



Konstant ist nur der Wandel

Das Klima

seit Beginn der Erdgeschichte

Christian-D. Schönwiese
Goethe-Universität Frankfurt/Main
Institut für Atmosphäre und Umwelt

Vor 4
Urn

s einem
Erde.

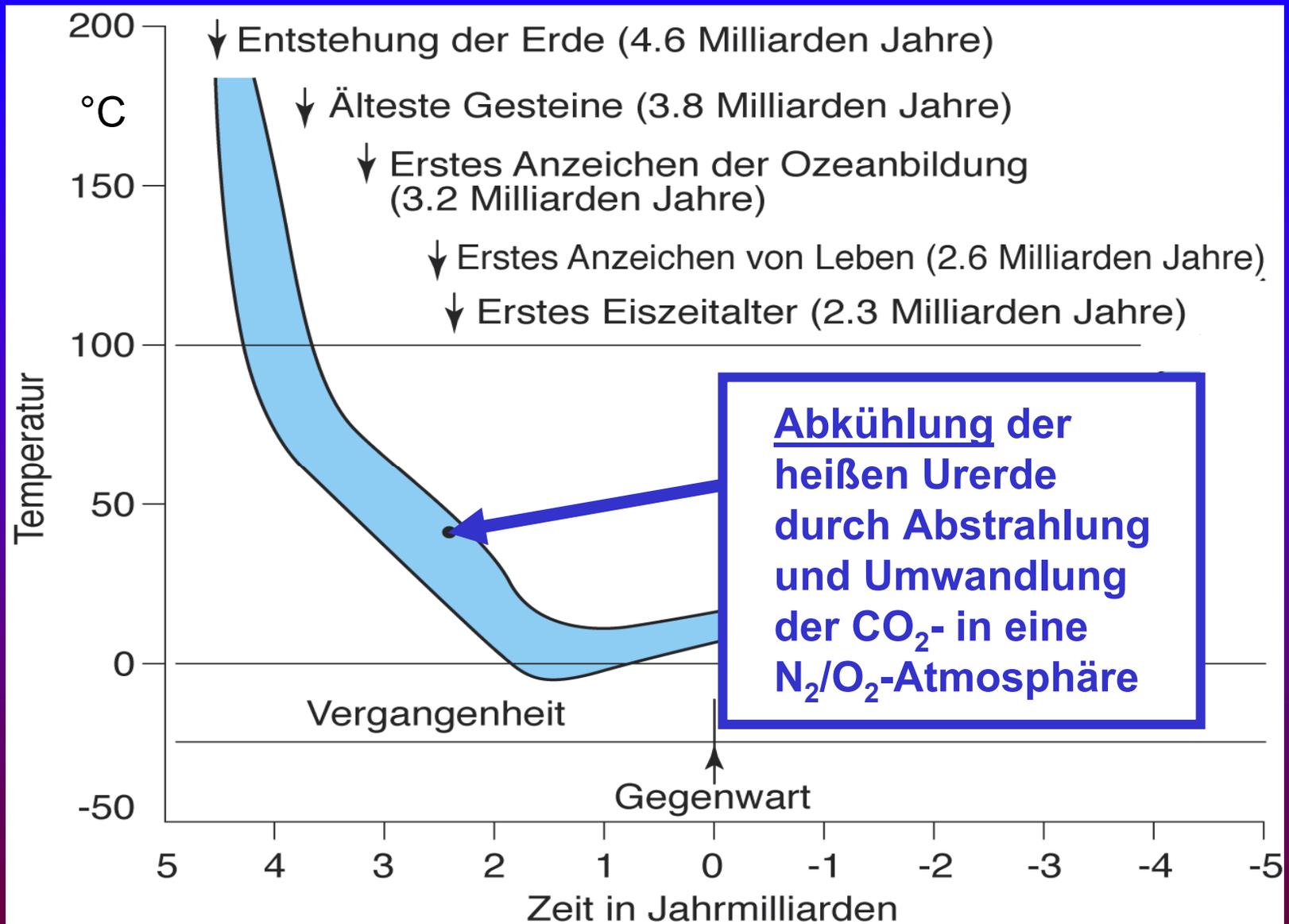
Die Zeitreise beginnt ...

Sonne

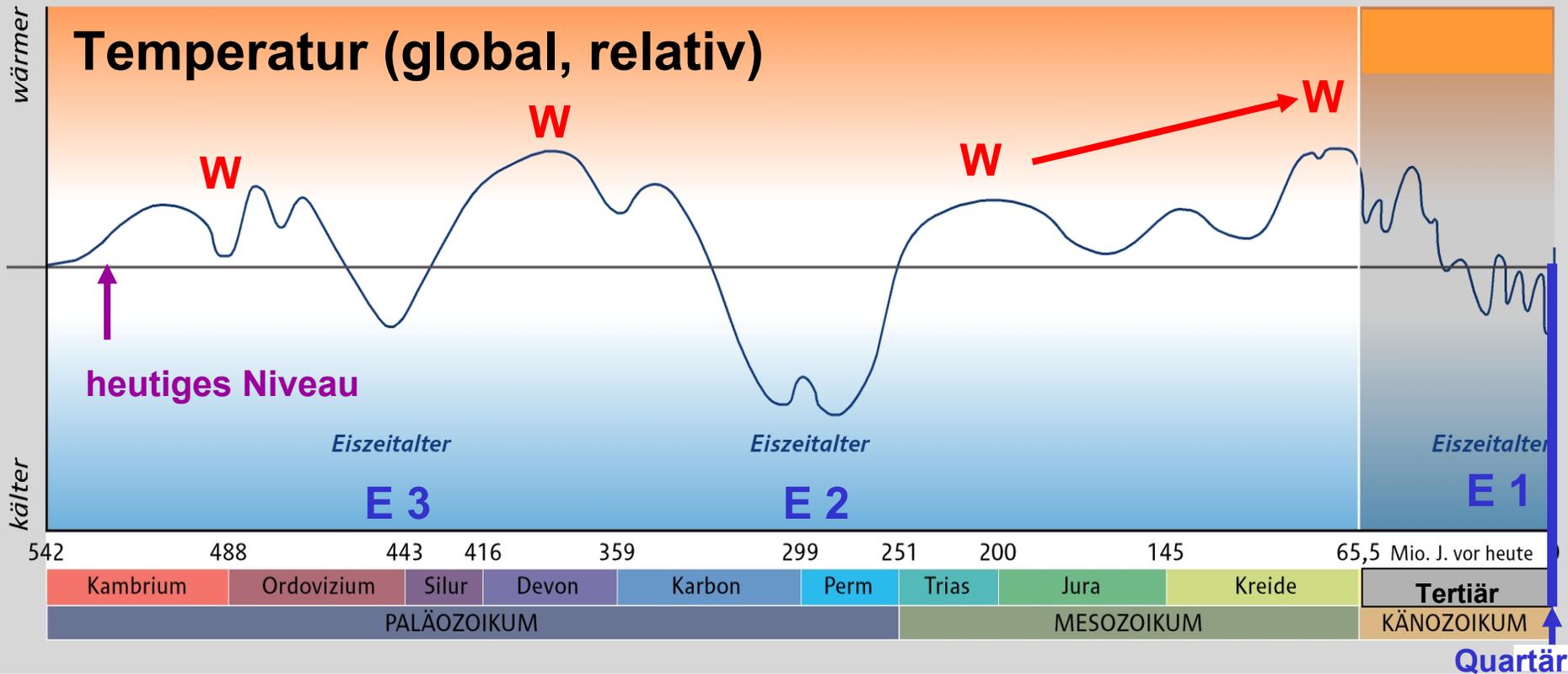
Saturn

Optimale Bedingungen des Klimas, der Atmosphäre, der Größe und Struktur der Erde, die die Entstehung des Lebens ermöglichen. Wasser und Boden sind unterschiedlichste Gründe für die Entstehung der Erde.

Klimawandel seit der Erdentstehung



Klimawandel, letzte ~ 500 Mill. Jahre

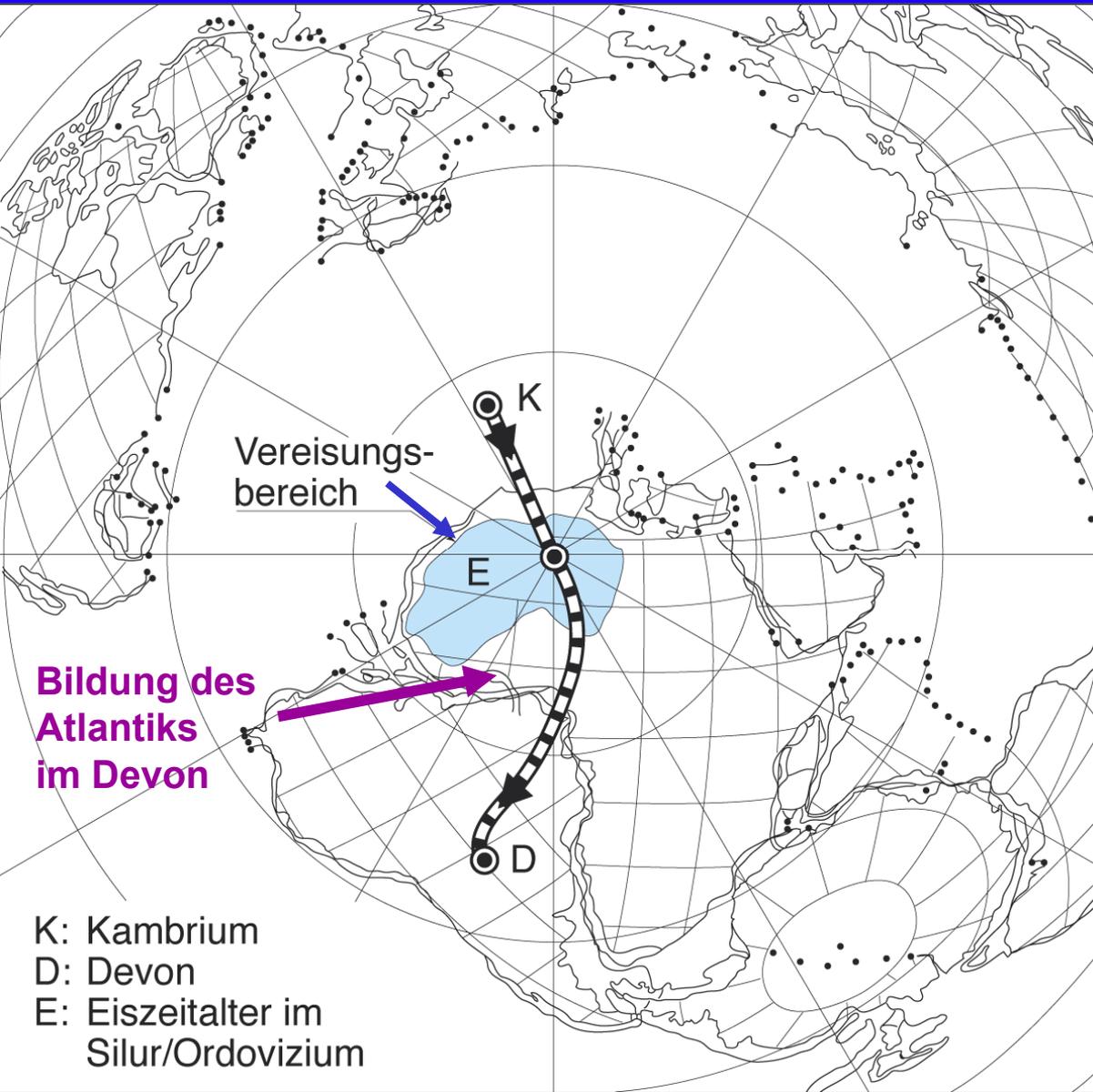


W: Warmklima ohne Eisvorkommen (akryogen)

E: Eiszeitalter, seit ca. 2 Mill. J.: Quartäres Eiszeitalter (E1)

Primäre Ursache: Kontinentaldrift, Eis-Albedo-Rückkopplung

Paläogeographie vor 440 Mill. Jahren und Relativbewegung des geographischen Südpols



Kontinentaldrift:

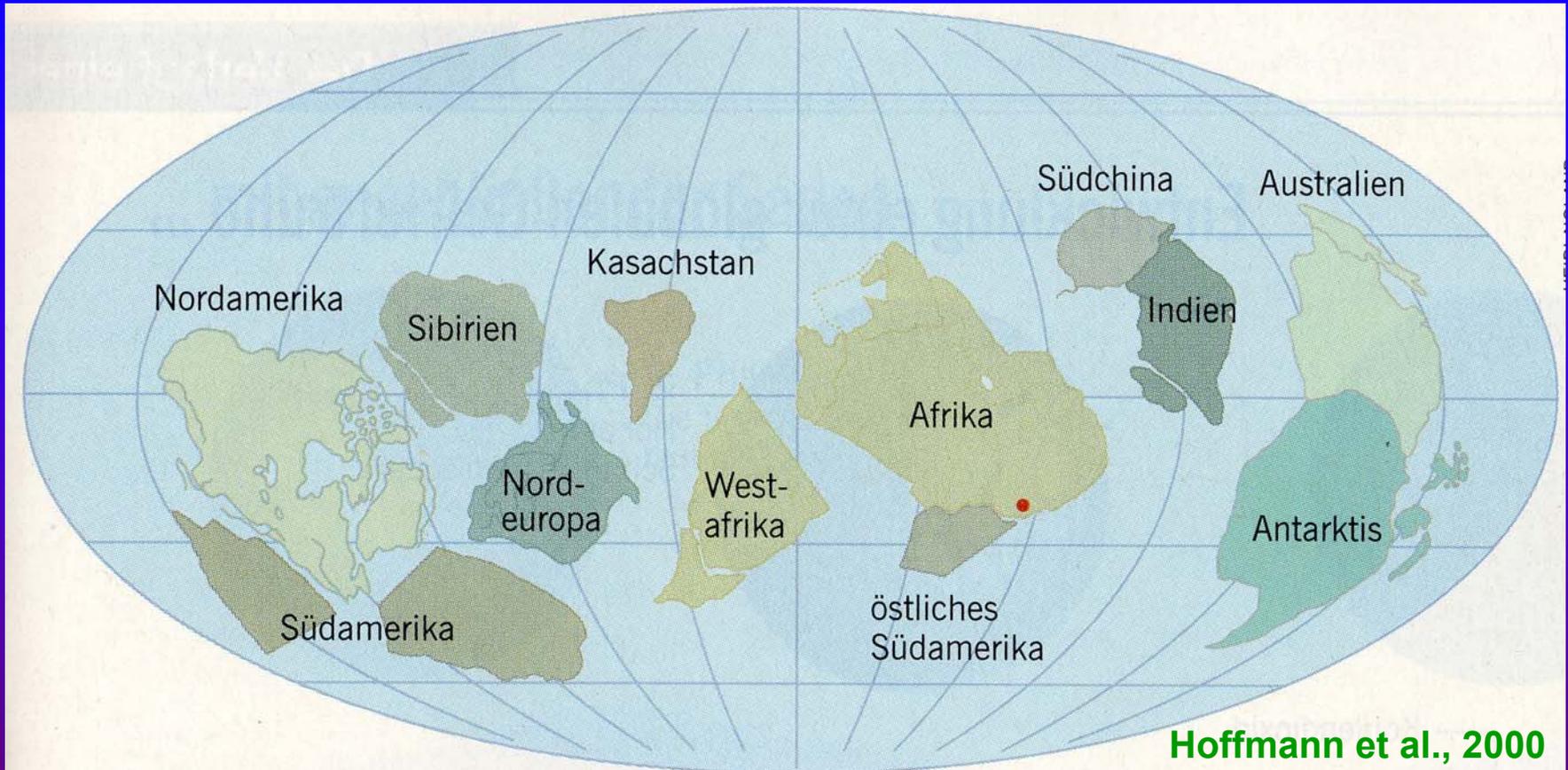
→ Lage des großen Urkontinents Gondwana im Bereich des geograph. Südpols

→ Eintritt des Silur-Ordovizischen Eiszeitalters

→ Beendigung durch die Öffnung des Atlantiks

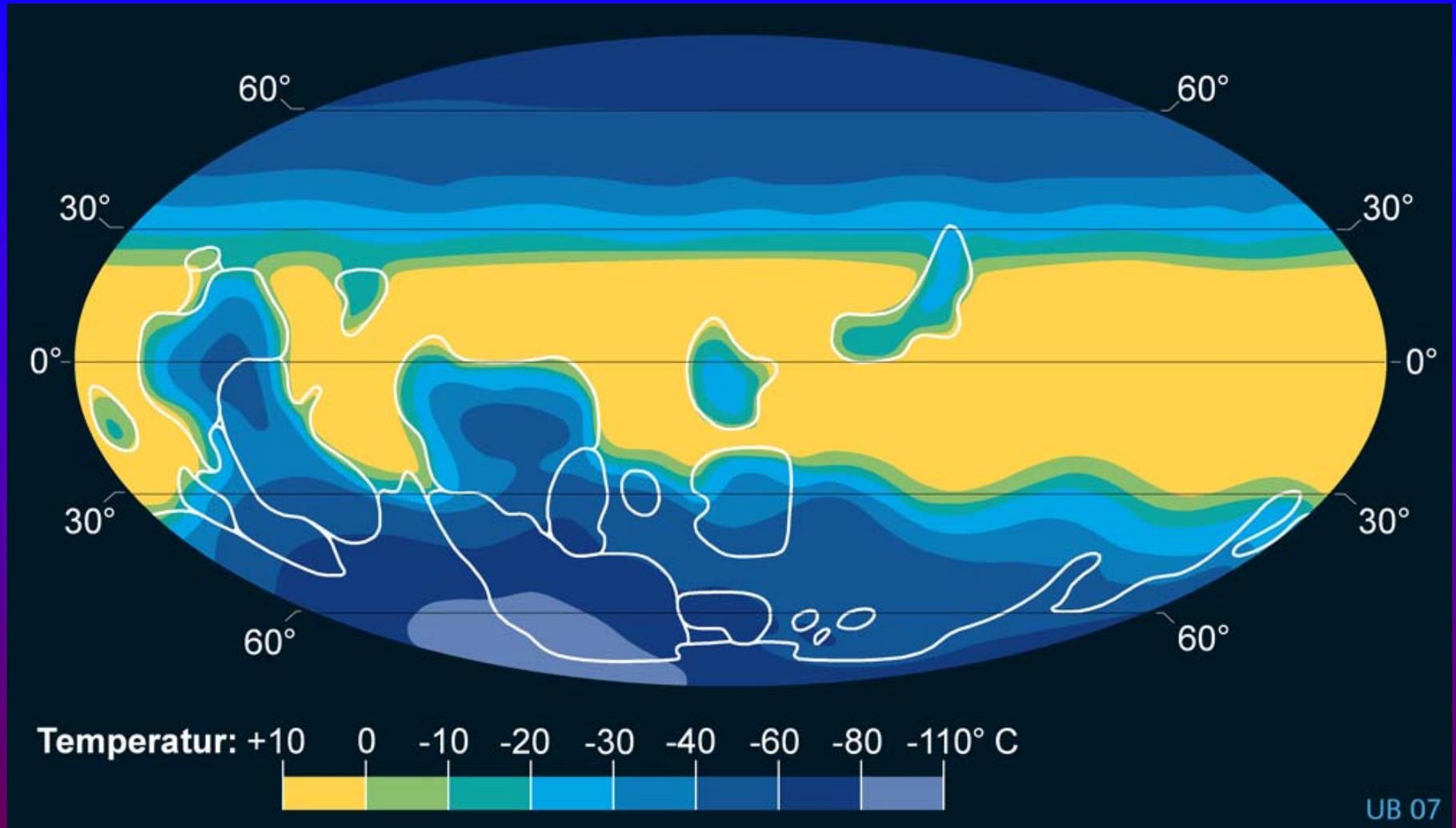
Kombiniert nach Smith et al., 1982, und Frakes, 1979, hier nach Schönwiese, 2013

Der extreme Klimazustand „Schneeball Erde“



1. Vor ca. 650-750 Mill. Jahren gruppierten sich viele relative kleine Kontinente in den Tropen → starke (chemische) Verwitterung.
2. Dies sowie die Karbonat-Bildung am Ozeanboden entzogen der Atmosphäre viel CO_2 → großräumige Vereisung der Erde).
3. Der Vulkanismus emittiert u.a. CO_2 (atm. Akkumulation wegen der fehlenden ozeanischen/biosphär. Senke) → drastische Erwärmung.

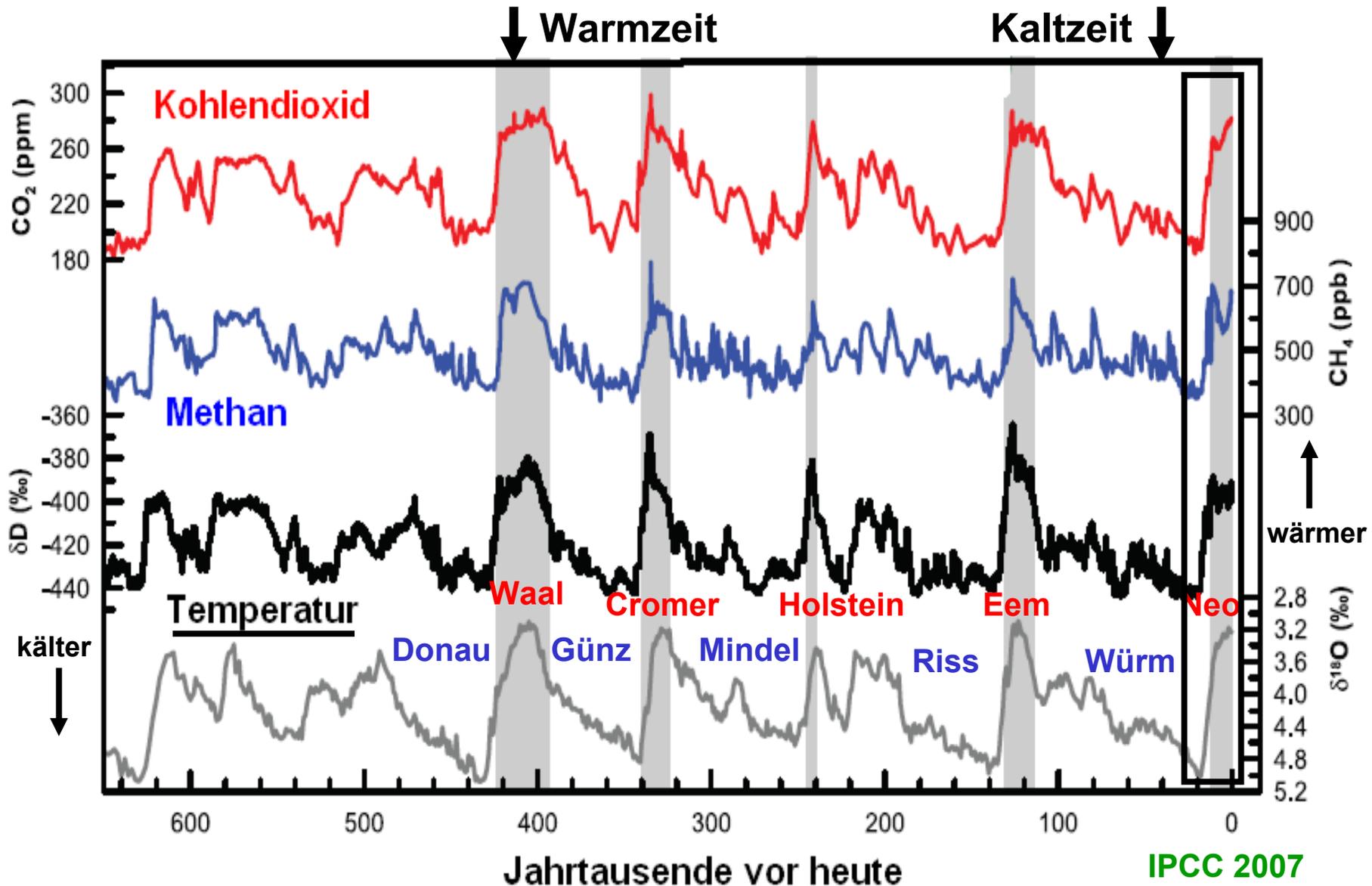
Klimasimulation „Schneeball-Erde“



Zeit: ca. 700 Mill. Jahre vor heute (Präkambrium); — Kontinentgrenzen

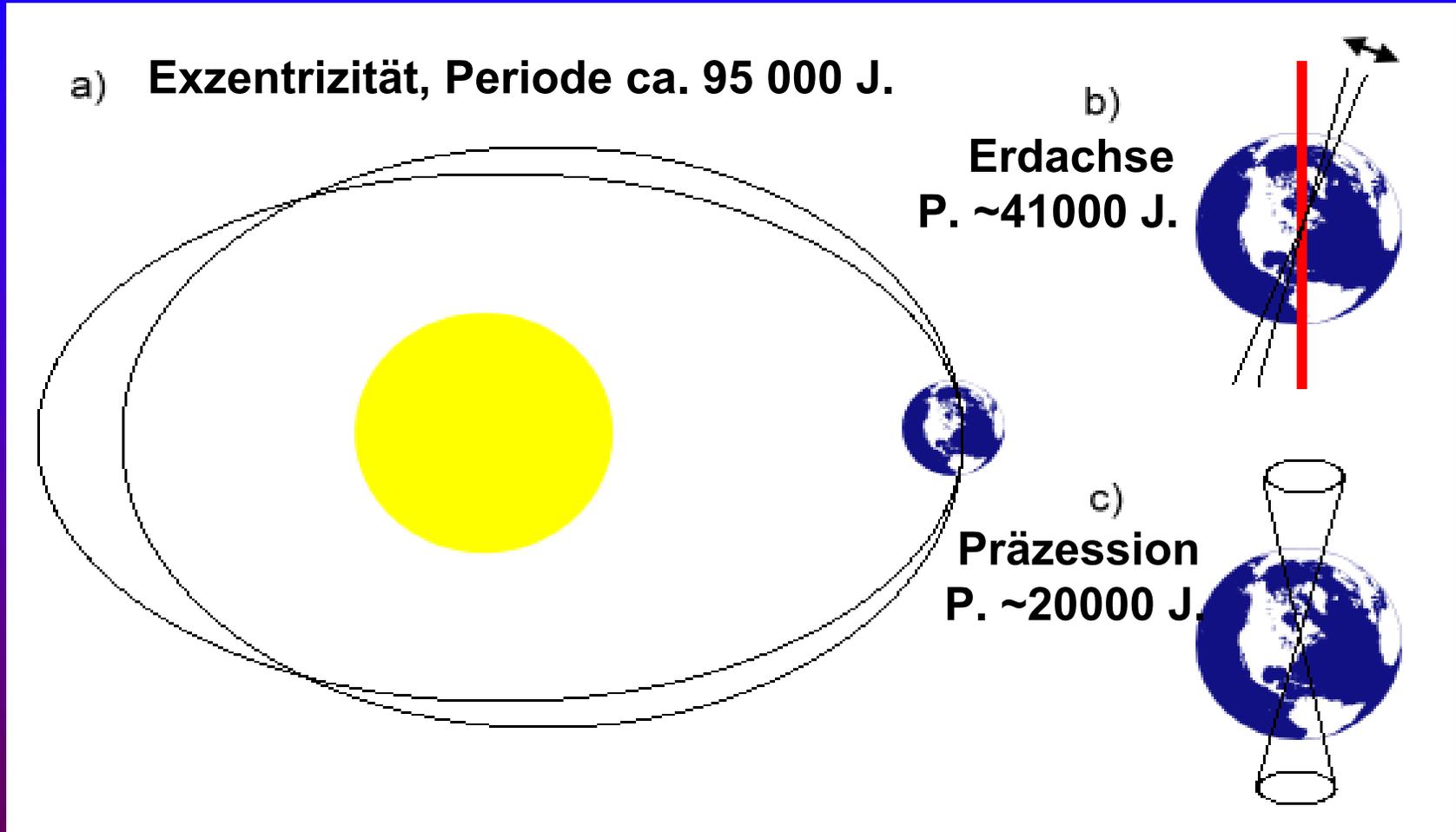
Hyde et al., 2000; verändert nach Bubenzer und Radtke, 2007

Klimawandel, letzte 650 000 Jahre



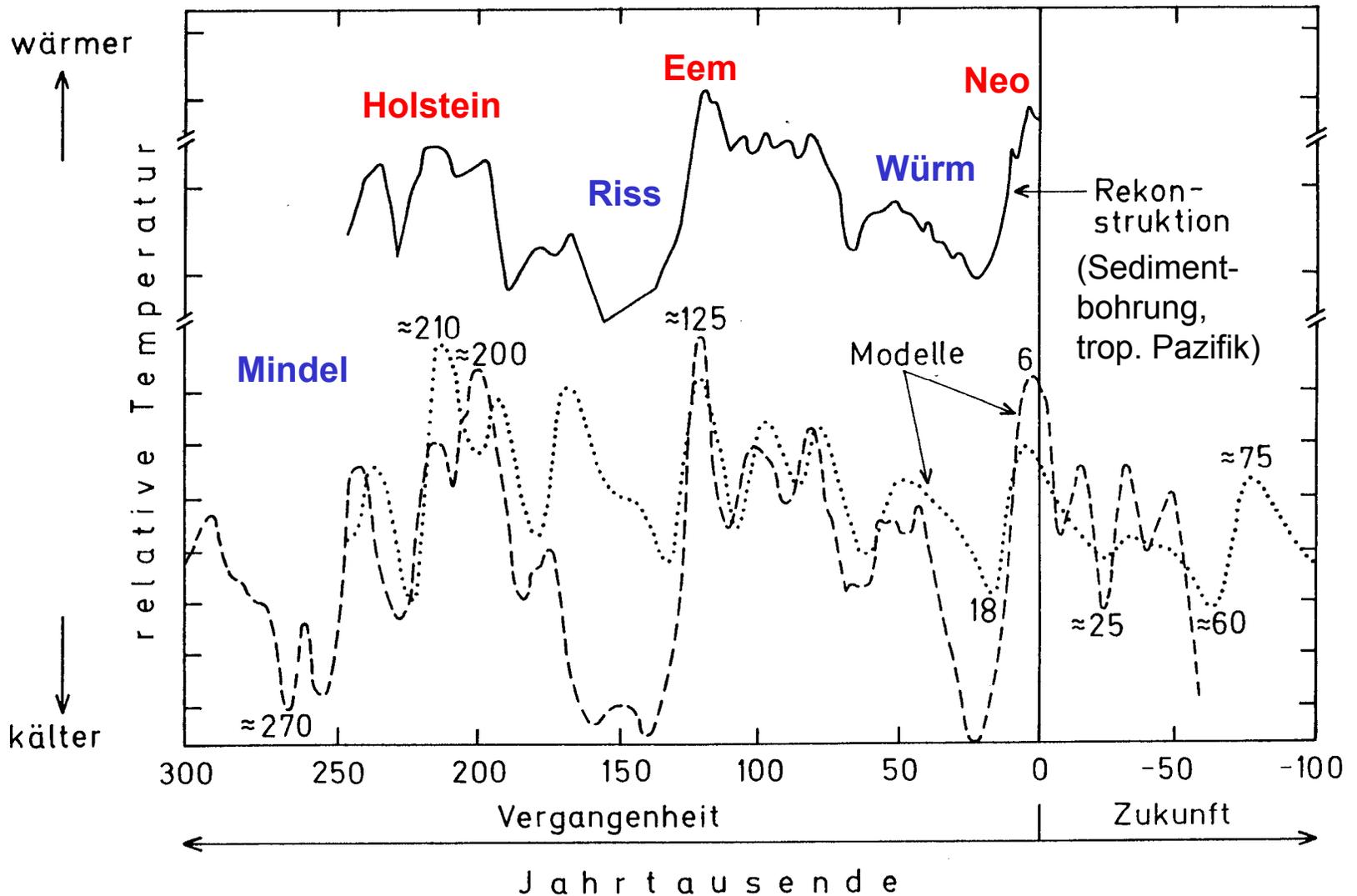
Primäre Ursache: Orbitalparameter (CO₂, CH₄ ... reagieren!)

Orbitalparameter der Erdumlaufbahn um die Sonne, die nach Milankovic den Eis-/Warmzeit-Zyklus steuern



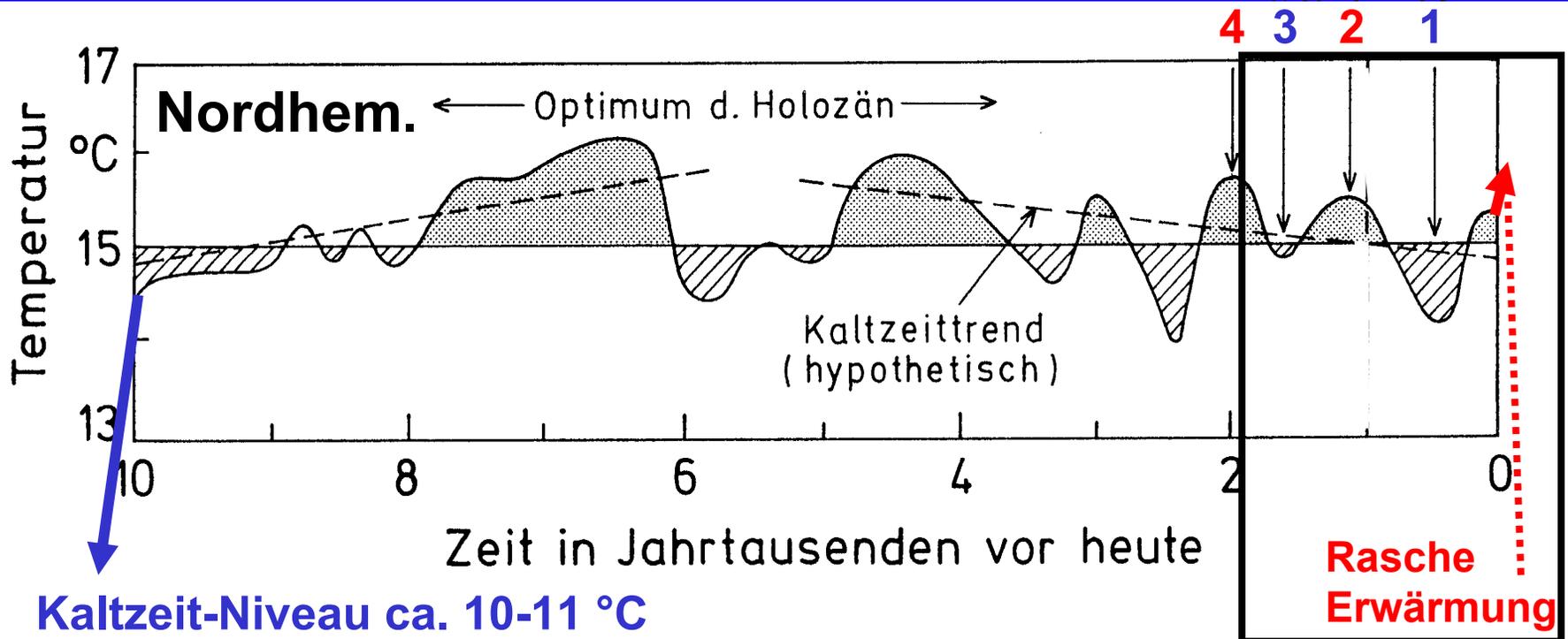
Die Exzentrizität der Erdumlaufbahn um die Sonne führt zu Variationen der Sonneneinstrahlung, die Neigung der Erdachse steuert die Ausprägung der Jahreszeiten und die Präzessionsbewegung ändert das Datum von Aphel bzw. Perihel (sonnennächste bzw. sonnenfernste Position der Erde).

Kalt-/Warmzeiten in Rekonstruktion und Modell



Nach Berger, 1981, gestrichelt, sowie Imbrie, 1984, gepunktet, u.a., hier nach Schönwiese, 1994

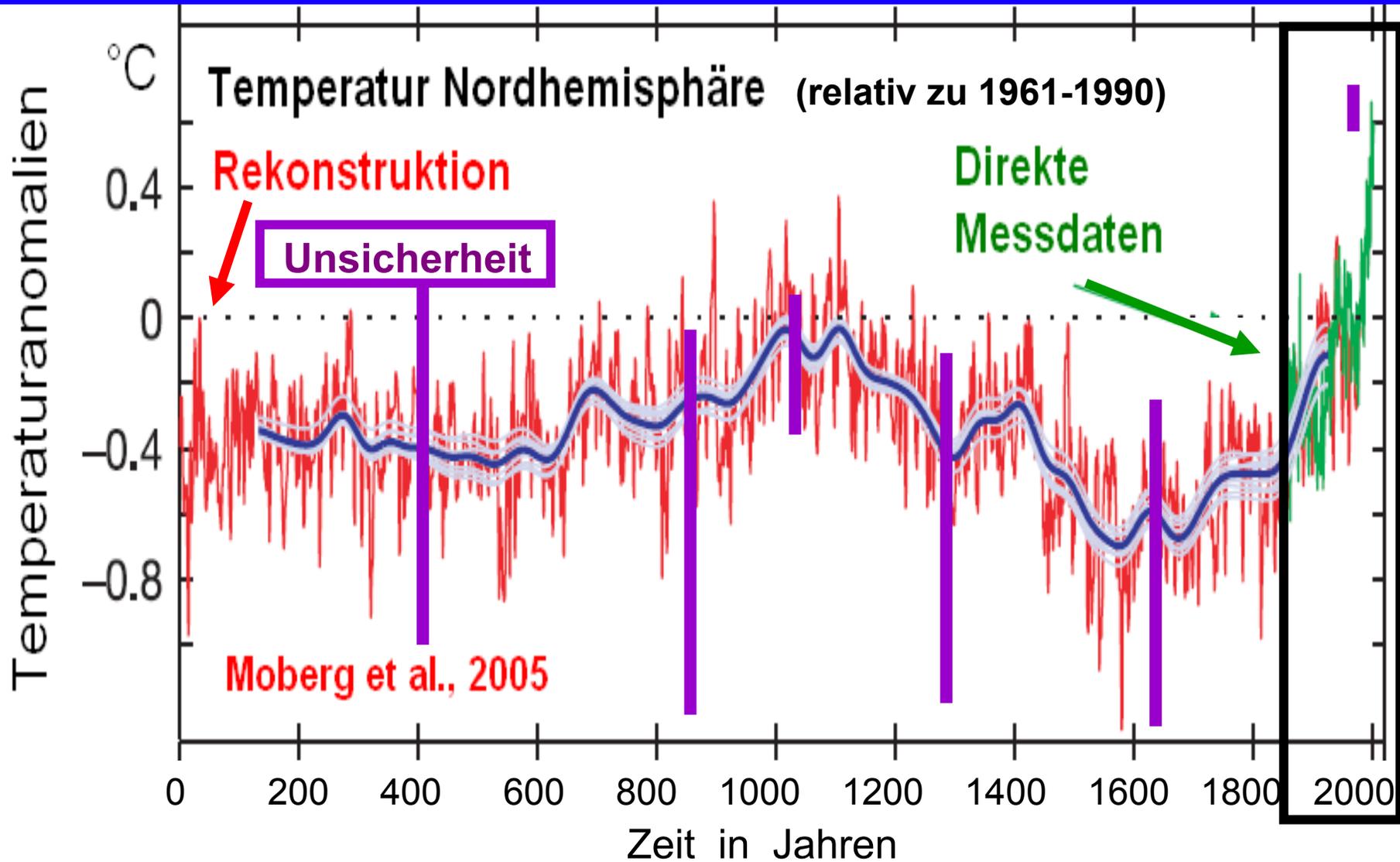
Klimawandel, letzte 10 000 Jahre



Fluktuationen zwischen relativ **warmen** u. **kalten** Epochen, zuletzt **Römerzeit-Warmphase (4)**, **Völkerwanderungszeit-Kaltphase (3)**, **Mittelalter-Warmphase (2)**, „Kleine Eiszeit“(1)

Primäre Ursachen (unsicher!): Sonnenaktivität, Vulkane; Besonderheiten ozeanischer und atmosphär. Zirkulation

Klimaänderungen, letzte ~2000 Jahre



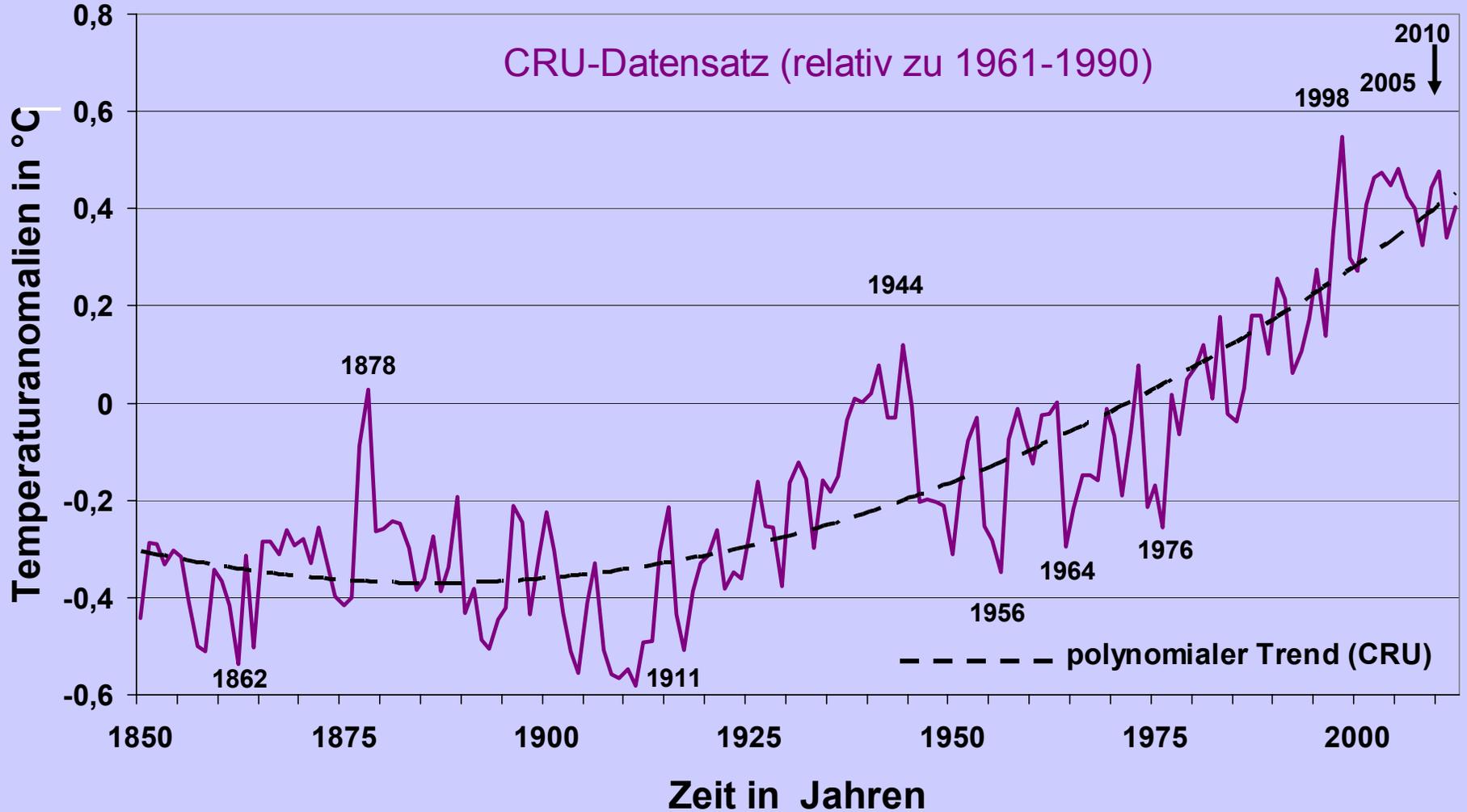
Dazu gibt es 11 Alternativen → Balkenbereich (Unsicherheit; IPCC, 2007)

Industriezeitalter: Der Klimafaktor Mensch tritt hinzu

Klimawandel, Industriezeitalter (Neoklima)

Klimawandel, Industriezeitalter (Neoklima)

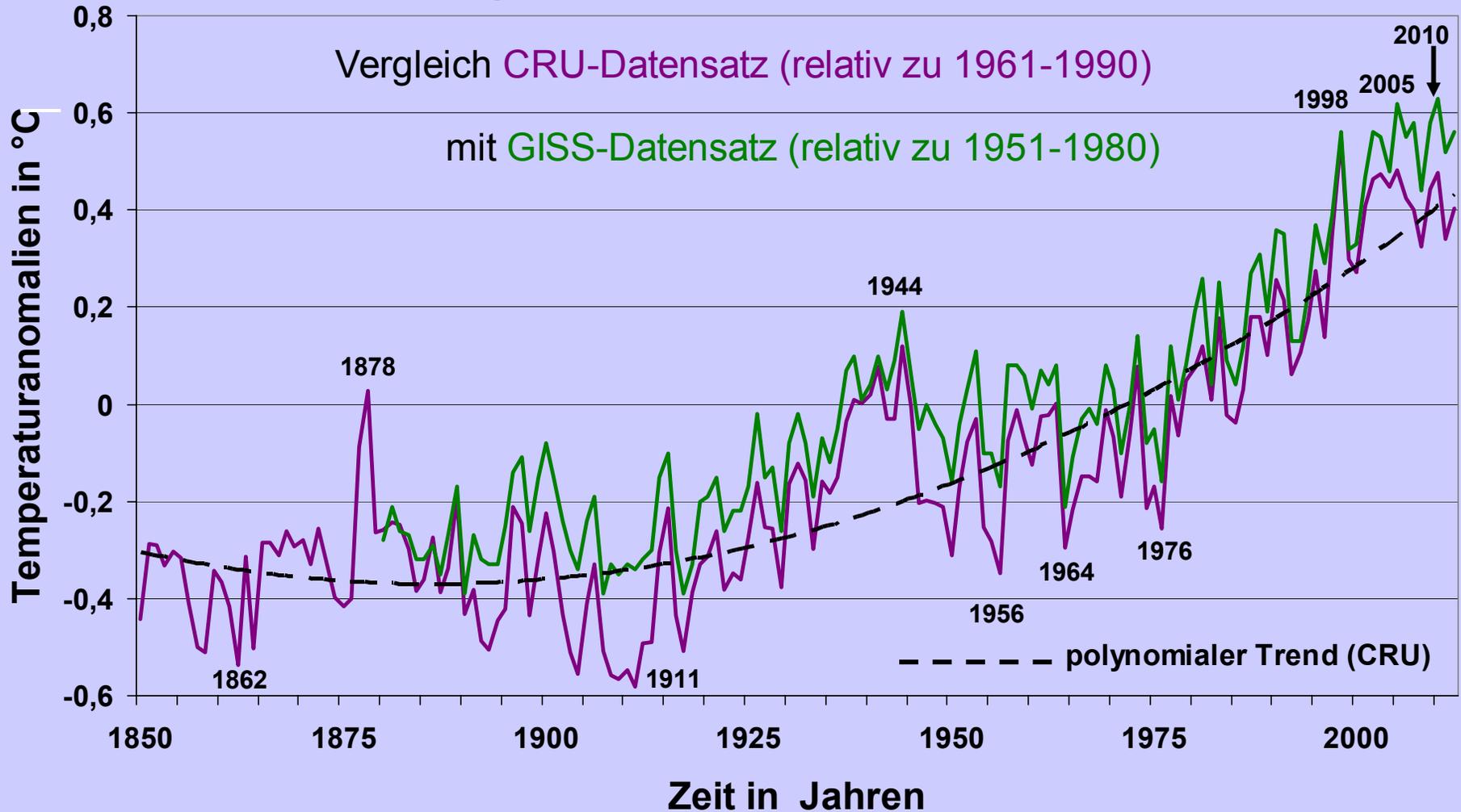
Globaltemperatur, Jahresanomalien 1850 - 2012



CRU: Climatic Research Unit, Universität Norwich, UK;

Klimawandel, Industriezeitalter (Neoklima)

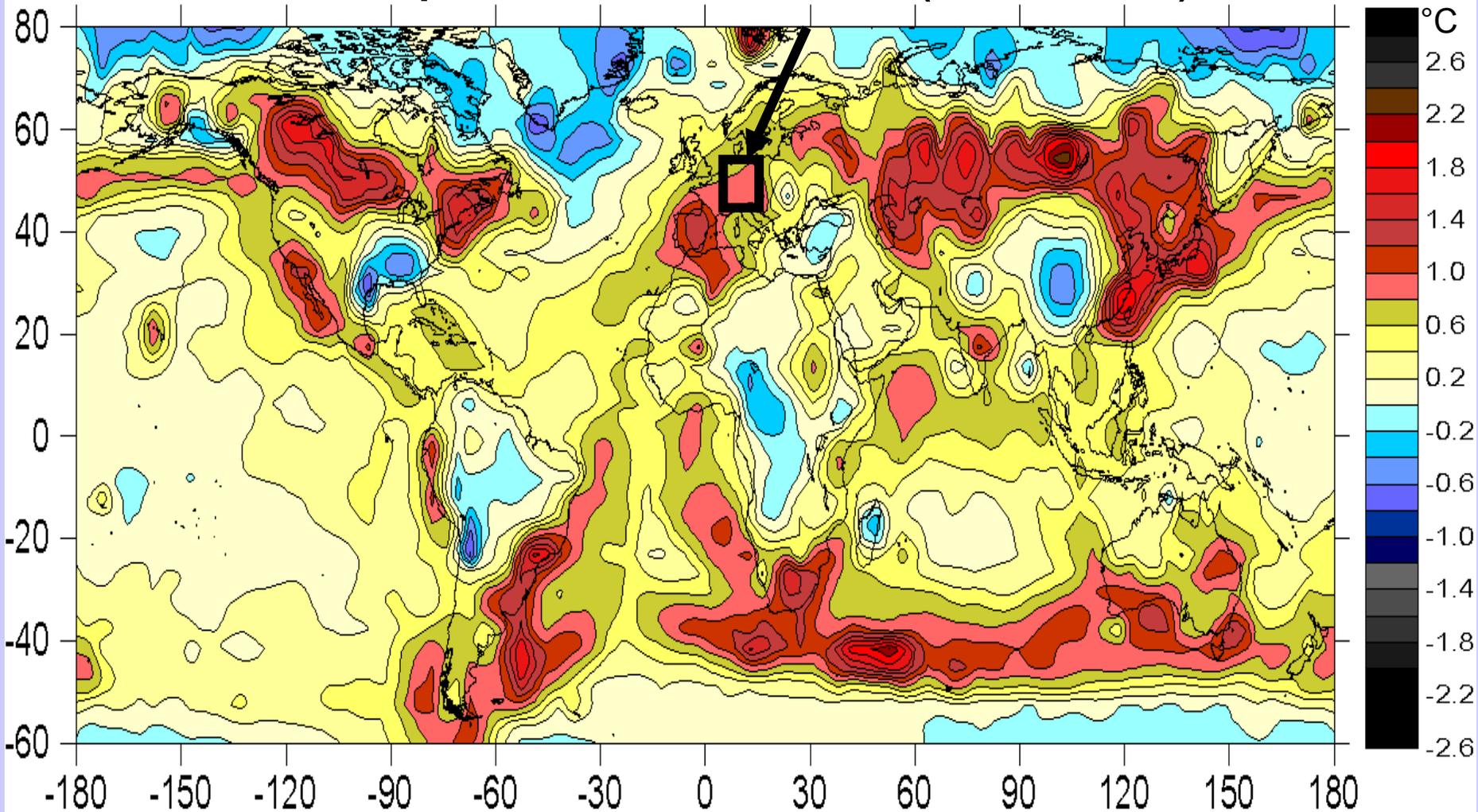
Globaltemperatur, Jahresanomalien 1850 - 2012



CRU: Climatic Research Unit, Universität Norwich, UK; GISS: Goddard Institute for Space Studies, NASA, USA

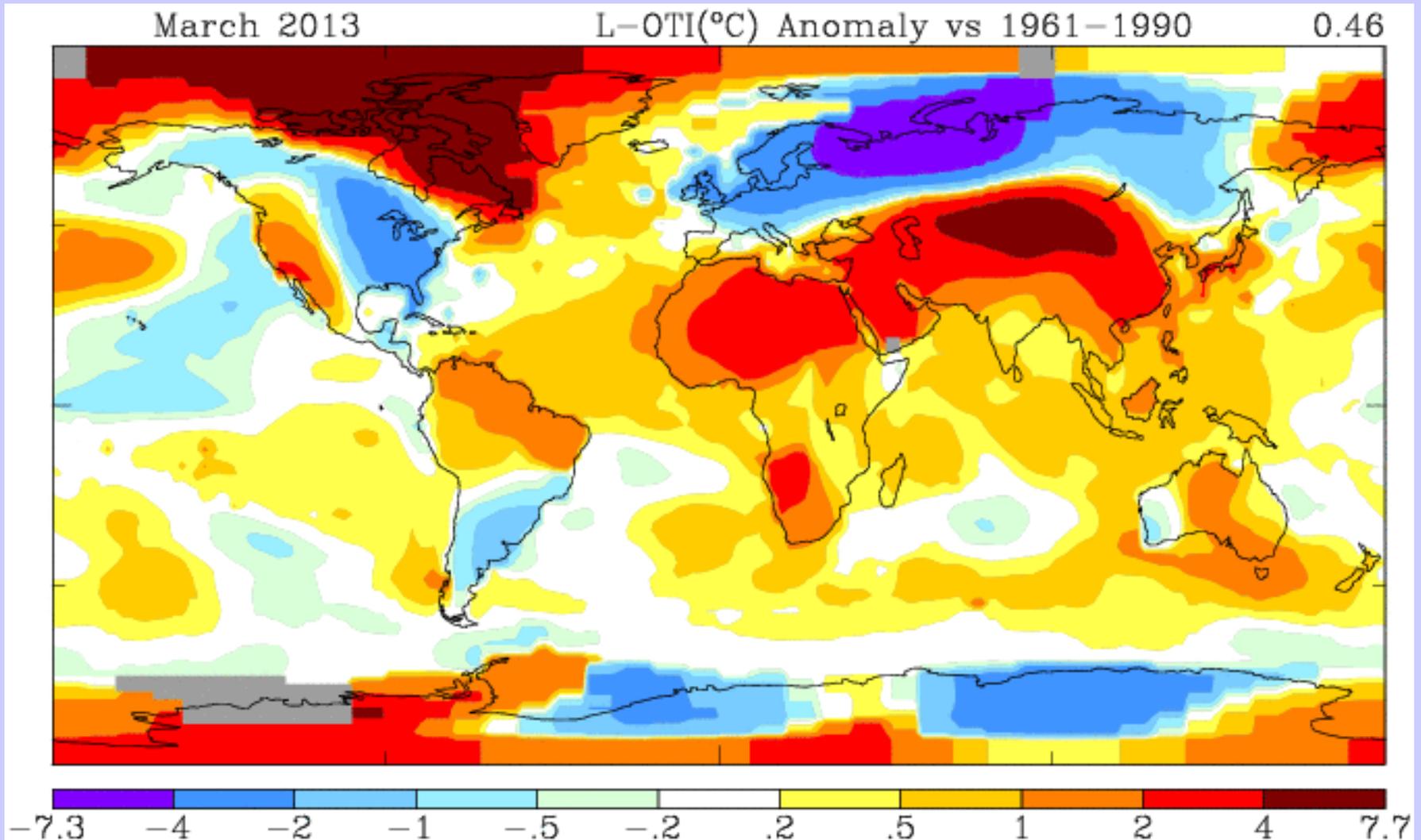
Regionale Aspekte des Klimawandels

Temperatortrends 1901-2000 (Jahreswerte)



Datenquelle: Jones et al., 2005; Analyse: Schönwiese et al, 2005

Temperatur-Anomaliekarte März 2013



Quelle: GISS, NASA, USA (Internet, Abruf 16.04.2013)

Übersicht der jahreszeitlichen Klimatrends in Deutschland

(Flächenmittelwerte, nach Schönwiese und Janoschitz, 2005)

Übersicht der jahreszeitlichen Klimatrends in Deutschland

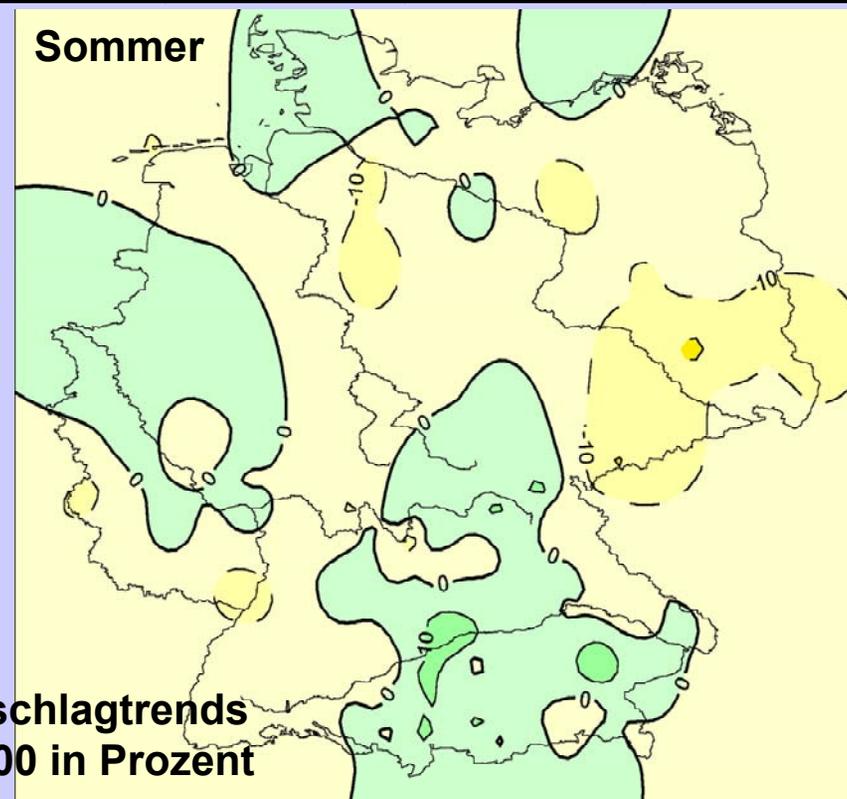
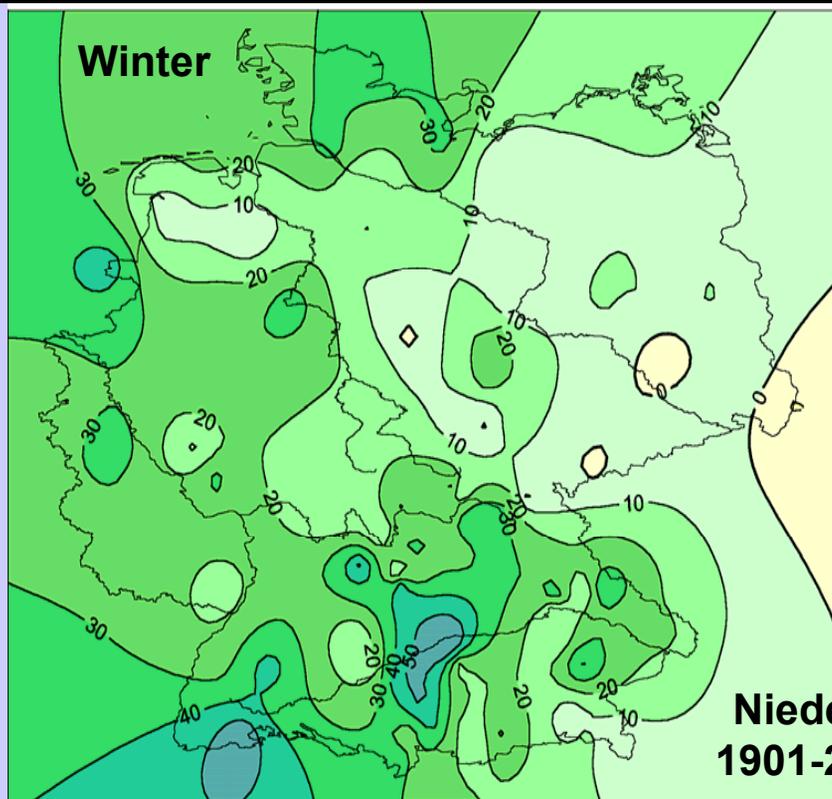
(Flächenmittelwerte, nach Schönwiese und Janoschitz, 2005)

Klimaelement, Zeitintervall	Frühling	Sommer	Herbst	Winter	Jahr
Temperatur, 1901 – 2000	+ 0,8 °C	+ 1,0 °C	+ 1,1 °C	+ 0,8 °C	+ 1,0 °C
1951 – 2000	+ 1,4 °C	+ 0,9 °C	+ 0,2 °C	+ 1,6 °C	+ 1,0 °C

Übersicht der jahreszeitlichen Klimatrends in Deutschland

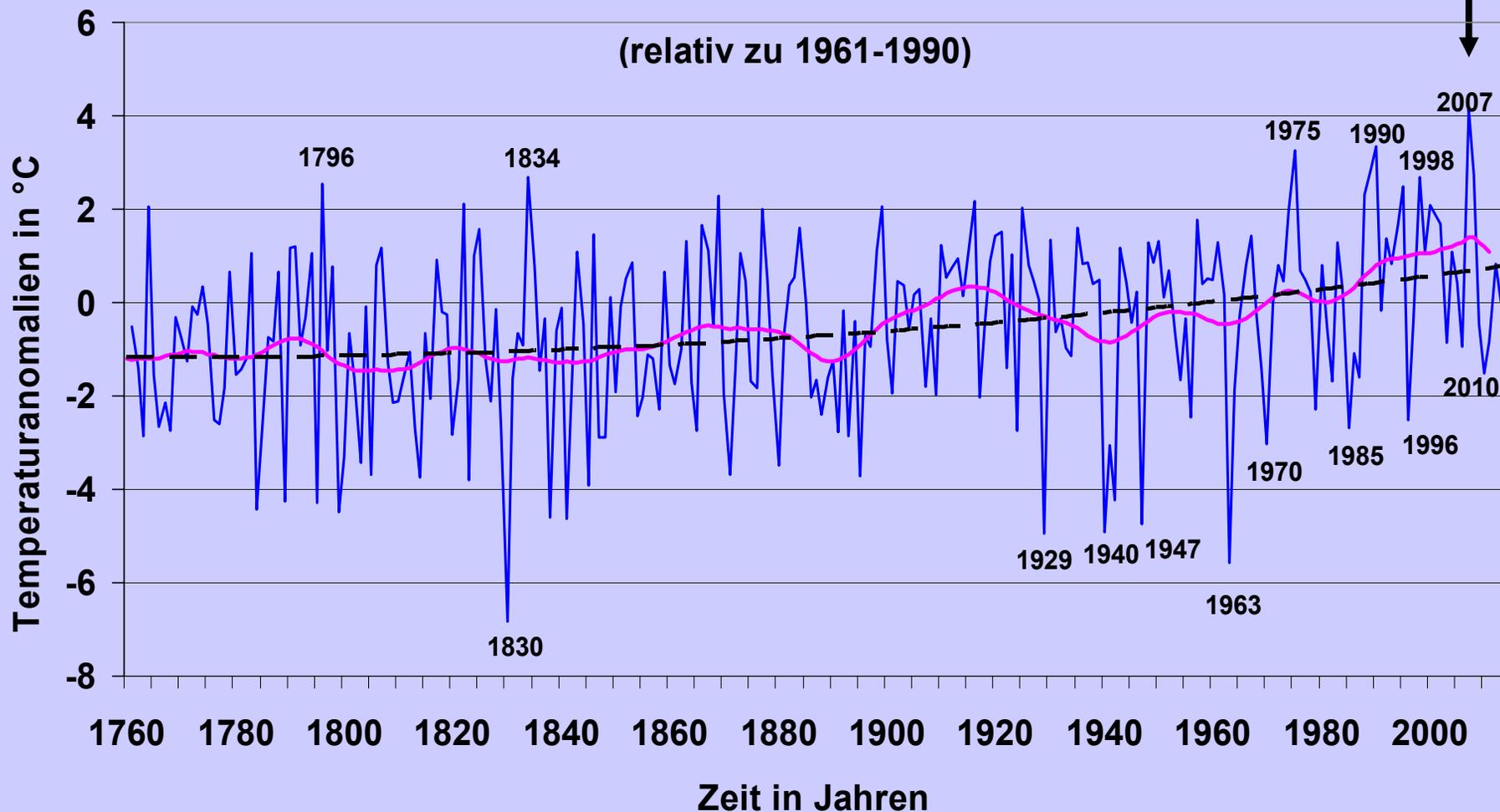
(Flächenmittelwerte, nach Schönwiese und Janoschitz, 2005)

Klimaelement, Zeitintervall	Frühling	Sommer	Herbst	Winter	Jahr
Temperatur, 1901 – 2000	+ 0,8 °C	+ 1,0 °C	+ 1,1 °C	+ 0,8 °C	+ 1,0 °C
1951 – 2000	+ 1,4 °C	+ 0,9 °C	+ 0,2 °C	+ 1,6 °C	+ 1,0 °C
Niederschlag, 1901 – 2000	+ 13 %	- 3 %	+ 9 %	+ 19 %	+ 9 %
1951 – 2000	+ 14 %	- 16 %	+ 18 %	+ 19 %	+ 6 %



**Niederschlagstrends
1901-2000 in Prozent**

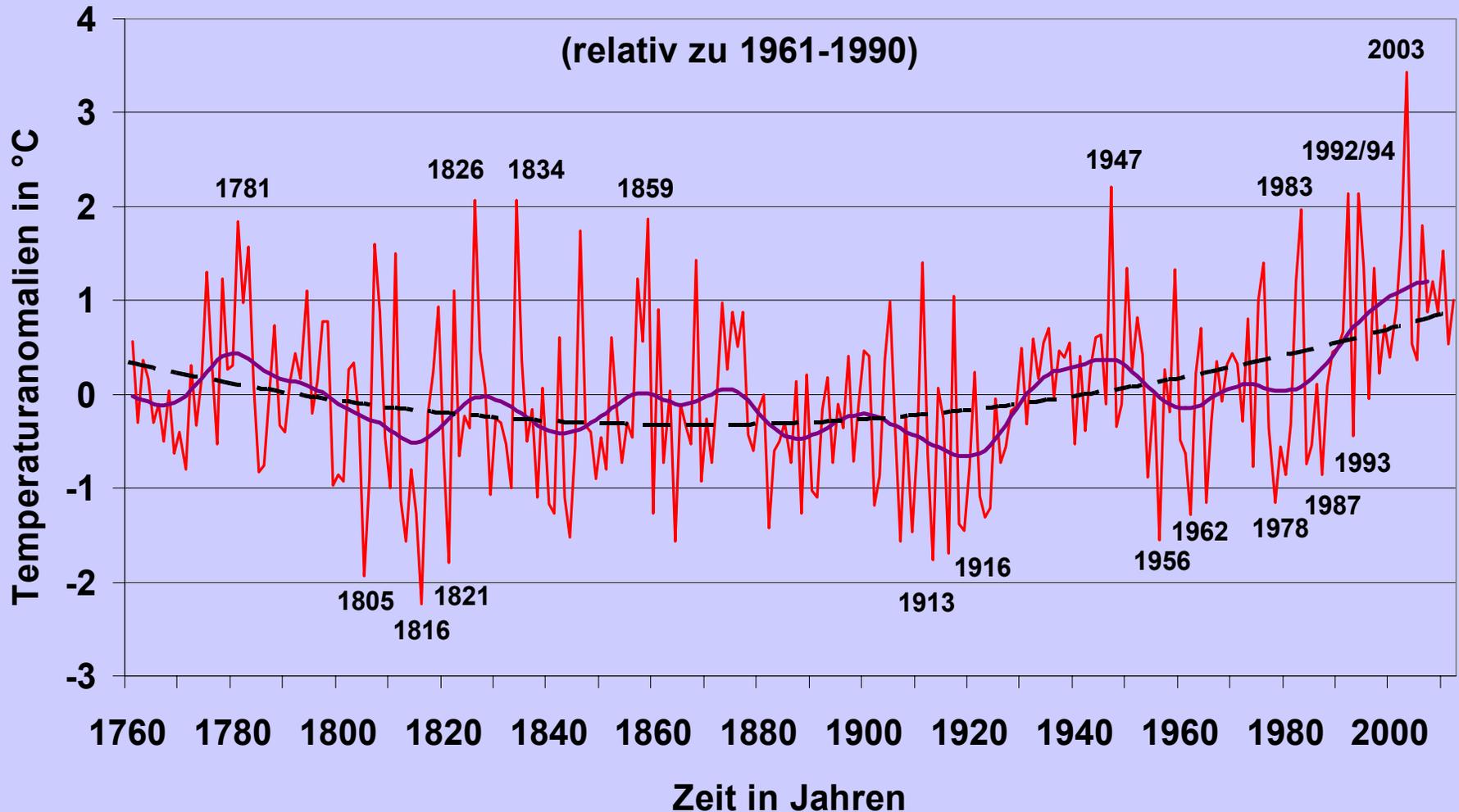
Deutschland-Temperatur, Winteranomalien 1761-2013



Datenquelle: Rapp,
2000; DWD; Analyse:
Schönwiese

Mittelwert (1961-1990): 0,2 °C: 2006/07: 4,3 °C

Deutschland-Temperatur, Sommeranomalien 1761-2012



Datenquelle: Rapp,
2000; DWD; Analyse:
Schönwiese

Mittelwert (1961-1990): 16,2 °C; 2003: 19,6 °C

Wird das Klima extremer?



Dresden,
Aug. 2002



Düsseldorf, Aug. 2003

Münchener Rück
Munich Re Group



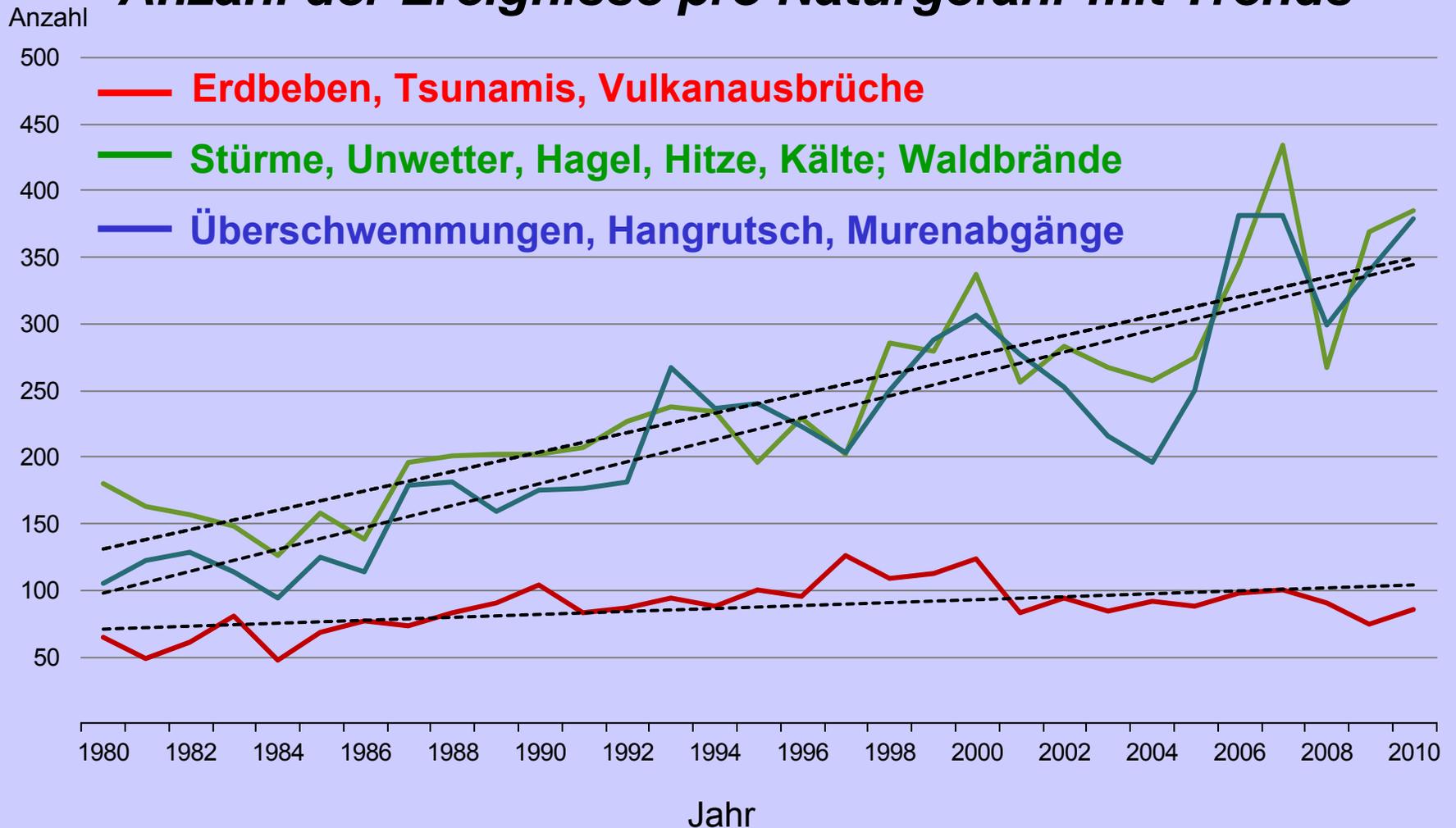
New Orleans, Aug. 2005



Motten (Rhön), Okt. 2005

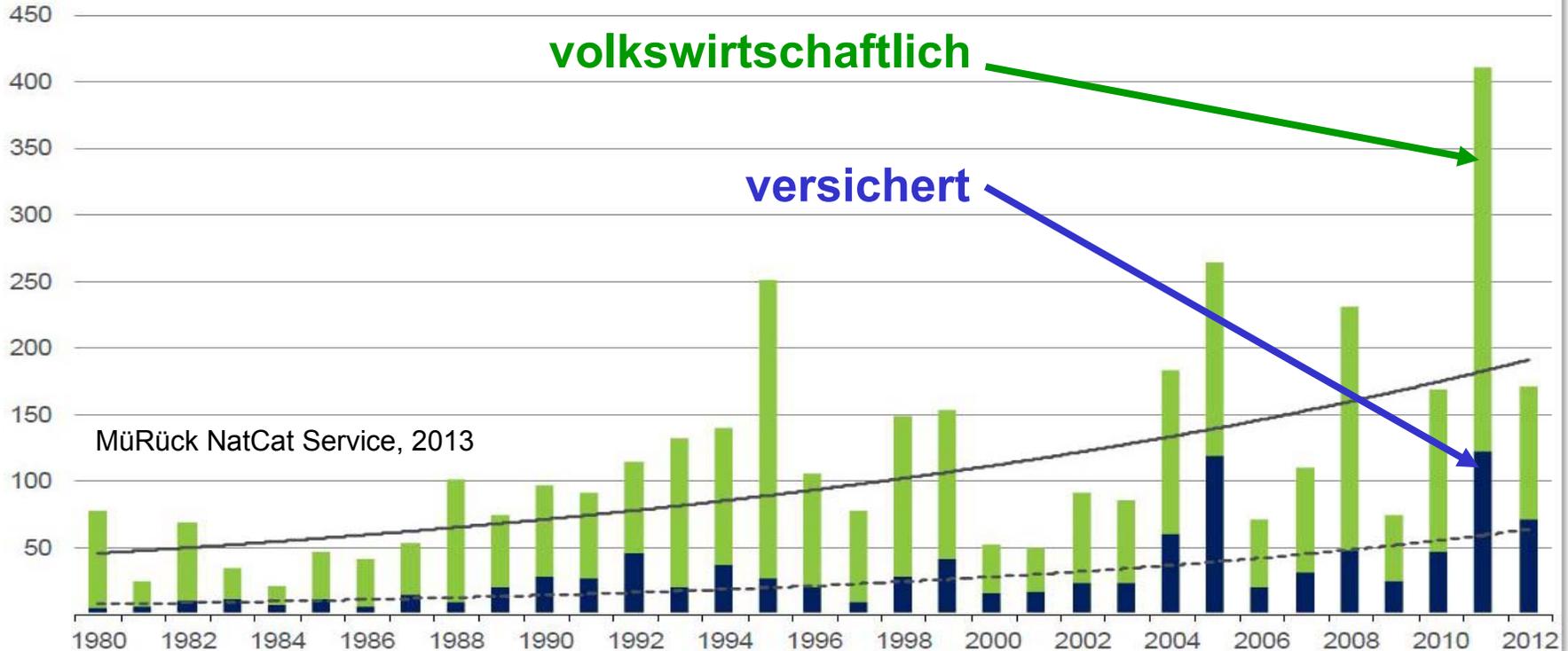
Naturkatastrophen weltweit 1980 - 2010

Anzahl der Ereignisse pro Naturgefahr mit Trends



Schäden durch Naturkatastrophen (1980 - 2012)

Mrd. US\$



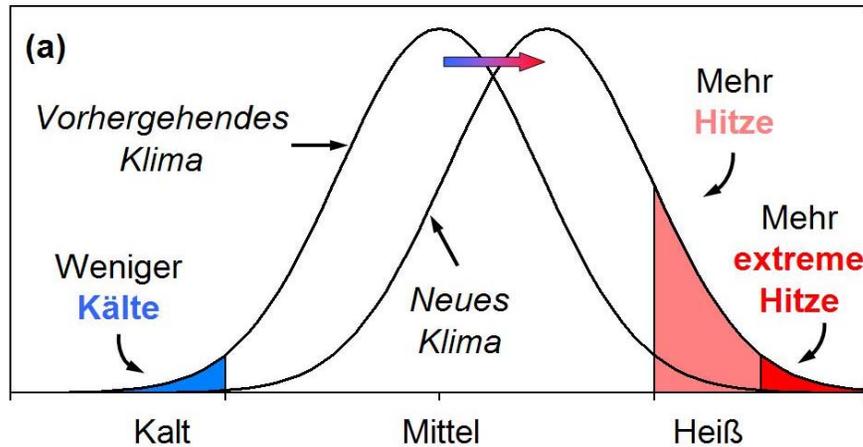
Volkswirtschaftliche und **versicherte** Schäden in Mrd. US\$ (Großkatastrophen)

Dekade	1950/59	1960/69	1970/79	1980/89	1990/99	2000/2009	Faktor *)
Anzahl	13	16	29	44	74	28	1,8
Schäden	59,9	72,4	100,8	156,1	525,5	435,2	6,0
Versich.	1,8	8,1	15,0	29,1	125,7	193,8	23,9

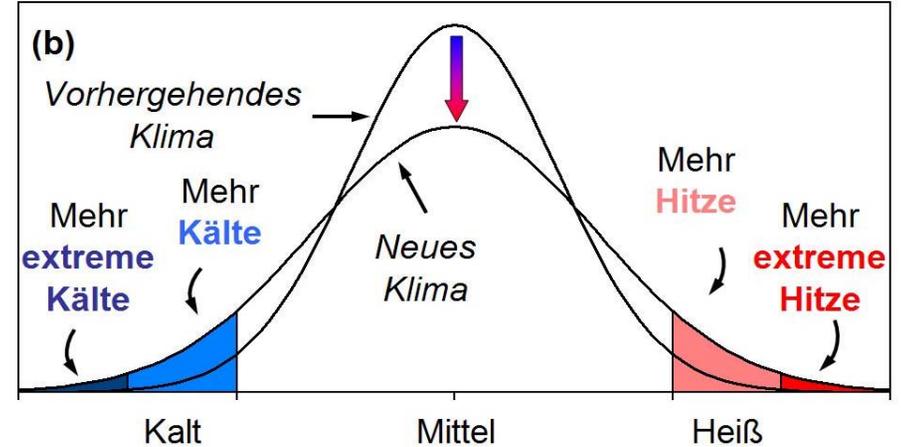
*) 2000/2009 gegenüber 1960/1969; Quelle: MüRück, Wirtz, 2010

Klimatologische Extremwertanalyse: Prinzipielle Möglichkeiten (z.B. Normalverteilung)

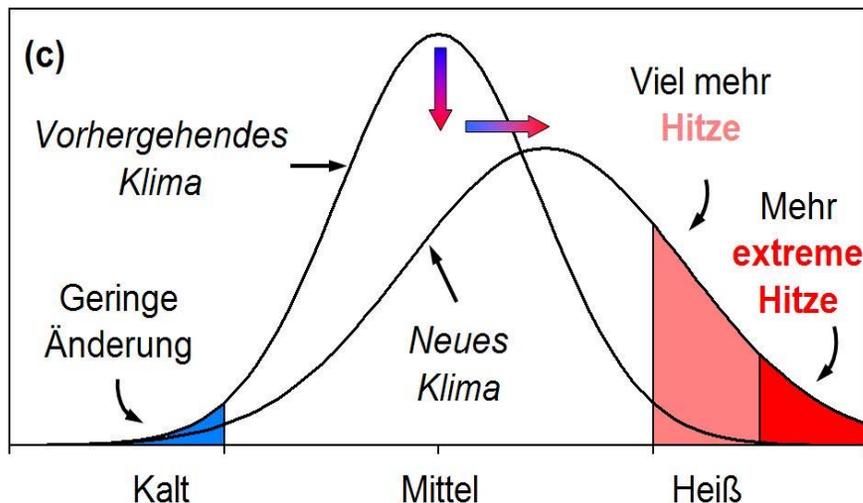
Zunahme des Mittelwerts



Zunahme der Streuung



Zunahme von Mittelwert und Streuung

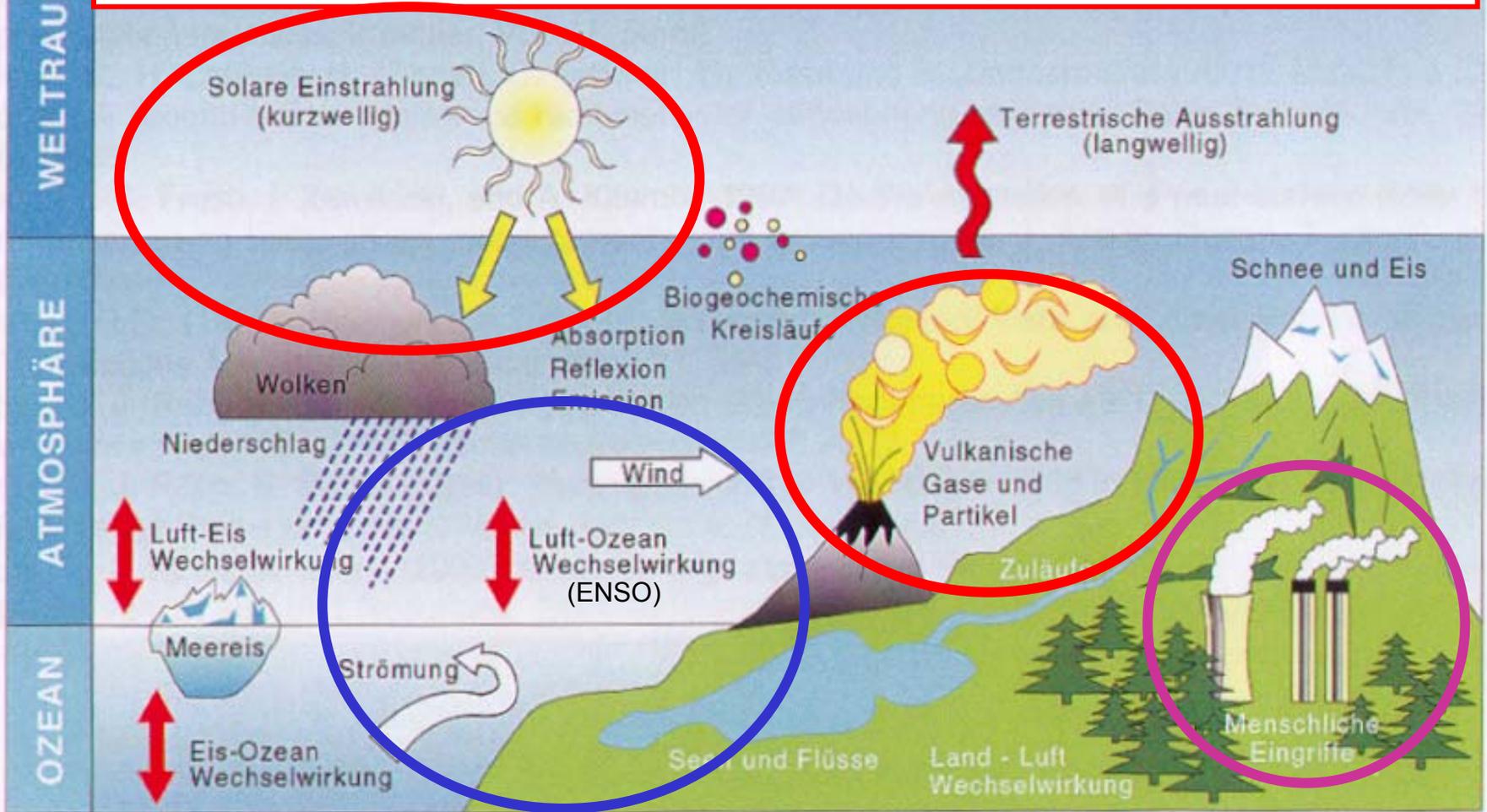


IPCC, 2001; Hupfer und Börngen, 2004.

In Deutschland zeigt sich bei der Temperatur verbreitet Fall (a), beim Niederschlag teilweise Fall (c). Der Wind (Sturmtiefs, Tornados) zeigt keine signifikanten Änderungen.

Weltweit nehmen Hitzewellen sowie Dürren und Starkniederschläge an Häufigkeit und Intensität vielfach zu; tropische Wirbelstürme scheinen intensiver zu werden.

Ursachen des Klimawandels (Industriezeitalter)

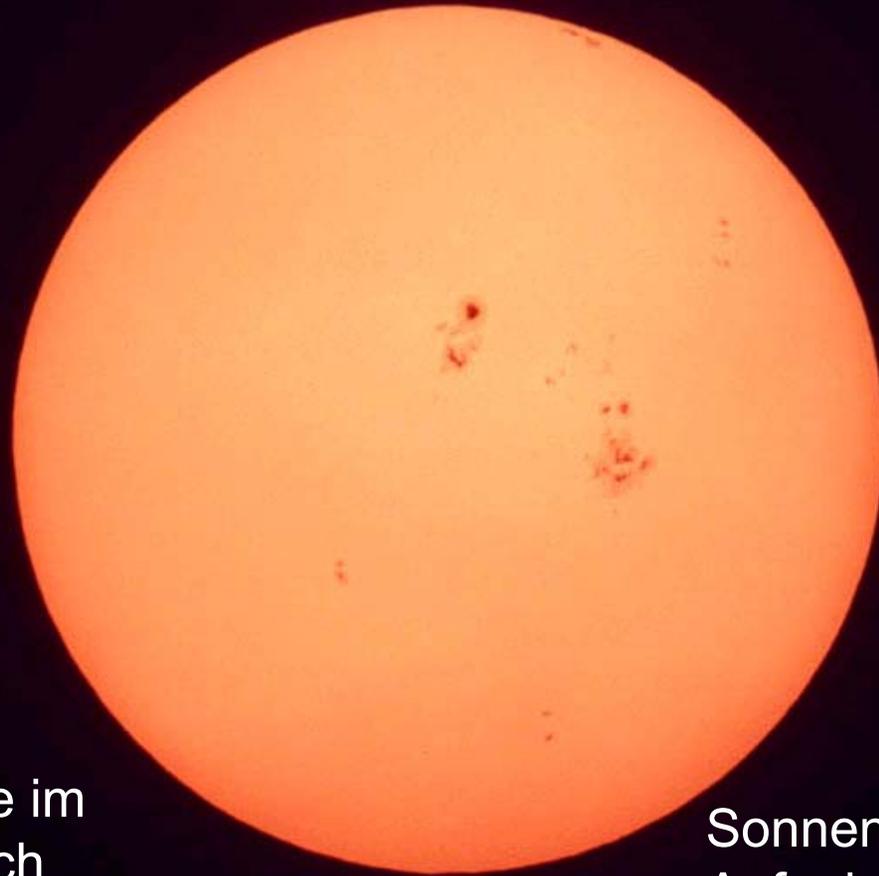


Klimasystem: Komponenten und Prozesse

Cubasch und Kasang, 2000

- ▶ Interne Wechselwirkungen im Klimasystem (Zirkulation, insbes. ENSO)
- ▶ Externe Einflüsse auf das Klimasystem (insbes. Sonnenaktivität, Vulkanismus; Mensch (Emission von Gasen und Partikeln))

Klimafaktor Sonnenaktivität



Aufnahme im
UV-Bereich

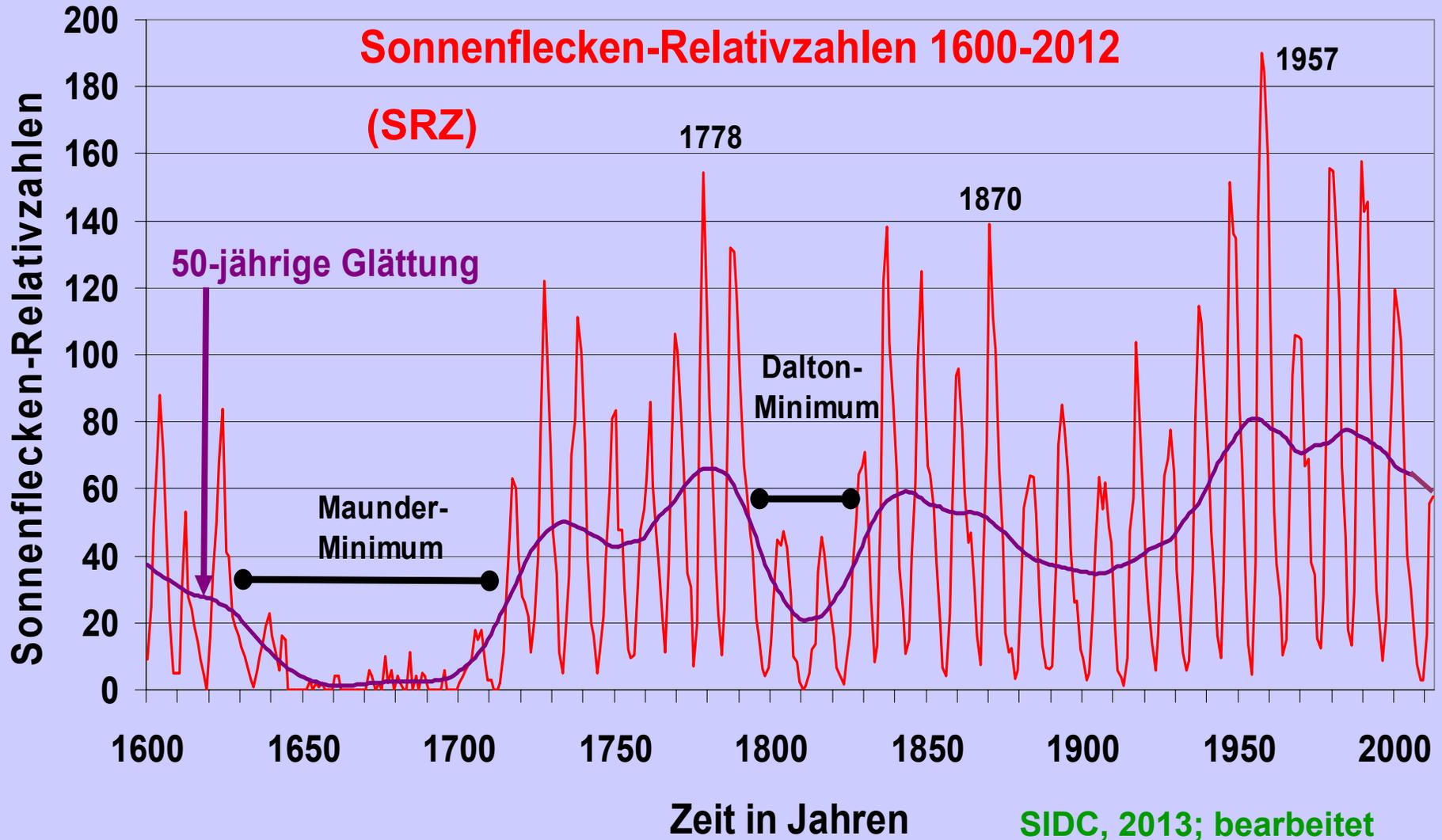
Sonnenflecken,
Aufnahme im
sichtbaren Bereich

Zur Sonnenaktivität als Klimafaktor

Zur Sonnenaktivität als Klimafaktor

Sonnenflecken-Relativzahlen 1600-2012

(SRZ)

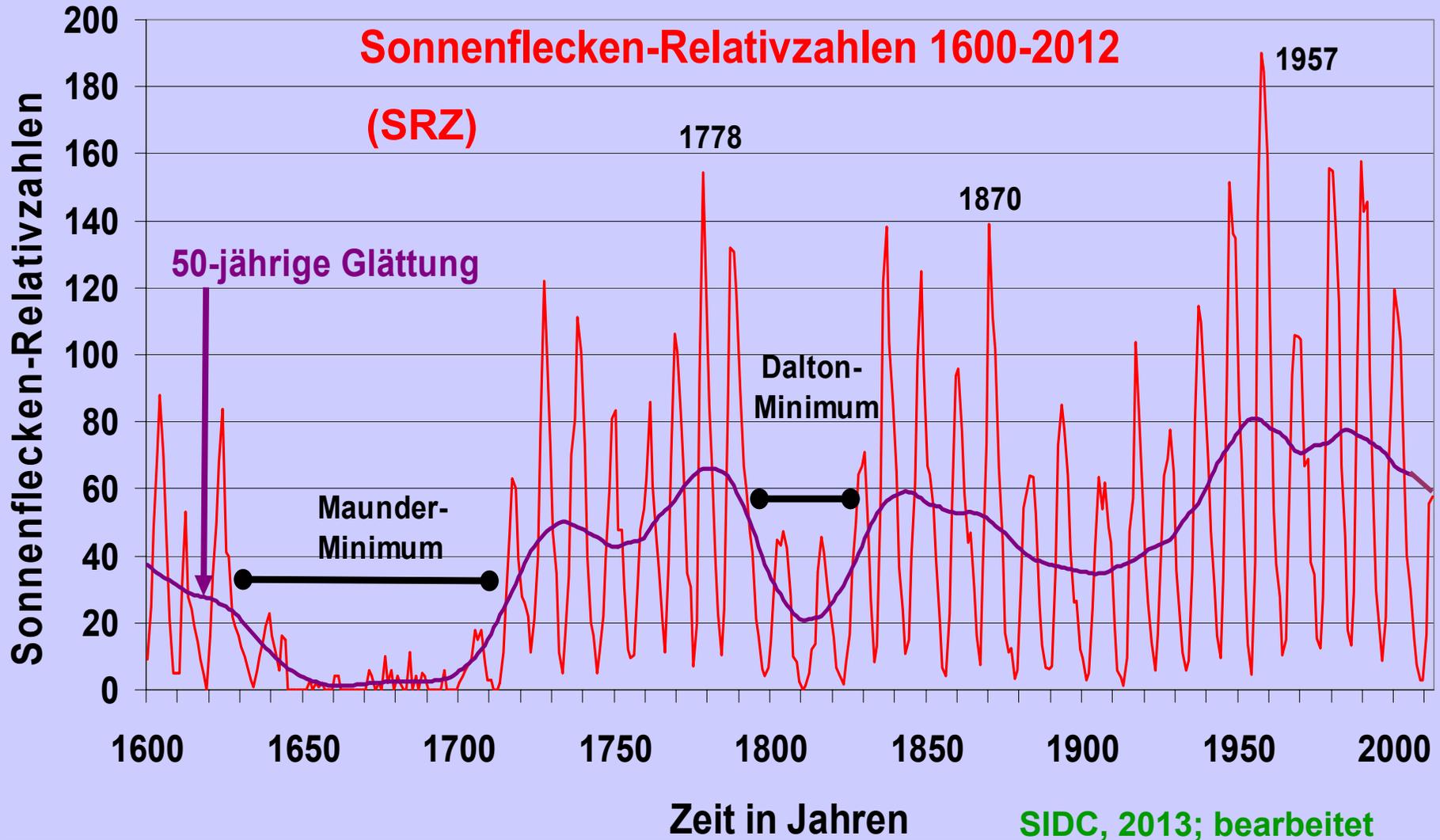


Zur Sonnenaktivität als Klimafaktor



Die SRZ gelten als Indikatoren der Sonnenaktivität (diverse Zyklen, Minimum-Phasen)

Zur Sonnenaktivität als Klimafaktor



Die SRZ gelten als Indikatoren der Sonnenaktivität (diverse Zyklen, Minimum-Phasen)

Satellitenmessungen der Sonneneinstrahlung außerhalb der Atmosphäre („Solarkonst.“) seit 1978 zeigen parallel zu den Sonnenflecken Variationen im Promillebereich.

Klimafaktor Vulkanismus

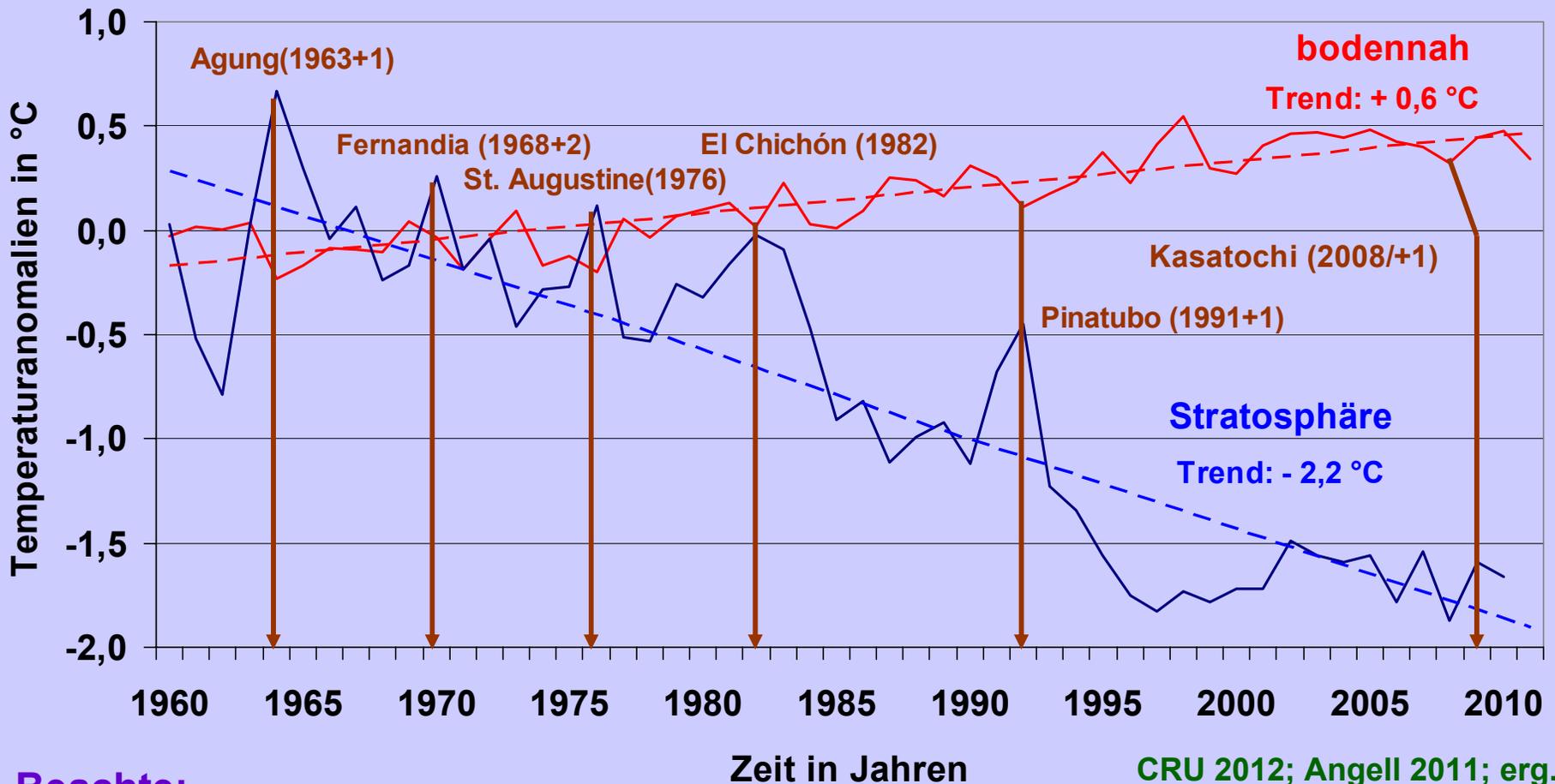


Explosive Vulkanausbrüche schleudern Gase u. Partikel bis in die Stratosphäre (ca. 10 - 50 km Höhe). Klimawirksam sind dabei vor allem die aus schwefelhaltigen Gasen entstehenden Sulfatpartikelschichten.

Sie erhöhen die Streuung der Sonneneinstrahlung, was zu geringerer Transmission und somit Abkühlung der unteren Atmosphäre führt. Außerdem absorbieren sie einen Teil der terrestrischen Ausstrahlung und erwärmen so die Stratosphäre.

Pinatubo, 12.6. 2001

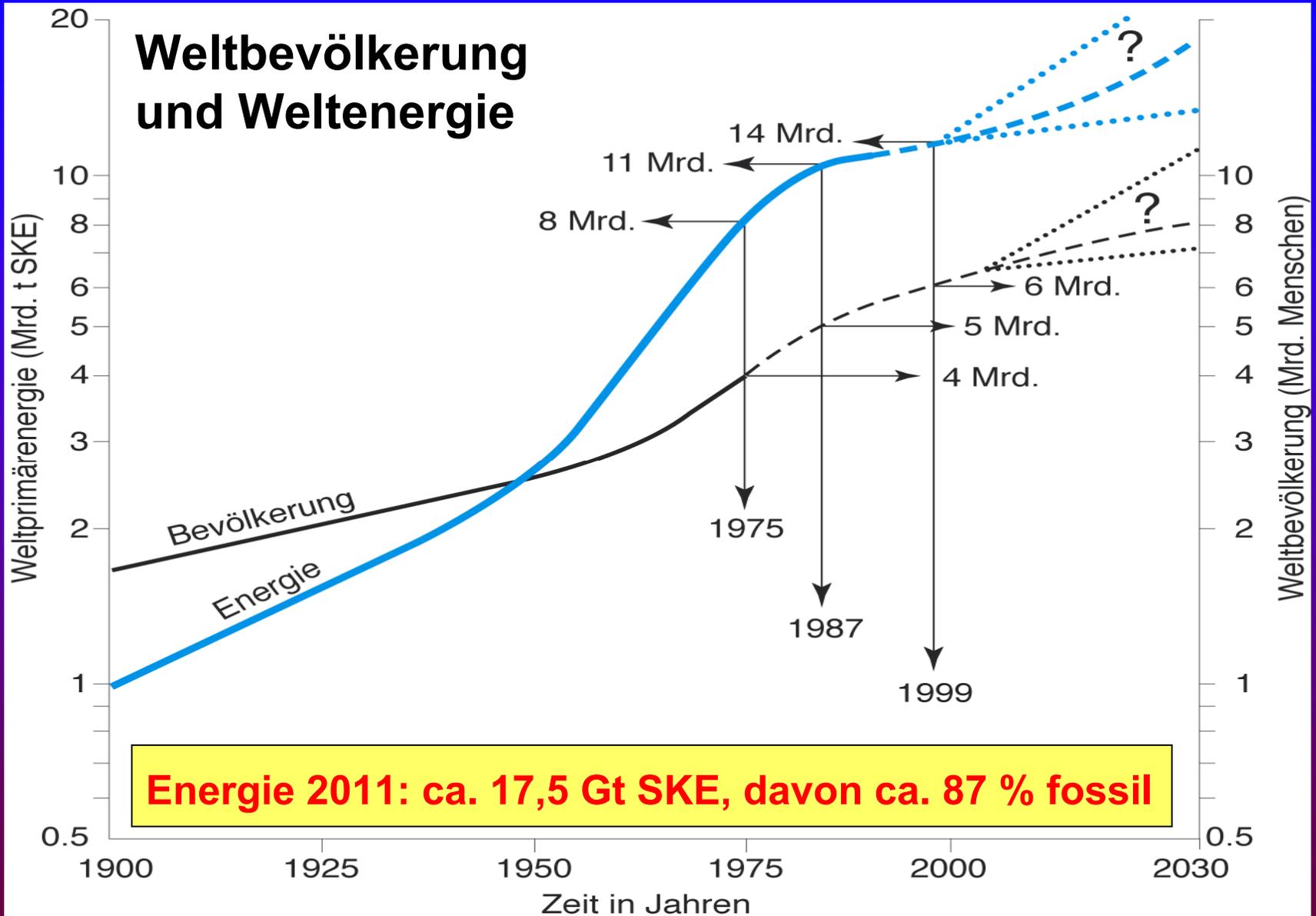
Globaltemperatur, Anomalien 1960 - 2011(2010)
Vergleich bodennah und Stratosphäre
(sowie einige explosive Vulkanausbrüche)



Beachte:

**Vulkanismus kühlt die Troposphäre und wärmt die Stratosphäre (vgl. oben);
 Sonnenaktivität wärmt die Troposphäre und Stratosphäre; „Treibhausgase“
 wärmen die Troposphäre und kühlen die Stratosphäre; interne Wechselwirkun-
 gen (z.B. ENSO) beeinflussen nur die Troposphäre (bodennahe Atmosphäre).**

Klimafaktor Mensch



Viele Quellen (u.a. Diekmann u. Heinloth, 1997; BP 2012); hier nach Sw, 2008, erg.

Klimafaktor Mensch: Kohlendioxid (CO₂)

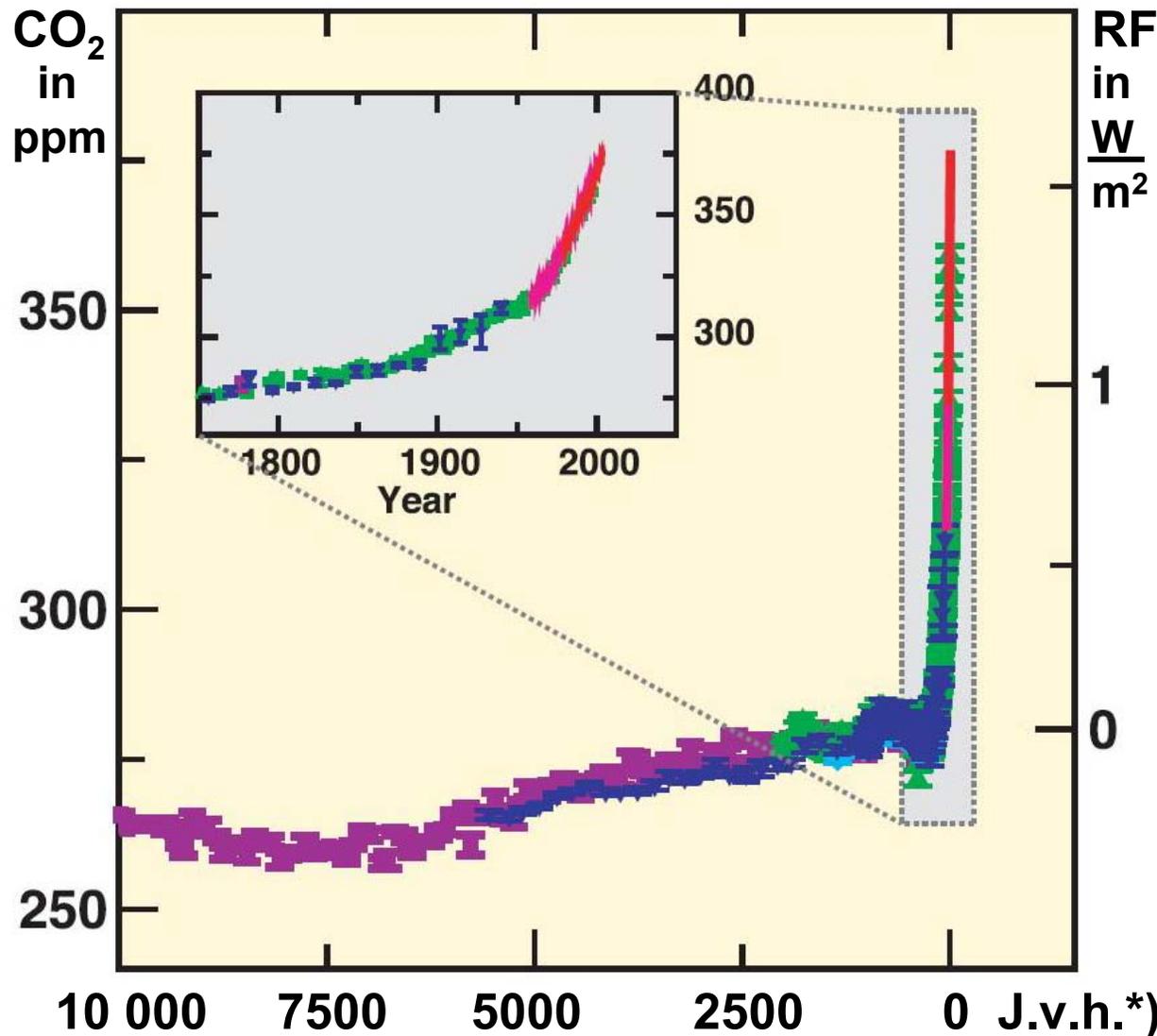
Anthropogener CO₂-Ausstoß: ca. 39 Gt/Jahr (10,6 GtC/J.)*, davon durch fossile Energie: 35,6 Gt/Jahr (9,7 GtC/J.)*, rasant steigend (1900: insgesamt ca. 2 Gt CO₂/Jahr).



* Bezugsjahr 2012

Global Carbon Project 2012

Folge: Anstieg der atm. CO₂-Konzentration (Darstellung: Holozän, d.h. letzte ca. 10 000 Jahre)



← 2012: 394 ppm

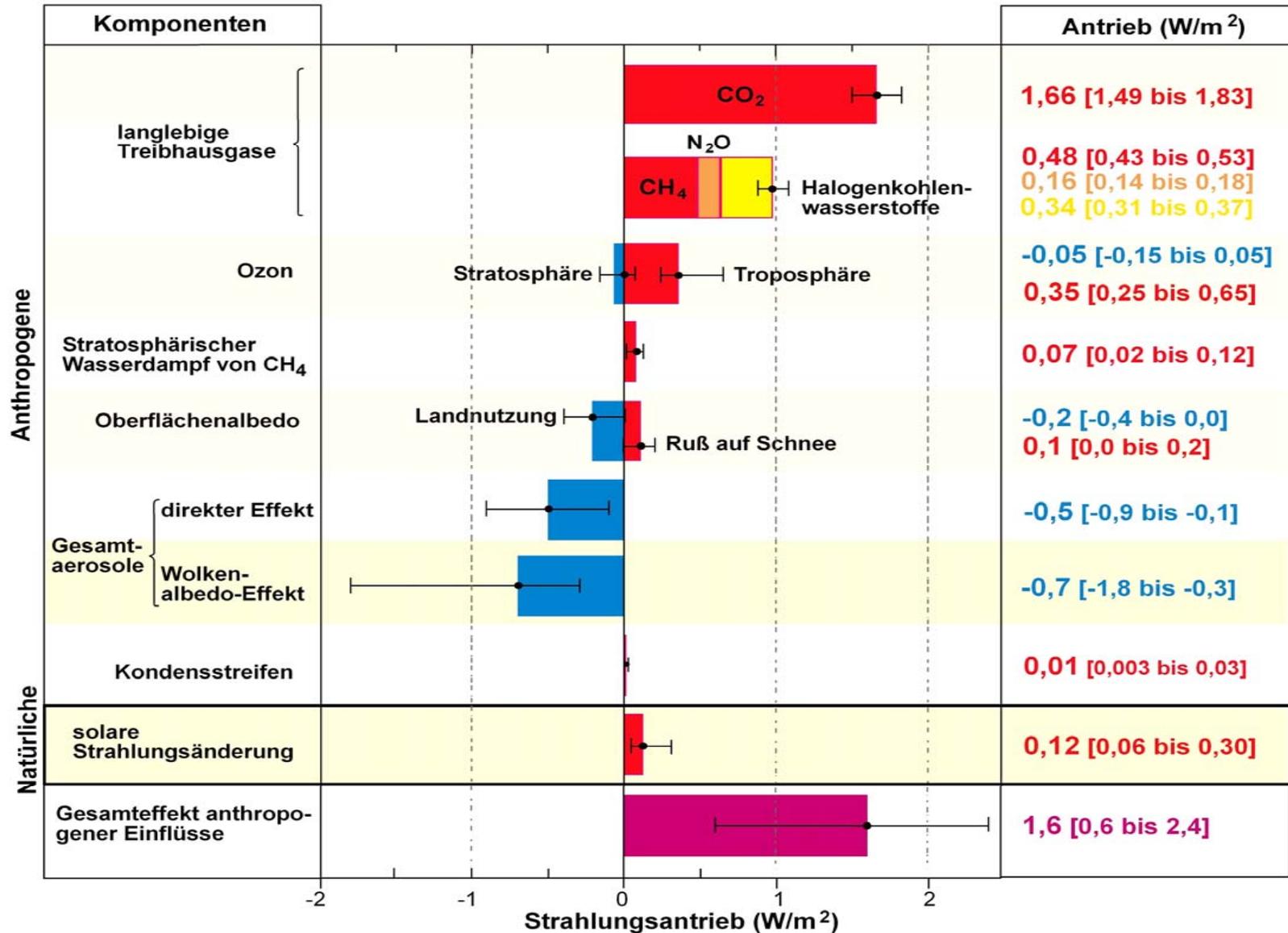
← 2000: 369 ppm

**Rasanter Anstieg
im Industriezeitalter
(seit ~ 1800); davor
(seit ca. 6000 J.v.h.)
Waldrodungseffekt?**

← 1750: ~ 280 ppm

← 7500 Jahre v.h.:
ca. 260 ppm

Globale Strahlungsantriebe 1750-2005 nach IPCC (2007)



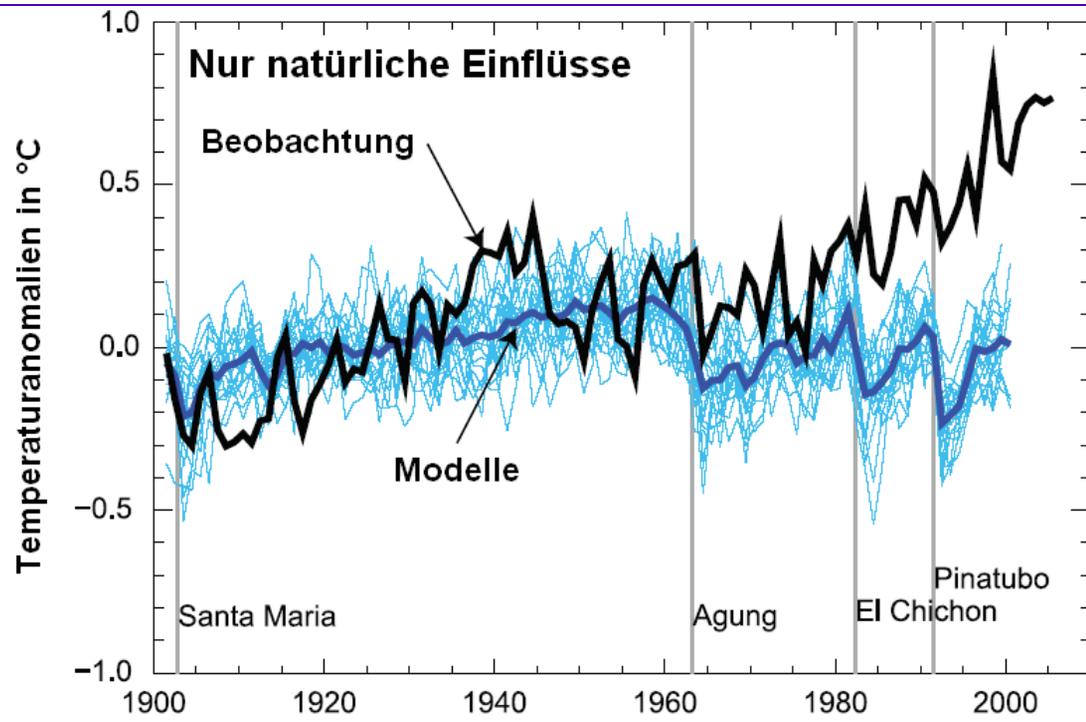
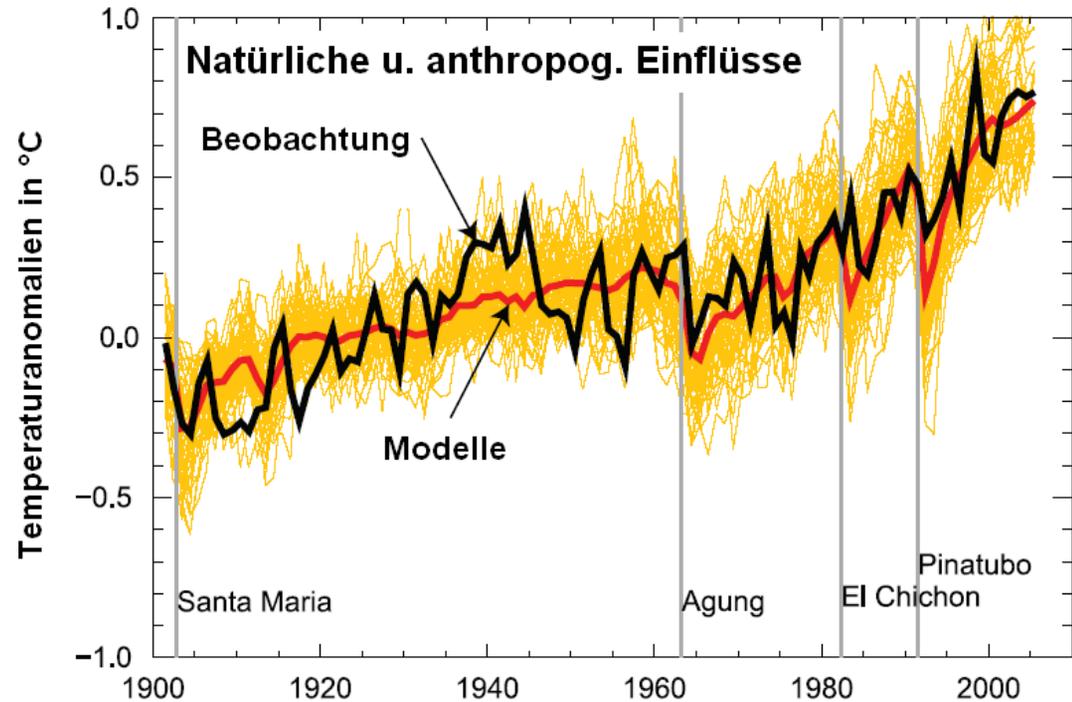
Explosiver Vulkanismus im Industriezeitalter episodisch bis $\sim 3 Wm^{-2}$ (z.B. Pinatubo, 1991)

Klimamodell- rechnungen ...

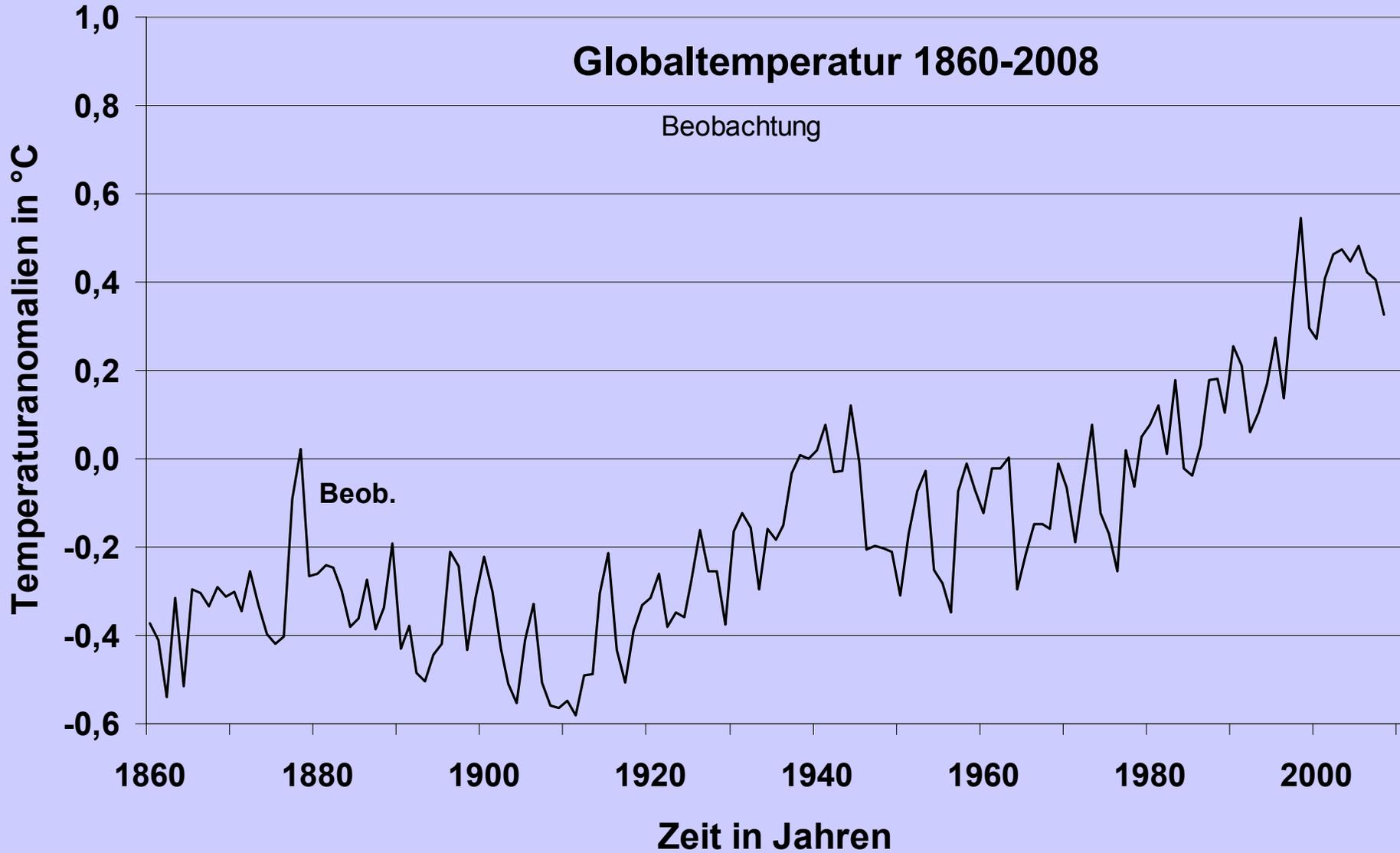
... zeigen, dass natürliche Ursachen für die globale Erwärmung der letzten Jahrzehnte extrem unwahrscheinlich*) sind.

(IPCC, 2007)

*) $p < 5 \%$
(Somit $p > 95 \%$ für anthropog. Ursachen)

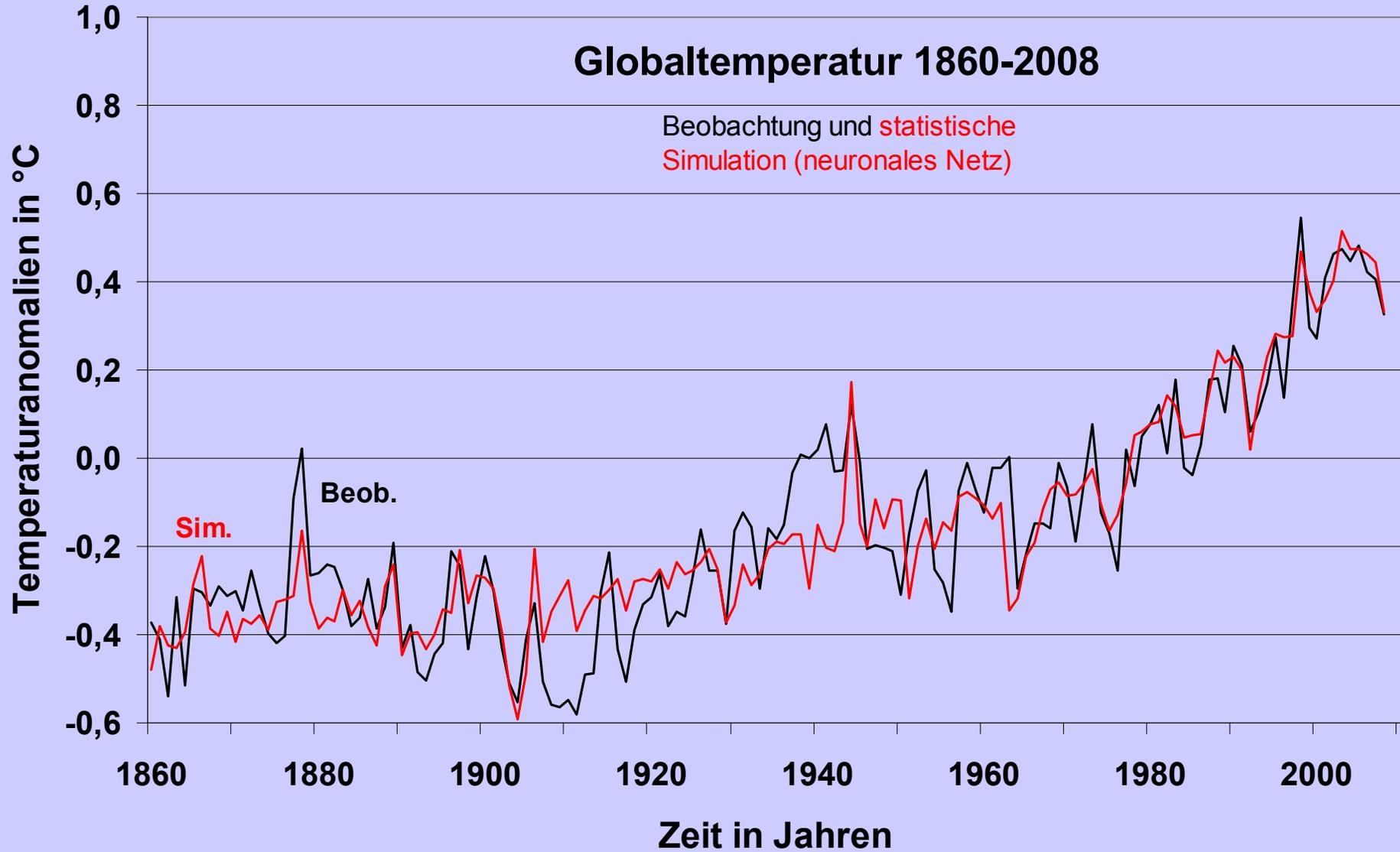


Zur statistischen Ursachenanalyse (neuronales Netz)

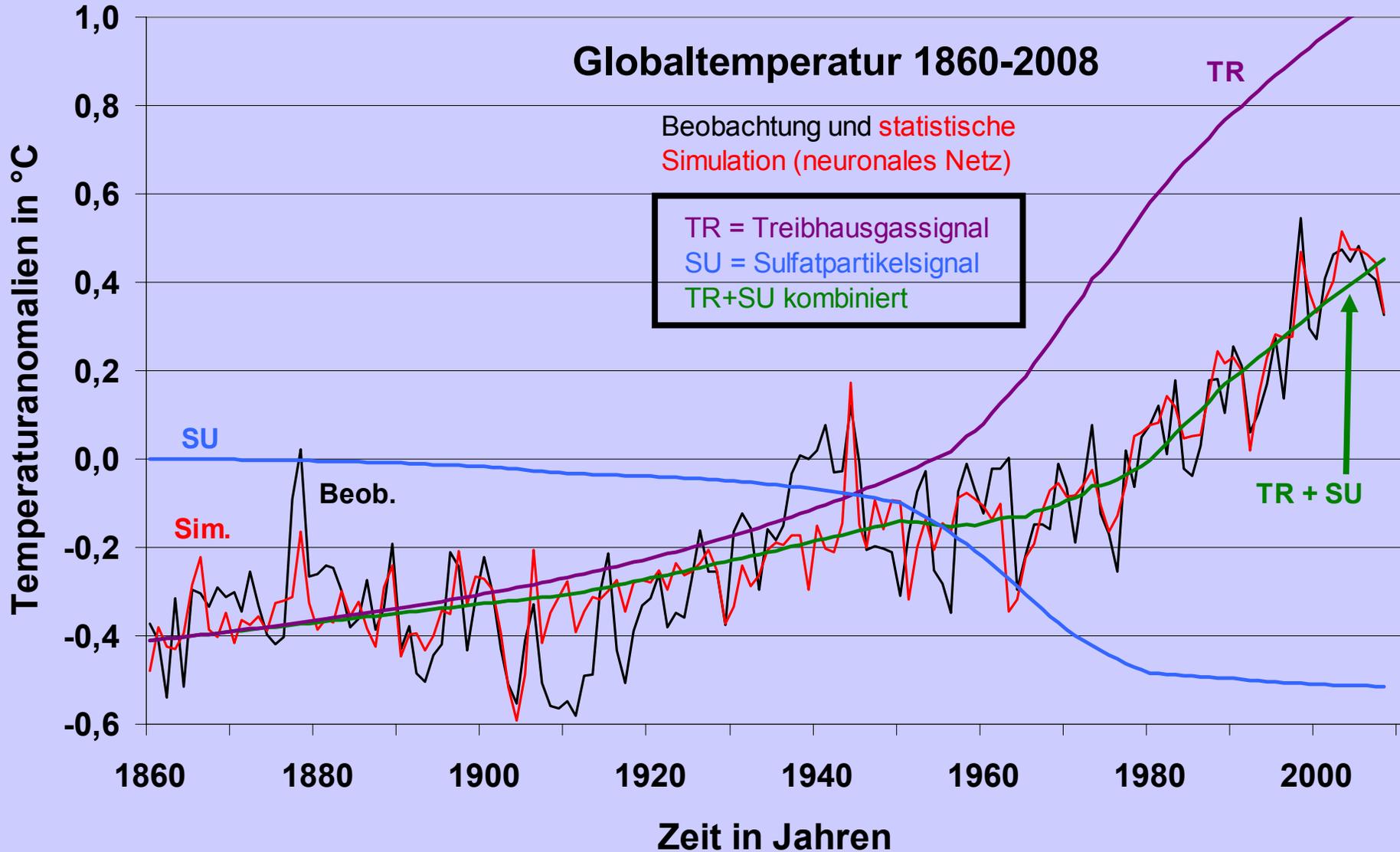


Schönwiese et al. 2010

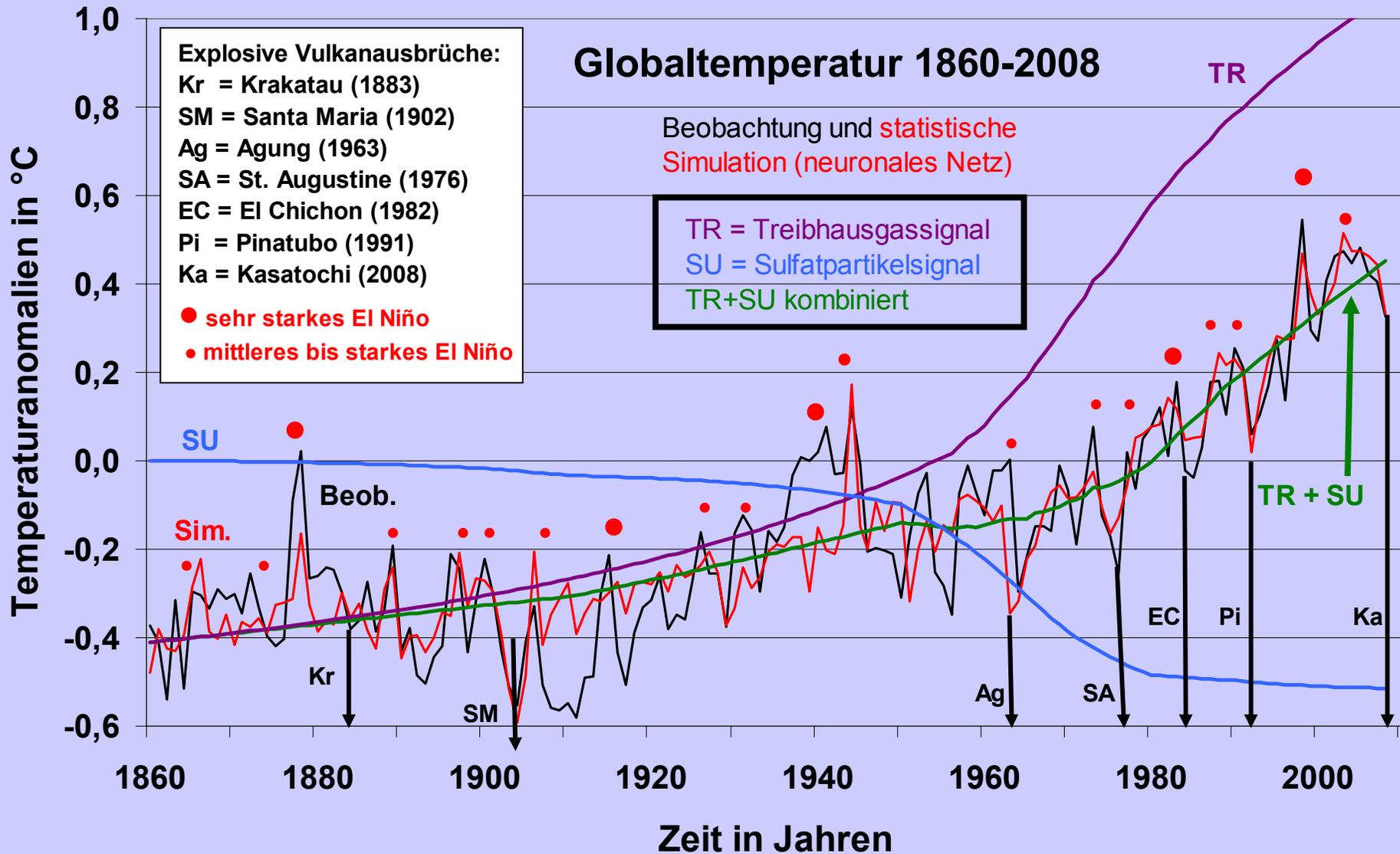
Zur statistischen Ursachenanalyse (neuronales Netz)



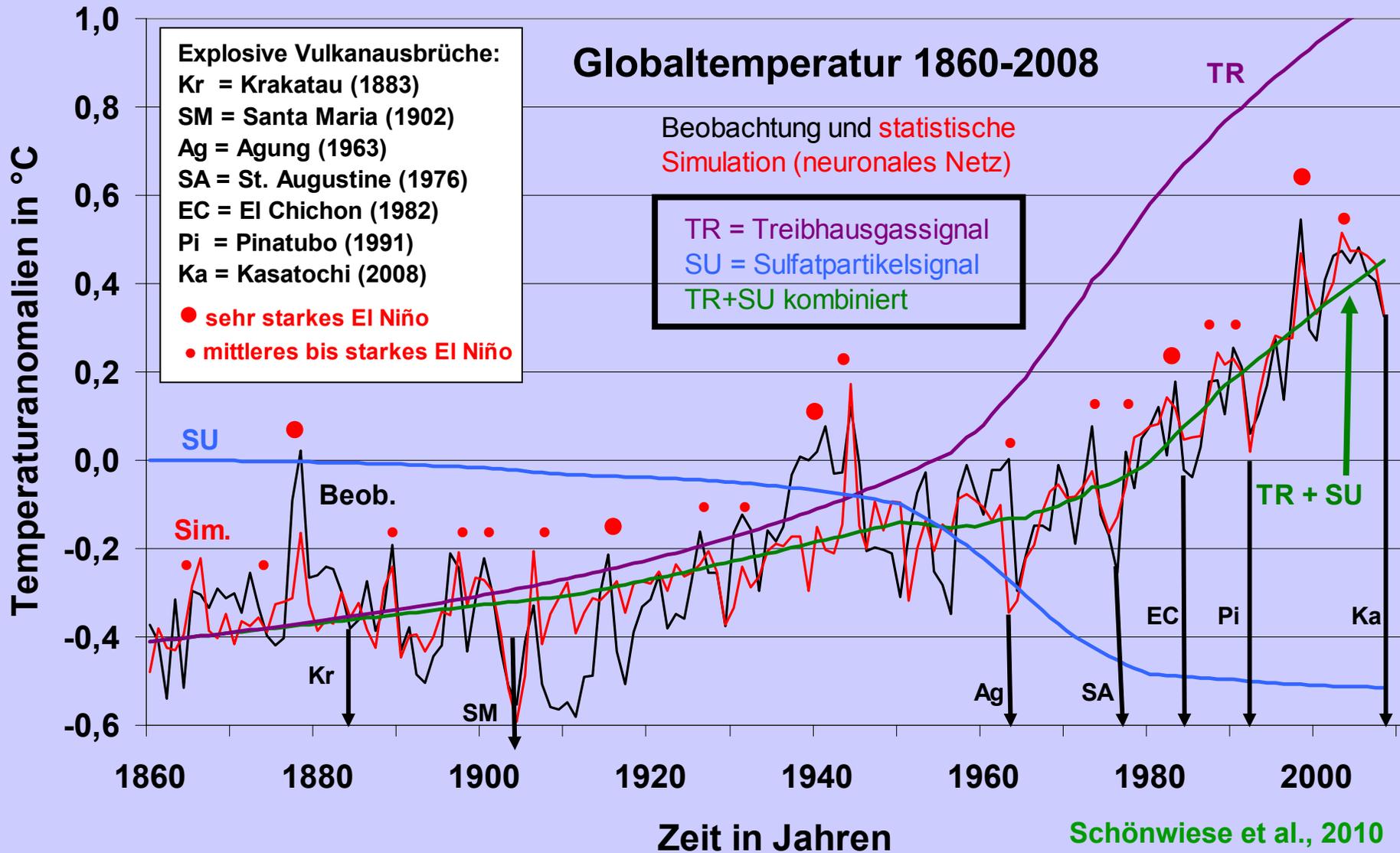
Zur statistischen Ursachenanalyse (neuronales Netz)



Zur statistischen Ursachenanalyse (neuronales Netz)



Zur statistischen Ursachenanalyse (neuronales Netz)



Erklärte Varianzen: anthropogen 61 %, natürlich 27 % (unerklärt 12 %)

**Mittlere globale troposphärische Strahlungsantriebe (ca. 1750-2000; IPCC, 2007)
und empirisch-statistisch geschätzte bodennahe Temperatursignale 1860-2008**
(nach Schönwiese, Walter und Brinckmann, 2010)

Klimafaktor	Art	Strahlungsantrieb in Wm^{-2}	Signal in $^{\circ}\text{C}$	Signalstruktur (zeitlich)
„Treibhausgase“	anthr.	+ 3,0 (2,7 - 3,6)	0,9 ↔ 1,5	progressiver Trend
Troposphär. Sulfat	anthr.	- 1,2 (0,4 - 2,7)	- 0,2 ↔ 0,5	uneinheitlicher Trend
Kombiniert	anthr.	-	0,7 ↔ 1,0	uneinheitlicher Trend
Vulkaneruptionen	natürl.	ca. - (1 - 7) *)	- 0,2 ↔ 0,3	episodisch (1-3 Jahre)
Sonnenaktivität	natürl.	+ 0,1 (0,06 - 0,3)	0,1 ↔ 0,2	fluktuativ
El Niño (ENSO)	natürl.	(intern) **)	0,1 ↔ 0,2	episodisch (Monate)

*) Pinatubo: 1991 → 2.4 Wm^{-2} , 1992 → 3.2 Wm^{-2} , 1993 → 0.9 Wm^{-2} , nach McCormick et al. (1995); Reichweite nach Grieser und Schönwiese (1999); **) atmosphärisch-ozeanische Wechselwirkung

Zusammenfassung

- Seit die Erde existiert gibt es **Klimawandel**.
- Je nach zeitlich-räumlicher Größenordnung sind die **Ursachen** dafür sehr unterschiedlich.
- Spätestens ab dem Industriezeitalter tritt der **Mensch** als zusätzlicher Klimafaktor hinzu.
- Der **globale Erwärmungstrend** der letzten Jahrzehnte ist höchstwahrscheinlich anthropogen, die **überlagerte Variabilität** weitgehend natürlich verursacht.
- Allerdings sind die **regional-jahreszeitlichen Strukturen** der Temperaturvariabilität sehr unterschiedlich. Das gilt in noch stärkerer Ausprägung für den Niederschlag.
- Insgesamt ist der globale Klimawandel regional z.T. mit häufigeren/intensiveren **Extremereignissen** verbunden.
- Aus den Erkenntnisse der **Vergangenheit** ergeben sich die Herausforderungen für die **Zukunft**.



Vielen Dank
für Ihr Interesse

Homepage des Autors:

[http://www2.uni-frankfurt.de/
43267598/Ehemalige-AG-Klimaforschung](http://www2.uni-frankfurt.de/43267598/Ehemalige-AG-Klimaforschung)