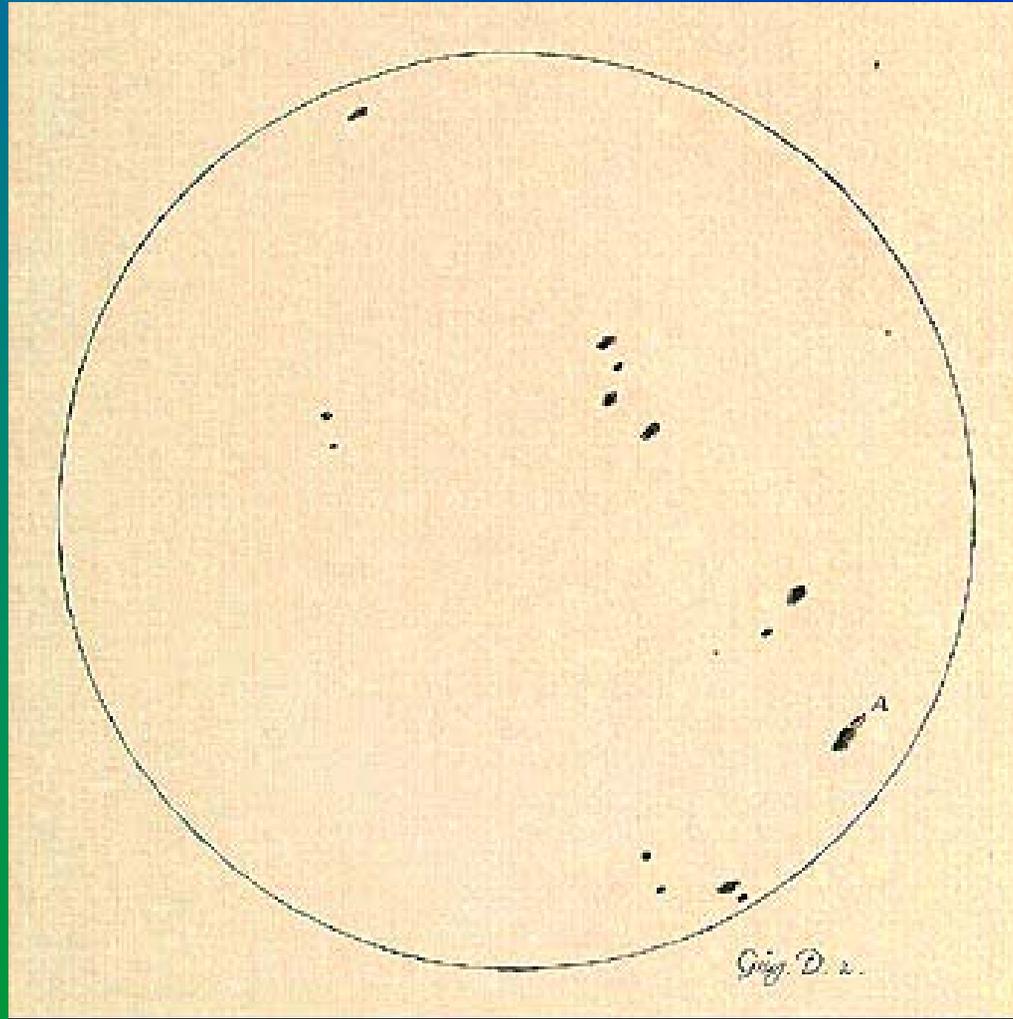


Die Vergangenheit der Erde?

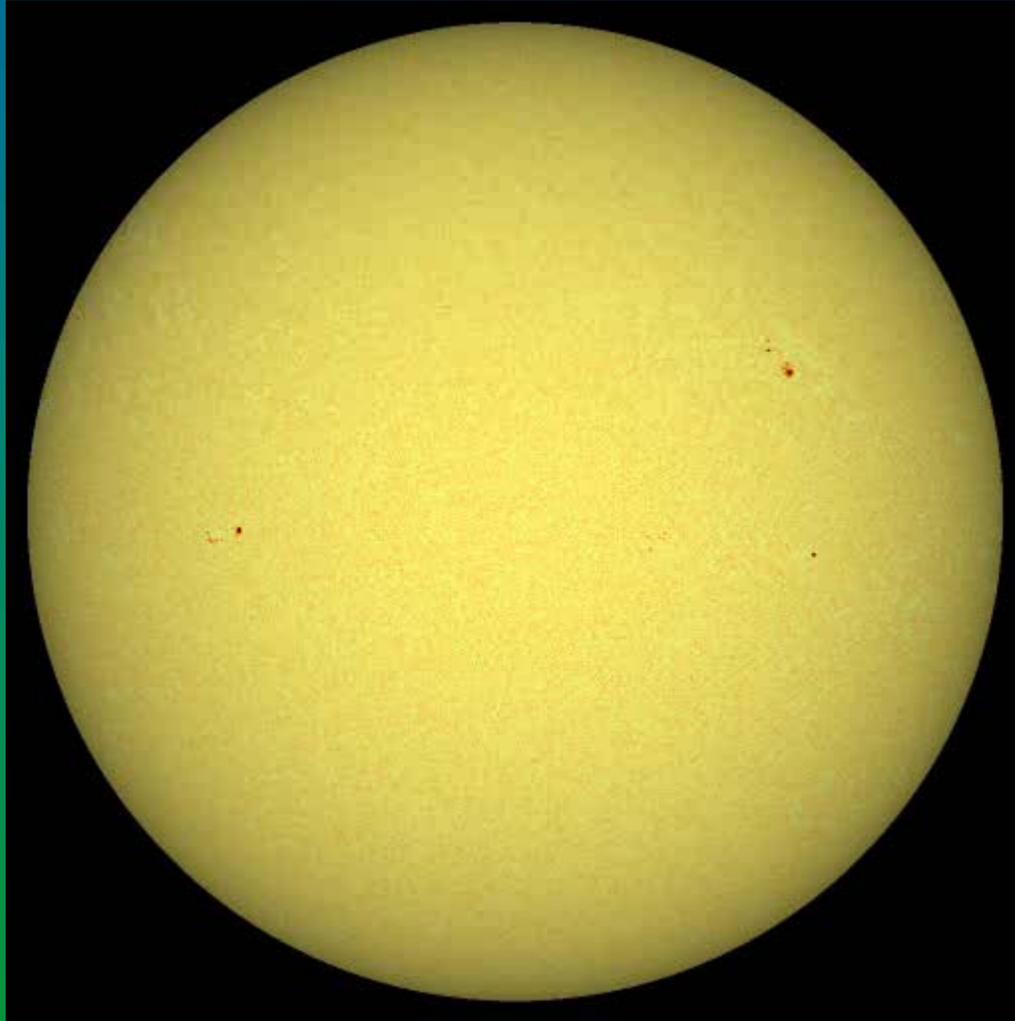
Sackmann et al. 1997

# Die Sonne ist verändert sich: sie hat Flecken!

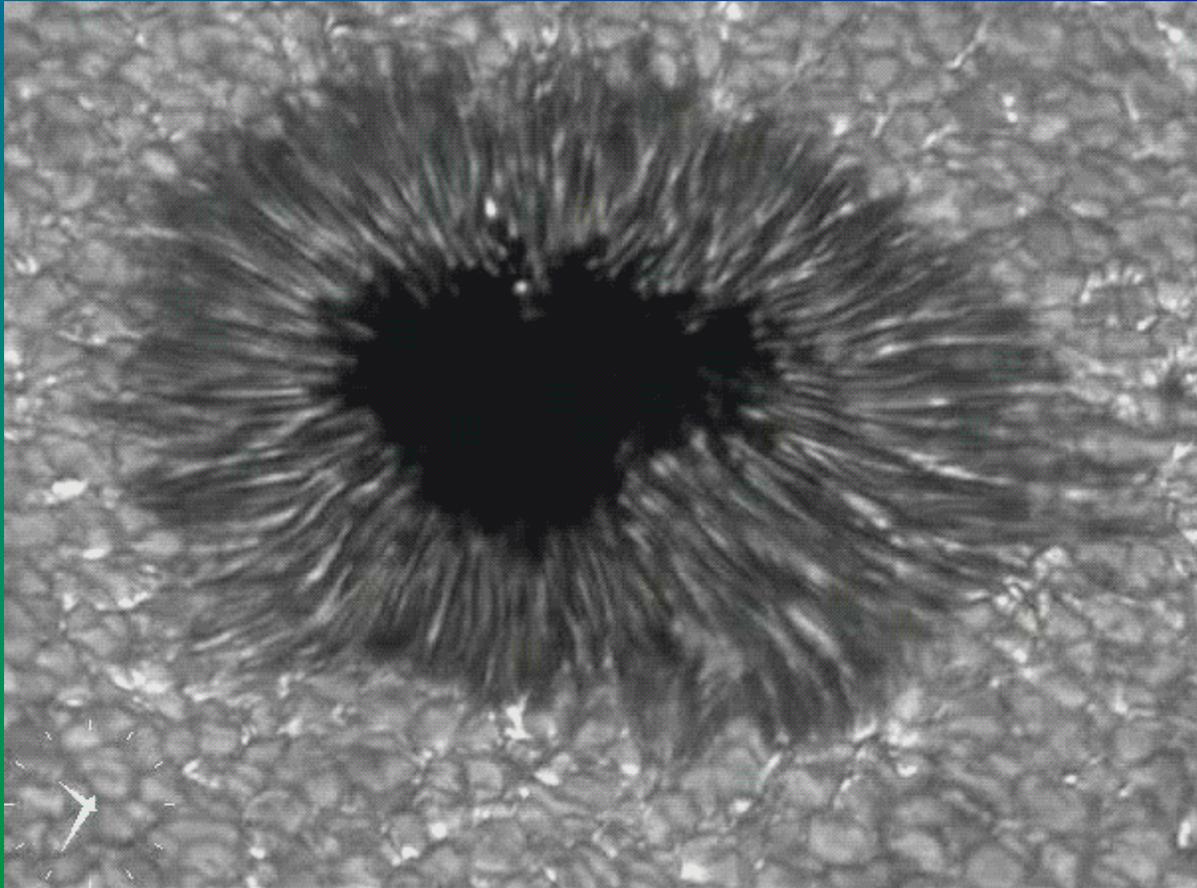
Beobachtet und gezeichnet von Galileo Galilei um 1620



# Sonnenflecken im Jahr 2001

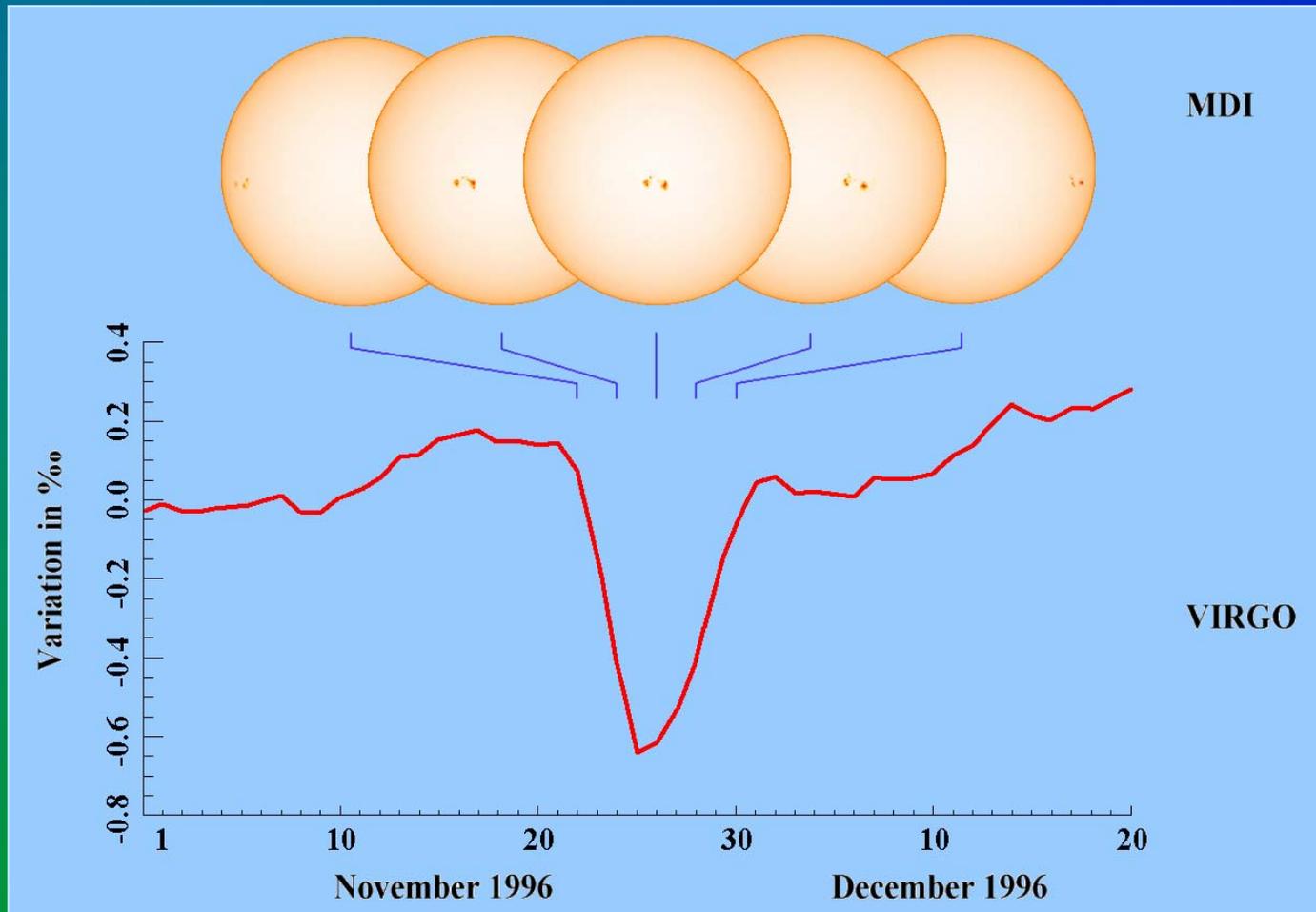


# Ein Sonnenfleck aus der Nähe



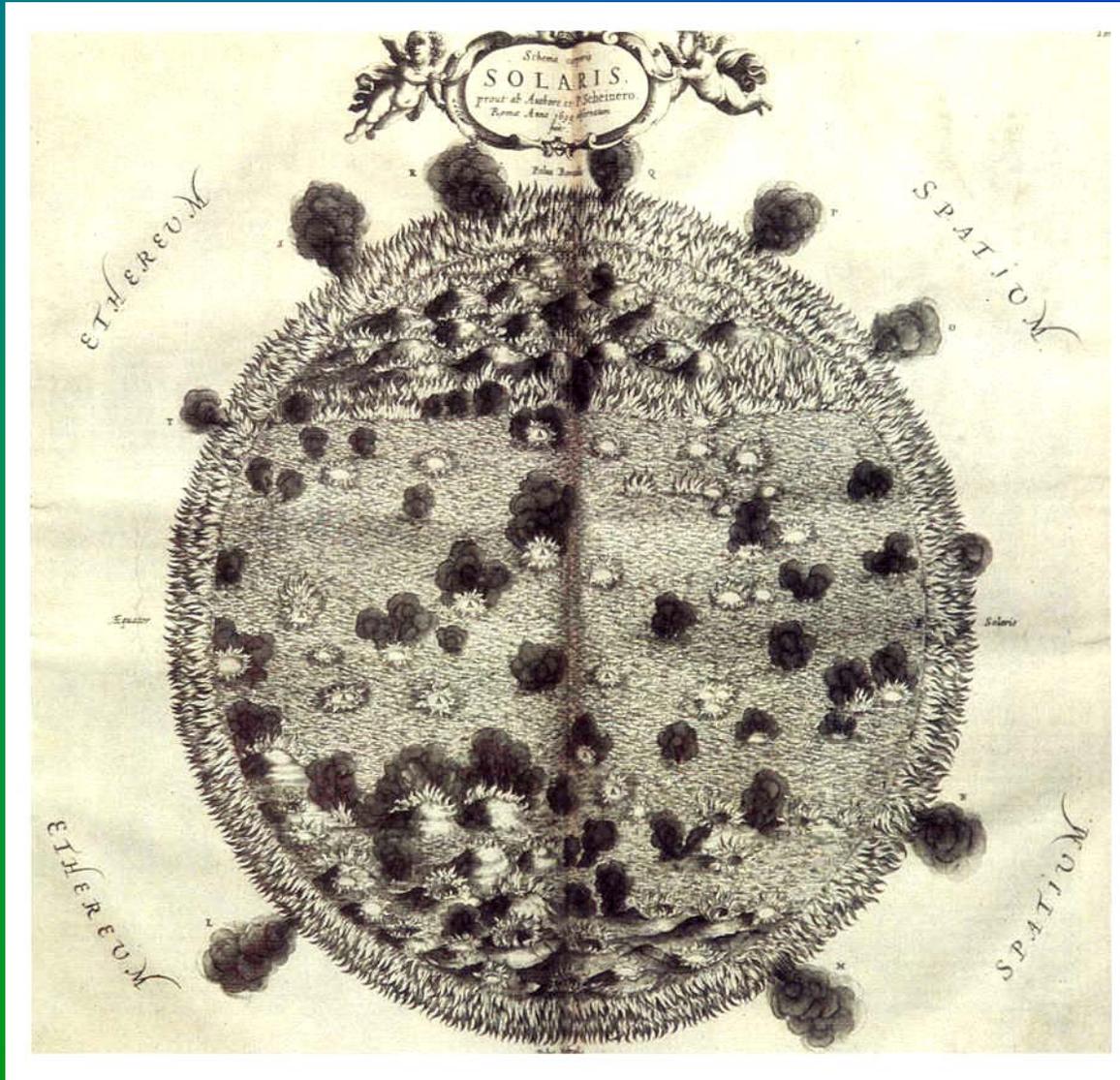
← ca. 30 000 km →

# Sonnenflecken und Sonnenhelligkeit



Die Sonne wird dunkler, wenn sie große Flecken hat

# Was sind Sonnenflecken ?

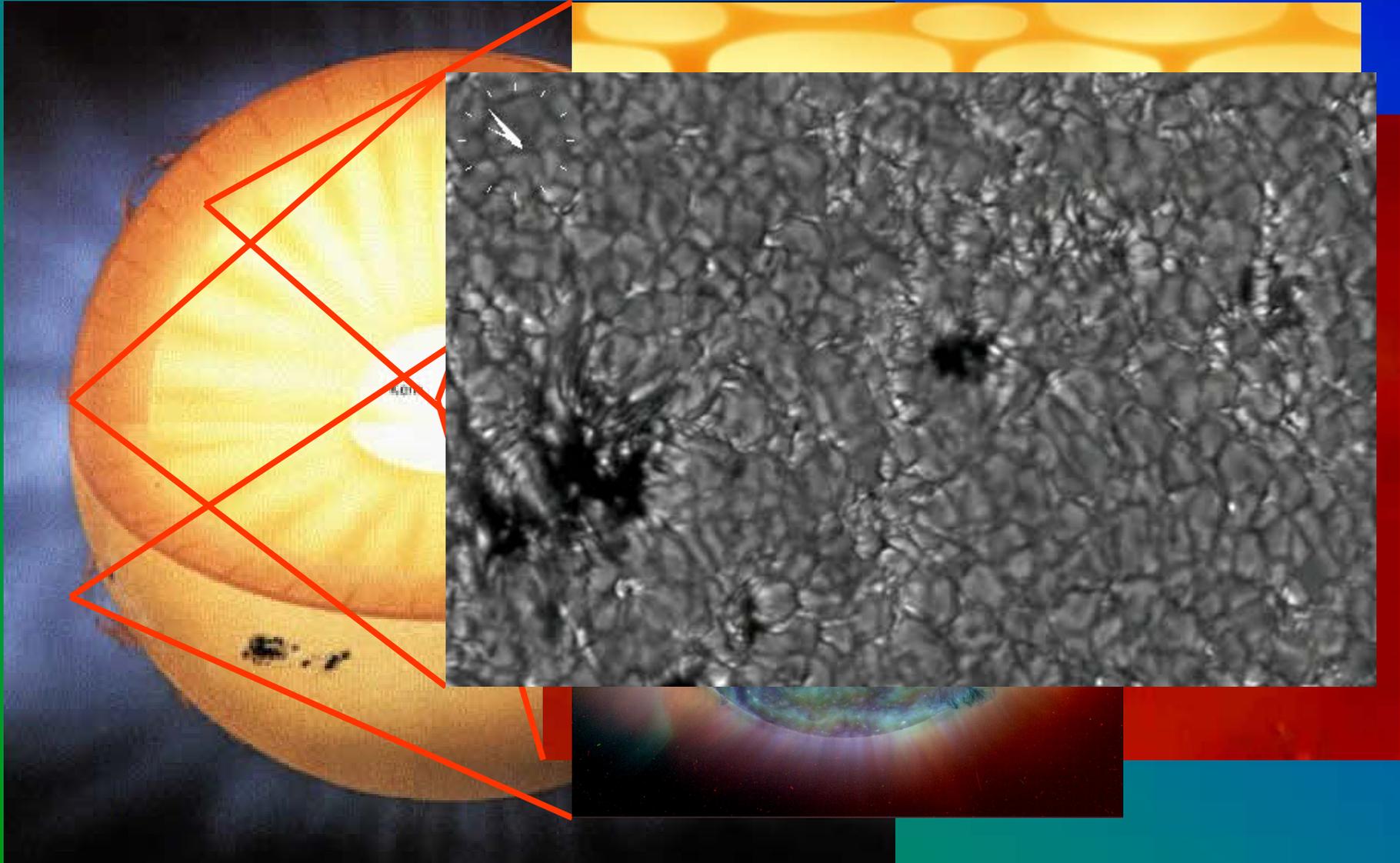


Rauchwolken ?

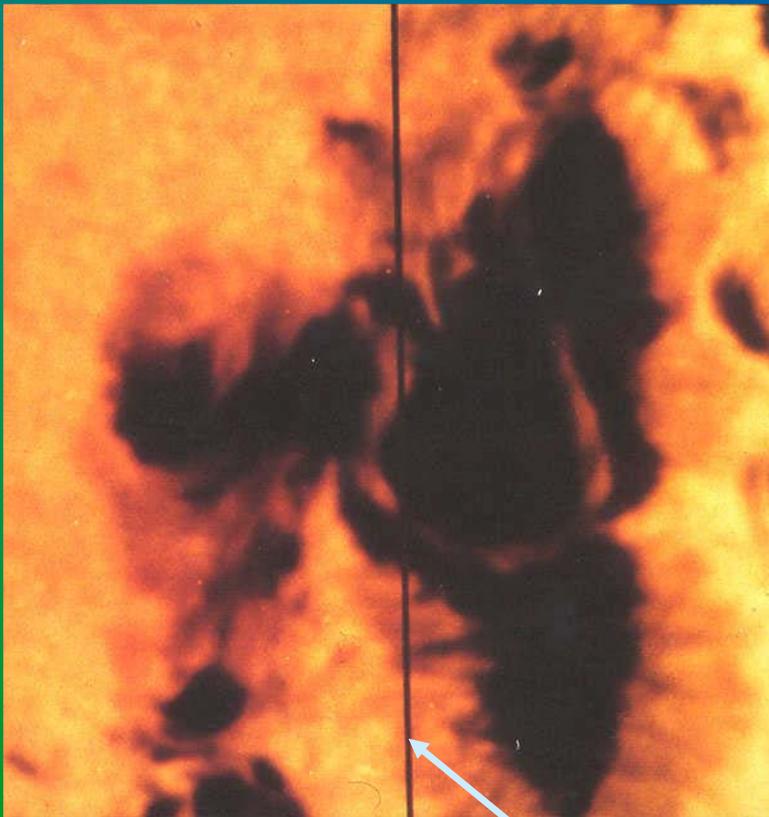
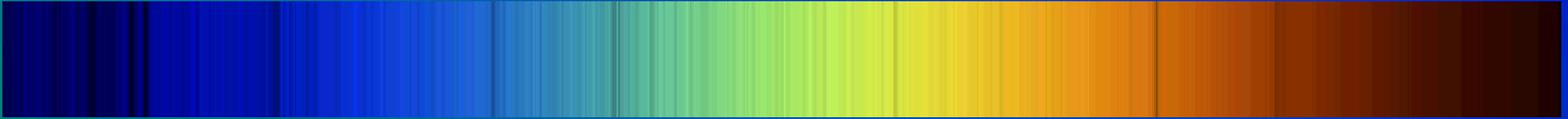
Löcher ?

Wirbelstürme ?

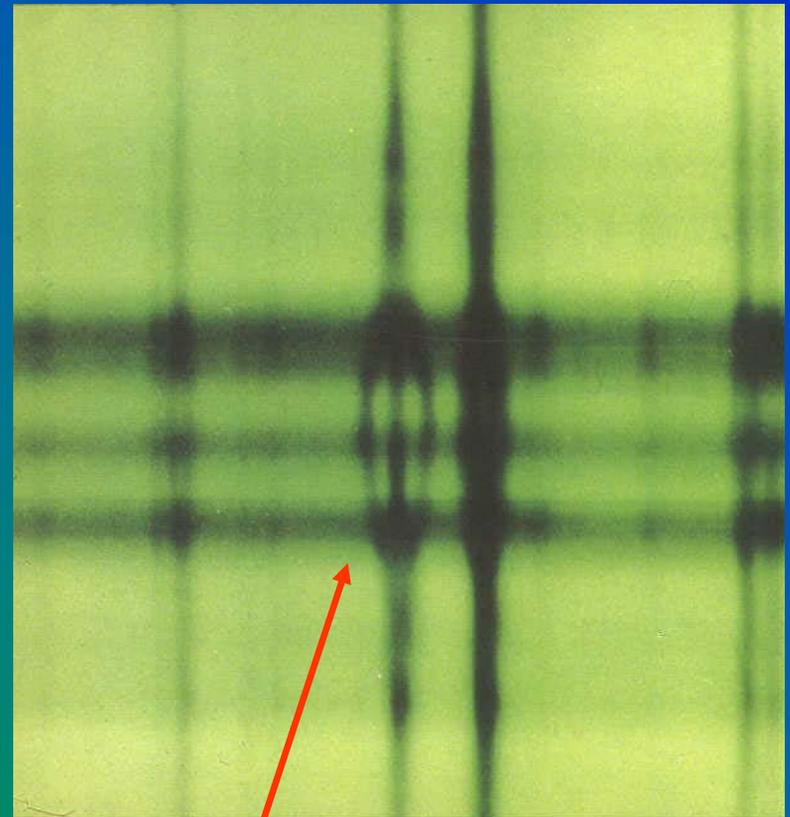
# Wie ist die Sonne aufgebaut?



# Sonnenflecken sind magnetisch

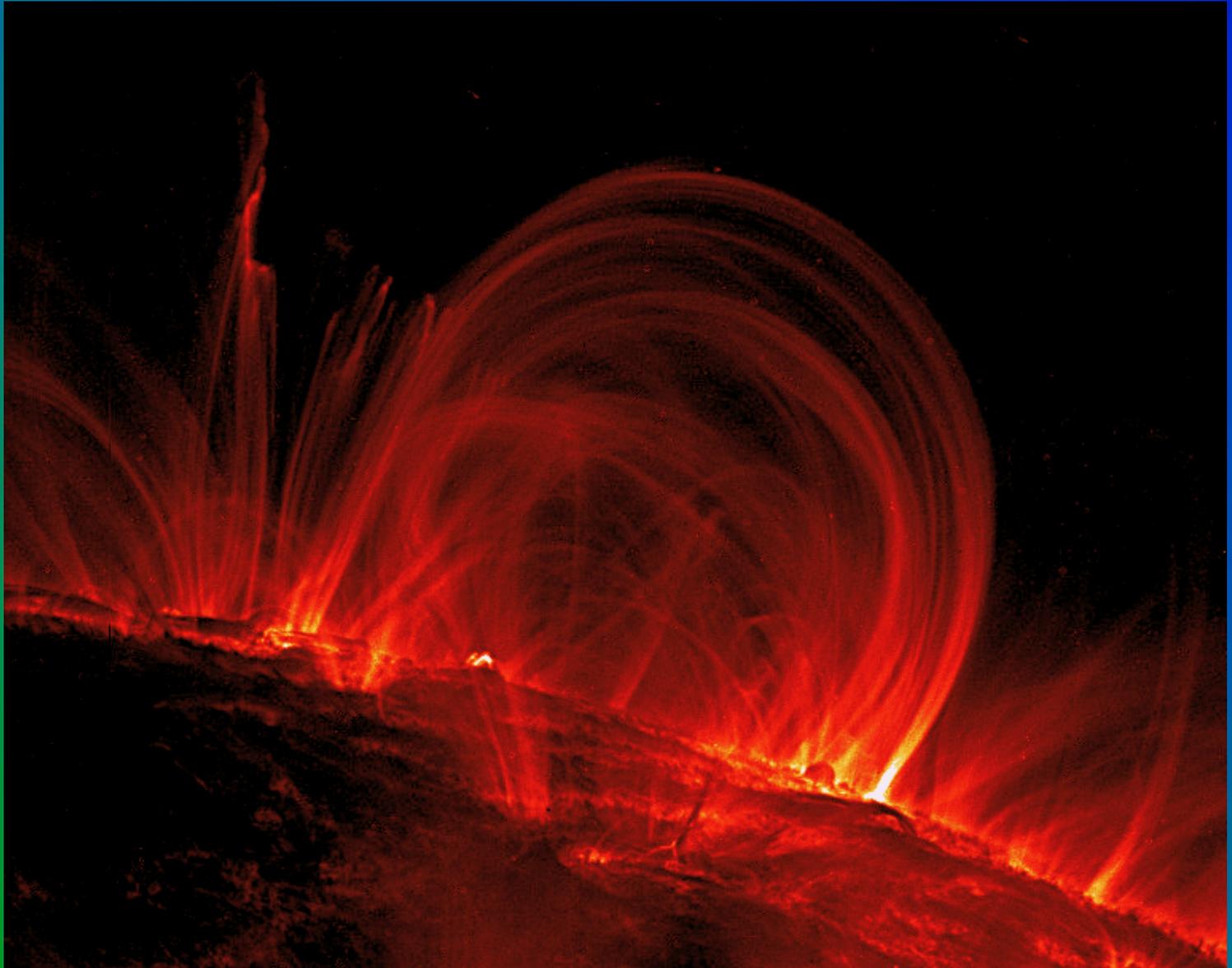


Sonnenfleck mit Spektrographenspalt

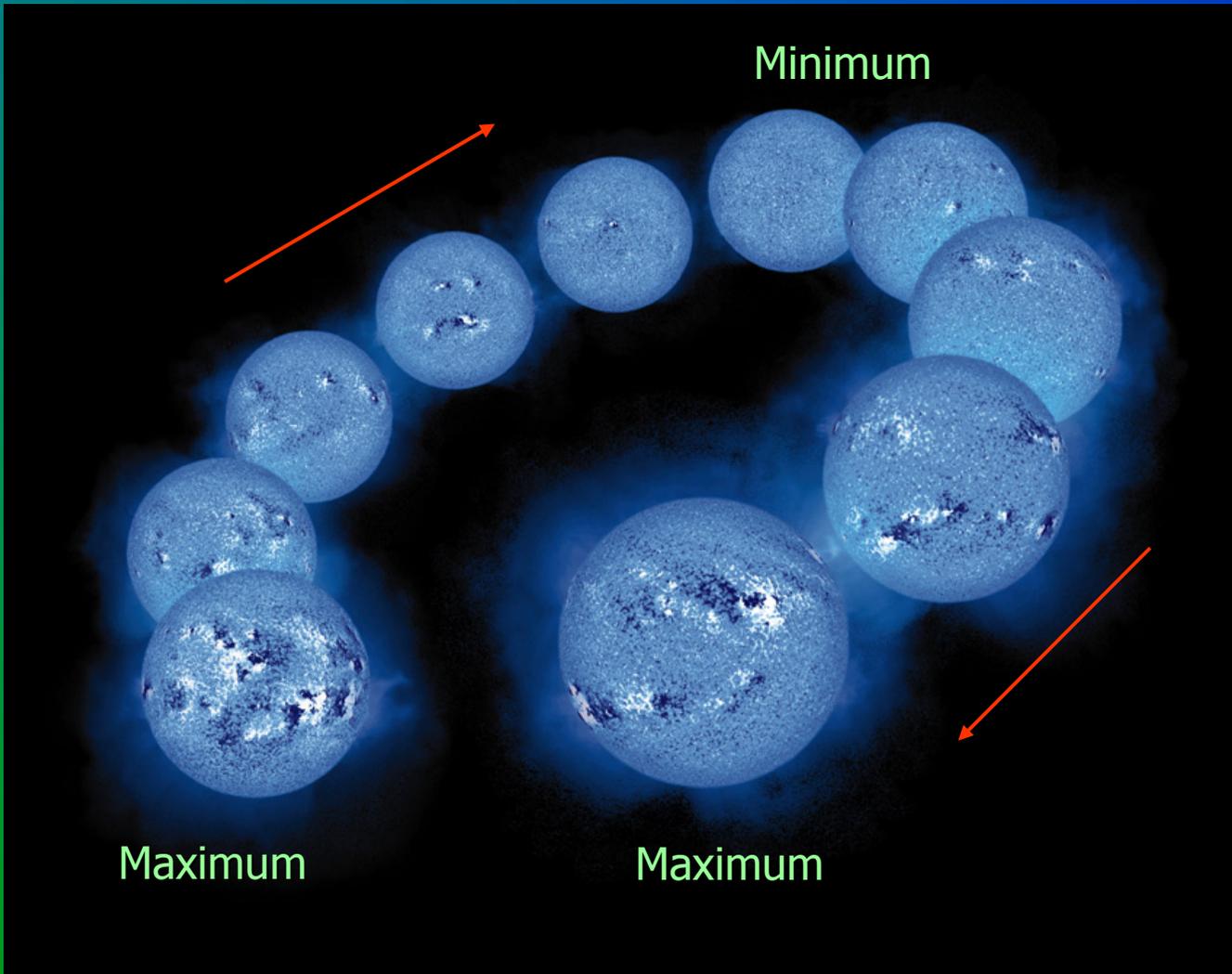


Durch das Magnetfeld  
aufgespaltene Spektrallinie

Heißes Gas zeichnet Feldlinien nach...

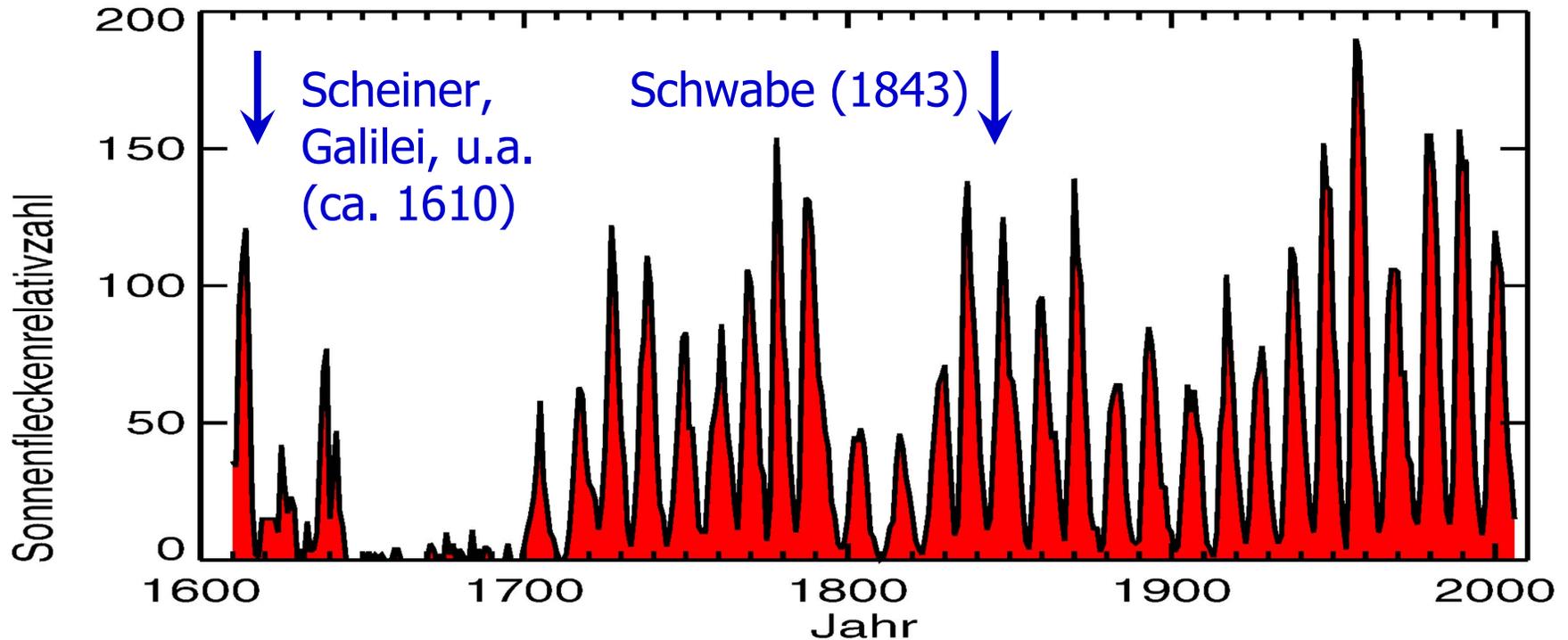


# Die veränderliche Sonne



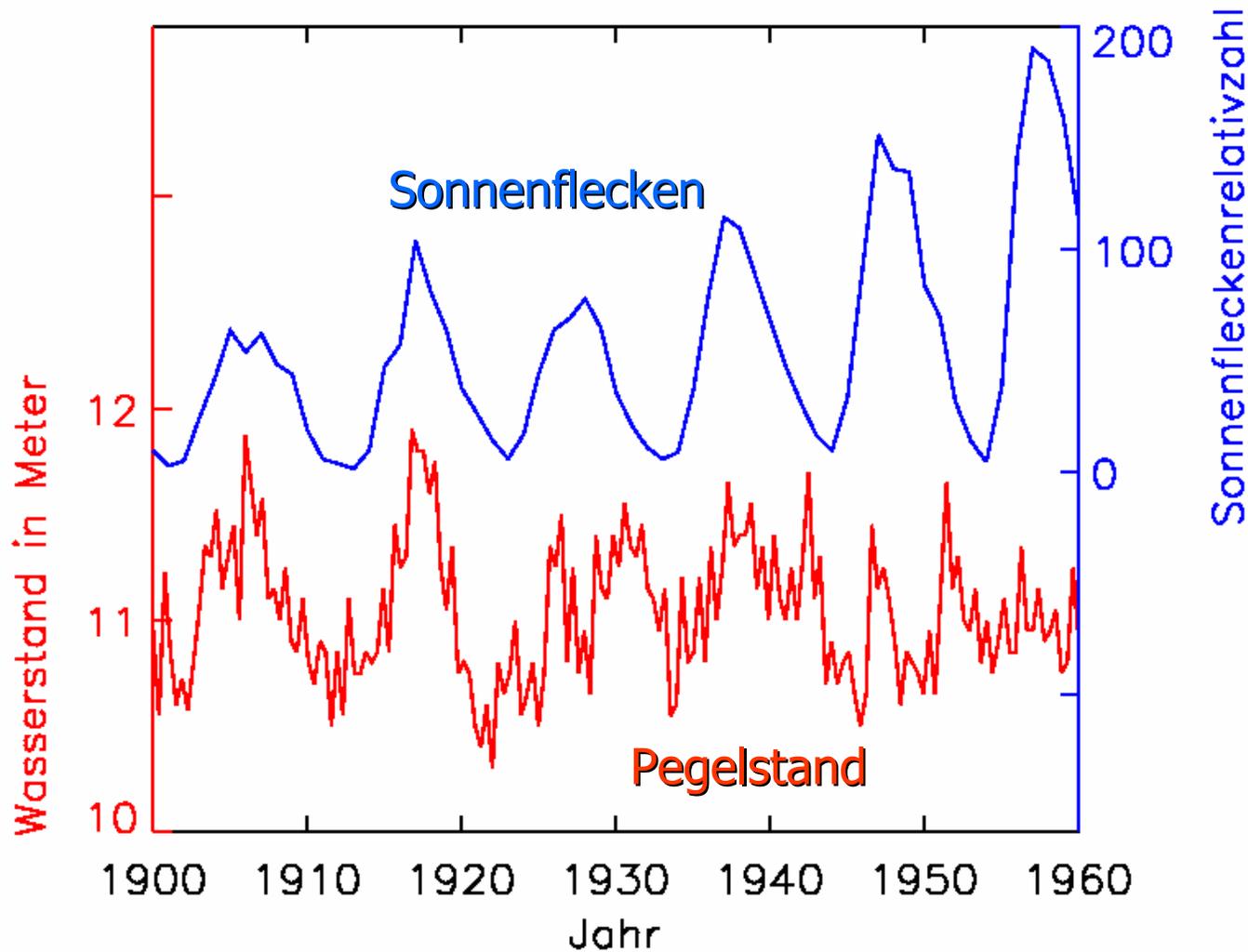
Die Aktivität der Sonne schwankt in einem etwa 11-jährigen Rhythmus

# Der 11-jährige Sonnenzyklus

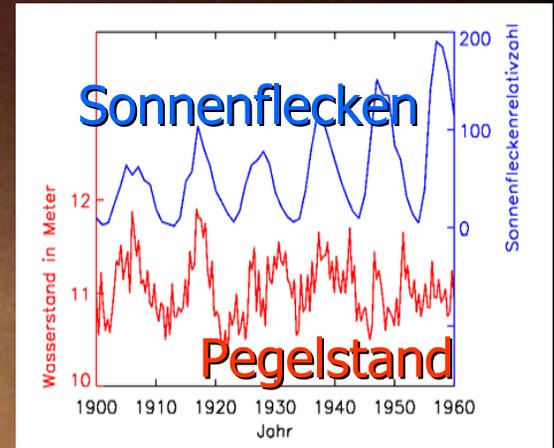


Die Aktivität der Sonne schwankt in einem Rhythmus von etwa 11 Jahren. Längerfristige Variationen sind diesem Zyklus überlagert.

# Der Wasserstand des Victoria-Sees

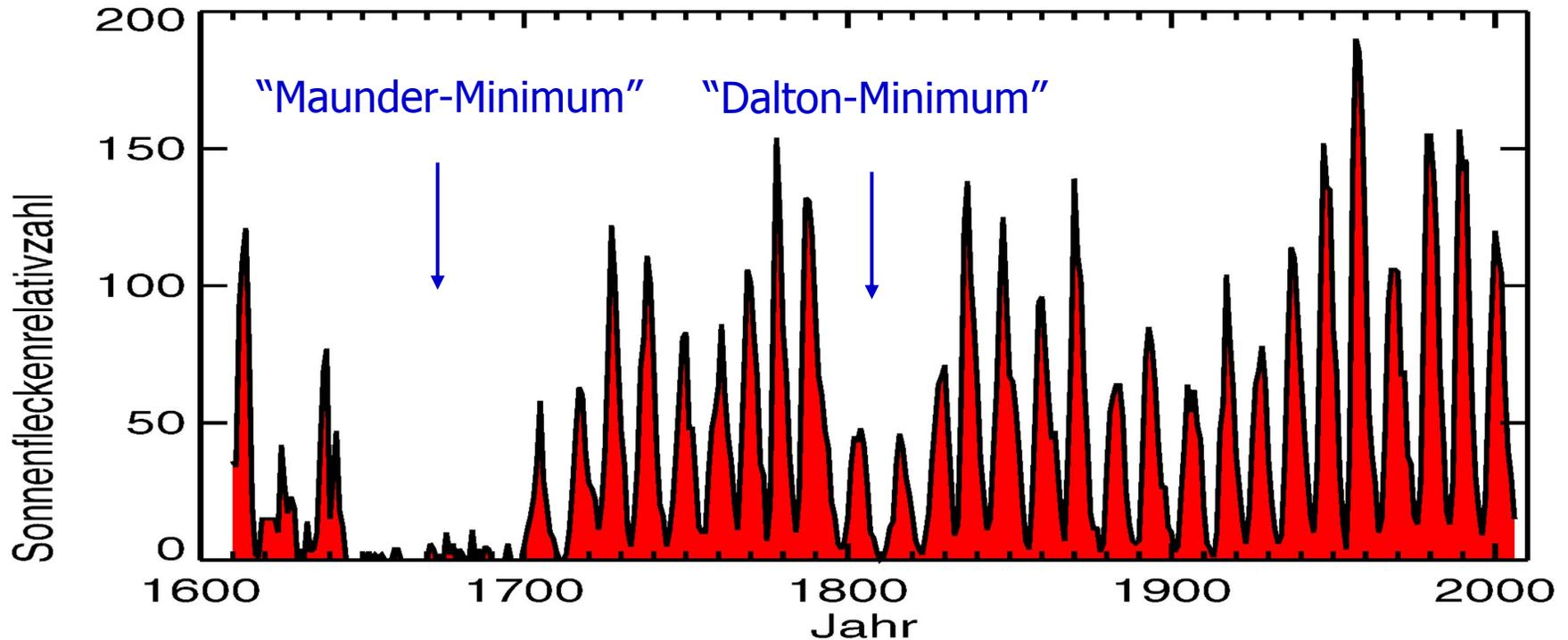


# 11-jähriger Zyklus und Klima ?



- Kein eindeutiger Zusammenhang
- Korrelationen kommen und gehen
- Vorzeichen wechseln örtlich und zeitlich
- Aber: Deutlicher Zusammenhang in der oberen Atmosphäre (Stratosphäre und darüber)

# Der 11-jährige Sonnenzyklus



Die Aktivität der Sonne schwankt in einem Rhythmus von etwa 11 Jahren. Längerfristige Variationen sind diesem Zyklus überlagert.

# Der Höhepunkt der "kleinen Eiszeit" im 17. Jh.



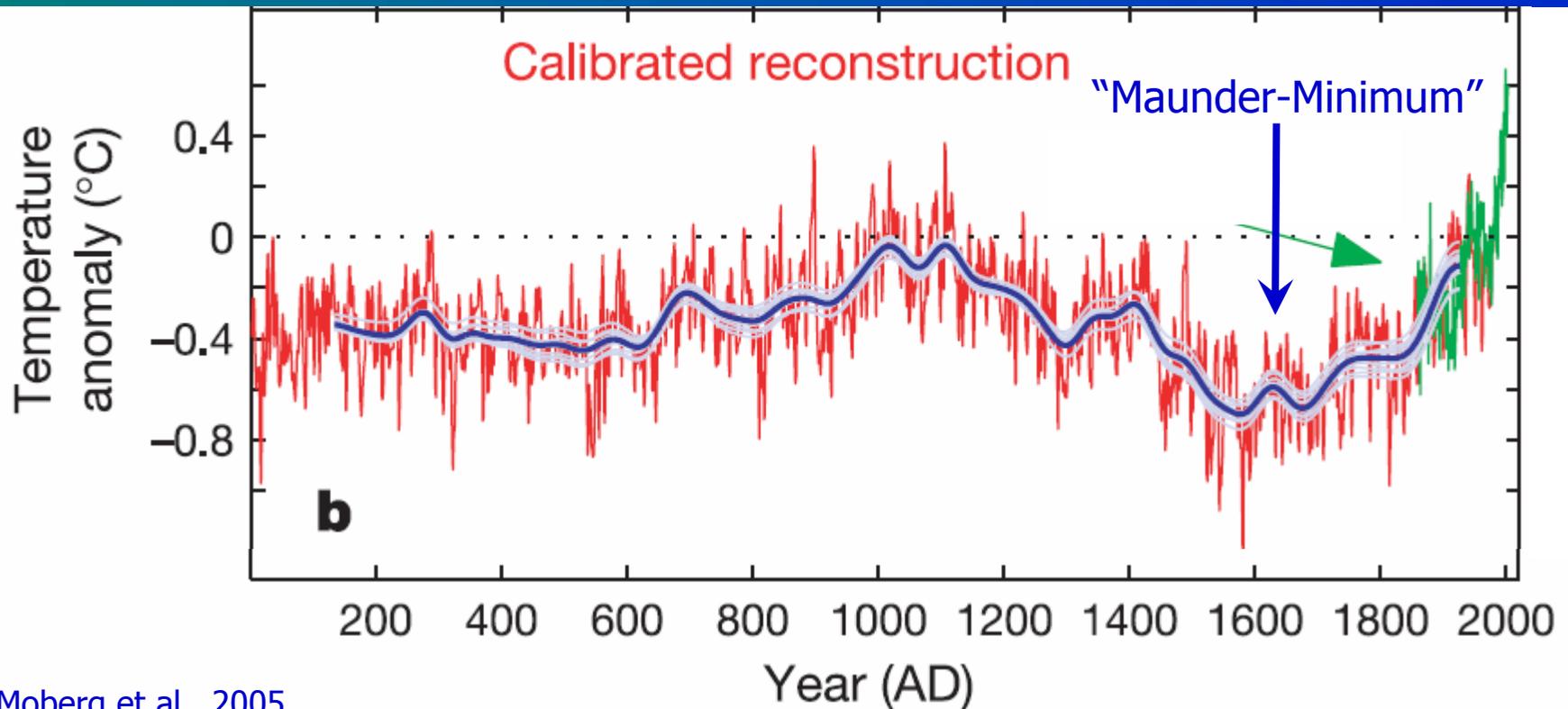
Die niederländischen Maler schufen ihre berühmten "Winterbilder".

# Der Höhepunkt der "kleinen Eiszeit" im 17. Jh.



Auf der zugefrorenen Themse wurden Märkte abgehalten

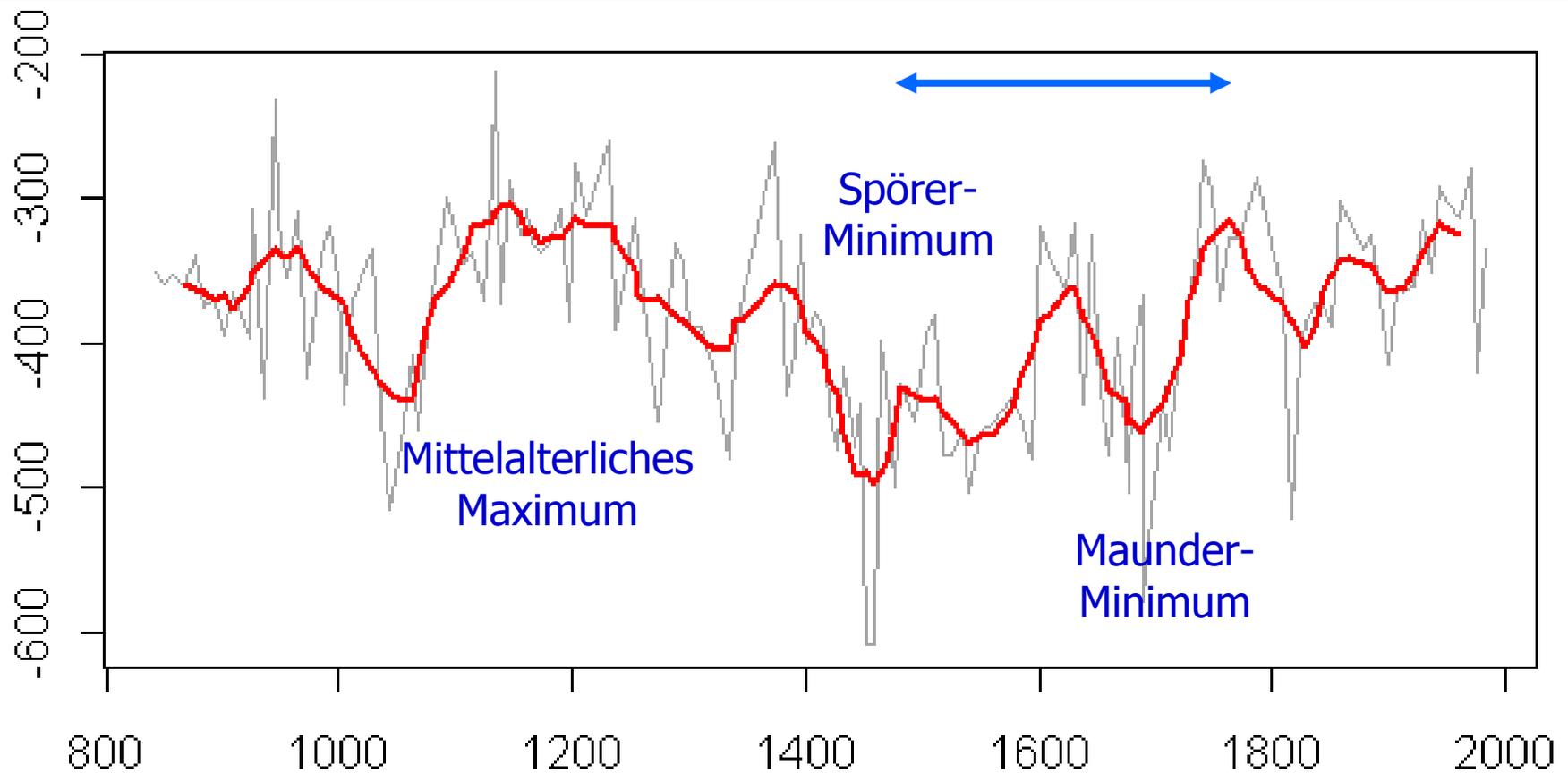
# Das Erdklima in den letzten 2000 Jahren



Moberg et al., 2005

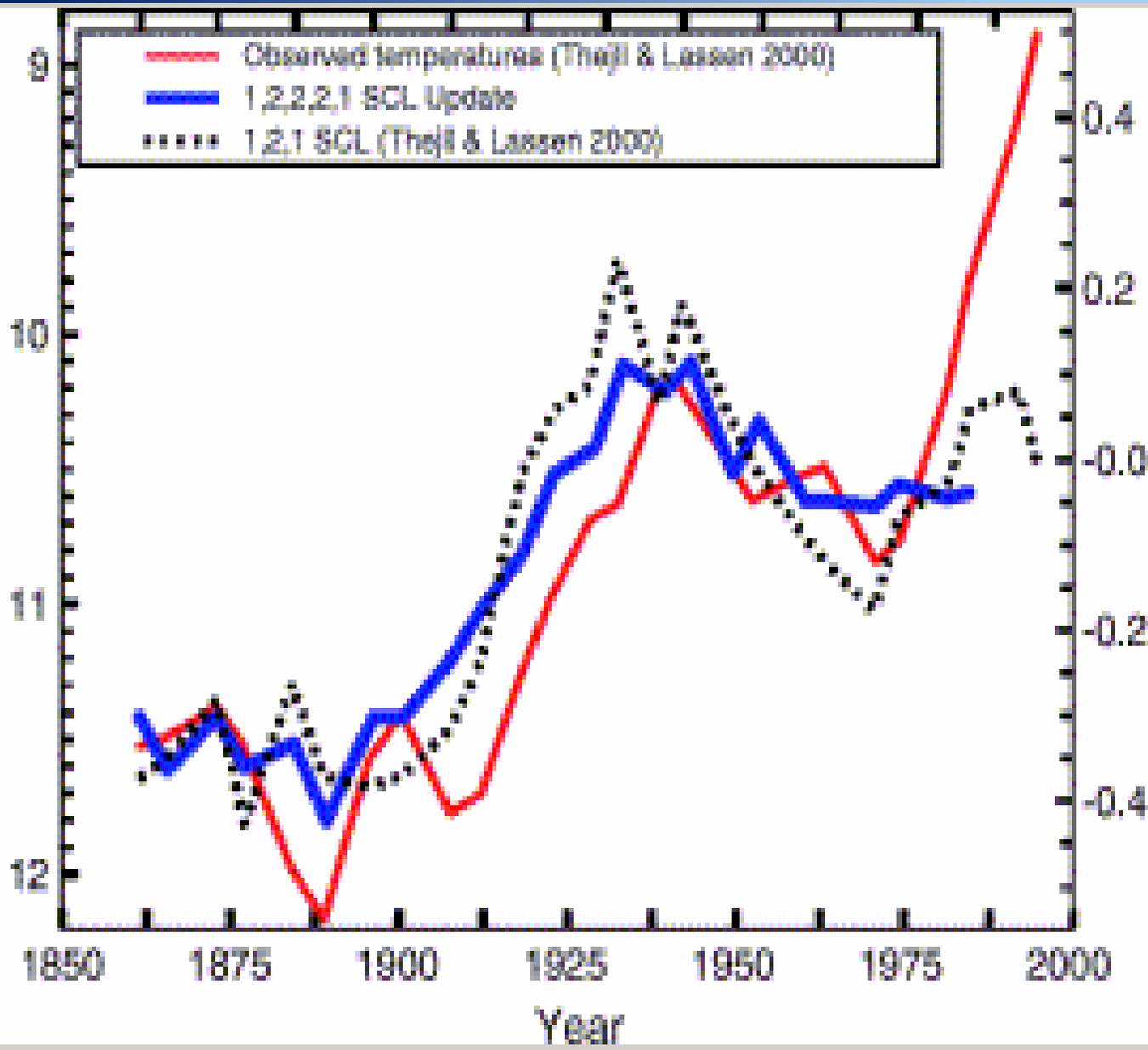
Rekonstruktion der globalen Temperatur  
(basierend auf Baumringen, Bohrlöchern, Sedimenten, Korallen, Stalagmiten, ...)

# Rekonstruktion der Sonnenaktivität in der Vergangenheit durch die gemessene $^{10}\text{Be}$ -Konzentration im Antarktischen Eis



Länge des Fleckenzyklus (J)

Solar cycle lengths (years)

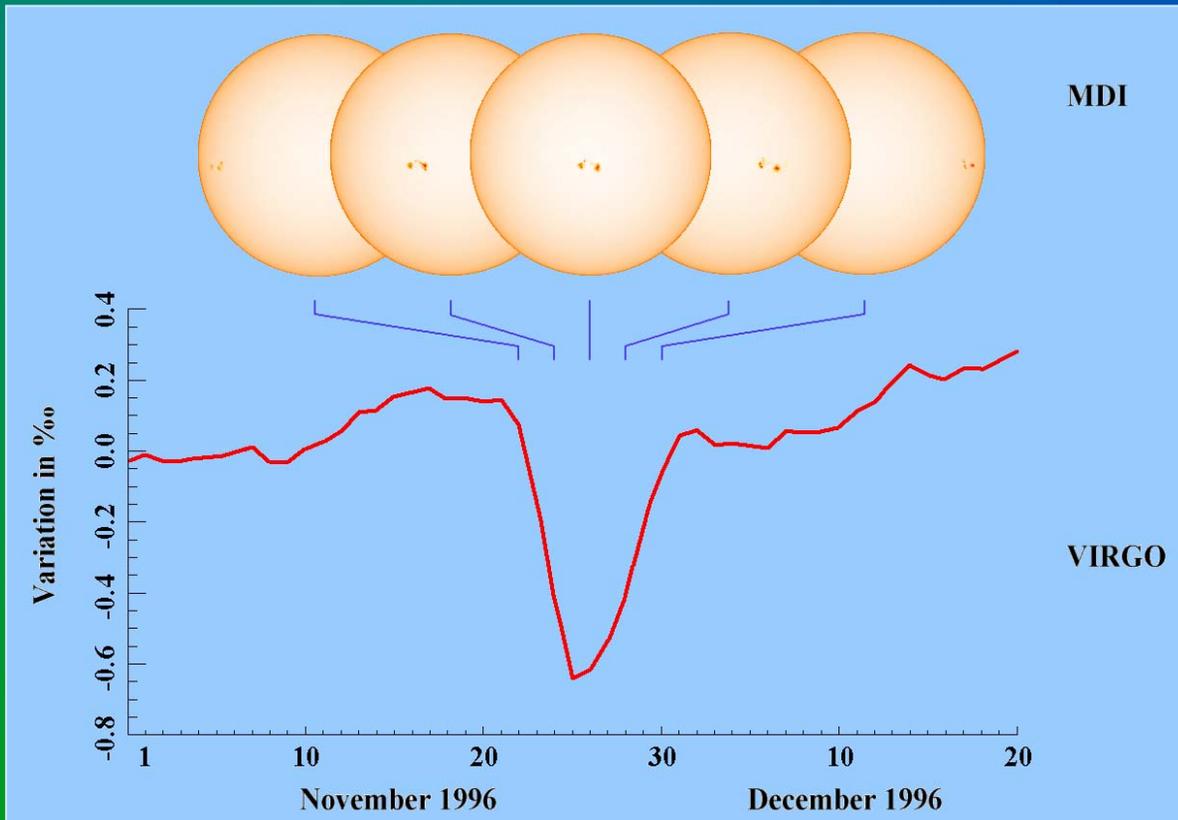
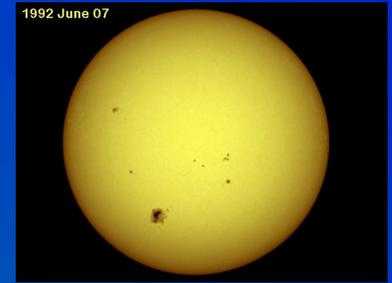


Temperaturanomalie (°C)

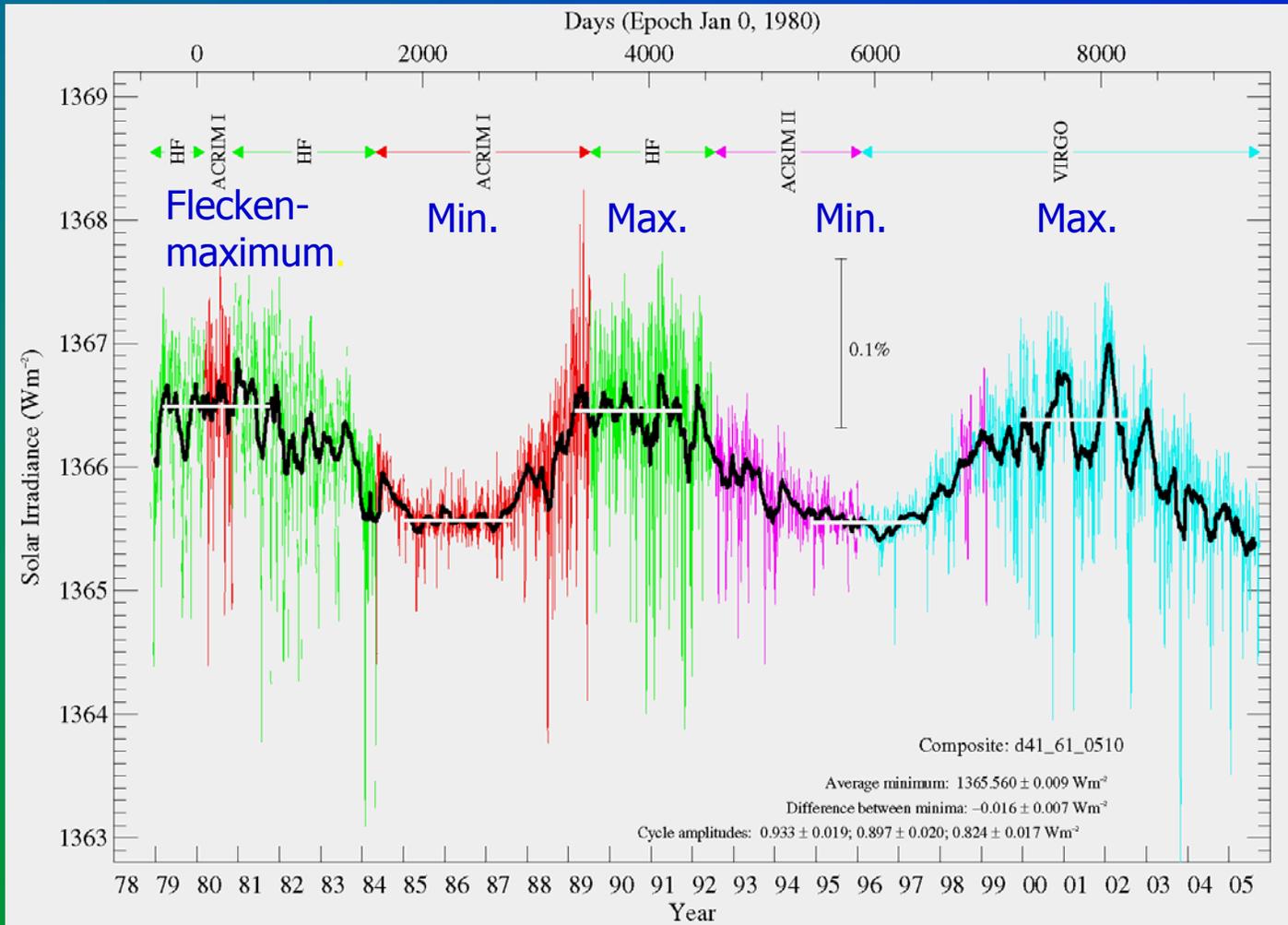
Temperaturanomalie (°C)

# Klimawirkung der Sonne: Physikalische Mechanismen ?

## ■ Variation der Gesamtstrahlung

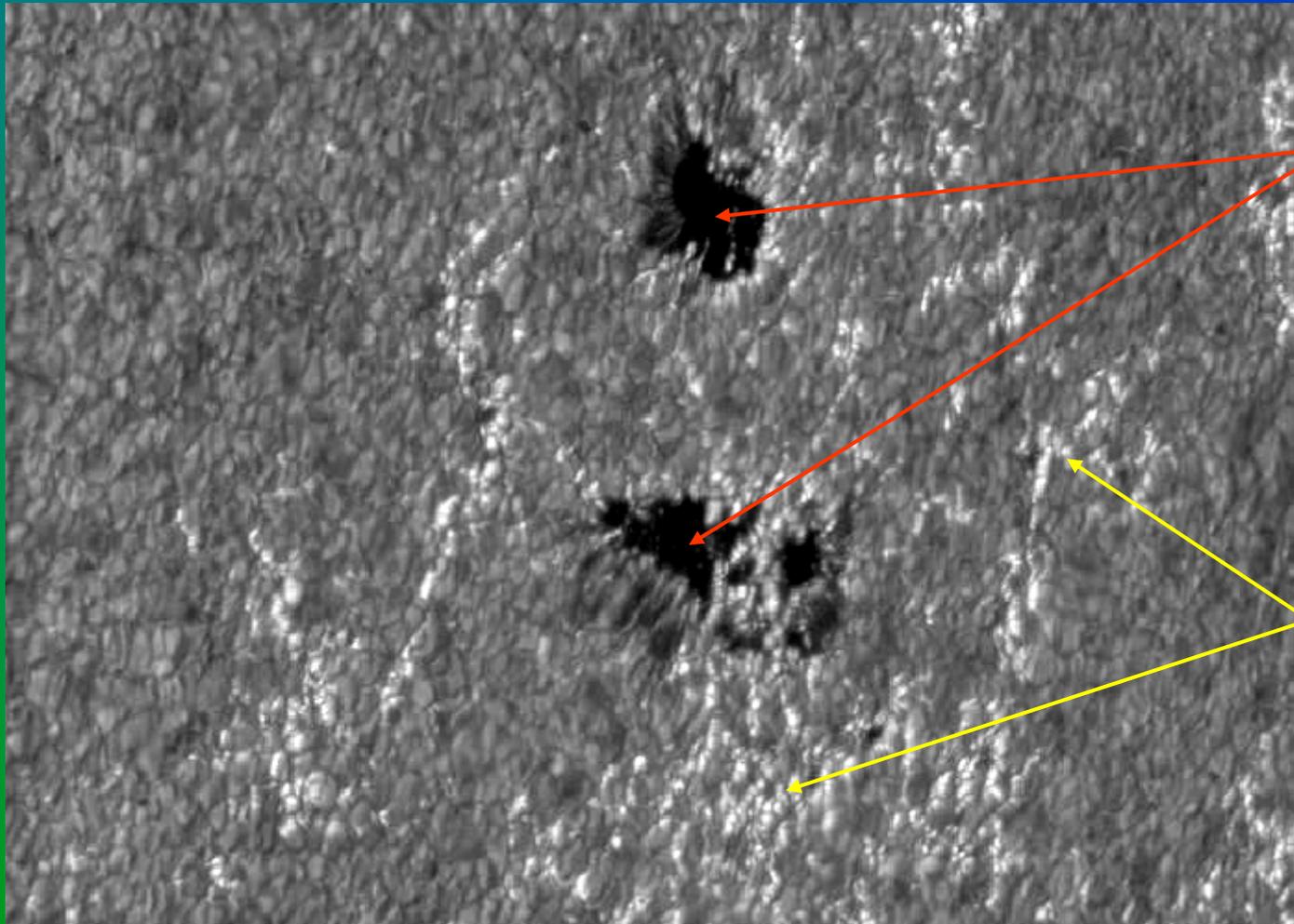


# Die "Solarkonstante" schwankt!



Die auf die Erde einfallende Gesamtstrahlung der Sonne variiert um etwa 0.1% im Takt des Aktivitätszyklus.

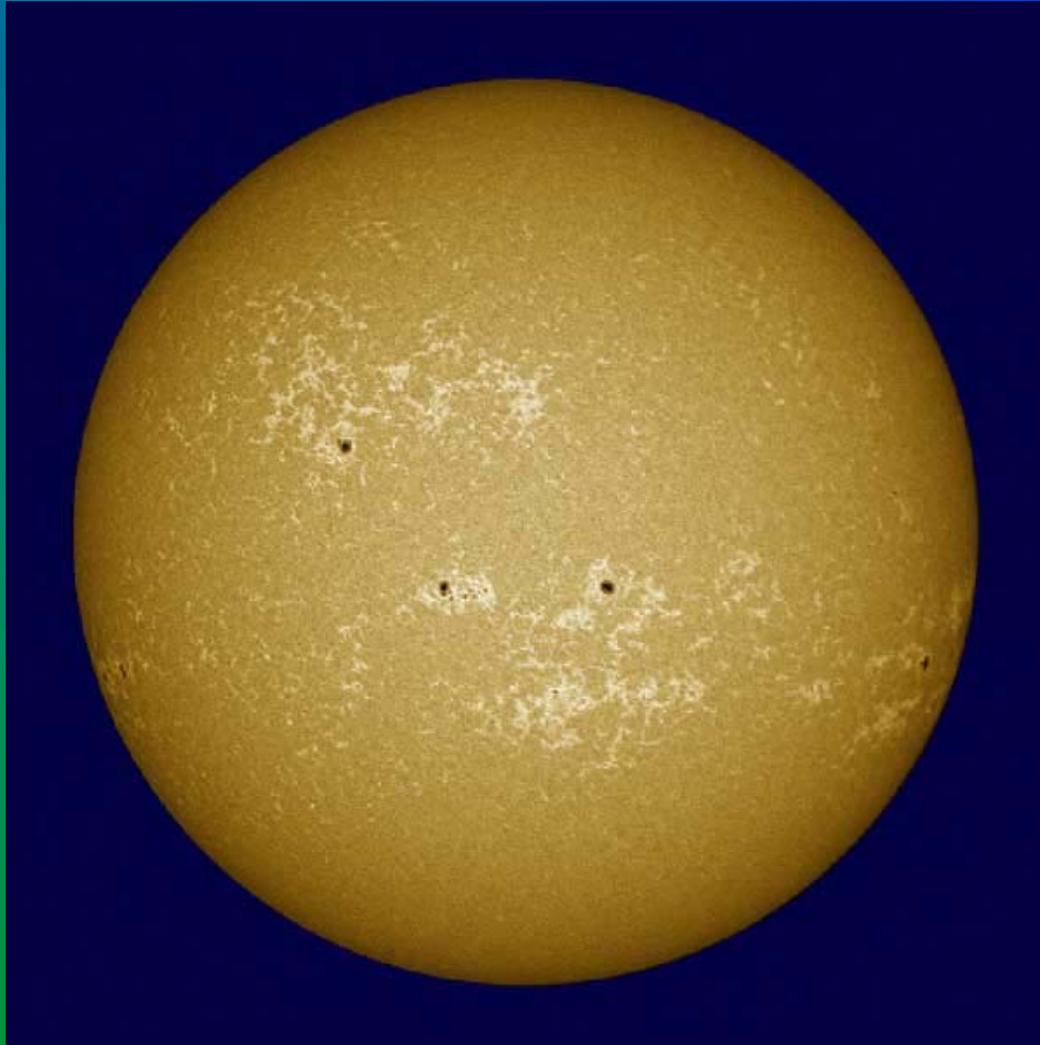
# Warum ist die Sonne heller, wenn sie mehr dunkle Sonnenflecken hat ?



Sonnenflecken  
(dunkel)

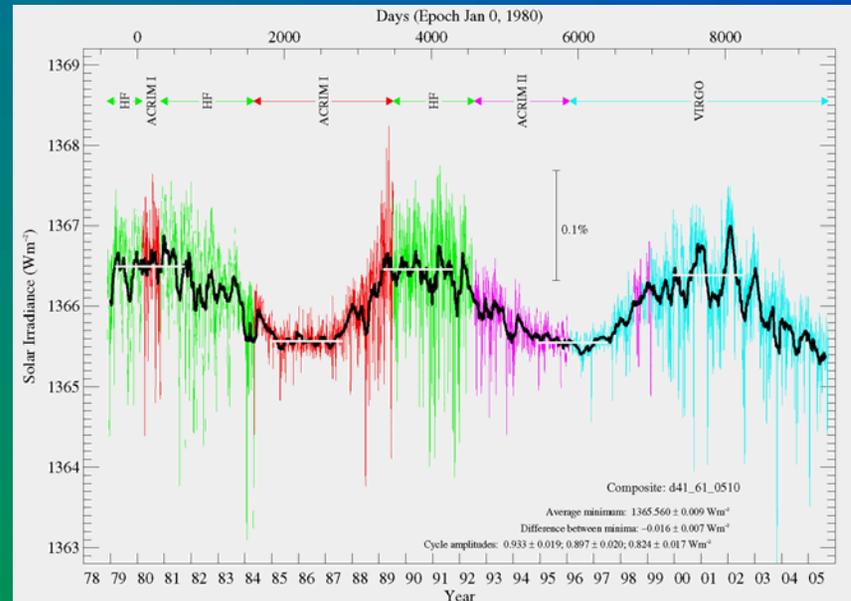
Fackeln (hell)

# Sonne mit Flecken und Fackeln



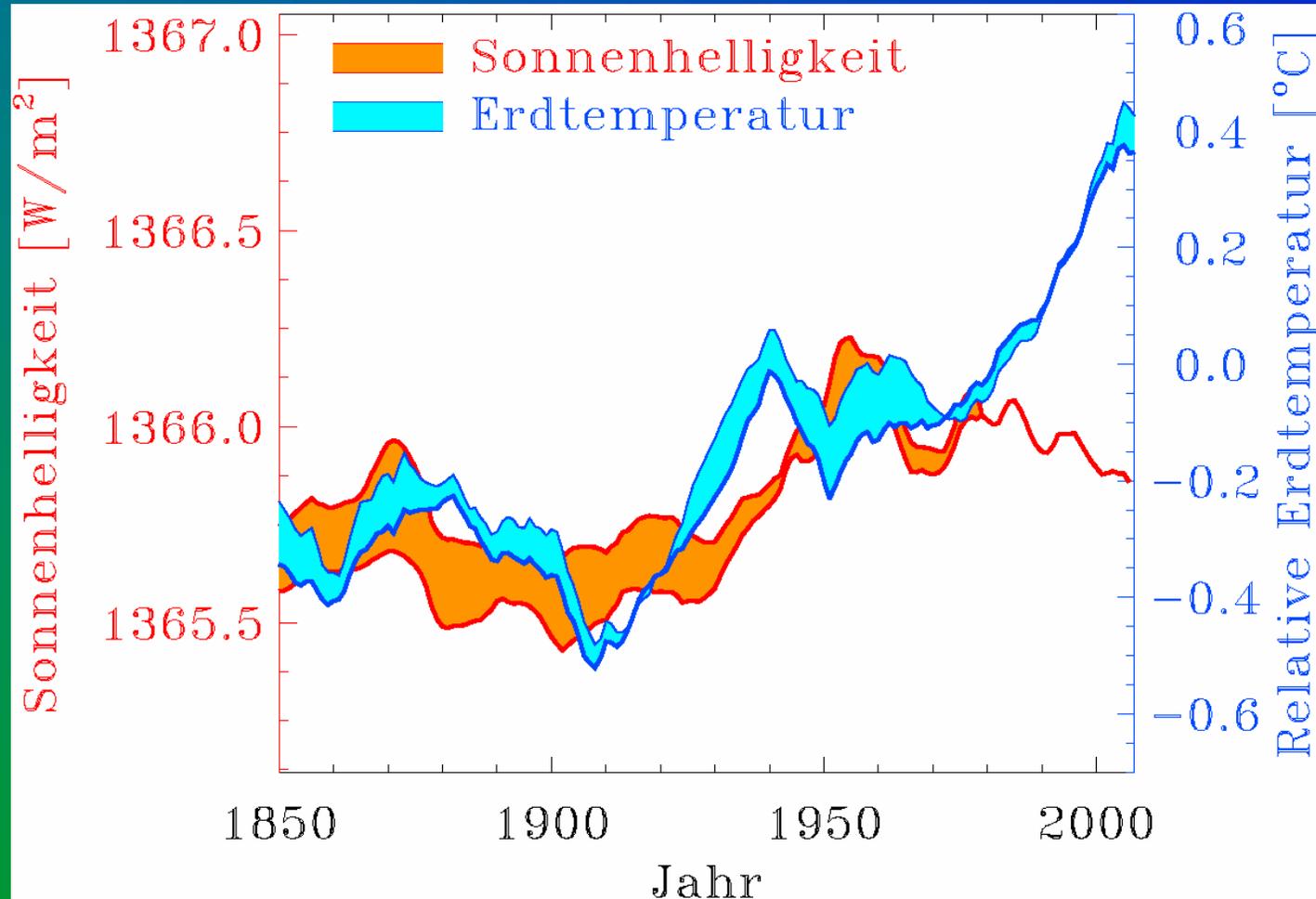
# Ein grundsätzliches Problem

- Verlässliche direkte Daten nur für die letzten Jahrzehnte vorhanden
- "Rekonstruktion" von Daten, z.B. aus Sonnenfleckenzahlen, erforderlich



# Variation der Sonnenhelligkeit und Erdklima

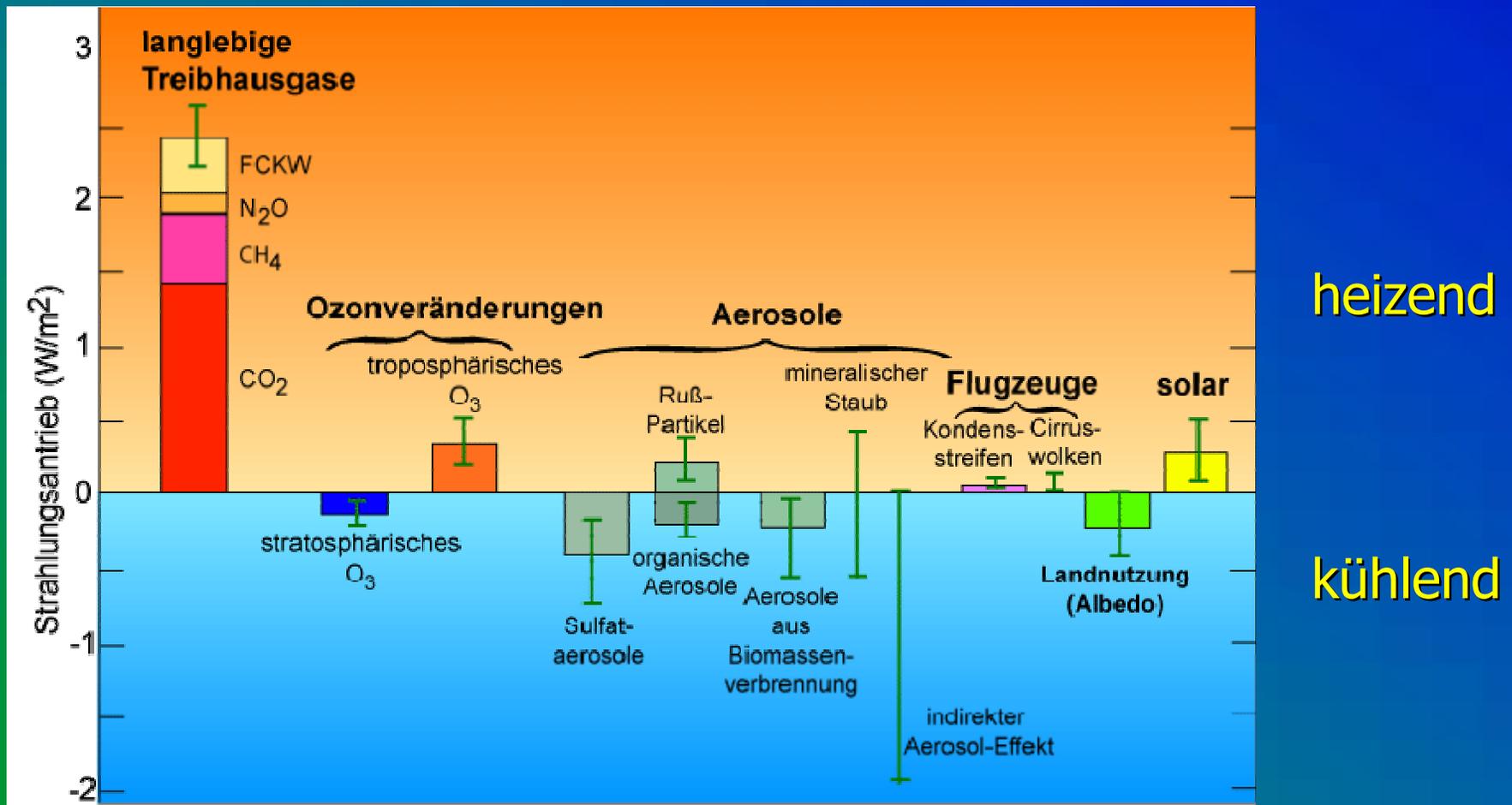
*Krivova, Balmaceda & Solanki (2007)*



Variation der mittleren Sonnenhelligkeit im 20. Jahrhundert  $< 0.1\%$

Vor 1970: Sonne folgt Erde! Nach 1970: kein weiterer Anstieg

# Wie groß sind die Effekte ?

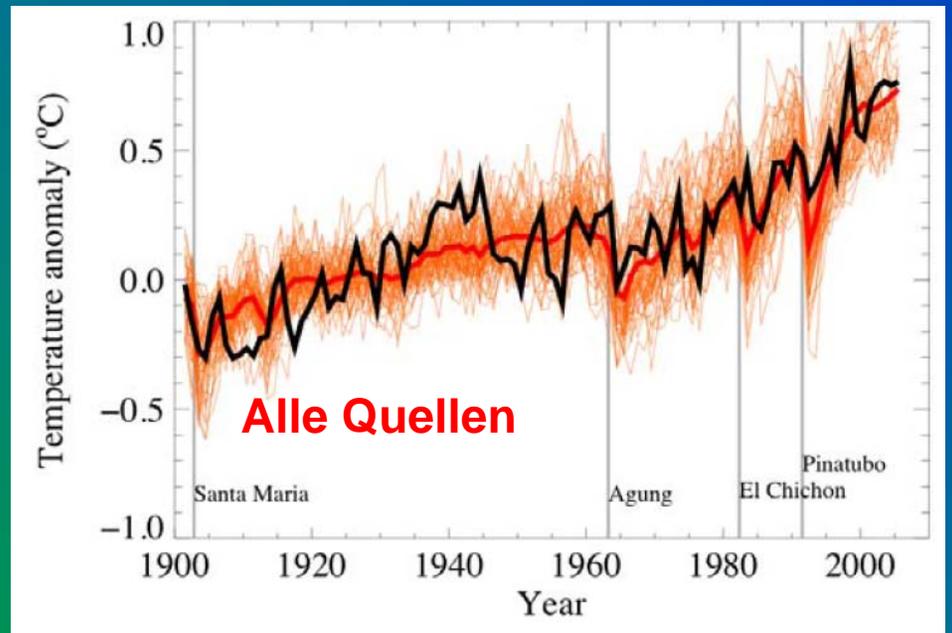
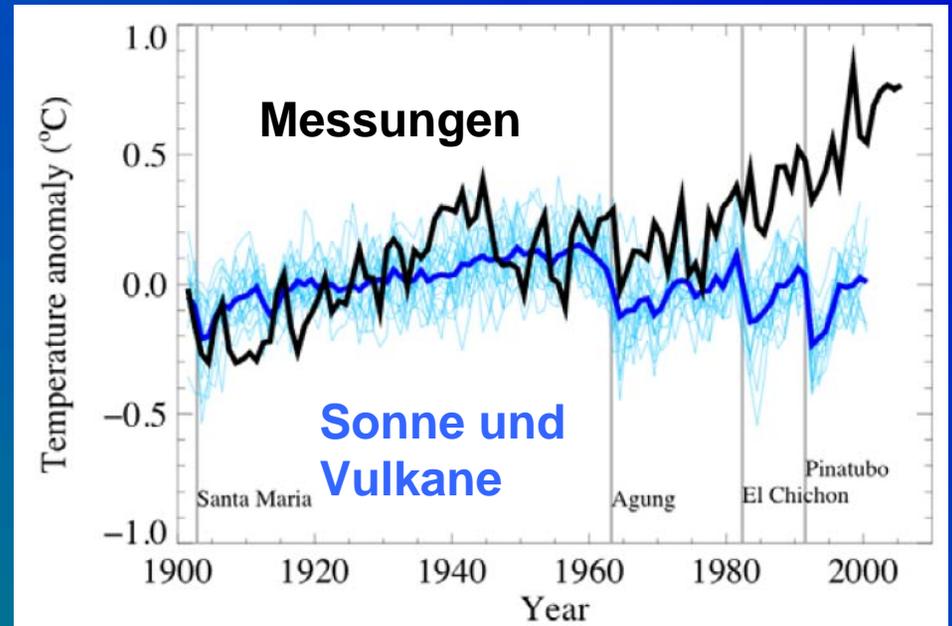


Der direkte solare Effekt (ca. 0.4 W/m<sup>2</sup>) entspricht 25% des übrigen Netto-Effekts (ca. 1.6 W/m<sup>2</sup>).

# Klimasimulationen

Mit natürlichen Ursachen allein kann die globale Erwärmung nicht erklärt werden.

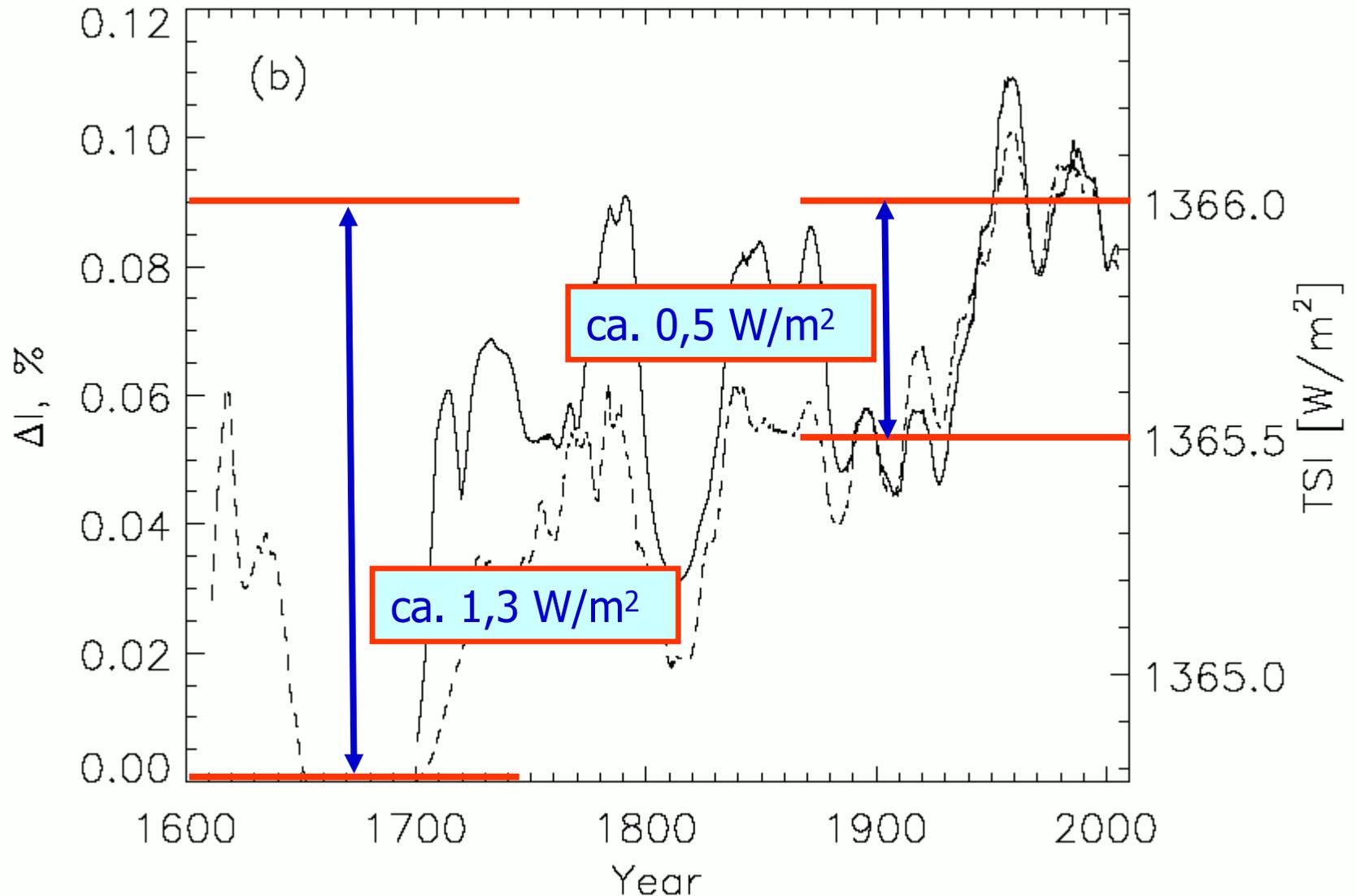
Natürliche und anthropogene Quellen wirken zusammen. Seit ca. 1980 dominiert der verstärkte Treibhauseffekt.



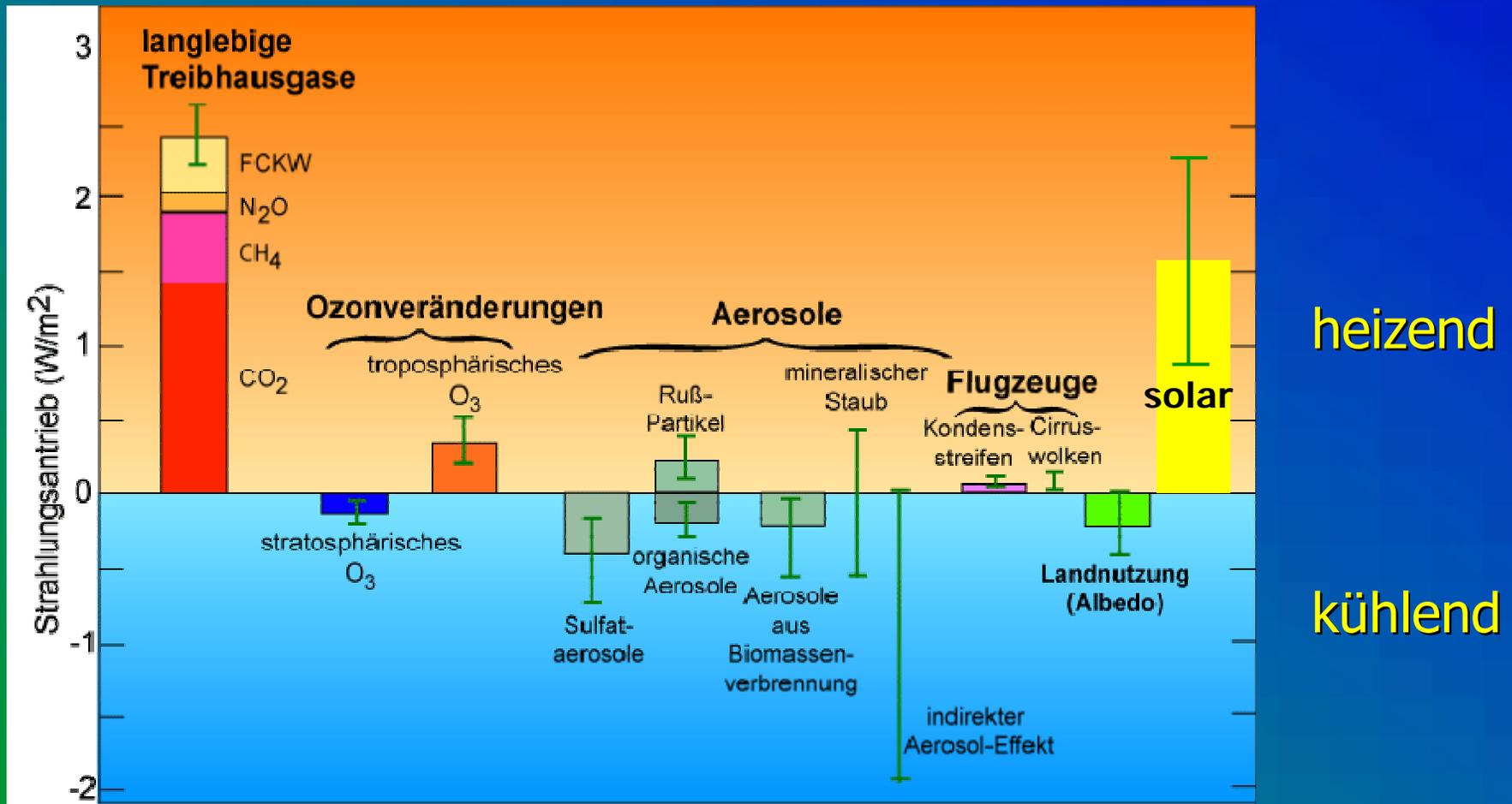
# Rekonstruierte Variation der Sonnenstrahlung seit 1600

Year

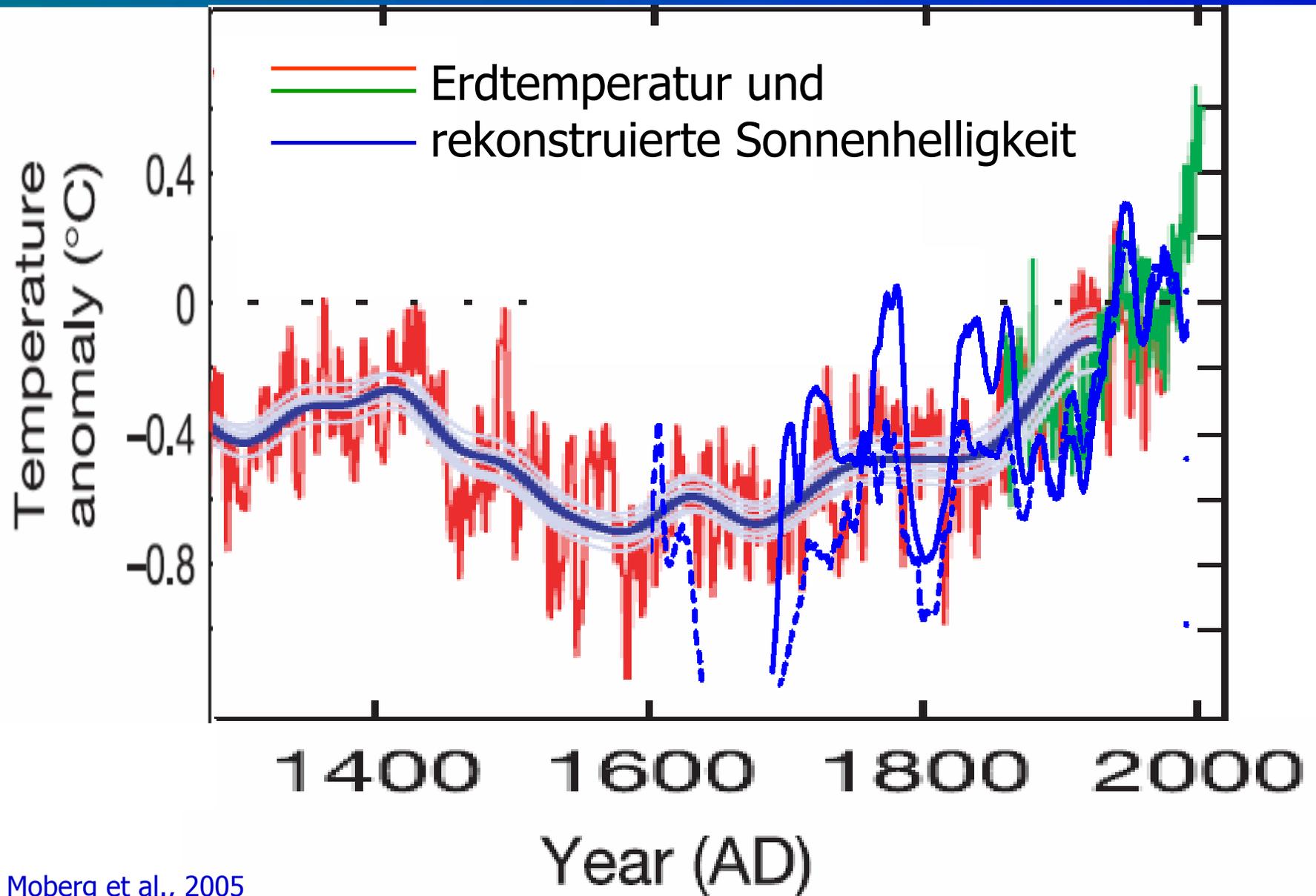
Balmaceda et al. (2007)



# Wie groß sind die Effekte ?

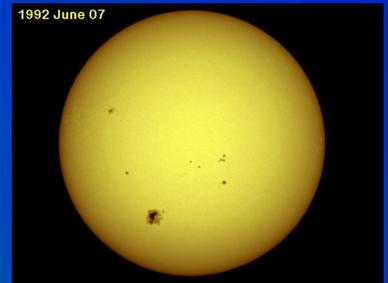


Der rekonstruierte solare Effekt seit 1700 könnte etwa der gegenwärtigen (!) Netto-Wirkung der anthropogenen Effekte (ca.  $1.6 \text{ W/m}^2$ ) entsprechen.



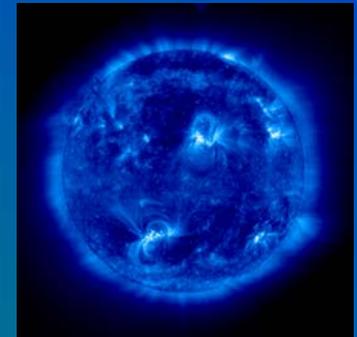
# Klimawirkung der Sonne: Physikalische Mechanismen ?

## ■ Variation der Gesamtstrahlung

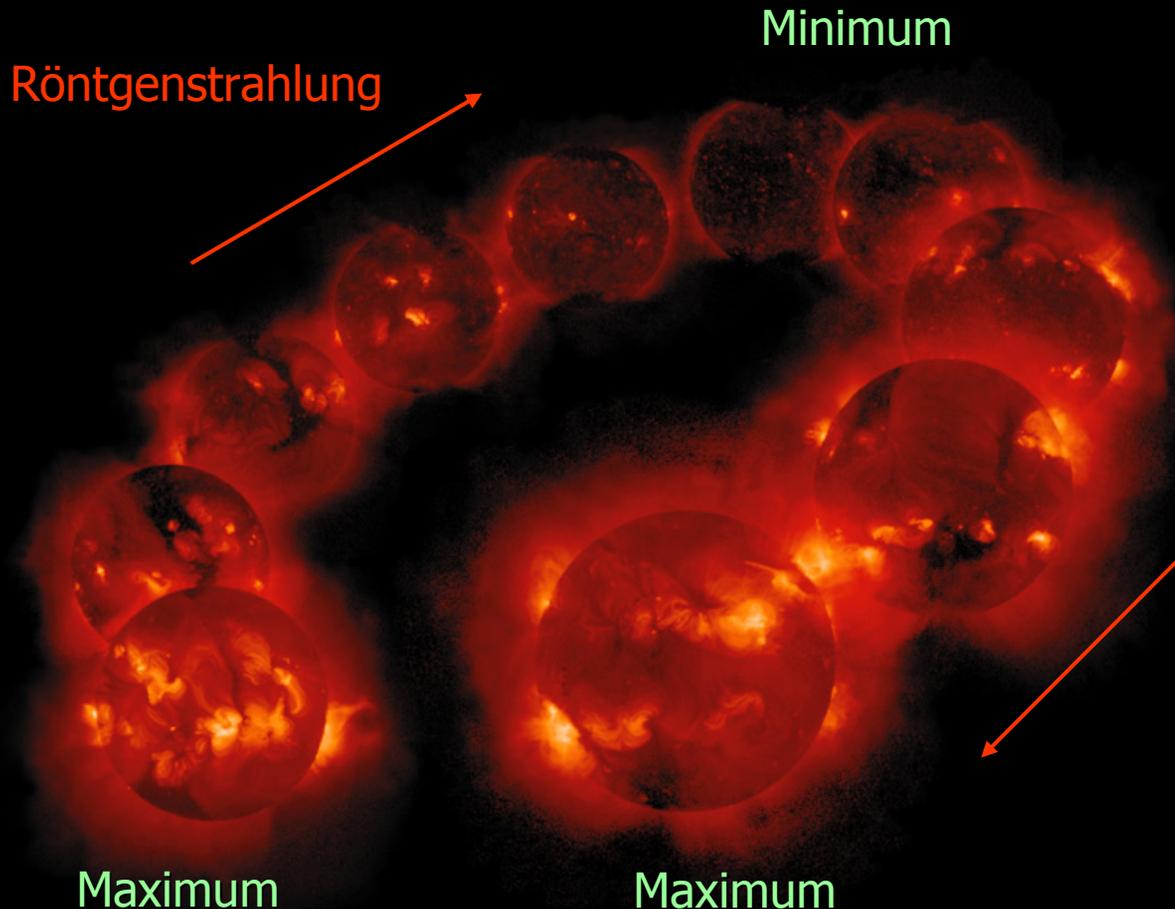


*Indirekte Effekte ?*

## ■ Schwankung der UV-Strahlung

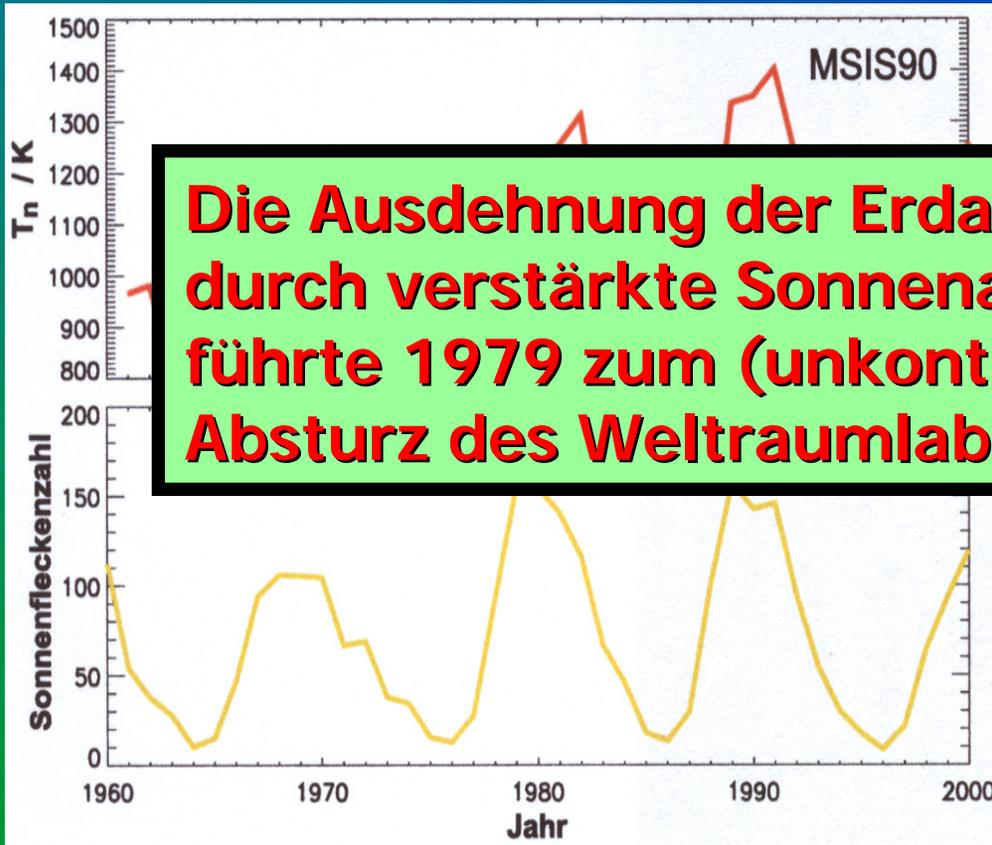


# Die veränderliche Sonne



Die kurzwellige Strahlung der Sonne schwankt im 11-Jahres-Zyklus stark: vom Faktor 2 im UV ( $<100$  nm) bis Faktor 100 im Röntgengebiet.

# Die Erdatmosphäre "atmet"



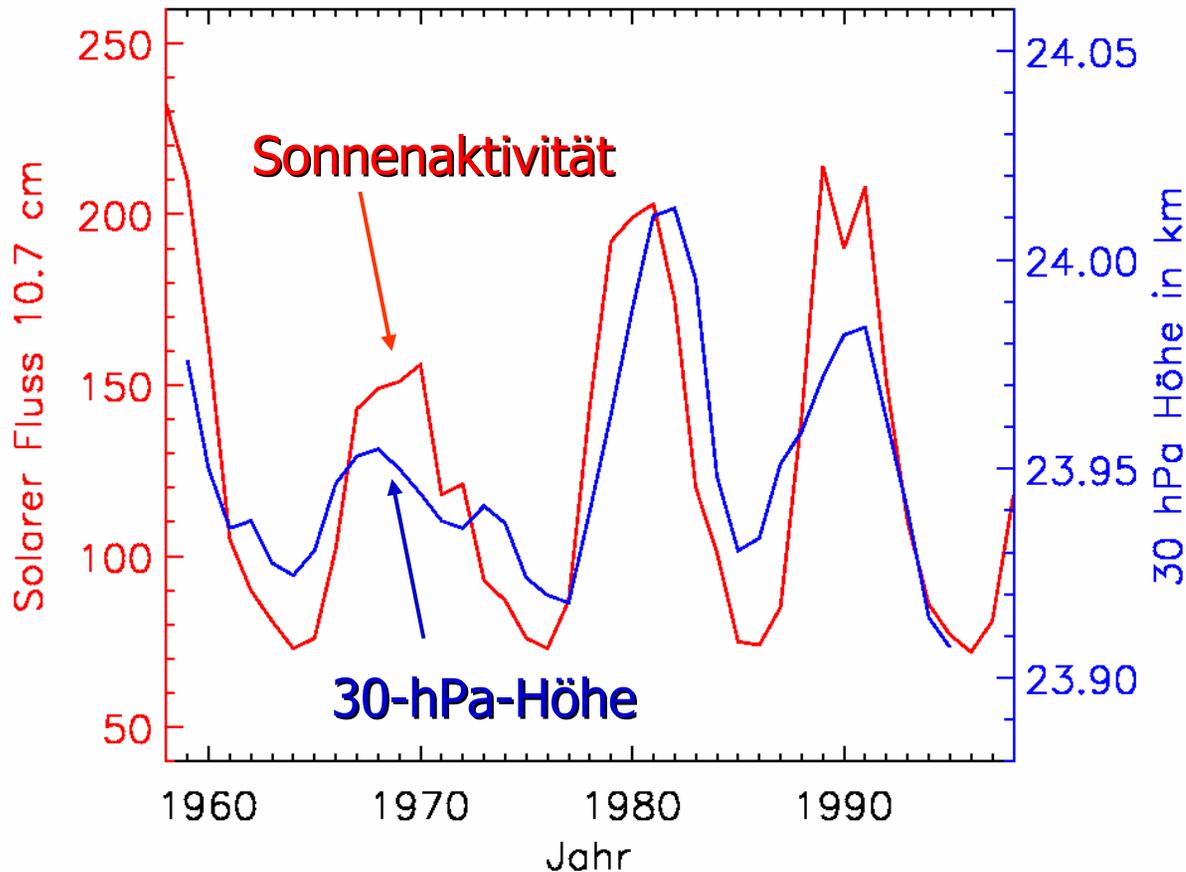
**Die Ausdehnung der Erdatmosphäre durch verstärkte Sonnenaktivität führte 1979 zum (unkontrollierten!) Absturz des Weltraumlabor "Skylab".**

Die Temperatur und die Höhe der äusseren Schichten der Atmosphäre schwanken im Sonnenzyklus.

Mittagstemperatur in 300 km Höhe und Sonnenfleckenanzahl



# Die Erdatmosphäre "atmet"



- verstärkte Aktivität der Sonne
- mehr UV-Strahlung
- erhöhte Bildung von Ozon
- Temperaturanstieg in der Stratosphäre
- Veränderung von Luftströmungen

➔ *ca. 20%  
Verstärkung  
des direkten  
Klima-Effekts*

Die Höhe der Stratosphäre schwankt im Takt des Sonnenzyklus (Karin Labitzke, FU Berlin)

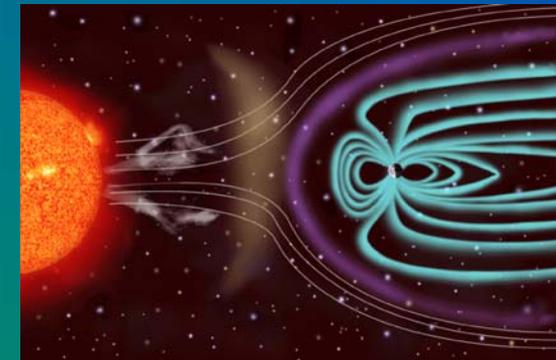
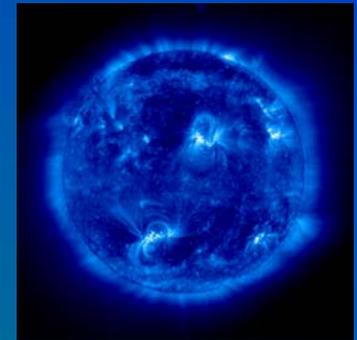
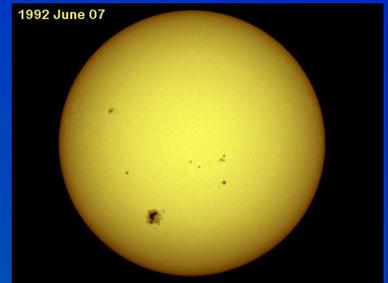
# Klimawirkung der Sonne: Physikalische Mechanismen ?

## ■ Variation der Gesamtstrahlung

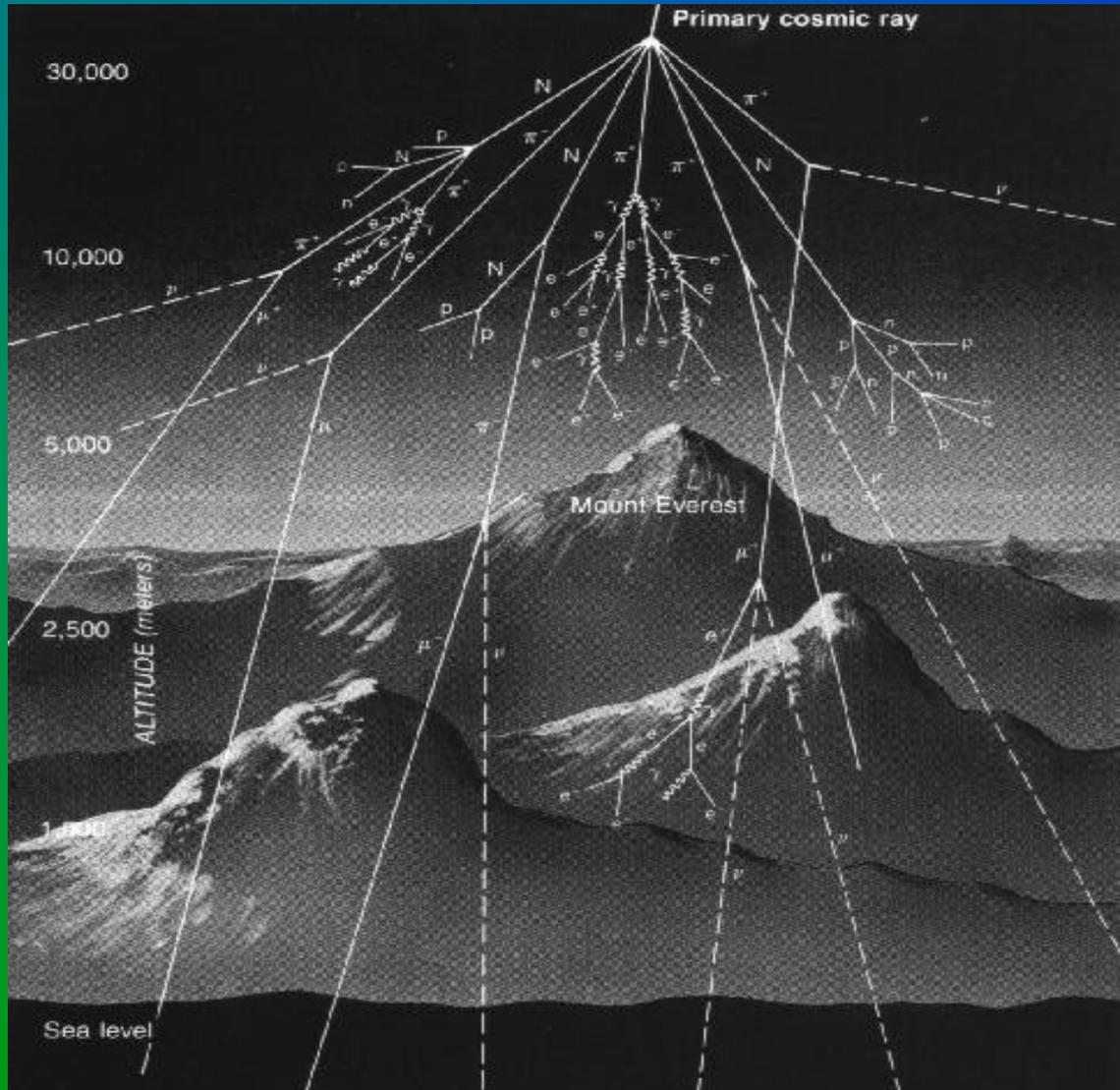
*Indirekte Effekte ?*

## ■ Schwankung der UV-Strahlung

## ■ Veränderung der kosmischen Strahlung



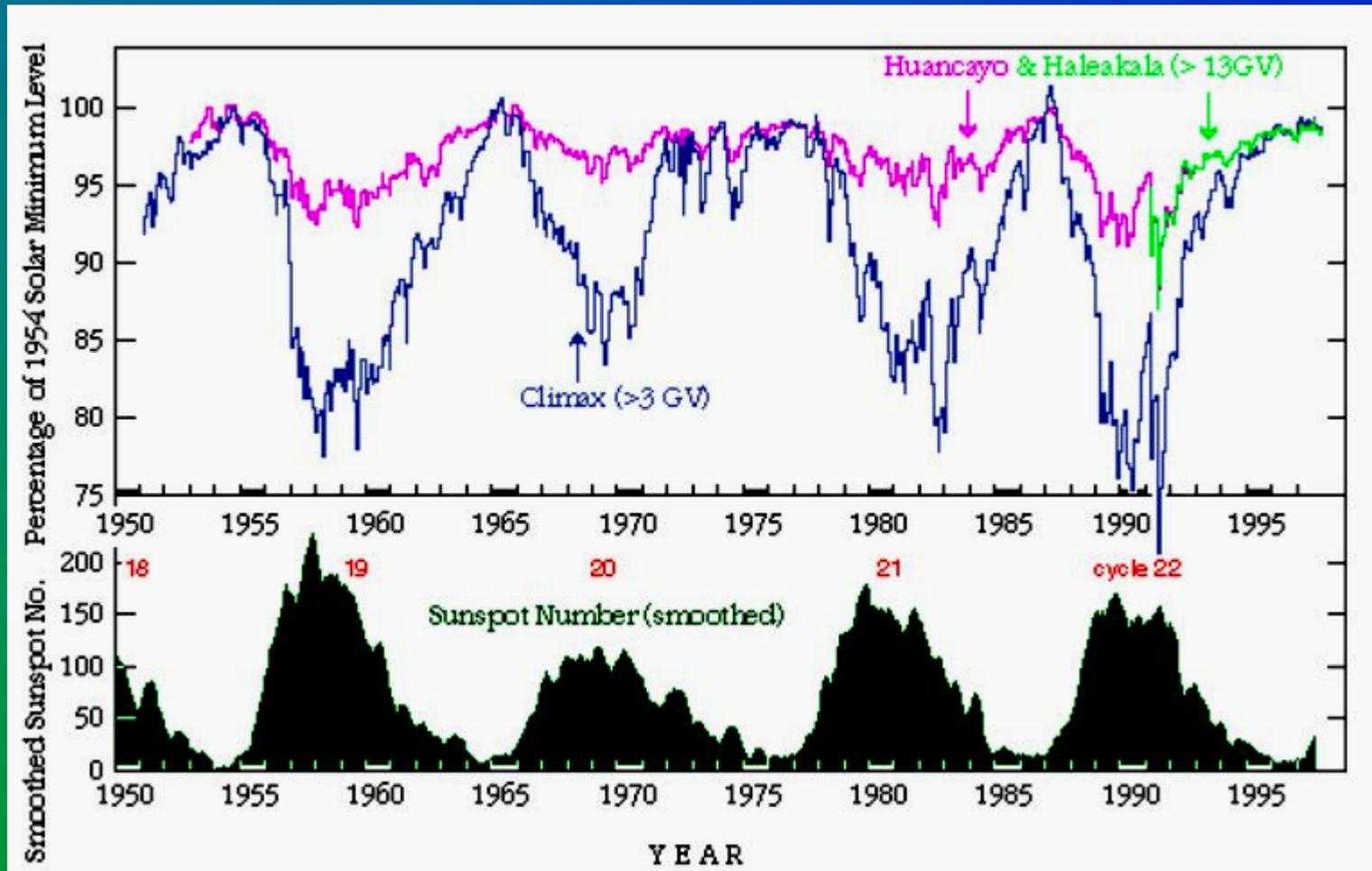
# Kosmische Strahlung



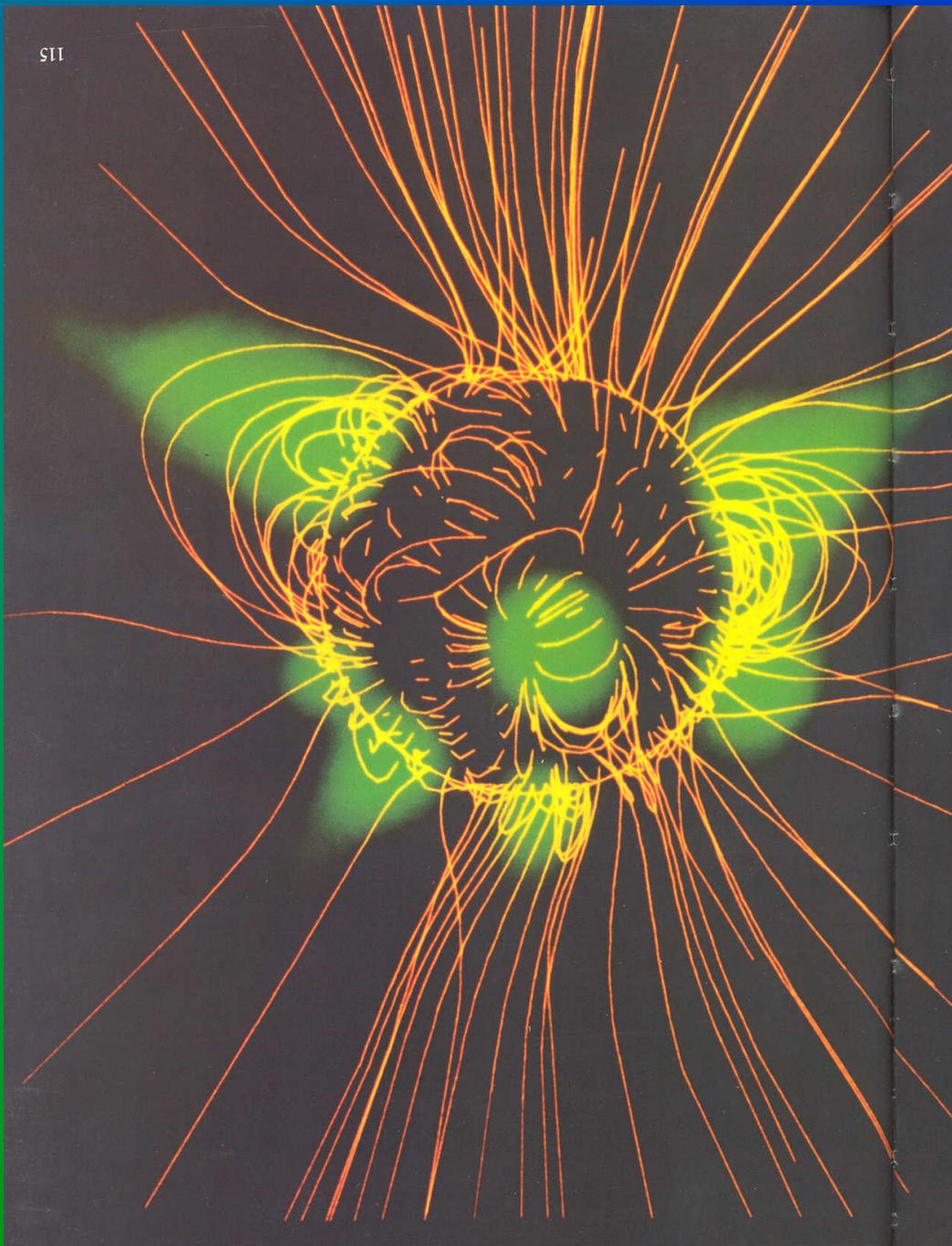
energiereiche Teilchen  
(Protonen,  $\alpha$ -Teilchen, ...)  
von Neutronensternen,  
Supernova-Explosionen usw.

dringen aus den Tiefen der  
Galaxis (Milchstraße) in die  
Heliosphäre und in die  
Erdatmosphäre ein.

# Schwankung der kosmischen Strahlung



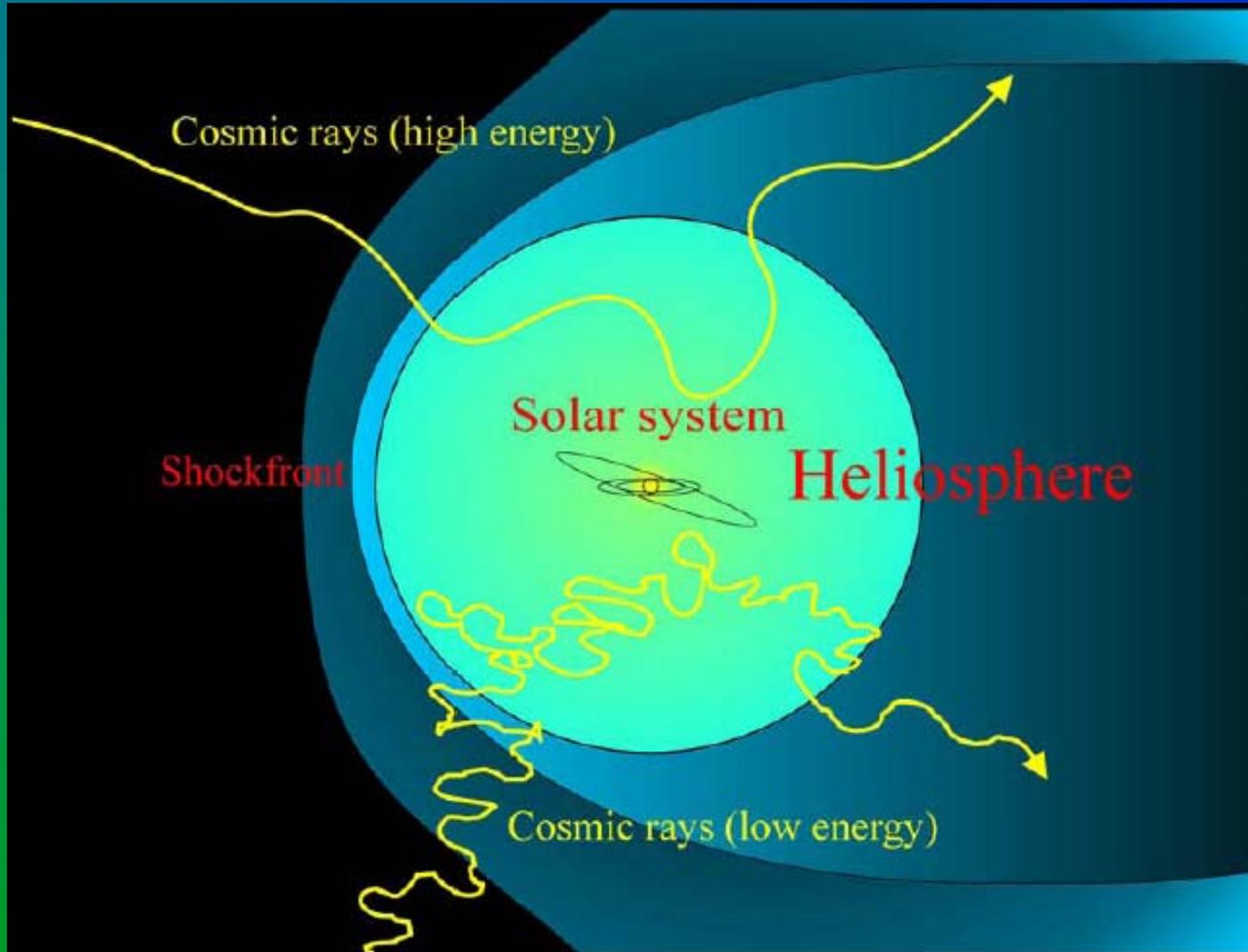
Die kosmische Höhenstrahlung variiert  
im **Gegentakt** des Aktivitätszyklus!



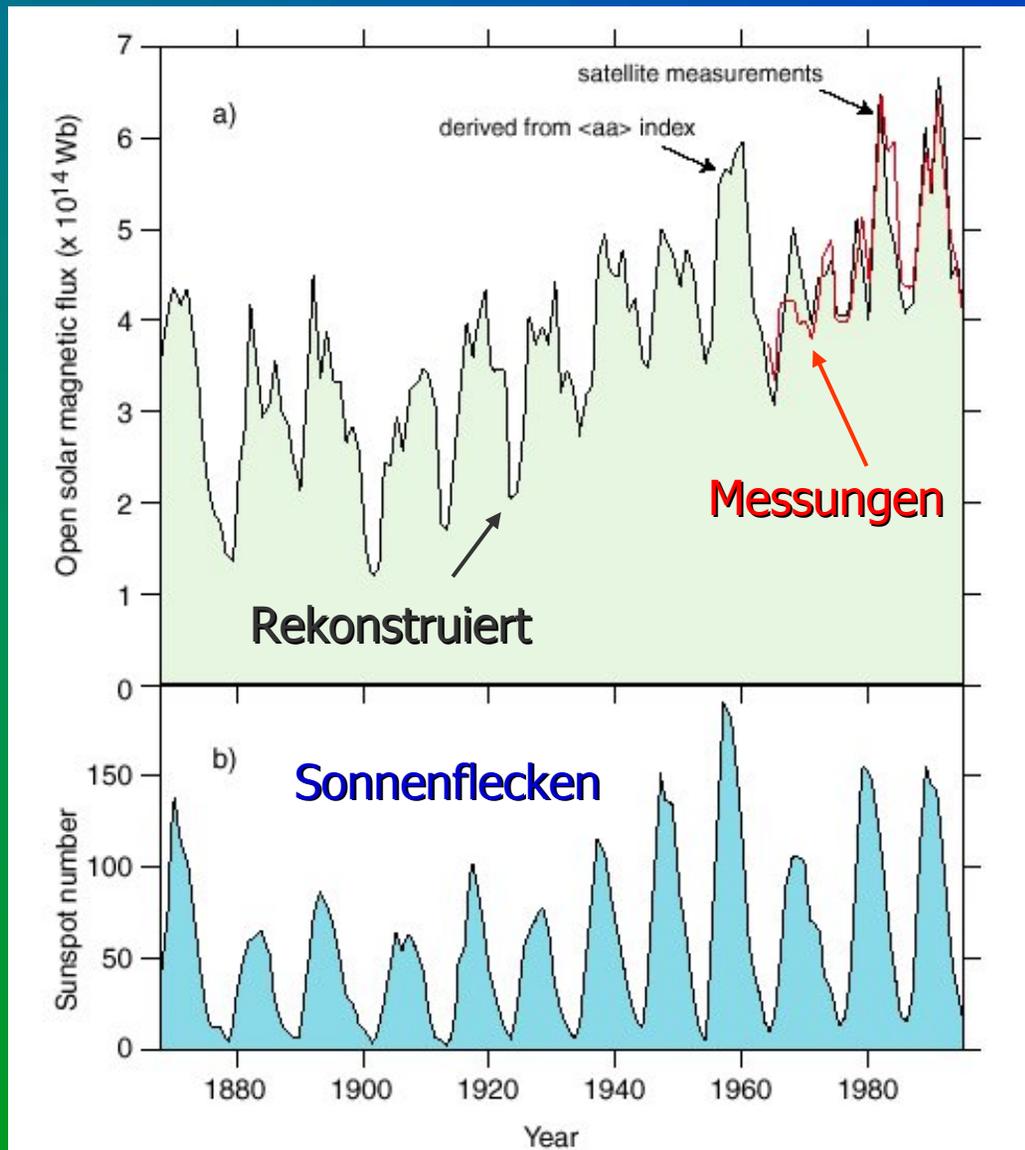
# Das Magnetfeld der Sonne...

- setzt sich fort in den interplanetaren Raum
- und schwankt im Rhythmus des 11-jährigen Zyklus

# Streuung von Teilchen der kosmischen Strahlung durch das Magnetfeld in der Heliosphäre



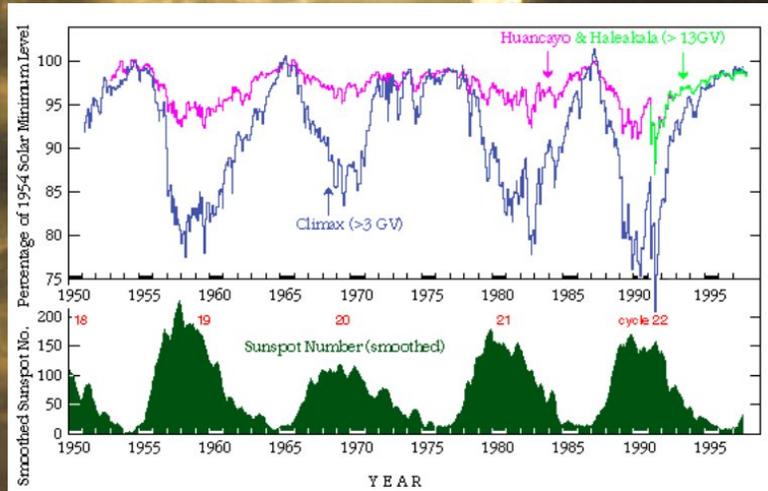
# Das interplanetare Magnetfeld im 20. Jh.



Verdoppelung im letzten Jahrhundert

➔ Abnahme der kosm. Strahlung um ca. 15%

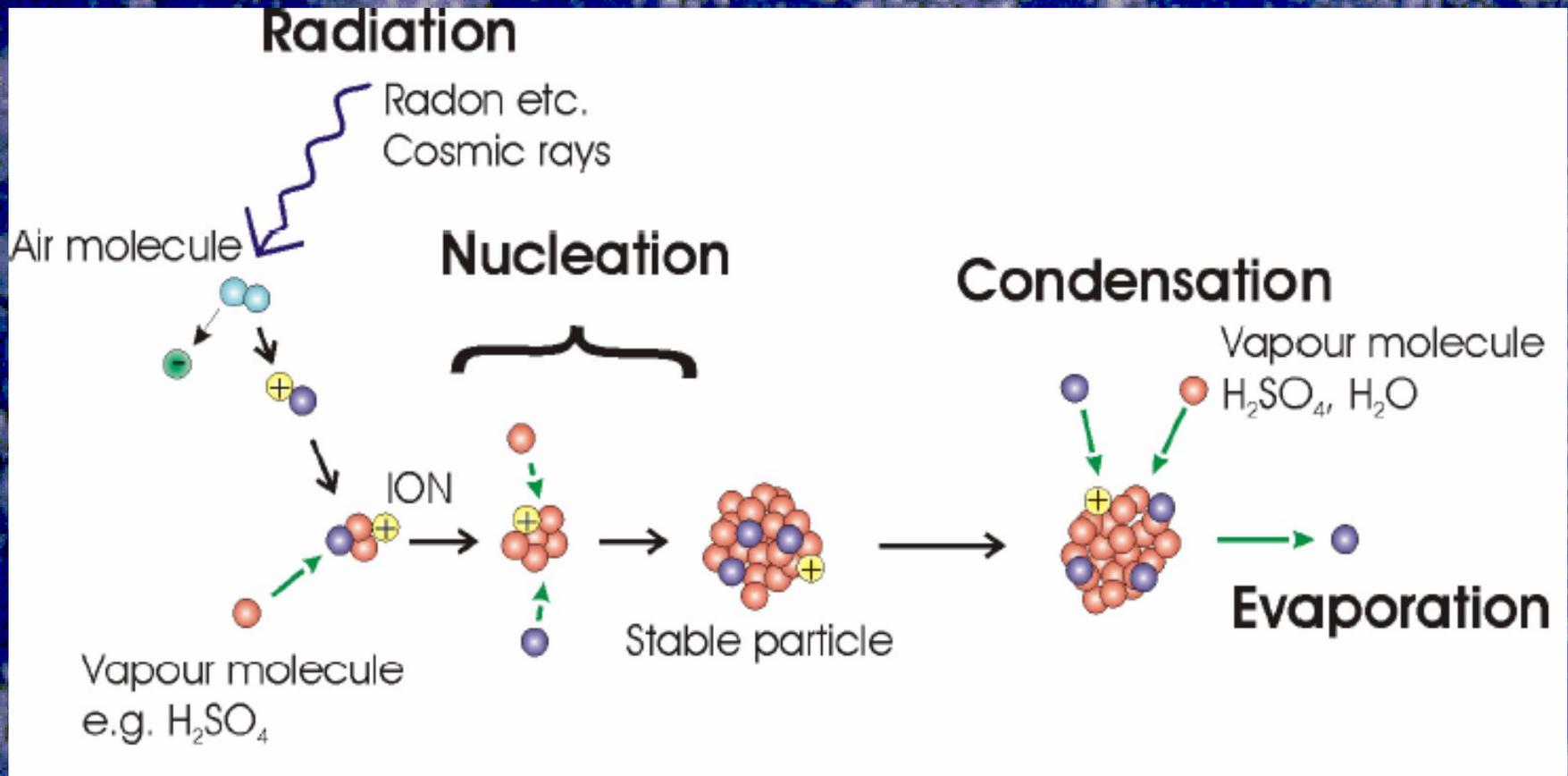
# Kosmische Strahlung und Klima?



## Kosmische Strahlung

- nimmt ab bei hoher Sonnenaktivität
- nimmt zu bei geringer Sonnenaktivität
- beeinflusst die Wolkenbildung durch Bildung von Kondensationskeimen ?
- Wirkung auf das Klima ?

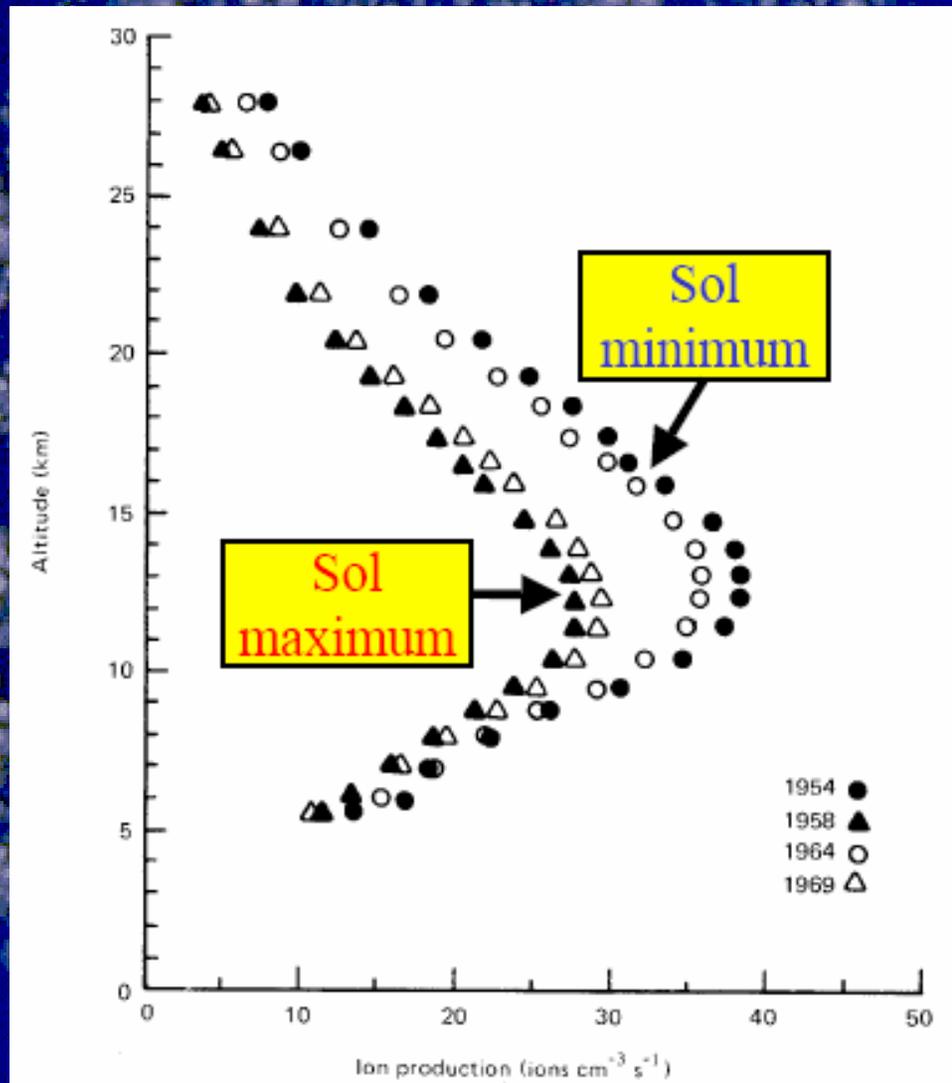
# Wie beeinflusst die kosmische Strahlung die Wolkenbildung?



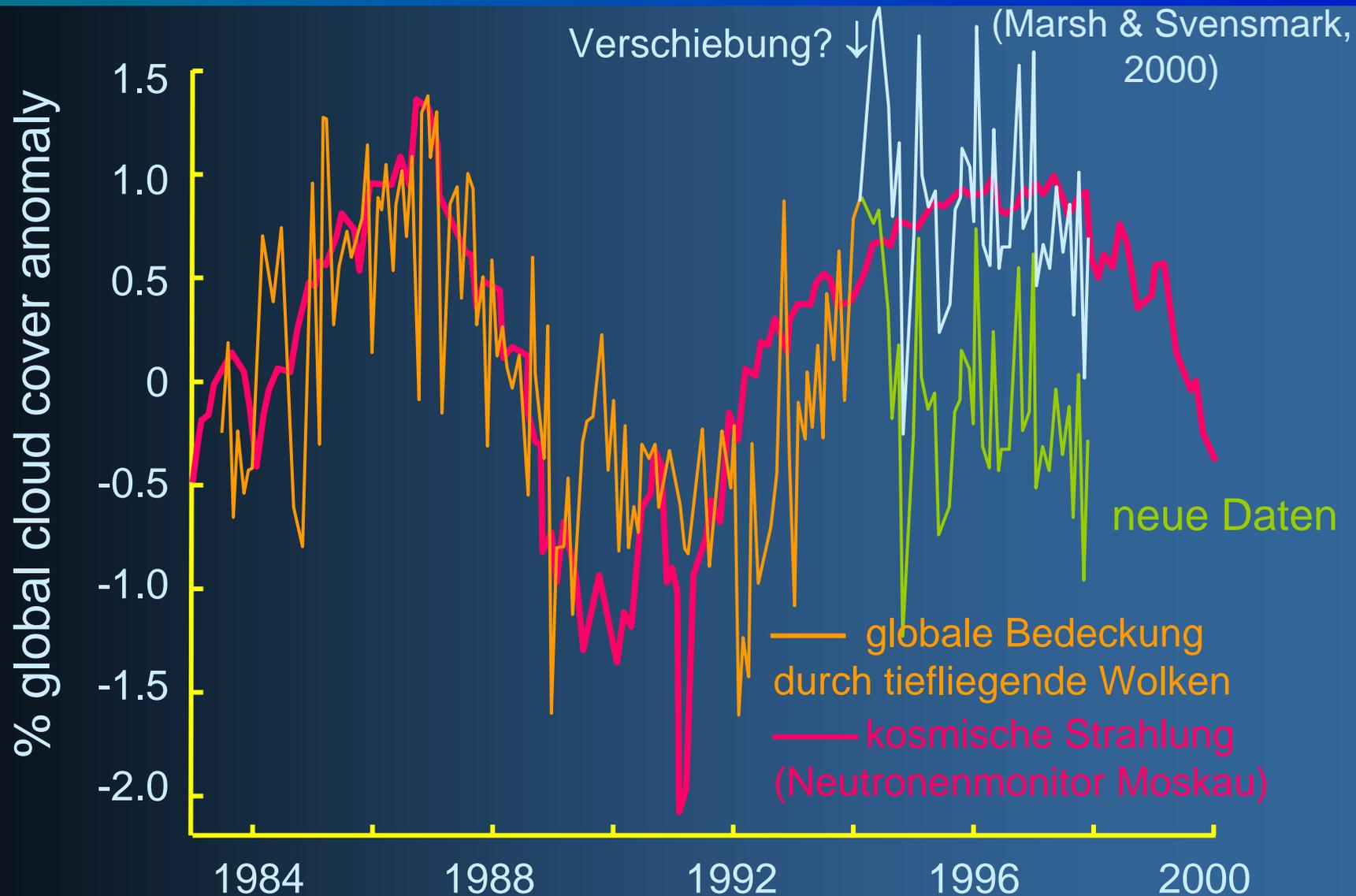
# Wolken und Temperatur

- Wolkenphysik ist sehr komplex!
- Dünne, hochliegende Wolken heizen (Treibhauseffekt)
- Dicke, tiefliegende Wolken kühlen (erhöhte Reflektion des Sonnenlichtes)
- In der Summe wirken Wolken kühlend

# Ionenproduktion in der Erdatmosphäre durch kosmische Strahlung

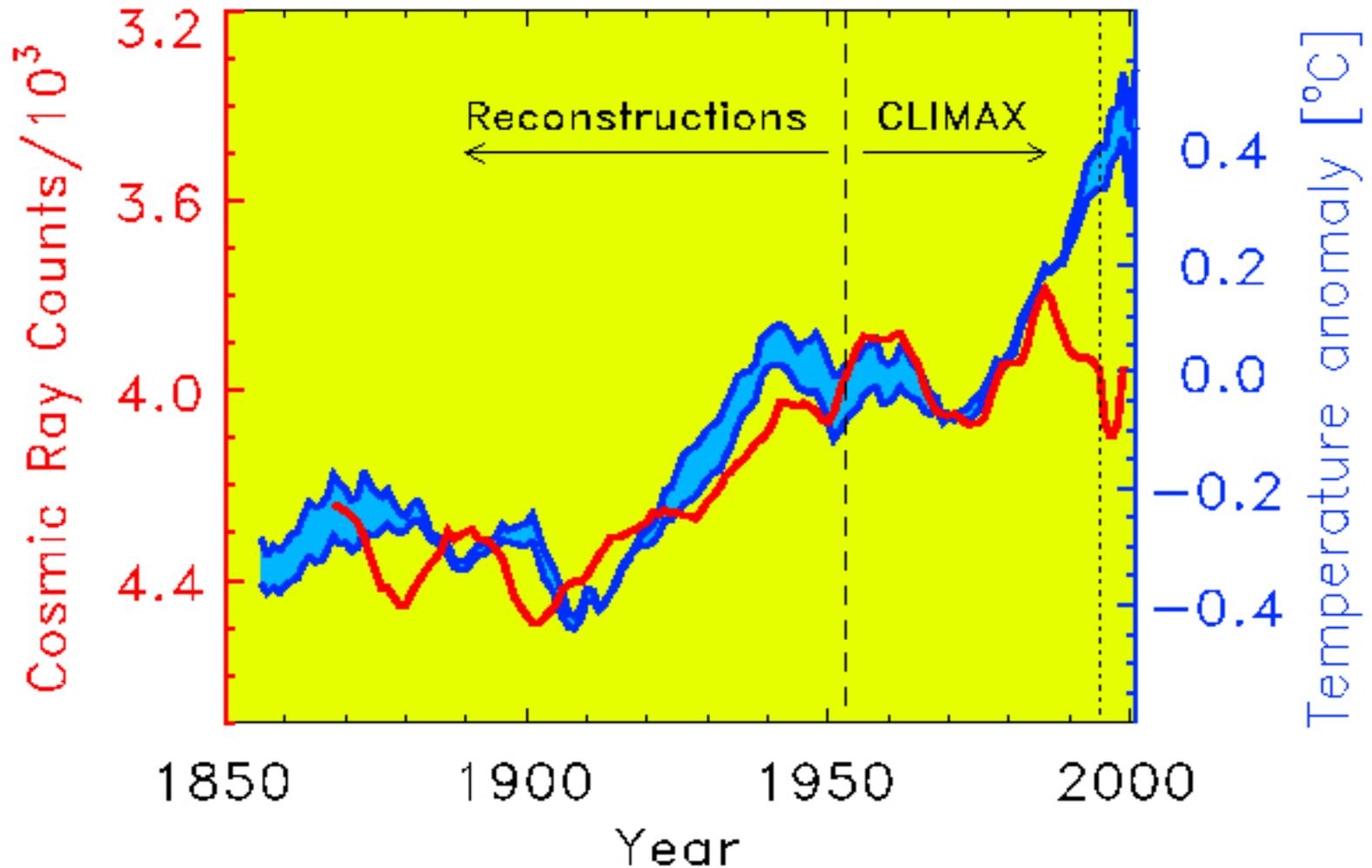


# Kosmische Strahlung und Wolkenbedeckung



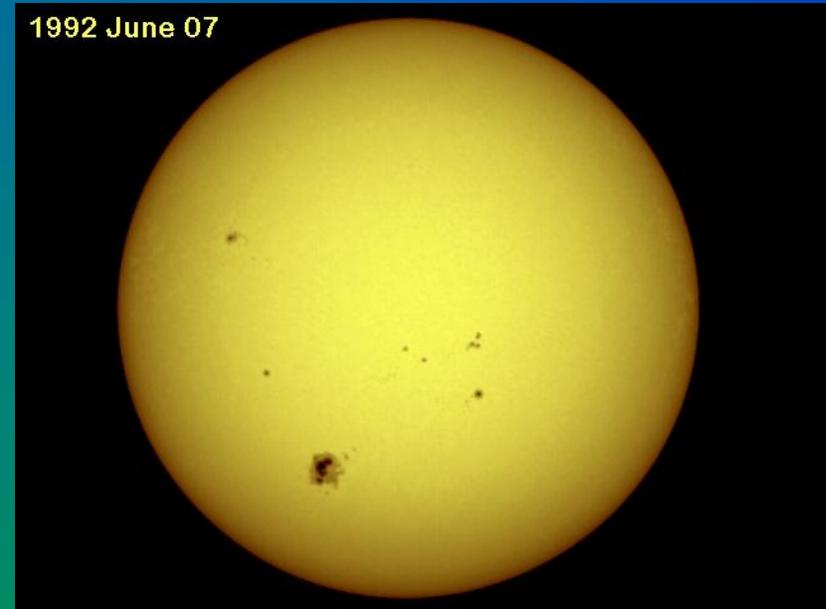
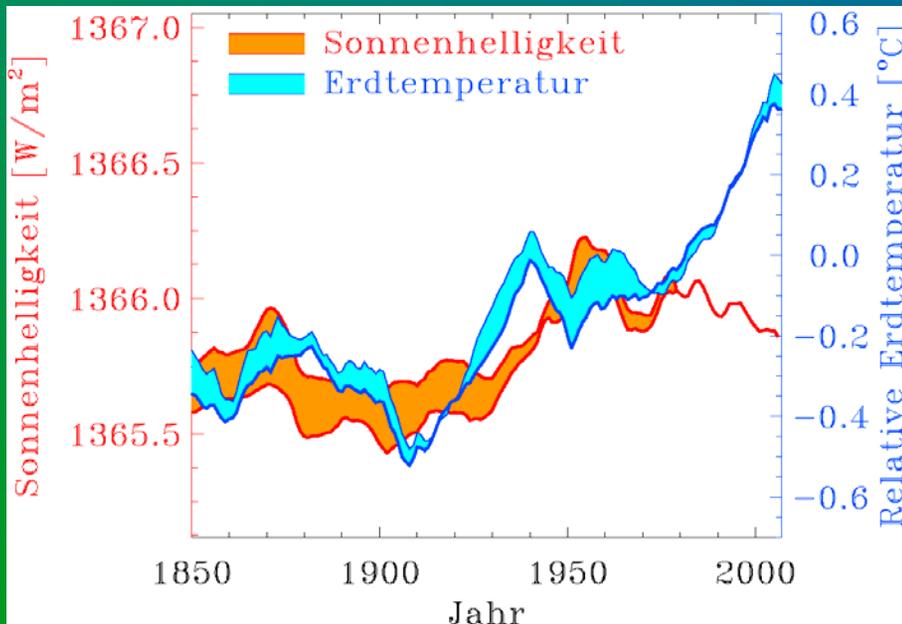


# Kosmische Strahlung und Klima



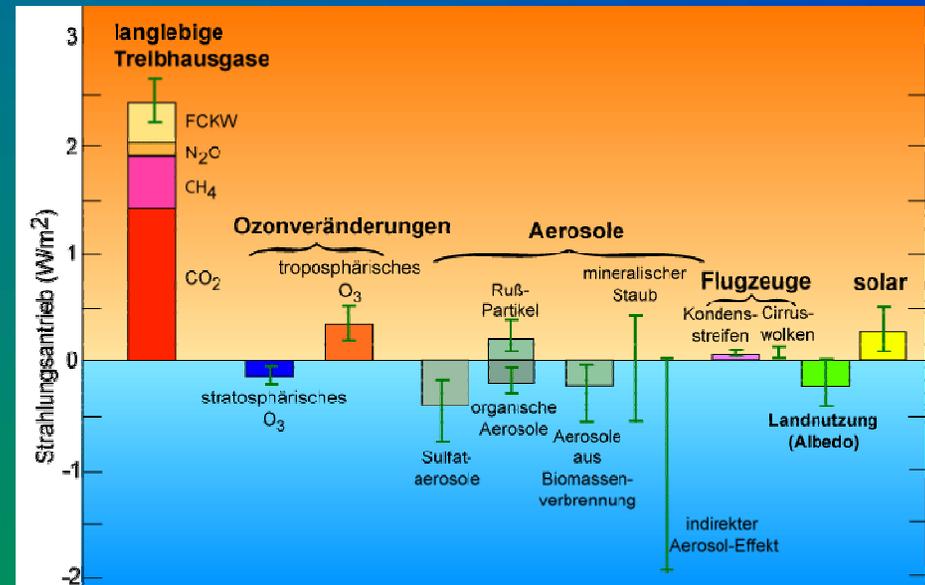
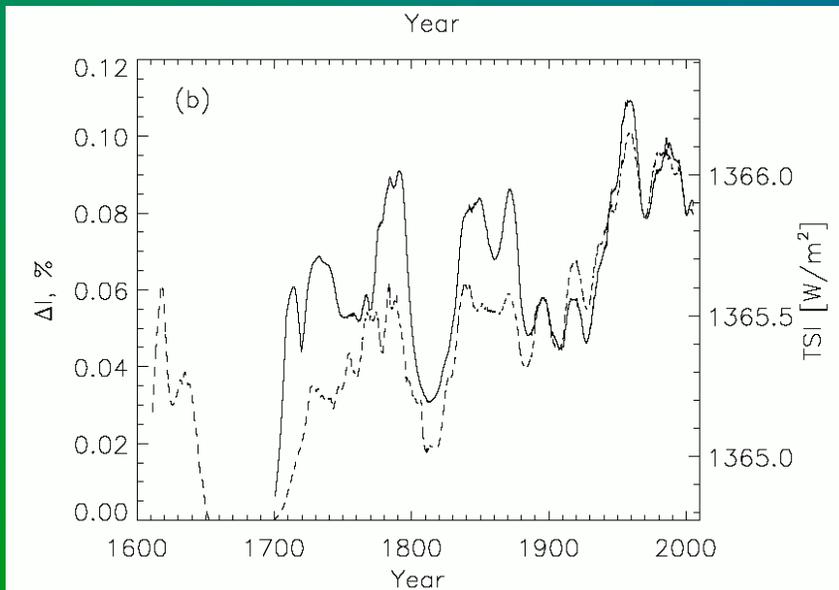
# Klimawirkung der Sonnenaktivität

- Veränderung der Gesamtstrahlung:  
im 20. Jh. zu gering für einen wesentlichen  
Beitrag zur globalen Erwärmung.  
Keine Korrelation seit  $\sim 1980$ !



# Klimawirkung der Sonnenaktivität

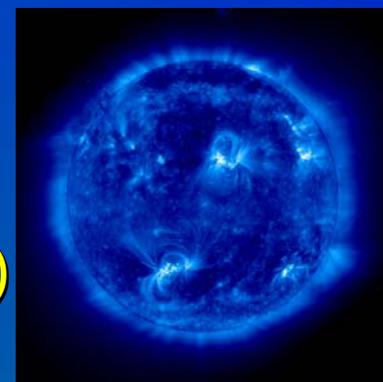
- **Veränderung der Gesamtstrahlung:** seit 1700 vergleichbar mit der Nettowirkung der anthropogenen Effekte im 20. Jh.  
Mögliche Klimawirkung (*aber: Rekonstruktion unsicher*)



# Klimawirkung der Sonnenaktivität

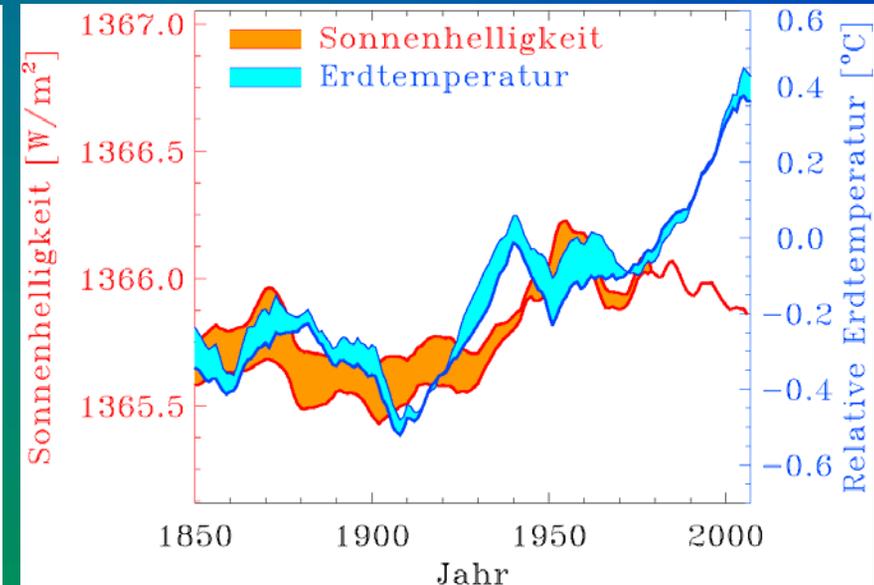
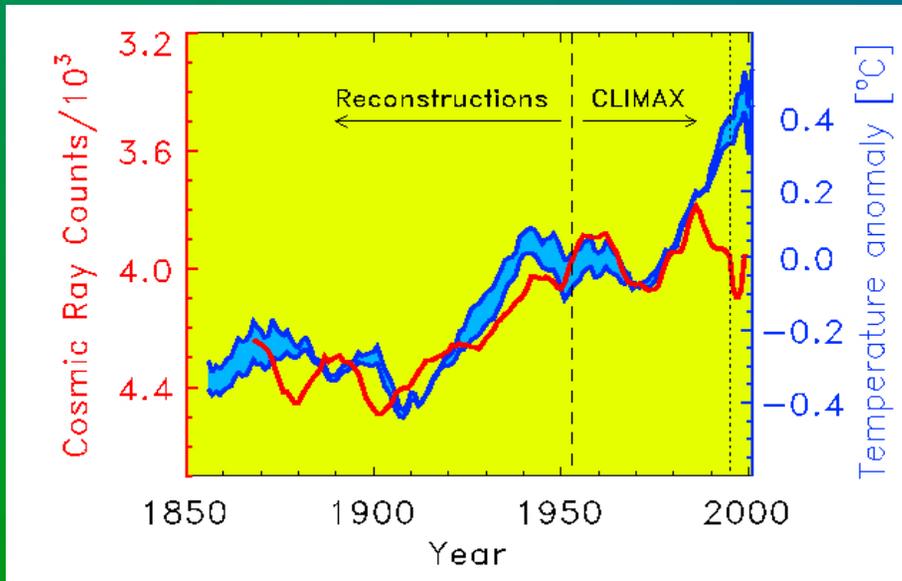
## *Indirekte Effekte:*

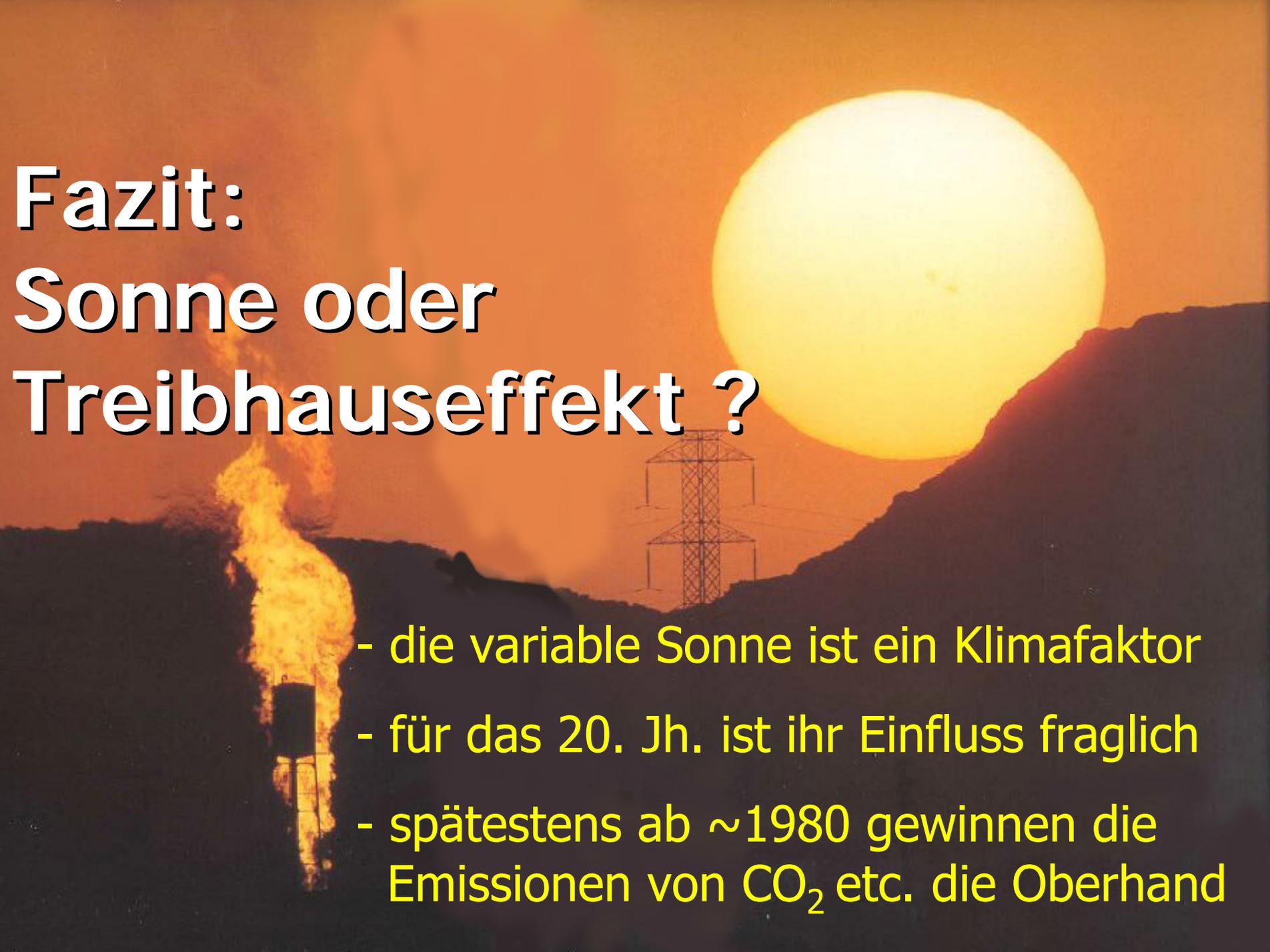
- Schwankung der UV-Strahlung
  - wirkt auf und über Ozon
  - 11-Jahres-Zyklus nachweisbar (Stratosph.)
- Veränderung der kosmischen Strahlung
  - wirkt eventuell auf die Wolkenbildung
  - Wolkenbedeckung variiert im Gleichtakt?
  - recht zuverlässige Rekonstruktion ( $^{14}\text{C}$ !)



# Klimawirkung der Sonnenaktivität

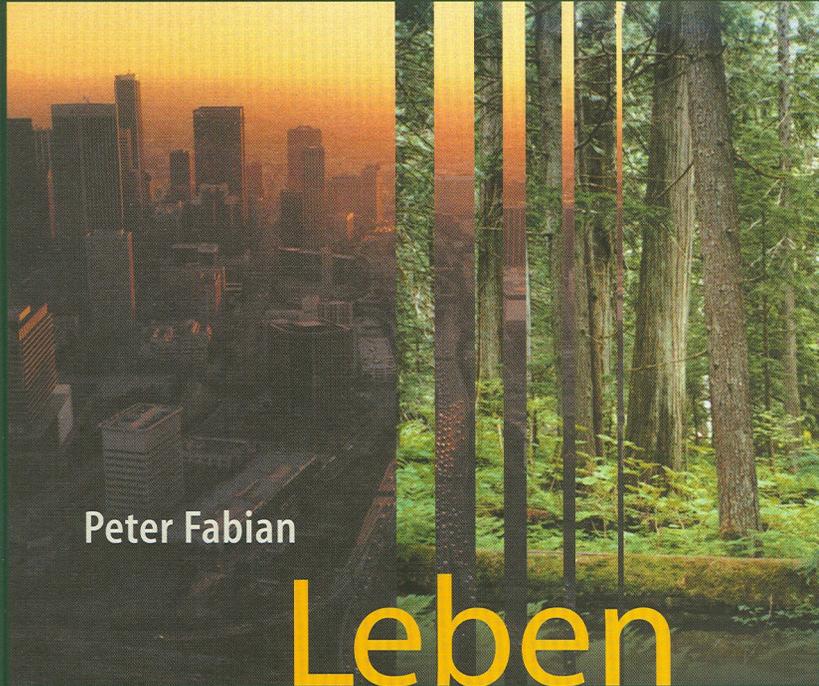
- Seit ca. 1980 steigen die Wirkungen der Sonne (Gesamthelligkeit, UV- und kosmische Strahlung) im Mittel nicht mehr an
- Aber: gleichzeitig zweiter Schub der globalen Erwärmung





# Fazit: Sonne oder Treibhauseffekt ?

- die variable Sonne ist ein Klimafaktor
- für das 20. Jh. ist ihr Einfluss fraglich
- spätestens ab ~1980 gewinnen die Emissionen von CO<sub>2</sub> etc. die Oberhand



Peter Fabian

# Leben IM TREIBHAUS

Unser Klimasystem –  
und was wir daraus machen



Springer