



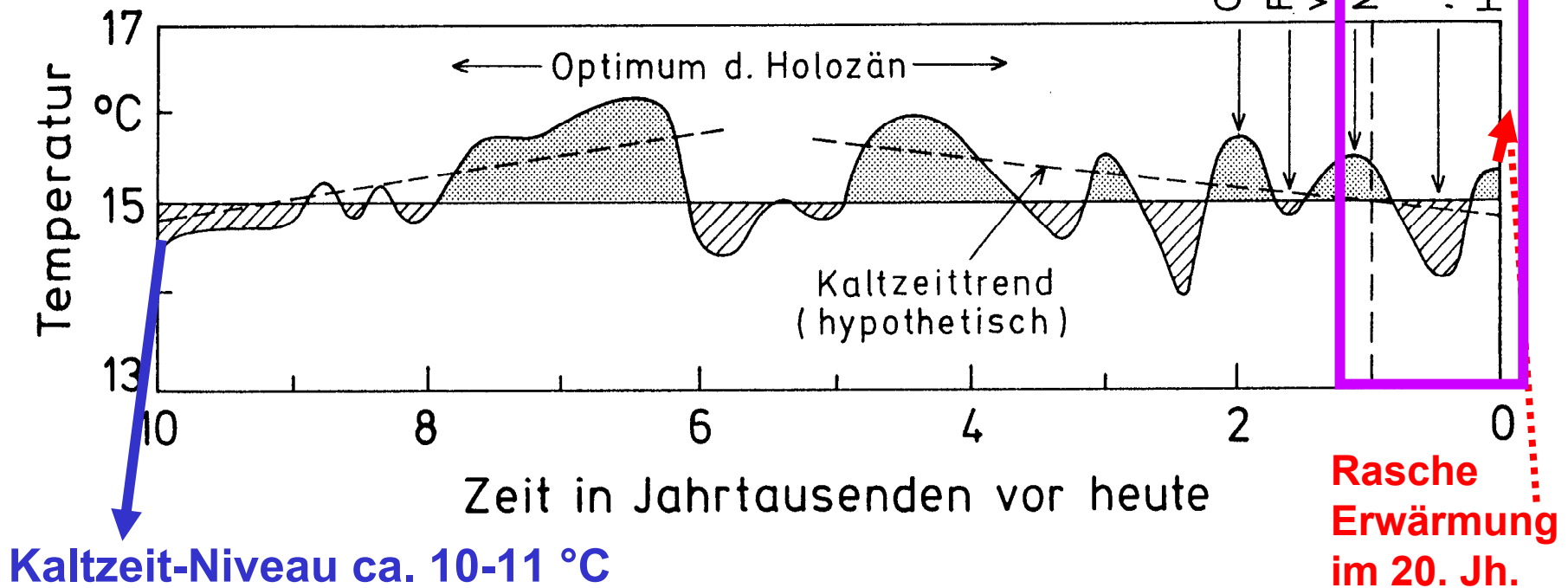
Phänomene und Ursachen des globalen Klimawandels im Industriezeitalter

**Christian-D. Schönwiese
Universität Frankfurt am Main
Institut für Atmosphäre und Umwelt**

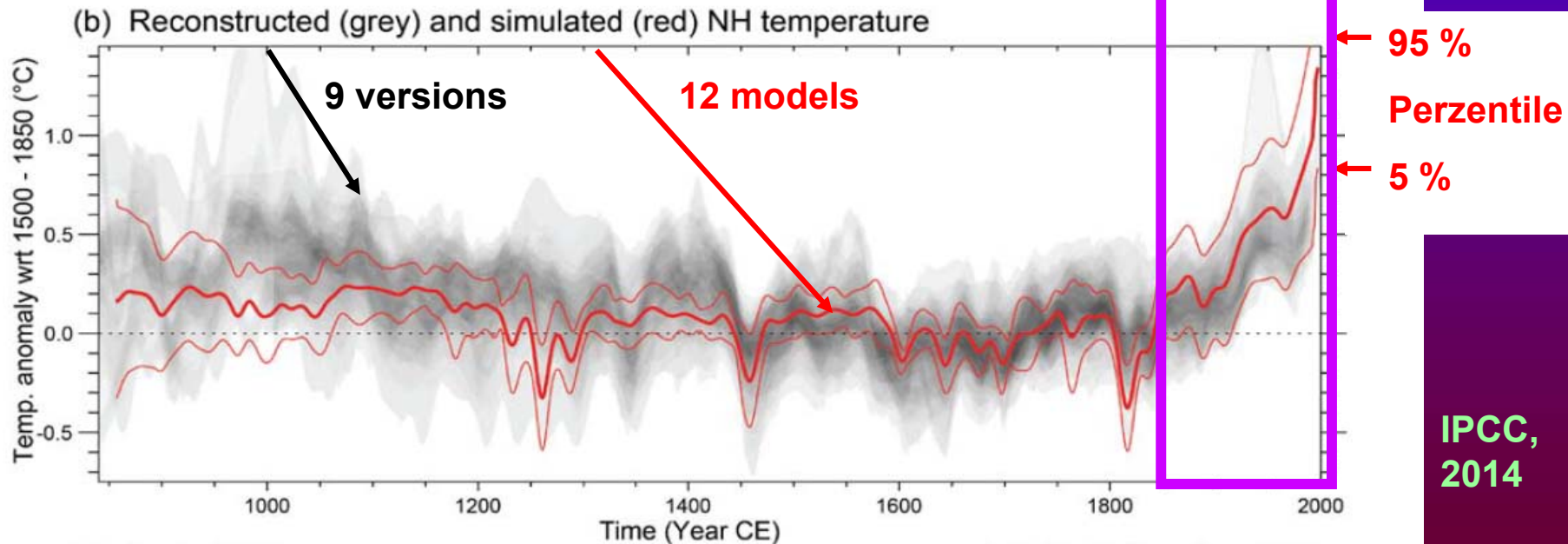
Vortragsübersicht

- **Holozän und Industriezeitalter:
Klimatologische Einordnung
(Temperatur - Nordhemisphäre)**
- **Global gemittelter Klimawandel ab 1880/1850:
Temperatur (zeitliche Variationsstrukturen)**
- **Regionale Strukturen des globalen Klimawandels:
Temperatur und Niederschlag**
- **Klimasystem und Ursachendiskussion:
Natürliche und anthropogene Faktoren**
- **Zusammenfassende Folgerungen**

Temperatur der Nordhemisphäre, letzte 10 000 Jahre
(Holozän = Neo-Warmzeit = Postglazial = Nacheiszeit)

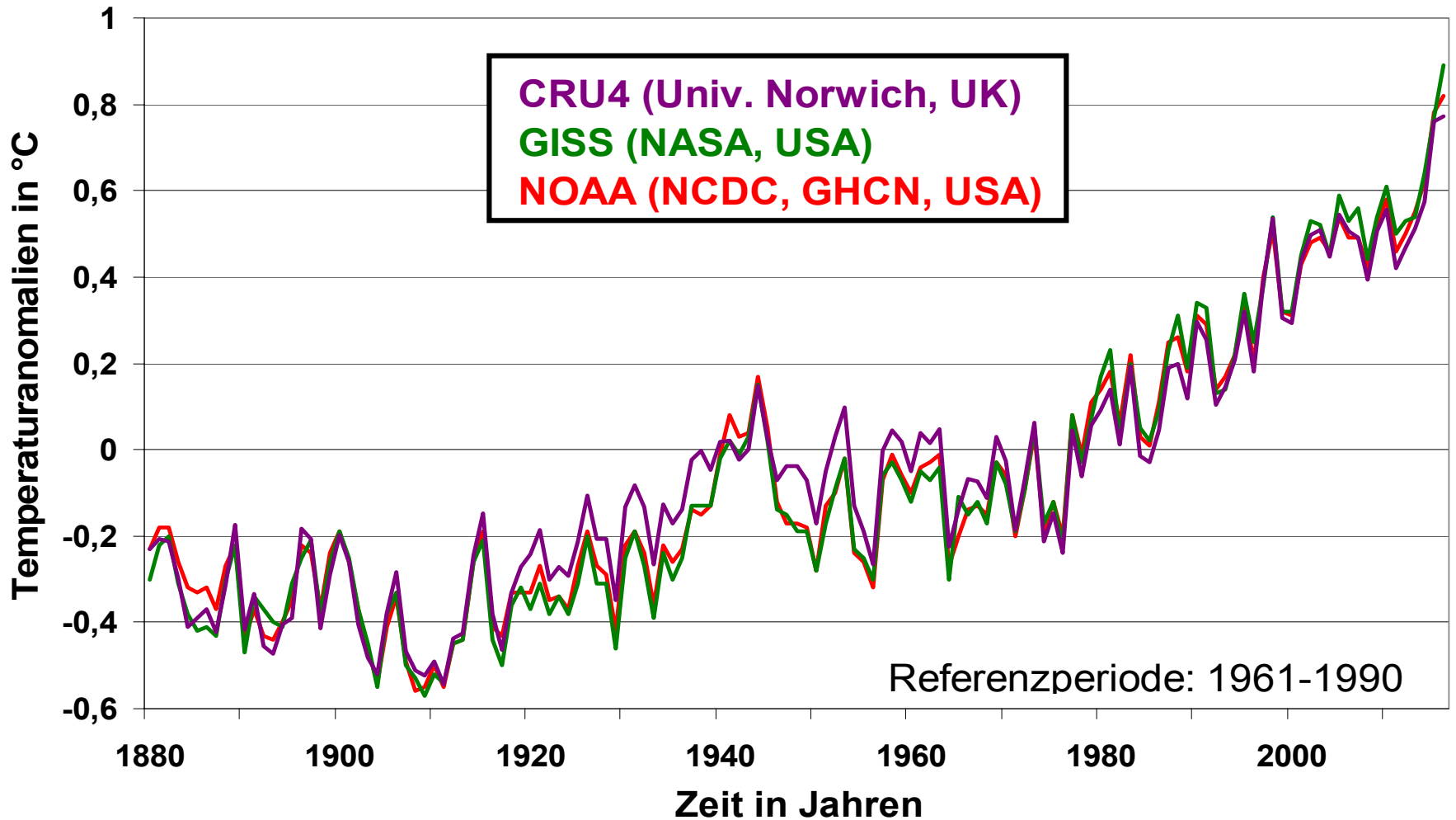


Temperatur der Nordhemisphäre 850-2000 n.C.



Globaltemperatur: Zeitreihenvergleich

Globaltemperatur, Jahresanomalien 1880-2016



Derzeitige Stationsdatenbasis: CRU (Climatic Research Unit), 5583; GISS (Goddard Institute for Space Studies) ca. 6300; NOAA (Nat. Oceanic and Atmospheric Administration) ca. 7280 Stationen (NCDC: National Climate Data Center; GHCN: Global Historical Climate Network)

Trends Globaltemperatur, Land + Ozean

Stand Febr. 2017

| Zeitspanne | CRU | GISS | NOAA |
|--------------|---------|---------|---------|
| 1880 - 2012* | 0,83 °C | 0,87 °C | 0,85 °C |
| 1880 - 2016 | 0,90 °C | 0,98 °C | 0,93 °C |
| 1998 - 2013 | 0,09 °C | 0,15 °C | 0,14 °C |
| 1998 - 2016 | 0,26 °C | 0,33 °C | 0,32 °C |

* IPCC (2014): $0,85 \pm 0,2$ °C

Trends Globaltemperatur, Land + Ozean

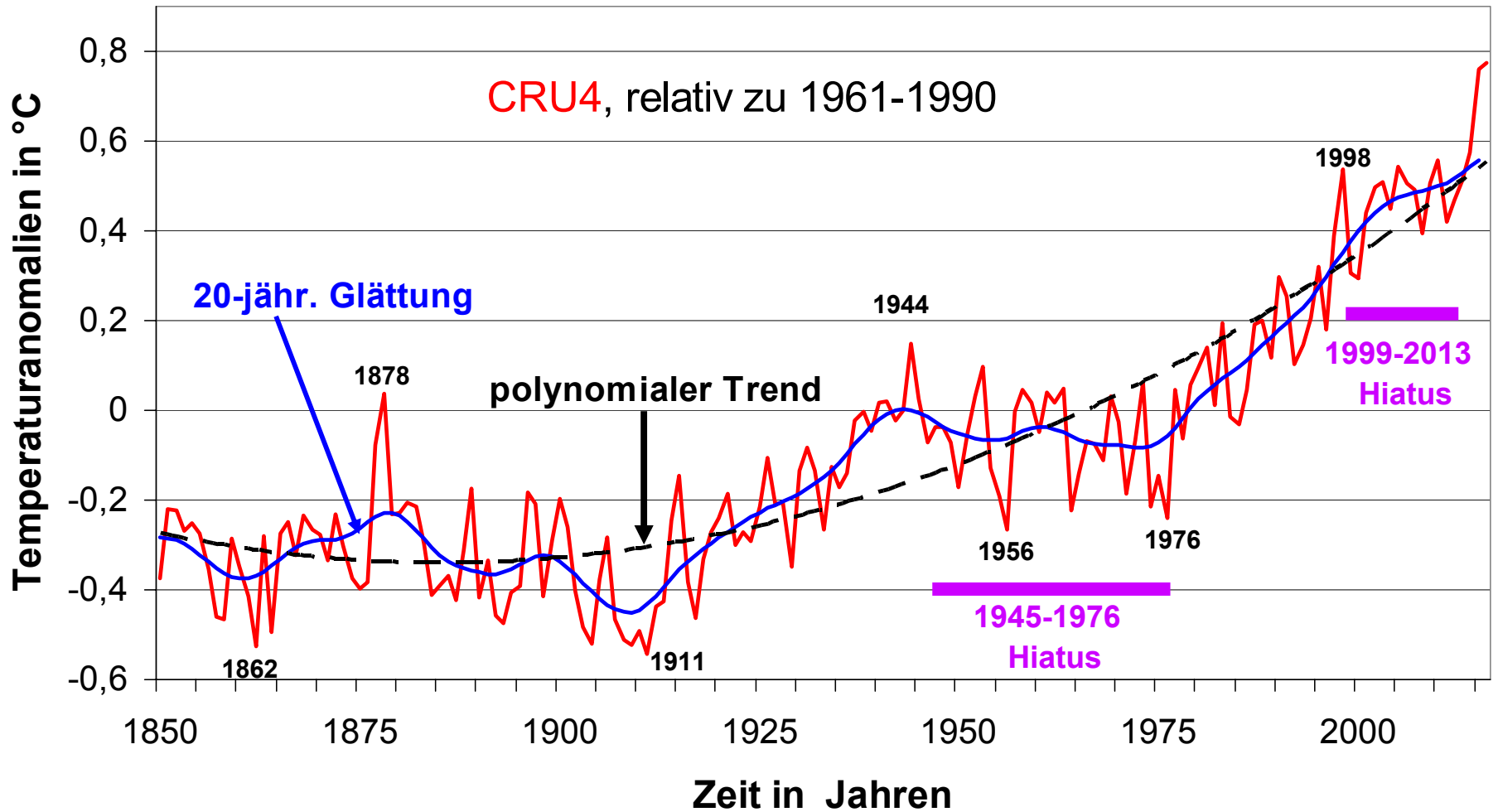
Stand Febr. 2017; D = Dekade

| Zeitspanne | CRU | GISS | NOAA |
|--------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| 1880 - 2012* | 0,83 °C <i>0,062 °C/D</i> | 0,87 °C <i>0,066 °C/D</i> | 0,85 °C <i>0,064 °C/D</i> |
| 1880 - 2016 | 0,90 °C <i>0,066 °C/D</i> | 0,98 °C <i>0,072 °C/D</i> | 0,93 °C <i>0,068 °C/D</i> |
| 1998 - 2013 | 0,09 °C <i>0,056 °C/D</i> | 0,15 °C <i>0,092 °C/D</i> | 0,14 °C <i>0,087 °C/D</i> |
| 1998 - 2016 | 0,26 °C <i>0,137 °C/D</i> | 0,33 °C <i>0,172 °C/D</i> | 0,32 °C <i>0,168 °C/D</i> |

* IPCC (2014): $0,85 \pm 0,2 \text{ °C}$

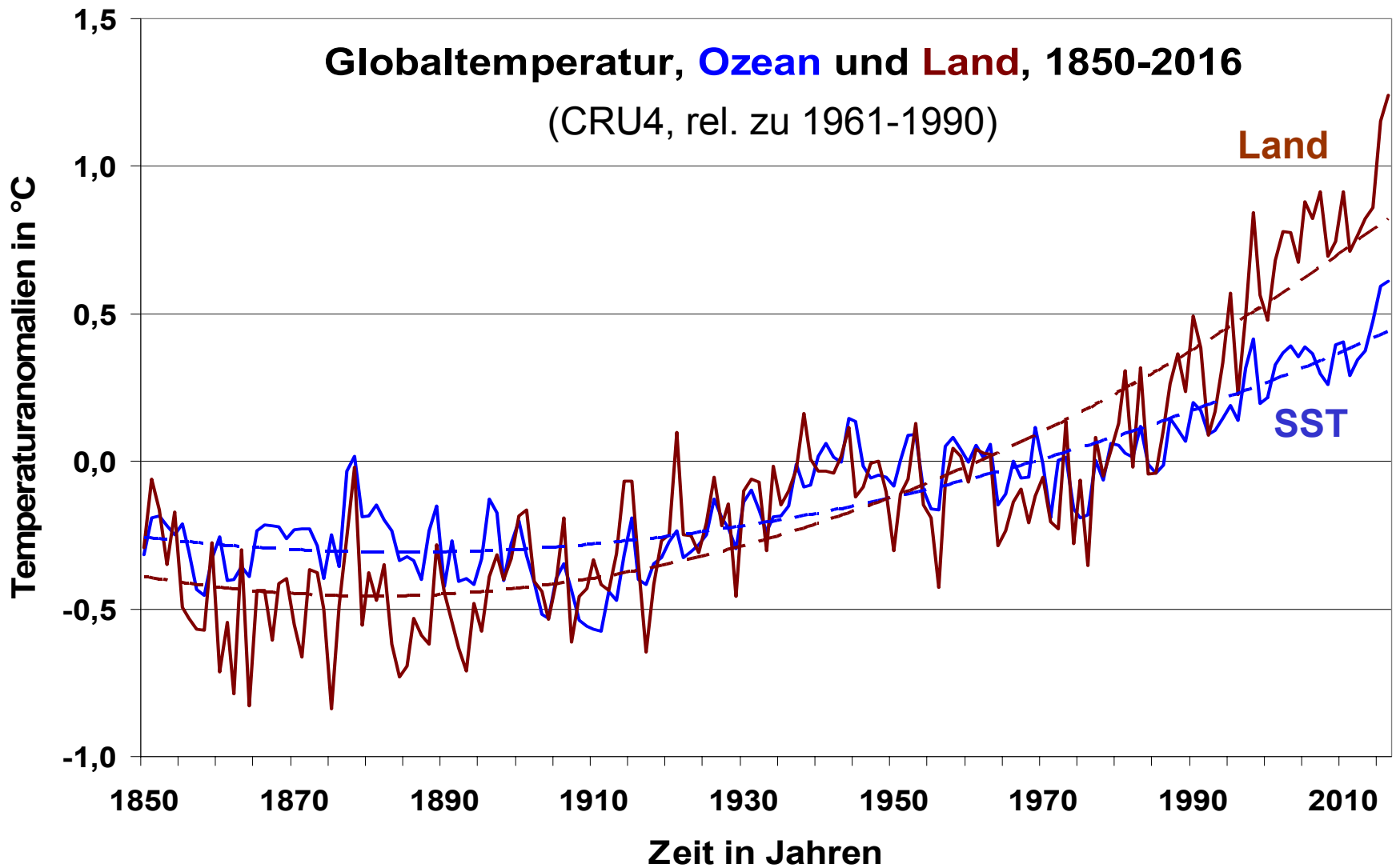
Globaltemperatur: Zeitreihenstrukturen

Globaltemperatur, Jahresanomalien 1850 - 2016

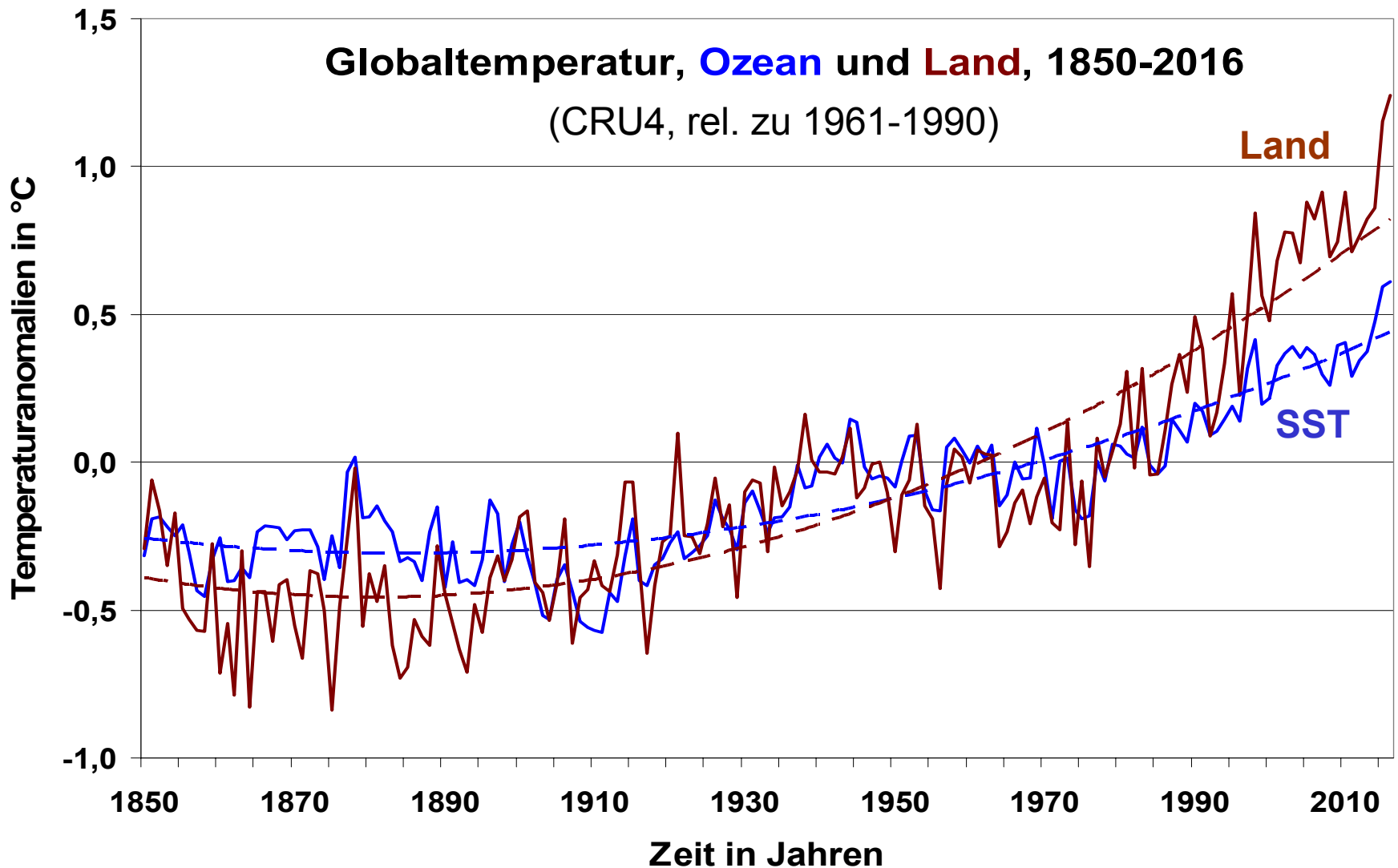


Globaltemperatur: Land und Ozean

Globaltemperatur, **Ozean** und **Land**, 1850-2016
(CRU4, rel. zu 1961-1990)



Globaltemperatur: Land und Ozean



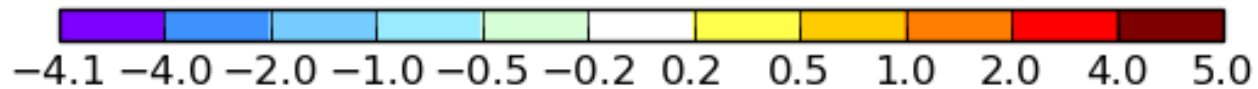
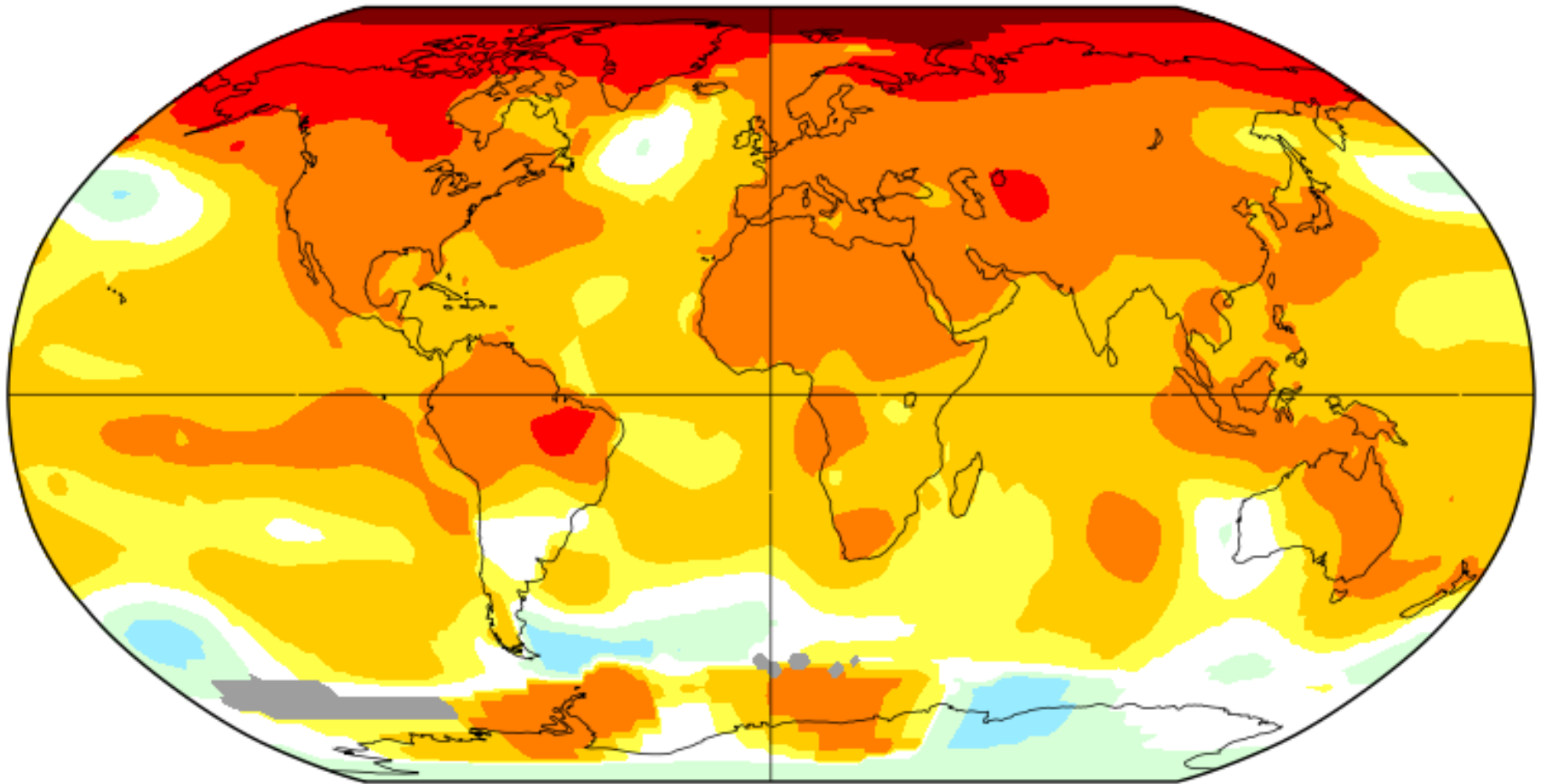
Trends 1880 - 2016: Land + 1,26; Ozean + 0,77 °C; Land + Ozean + 0,90 °C

Regionale Strukturen der Temperaturanomalien 2016

Annual J-D 2016

L-OTI(°C) Anomaly vs 1961-1990

0.89

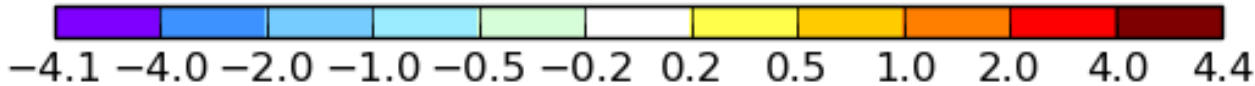
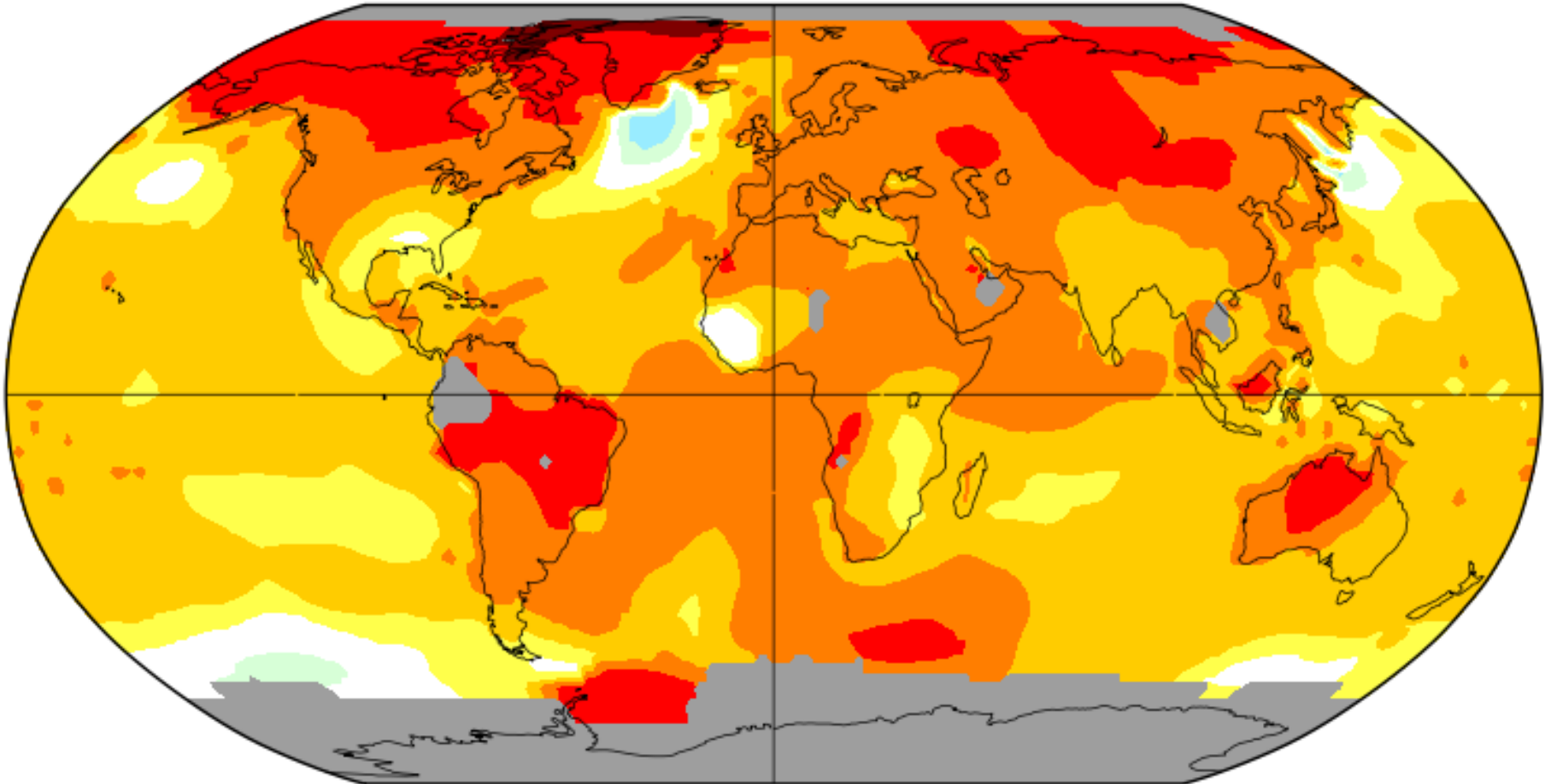


Regionale Strukturen der Temperaturentrends 1900 - 2016

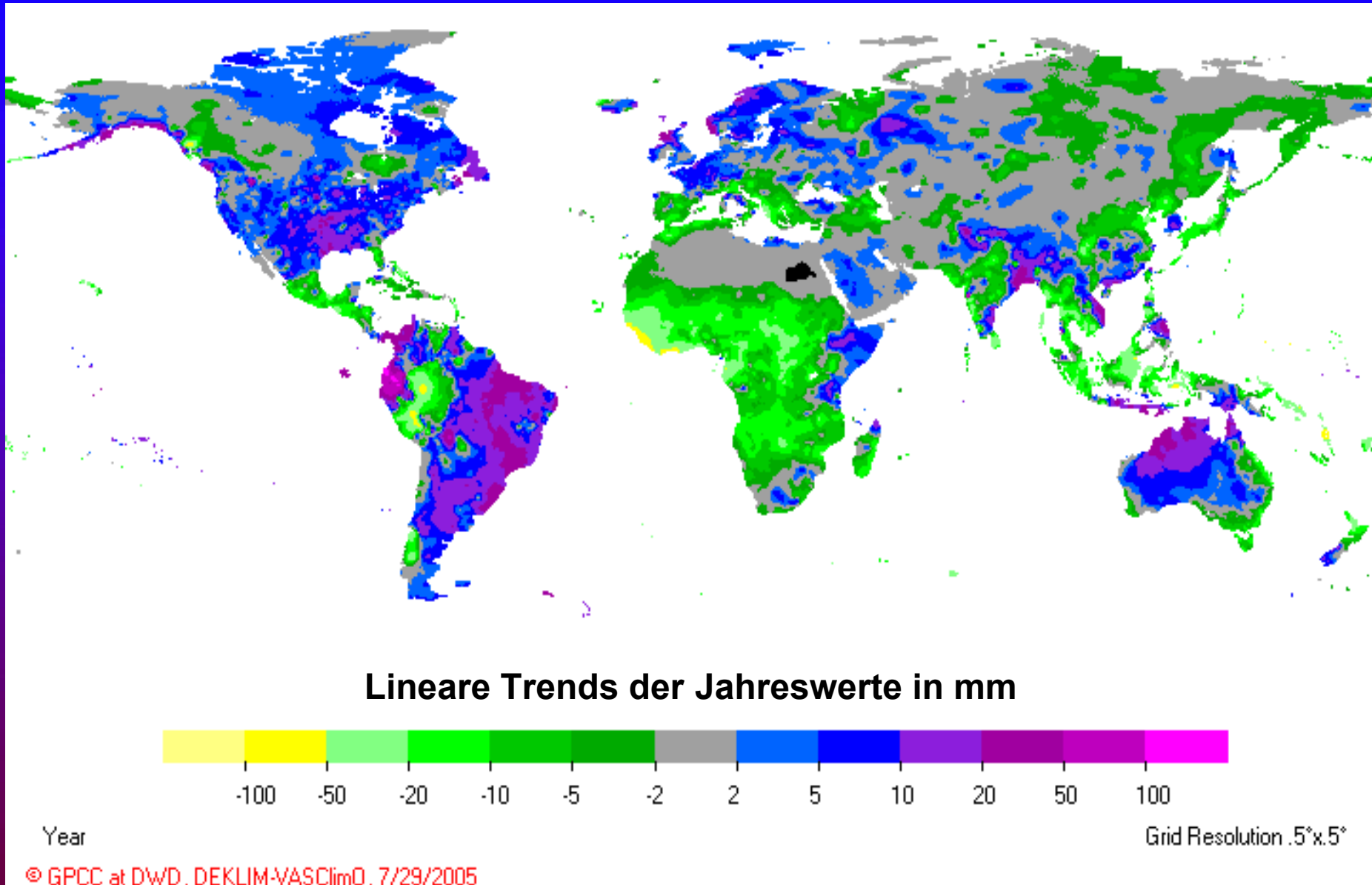
Annual J-D

L-OTI(°C) Change 1880-2016

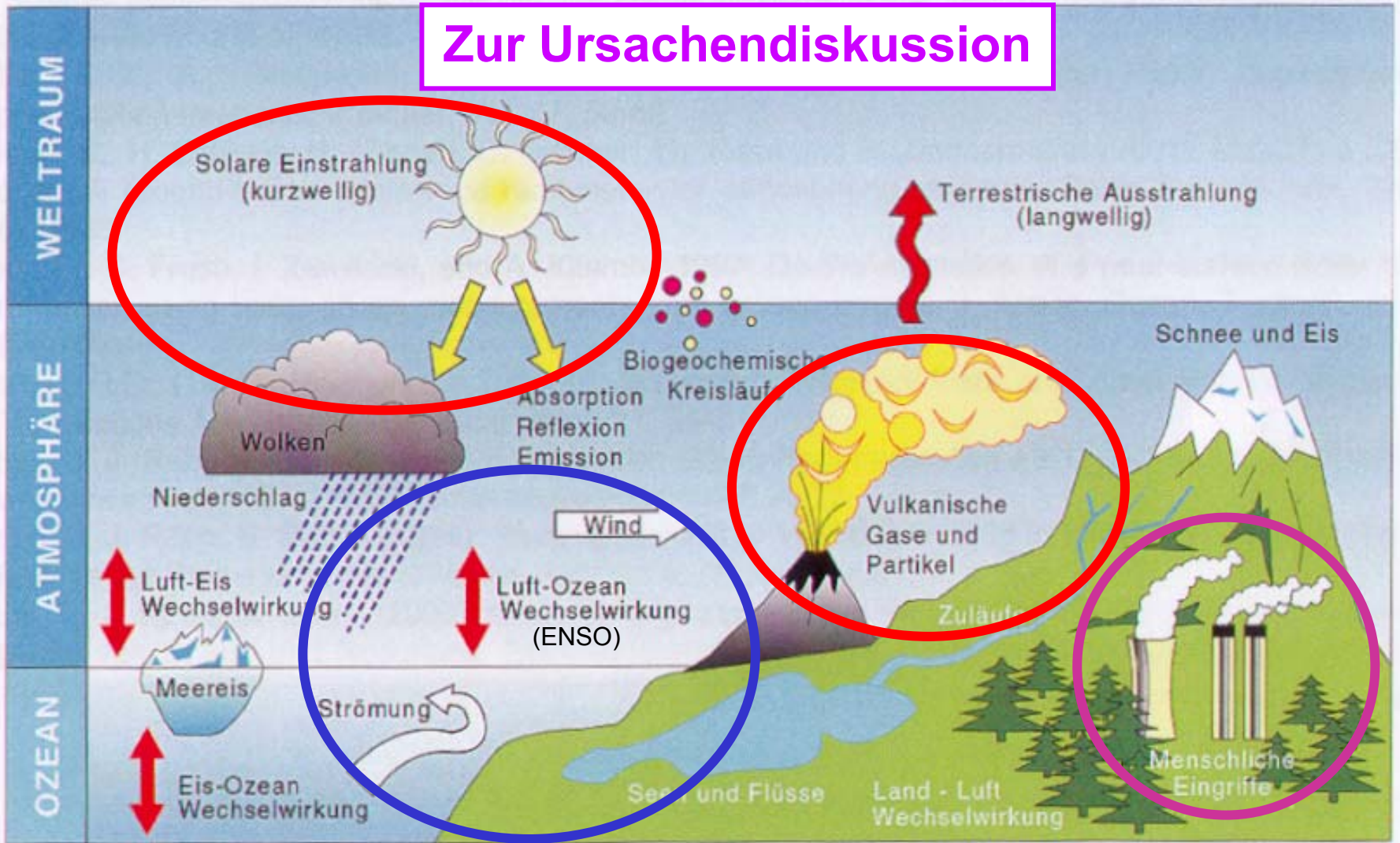
1.02



Regionale Strukturen der Niederschlagstrends 1951-2000



Zur Ursachendiskussion



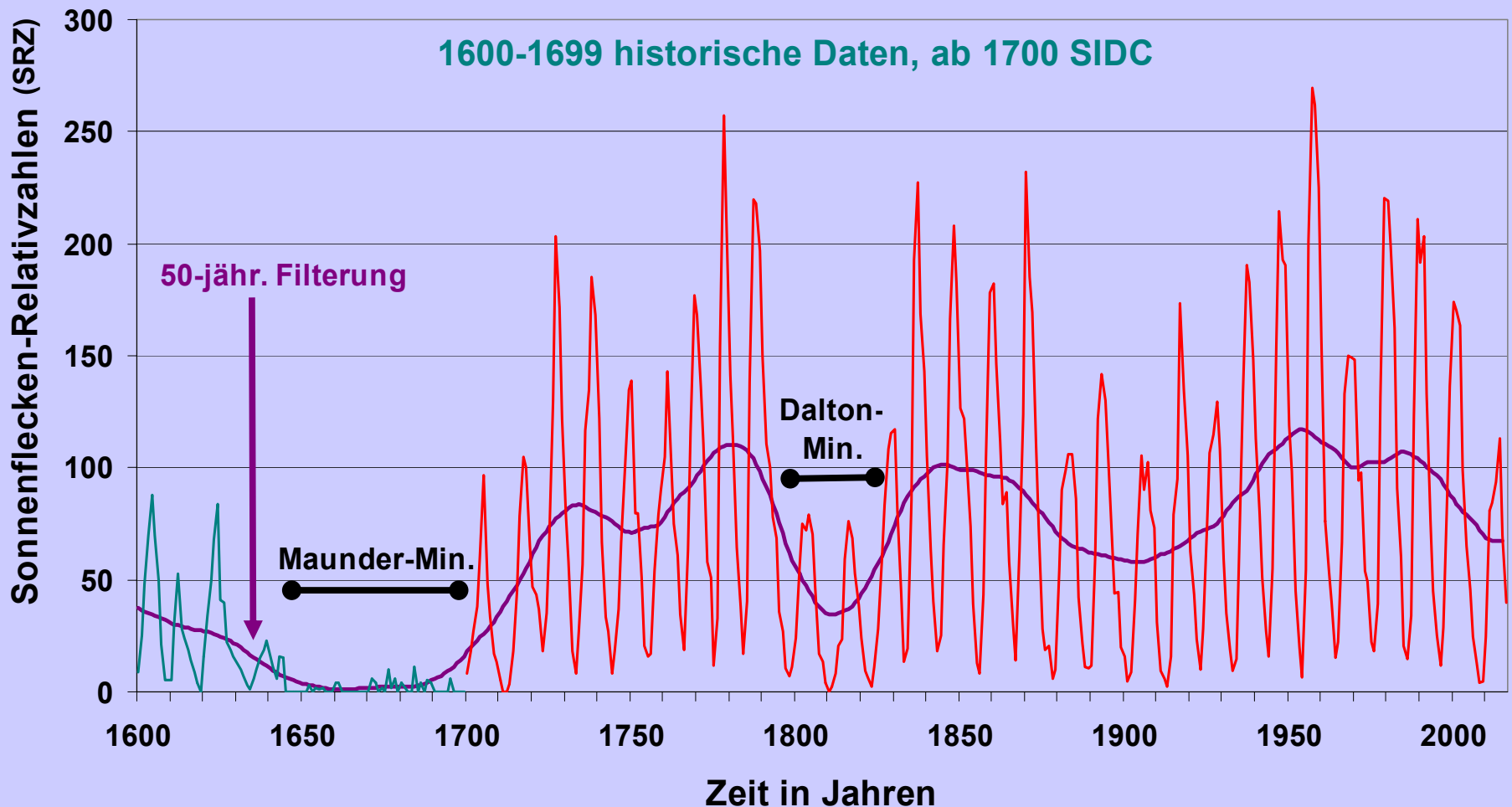
Klimasystem: Komponenten und Prozesse

Cubasch und Kasang, 2000

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

Zur Sonnenaktivität als Klimafaktor

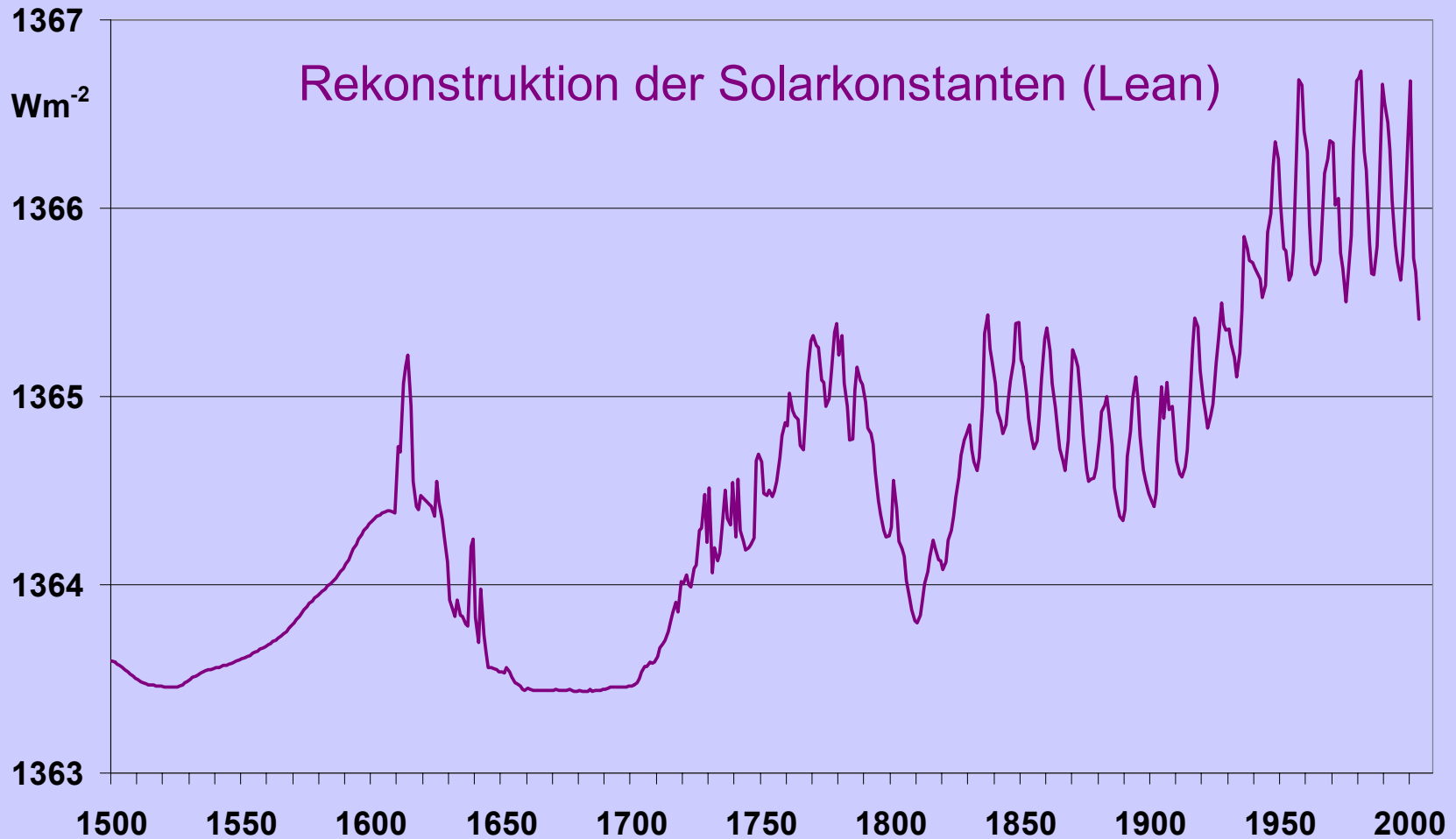
Sonnenflecken-Relativzahlen 1600-2016



Die Sonnenflecken sind relative Dunkelgebiete auf der sichtbaren Sonnenoberfläche. Sie werden durch Fackeln usw. hinsichtlich der Ausstrahlung überkompensiert.

Quellen: Waldmeier, 1961; Eddy, 1967; Schove, 1983; SIDC, 2017; bearbeitet

Rekonstruktion der „Solarkonstanten“ seit 1500

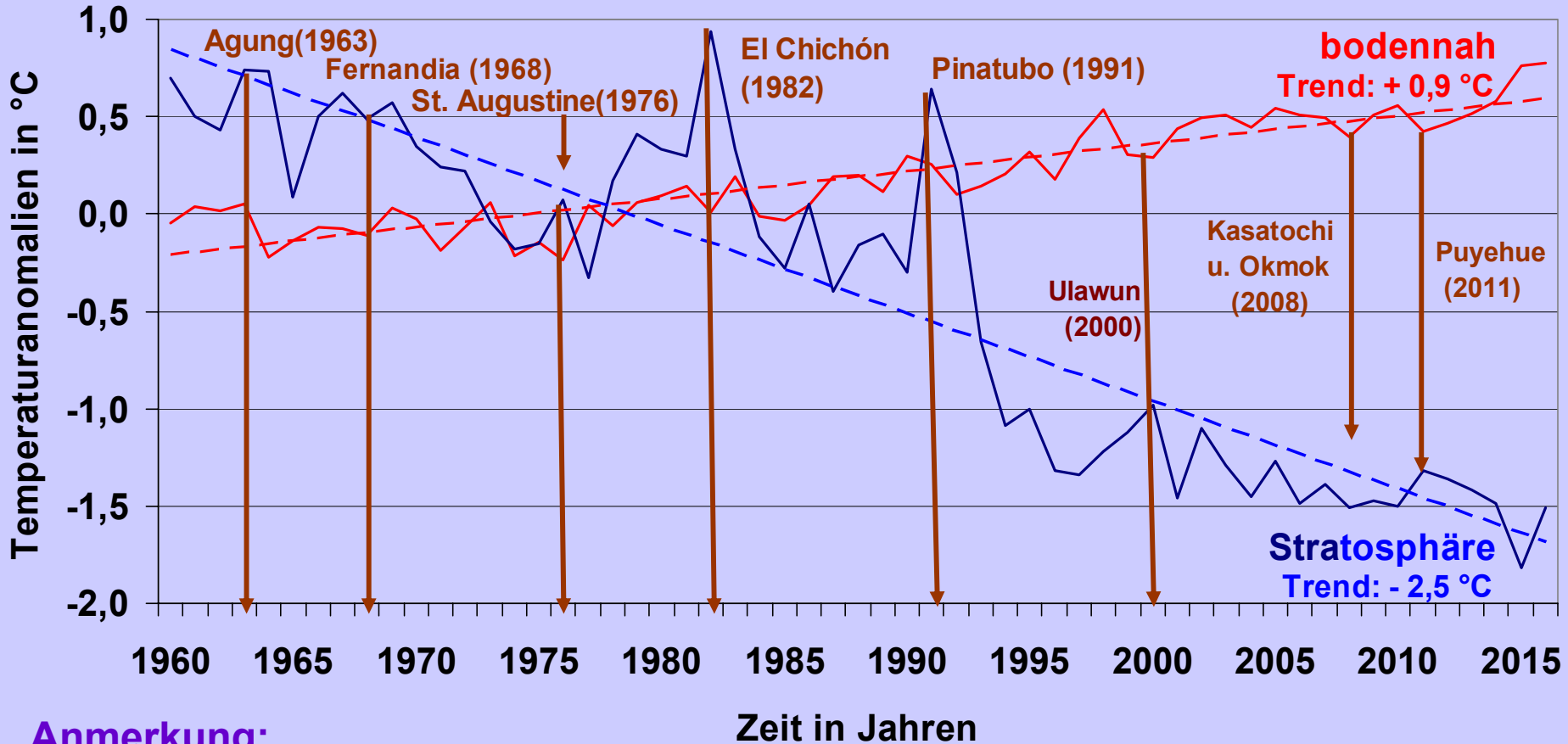


Hier sind Satellitenmessungen der „Solarkonstanten“ u.a. mit SRZ korreliert worden → seit 1880 Trend von ca. $1,2 \text{ Wm}^{-2}$, entsprechend ca. 0,1 % der Solarkonstanten (Amplitude des quasi-11-jährigen Zyklus etwas weniger). Das IPCC (2014) gibt für den troposphär. Strahlungsantrieb seit 1750 nur $\leq 0,1 \text{ Wm}^{-2}$ an.

Quelle: J. Lean, Center for Space Research, Washington, USA, 2010.

Globaltemperatur, Anomalien 1960 - 2016
Vergleich bodennah (CRU) und Stratosphäre (30 hPa, NOAA)
sowie einige explosive Vulkanausbrüche

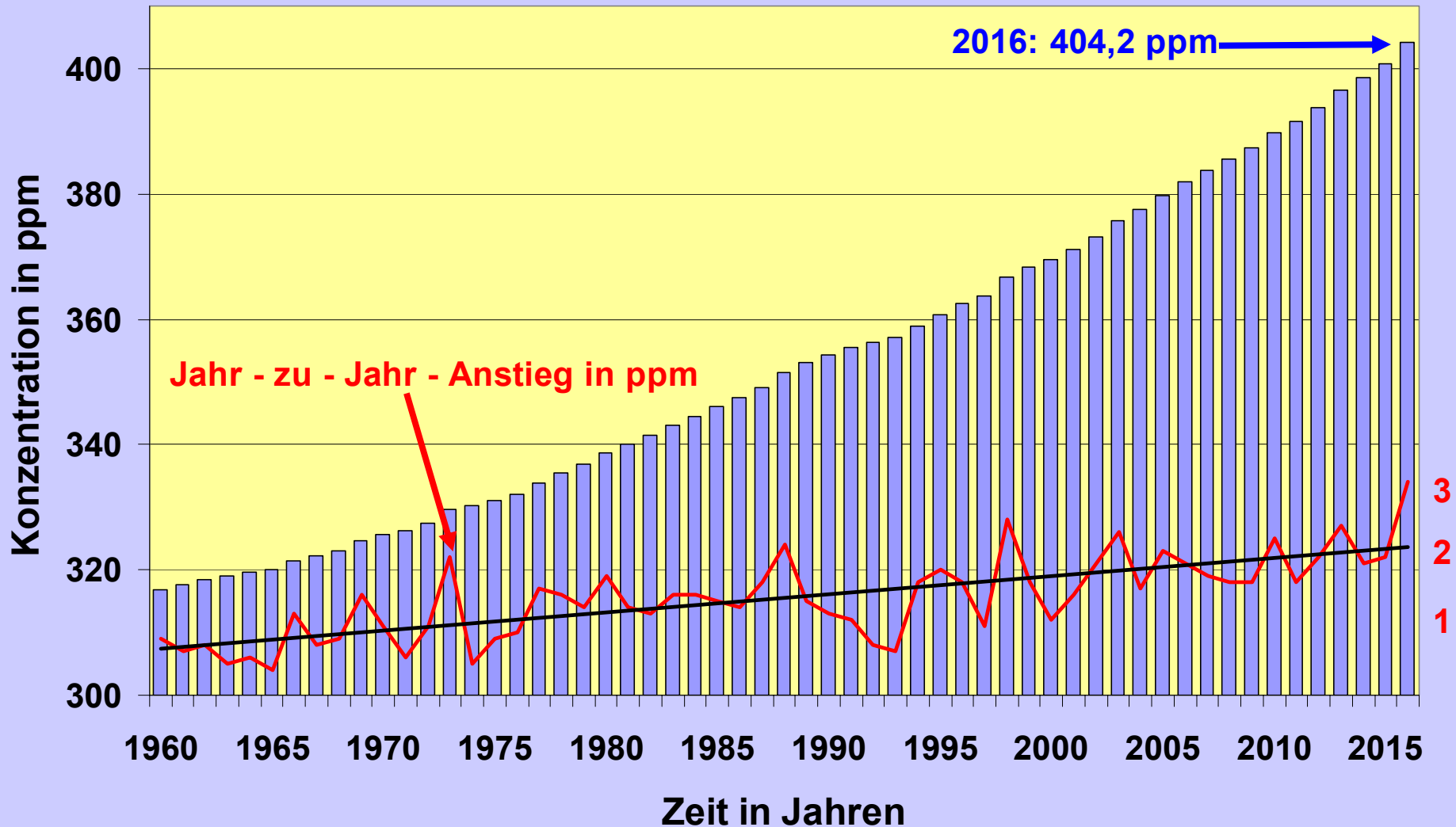
Vulkanismus-Strahlungsantrieb seit 1850 max. $\sim 3\text{-}4 \text{ Wm}^{-2}$ (Krakatau/1883, Pinatubo/1991)



Anmerkung:

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.

Atmosphär. Kohlendioxidkonzentration, Mauna Loa



Vorindustrielle CO₂-Konzentration um 1880: ca. 290 ppm; um 1750/1800: ca. 280 ppm; äquivalente CO₂-Konzentration derzeit grob ca. 500 ppm

Spurengasübersicht

Konzentrationen 2015, ~1750 in Klammern, Emissionen 2015 (CO₂) bzw. ~2010)

| Spurengas, Symbol | Anthropogene Emission | Atmosphärische Konzentration | Treibh. natürlich | Treibh. anthrop.* |
|---|-----------------------------------|------------------------------|-------------------|-------------------|
| Kohlendioxid, CO₂ | 40 Gt a⁻¹ | 400,8 (280) ppm | 26 % | 57,7 % |
| Methan, CH₄ | 300-370Mt a⁻¹ | 1,83 (0,72) ppm | 2 % | 22 % |
| FCKW | gering | F12: 0,52 (0) ppb | - | 6,2 % |
| Distickstoffoxid, N₂O | 3-12 Mt a⁻¹ | 0,33 (0,27) ppm | 4 % | 5,85 % |
| Ozon, O₃ | ~0,5 Gt a⁻¹ (?) | ~ 34 (24) ppb ** | 8 % | 8,25 % |
| Wasserdampf, H₂O | relativ gering | 2,6 (2,6) % ** | 60 % | (indirekt) |

Quellen: CDIAC, 2016; IPCC, 2014; natürl. Treibhauseffekt nach Kiehl u. Trenberth, 1997;

* Relation d. Strahlungsantriebe 1750 - 2011 (IPCC, 2014) ** räumlich/zeitlich stark variabel

Aufschlüsselung der anthropogenen Emissionen (IPCC, 2014, erg.)

CO₂: 92 % fossile Energie (u. Zementprod.), 8 % Waldrodungen (u. Holznutzung)

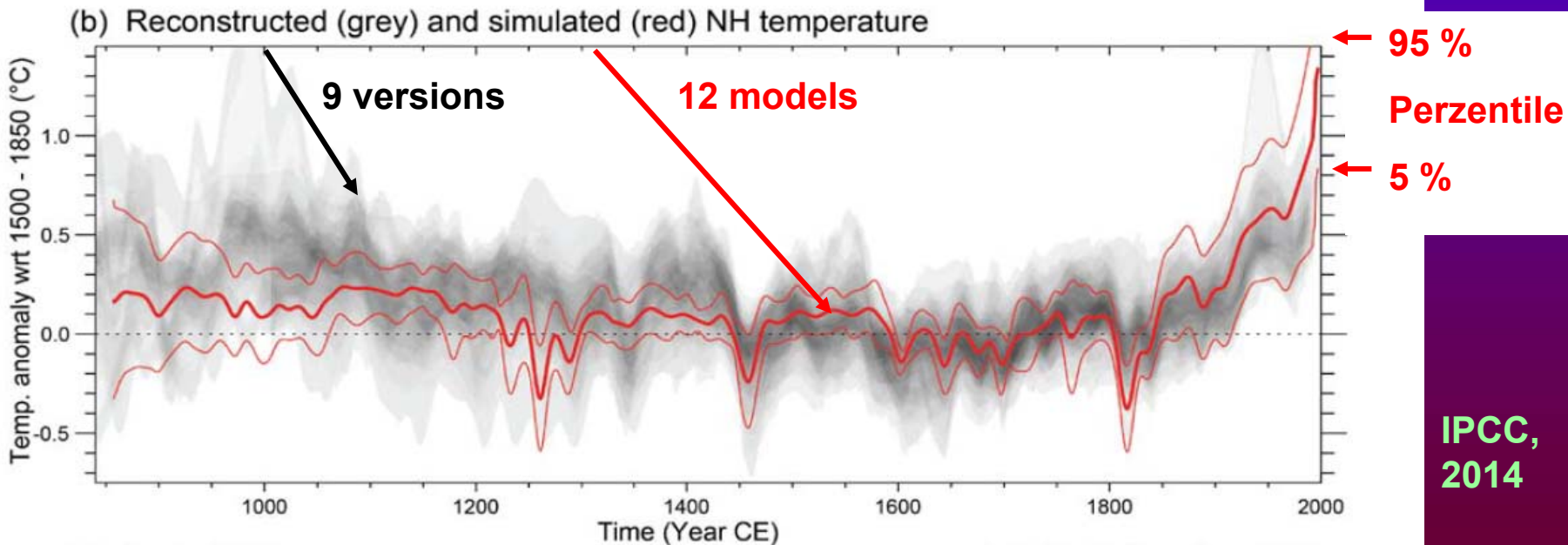
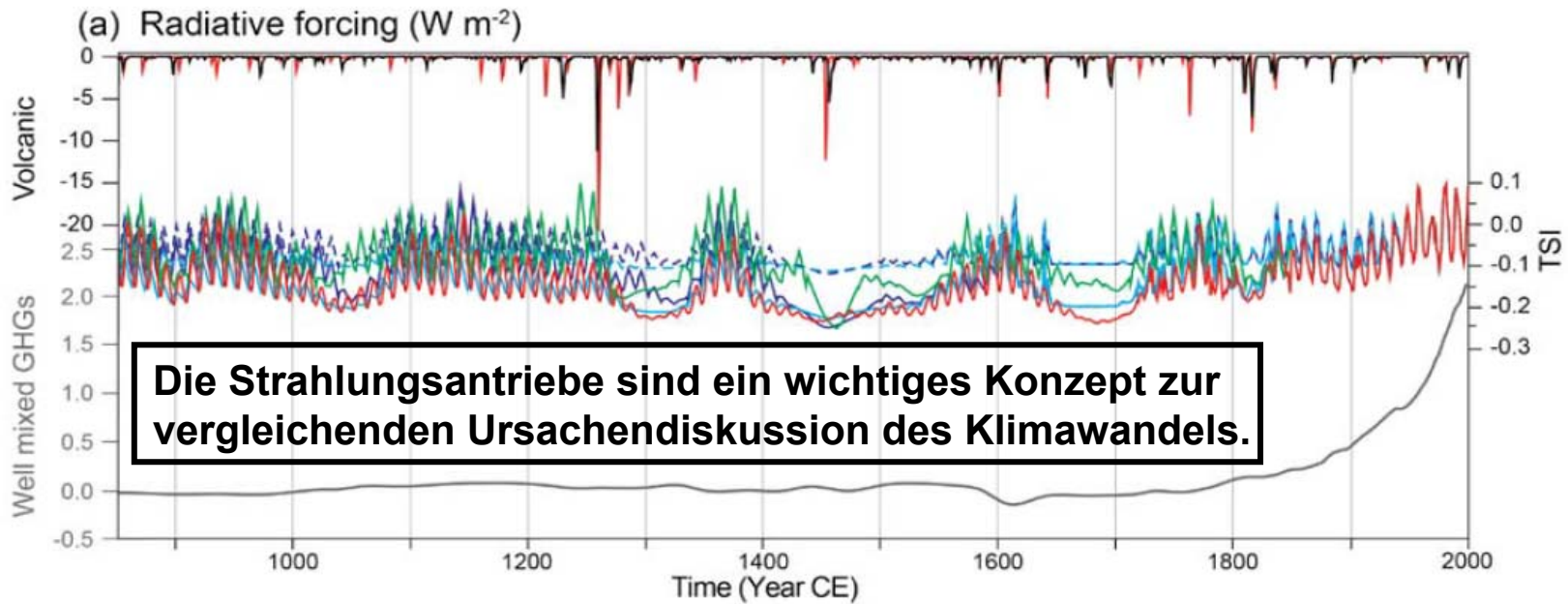
CH₄: 28 % fossile Energie, 27 % Viehhaltung, 24 % Abfälle (Müll, Abwasser), 11% Reisanbau, 11% Biomasse-Verbrennung

FCKW: Treibgas in Spraydosen, Kältetechnik, Dämm-Material, Reinigung

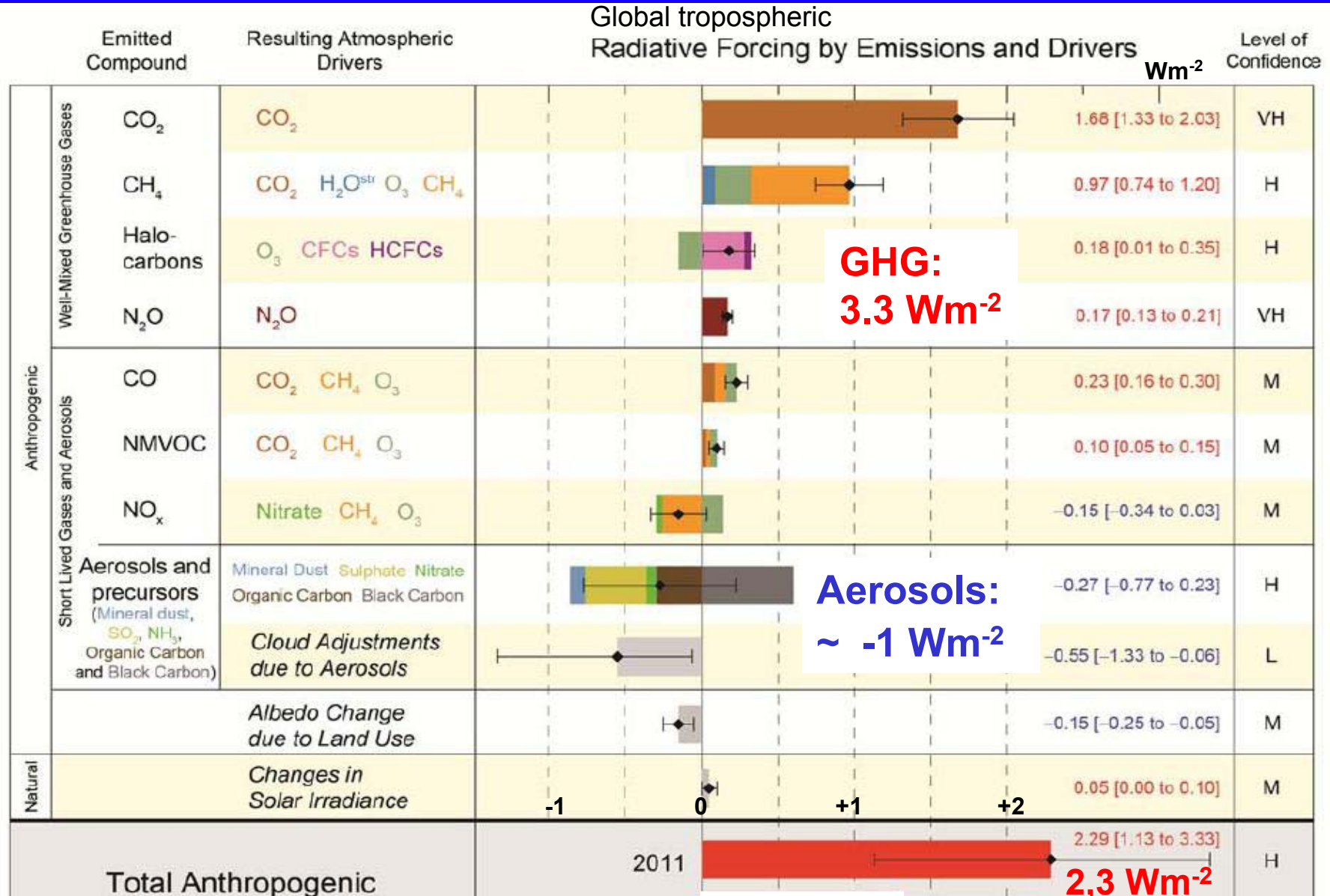
N₂O: 65% Landwirtschaft (einschl. Düngung), 11 % fossile Energie, 11% Biomasse-Verbrennung, 10 % Flüsse und Küsten (Rest chem. Industrie)

O₃: indirekt über Vorläufersubstanzen (insbesondere NO_x, VOC und CO)

Temperatur der Nordhemisphäre 850-2000 n.C.



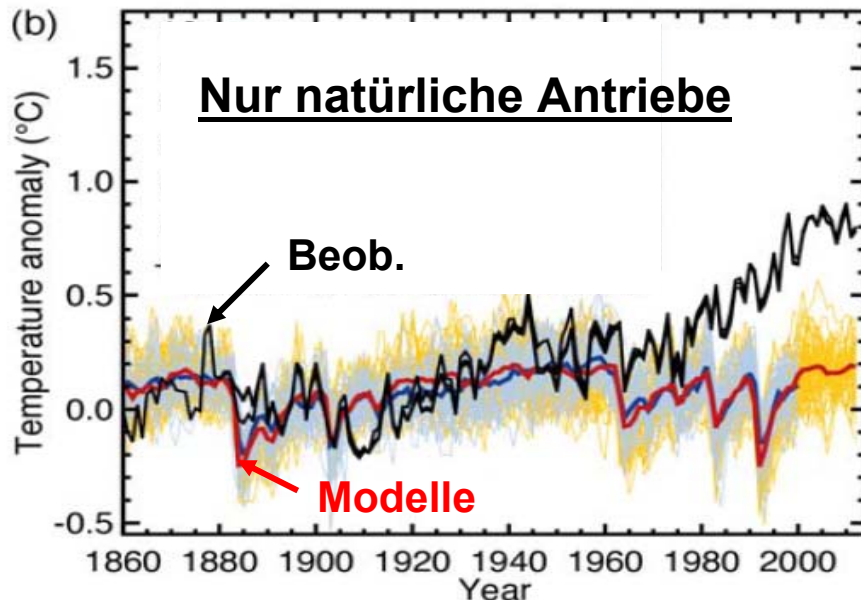
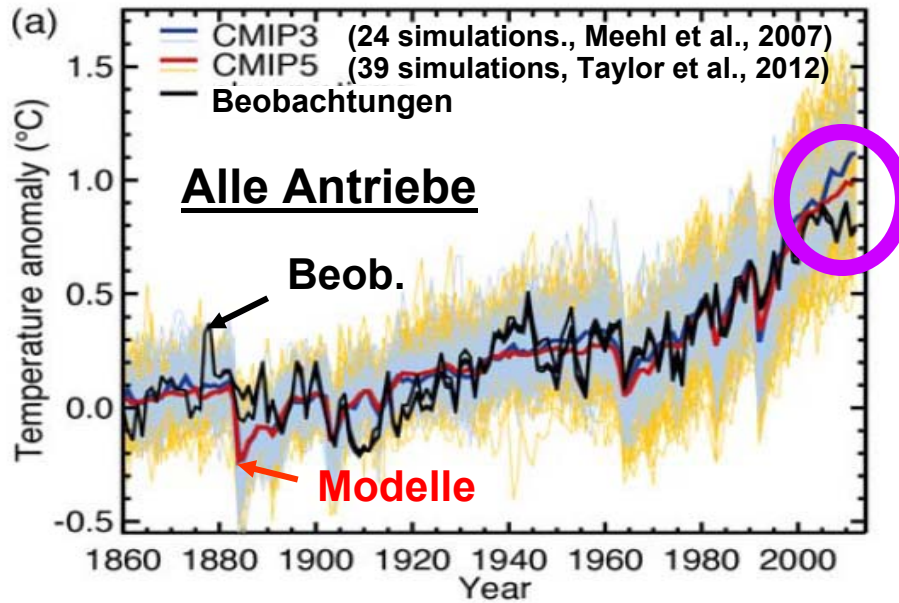
Globale troposphär. Strahlungsantriebe 1750-2011 (IPCC, 2014)



Zusätzlich: Vulkanismus, episodisch, max. ~3-4 Wm⁻² (z.B. Krakatau, Pinatubo)

Modellsimulationen Globaltemperatur, 1860-2012

(Ref.: 1880-1919)

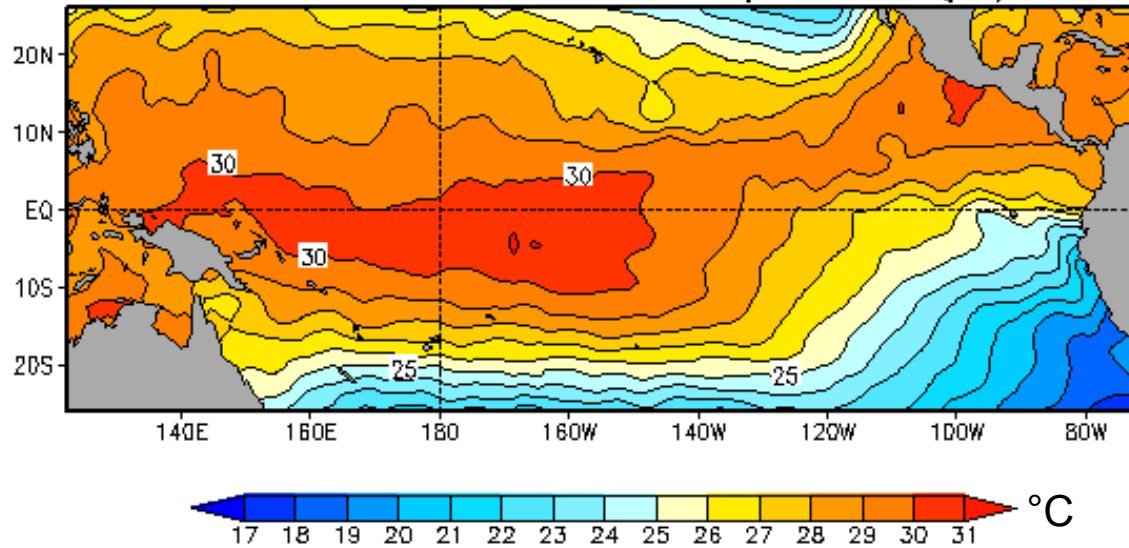


„Der menschliche Einfluss ist mit extrem hoher* Wahrscheinlichkeit die dominante Ursache der beobachteten Erwärmung seit der Mitte des 20. Jahrhunderts“
(IPCC, 2014).

* $p > 95\%$

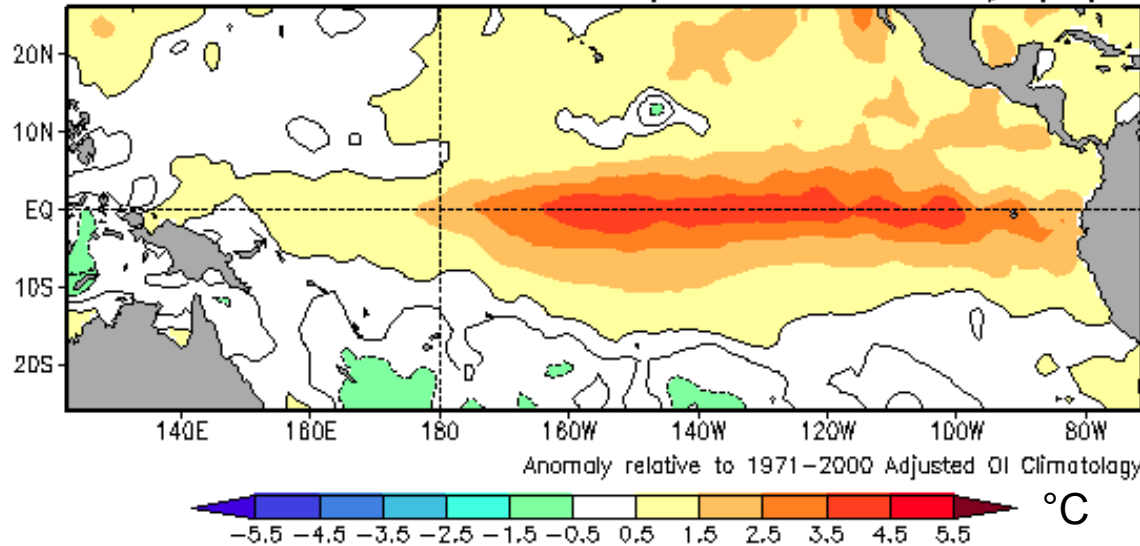
IPCC, 2014

Observed Sea Surface Temperature (°C)



SST

Observed Sea Surface Temperature Anomaly (°C)



El Niño 2015

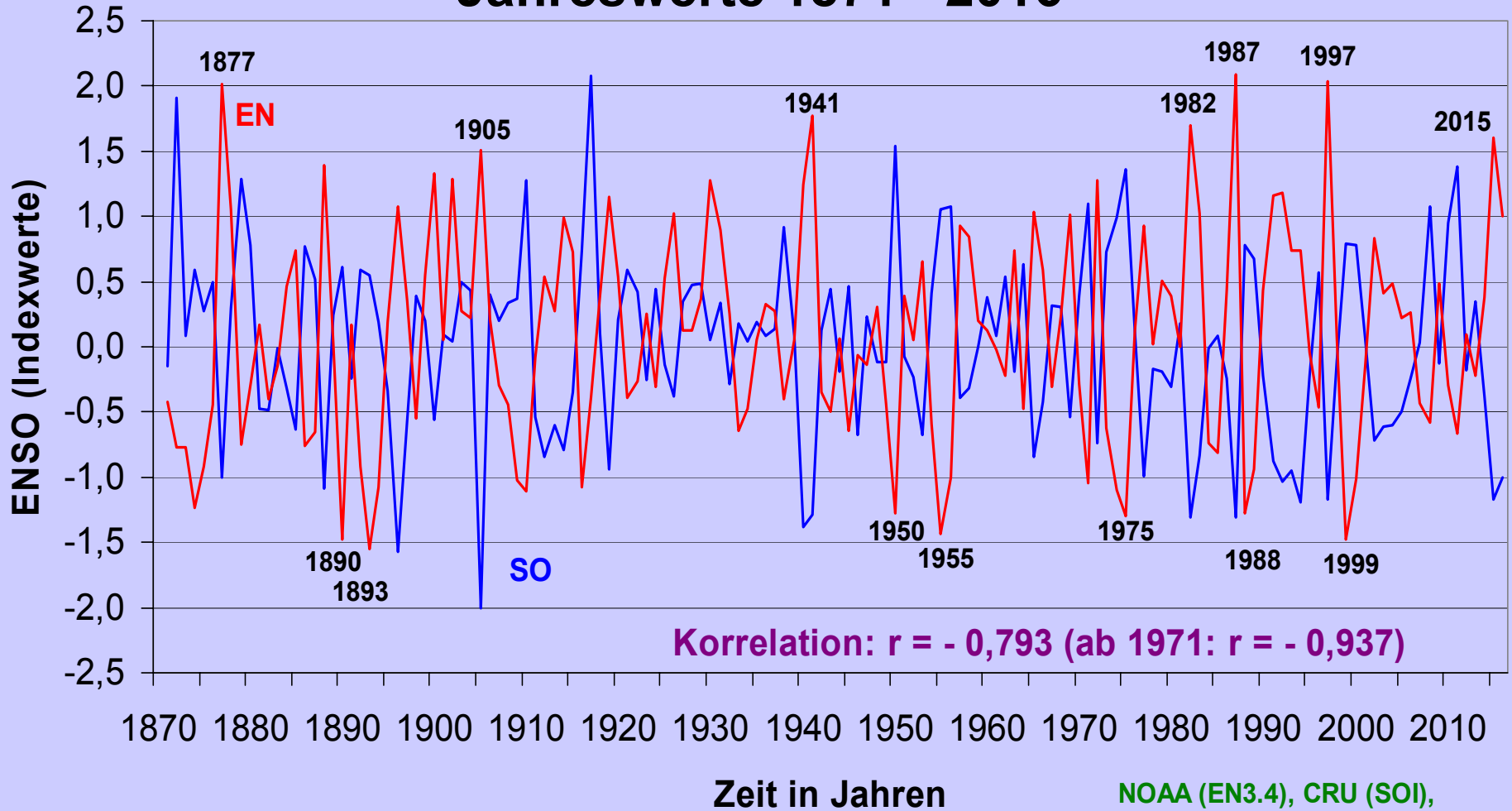
Meeresoberflächentemp. (SST) und deren Anomalien im tropischen Pazifik

7 Tage-Mittel, NOAA, USA

Abruf 17.11.2015

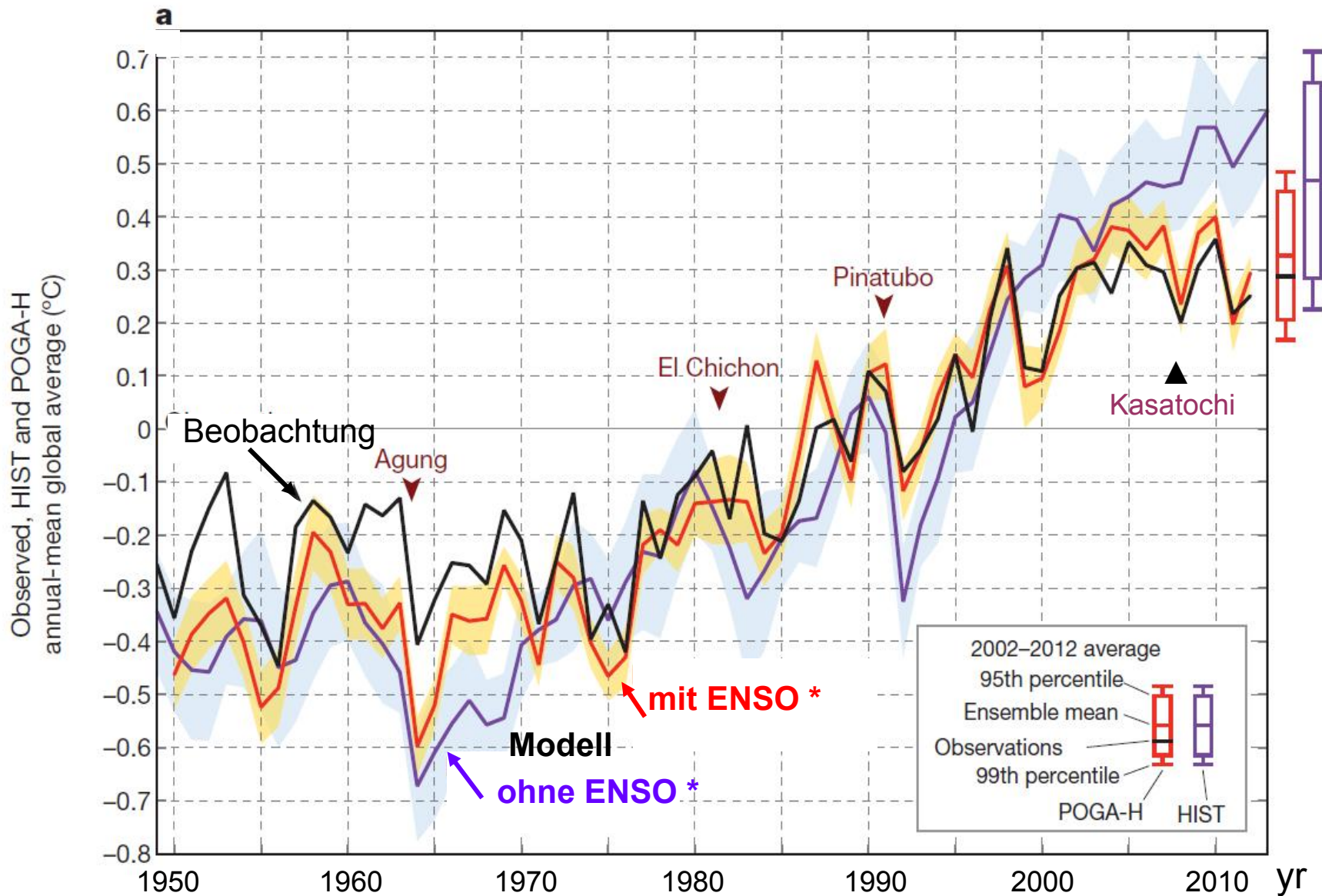
El Niño (EN) / La Niña (LN) und Südliche Oszillation

Jahreswerte 1871 - 2016



EN / LN, d.h. die SST-Anomalien im tropischen Ostpazifik (hier Region 3.4), sind mit der sog. *Südlichen Oszillation (SO)*, d.h. der Luftdruckdifferenz zwischen Tahiti und Darwin (Australien) negativ korreliert. Zusammenfassend spricht man vom ENSO - Mechanismus, einer internen Klimasystem - Wechselwirkung.

Modellsimulationen ohne und mit ENSO*- Antrieb 1950-2013

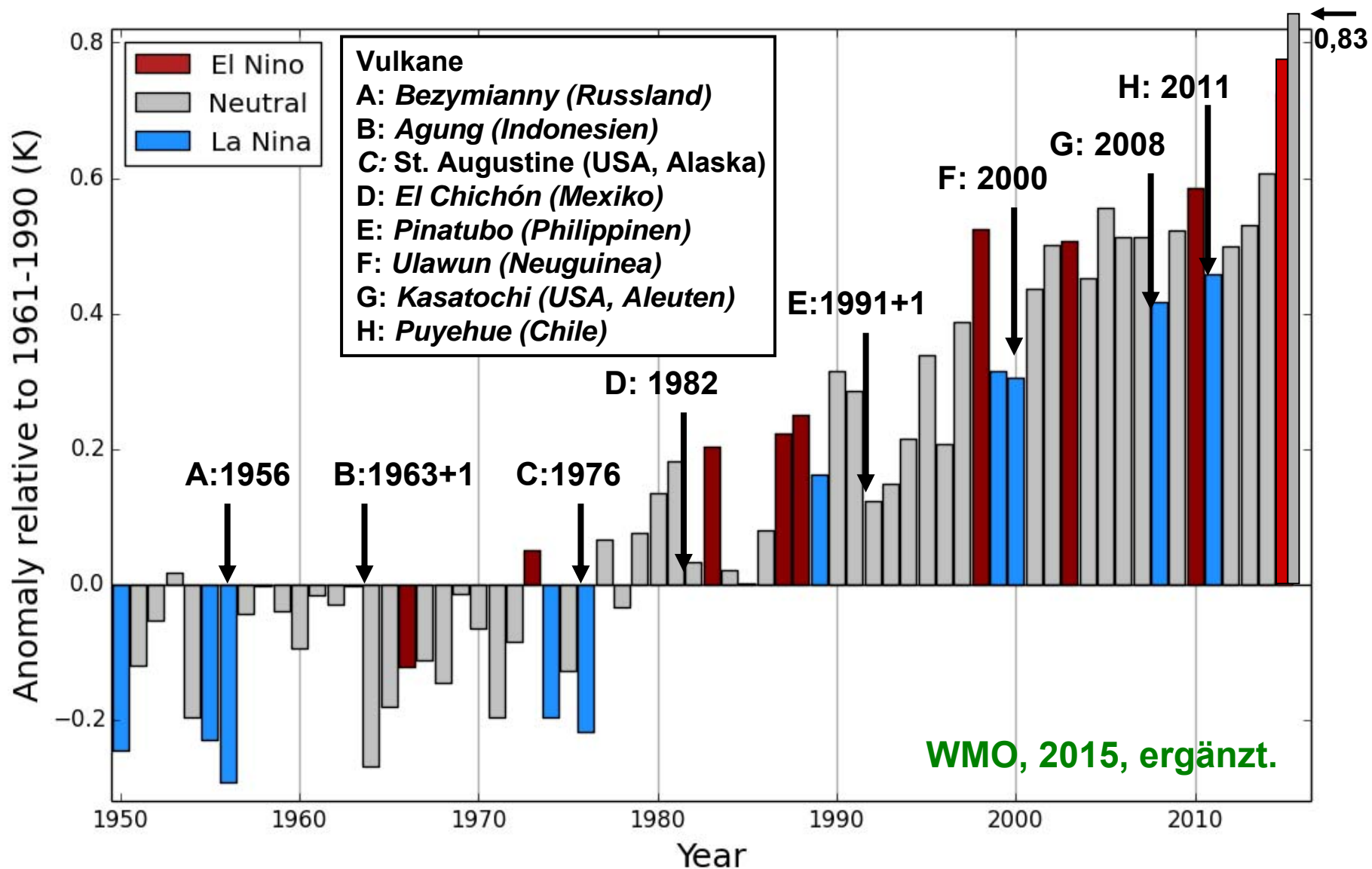


* El Niño / Southern Oscillation

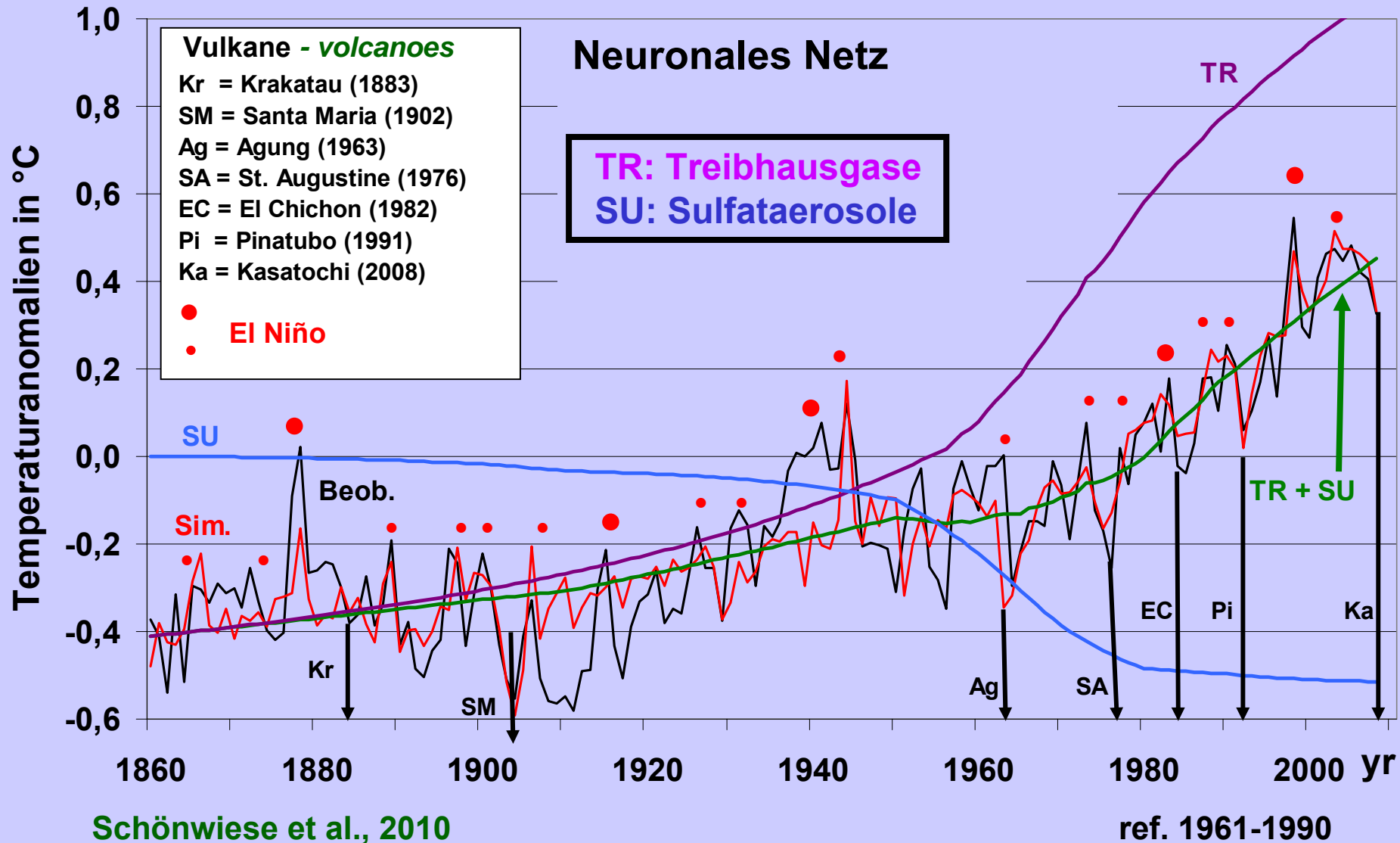
Kosaka und Xie, 2013 (Nature), erg.

Globaltemperatur, Jahresanomalien 1950-2016

Mittelwerte aus drei Datenquellen (CRU, GISS, NOAA)



Globaltemperatur 1860 - 2008, Beobachtung und Modell



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

Übersicht:

Strahlungsantriebe 1750-2011 (IPCC, 2013) und Klimasignale 1860-2008 (Schönwiese et al., 2010)

| Klimafaktor | Strahlungsantrieb | TGL*- Signal | Signalstruktur |
|----------------------|------------------------------------|---------------|---------------------|
| Treibhausgase, TR | + 3,3 (2,4 - 4,3) Wm ⁻² | 0,9 - 1,3 K | Progressiver Trend |
| Partikel (Aerosol) A | - 0,9 (0,1 - 1,9) Wm ⁻² | 0,2 - 0,4 K | Uneinheitl. Trend |
| Kombiniert, TR+A | (+ 2,4 Wm ⁻²) | (0,5 - 1,1 K) | Uneinheitl. Trend |
| Vulkaneruptionen | - 1- 3 Wm ⁻² (max.)** | 0,1 - 0,2 K | Episodisch (1-3 a) |
| Sonnenaktivität | + 0,1 Wm ⁻² | 0,1 - 0,2 K | Fluktuativ |
| ENSO (SOI) *** | Entfällt (+) | 0,2 - 0,3 K | Episodisch (n• mon) |

* global gemittelte bodennahe Lufttemperatur, Signalabschätzungen mittels neuronaler Netze

** Pinatubo-Ausbruch 1991: 2,4 Wm⁻², 1992: 3,2 Wm⁻², 1993: 0,9 Wm⁻² (McCormick et al. 1995)

*** El Niño / Southern Oscillation (hier Southern Oscillation Index)

Die erklärte Varianz (TGL) liegt je nach Modell zwischen 76 % und 88 %

Signifikanztests (Auswahl): F-Tests EV → p > 99 % (α < 0.01);
Simulationen mit Zufallsantrieben, MLR (500 Sim.) → 0 % < EV < 22 %
(EV = 2,6 %); NN max. 37 %, Verifikationsphase 0 %;
Residuumanalyse (MLR und NN) → normalverteilt und stationär.

Zusammenfassende Folgerungen

- Grundsätzlich variiert das Klima in allen relevanten Größenordnungen des Raums und der Zeit.
- Je nach diesen Größenordnungen sind die Ursache-Wirkung-Mechanismen unterschiedlich.
- Im Industriezeitalter ist der im globalen Mittel beobachtete langfristige Temperaturanstieg zweifellos anthropogen.
- Er ist jedoch stets von relativ kurzfristigen natürlichen bzw. anthropogenen Fluktuationen überlagert, einschließlich dekadischer Variabilität (→ ggf. Hiatus).
- Der Hiatus 1945-1976 wurde durch die anthropogene Bildung von Sulfat-Aerosol verursacht, der Hiatus 1999-2013 ozeanisch (relative Häufung von La Niña).
- 2016 war das wärmste Jahr seit Beobachtungsbeginn (davor in Folge auch 2014 und 2015).
- ► Problematische Zukunft



Vielen Dank
für Ihr Interesse

Homepage des Autors:

<http://www.geo.uni-frankfurt.de/iau/klima>