



Klimaänderungen

Aktuelle wissenschaftliche Erkenntnisse

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

Zur Motivation

Warum beschäftigt sich nicht nur die Wissenschaft, sondern auch die Öffentlichkeit intensiv mit dem Problemkreis Klimaänderungen?

► Einerseits ist die Menschheit hochgradig von der Gunst des Klimas abhängig, andererseits nimmt sie selbst immer mehr darauf Einfluss (oft nachteilig!).

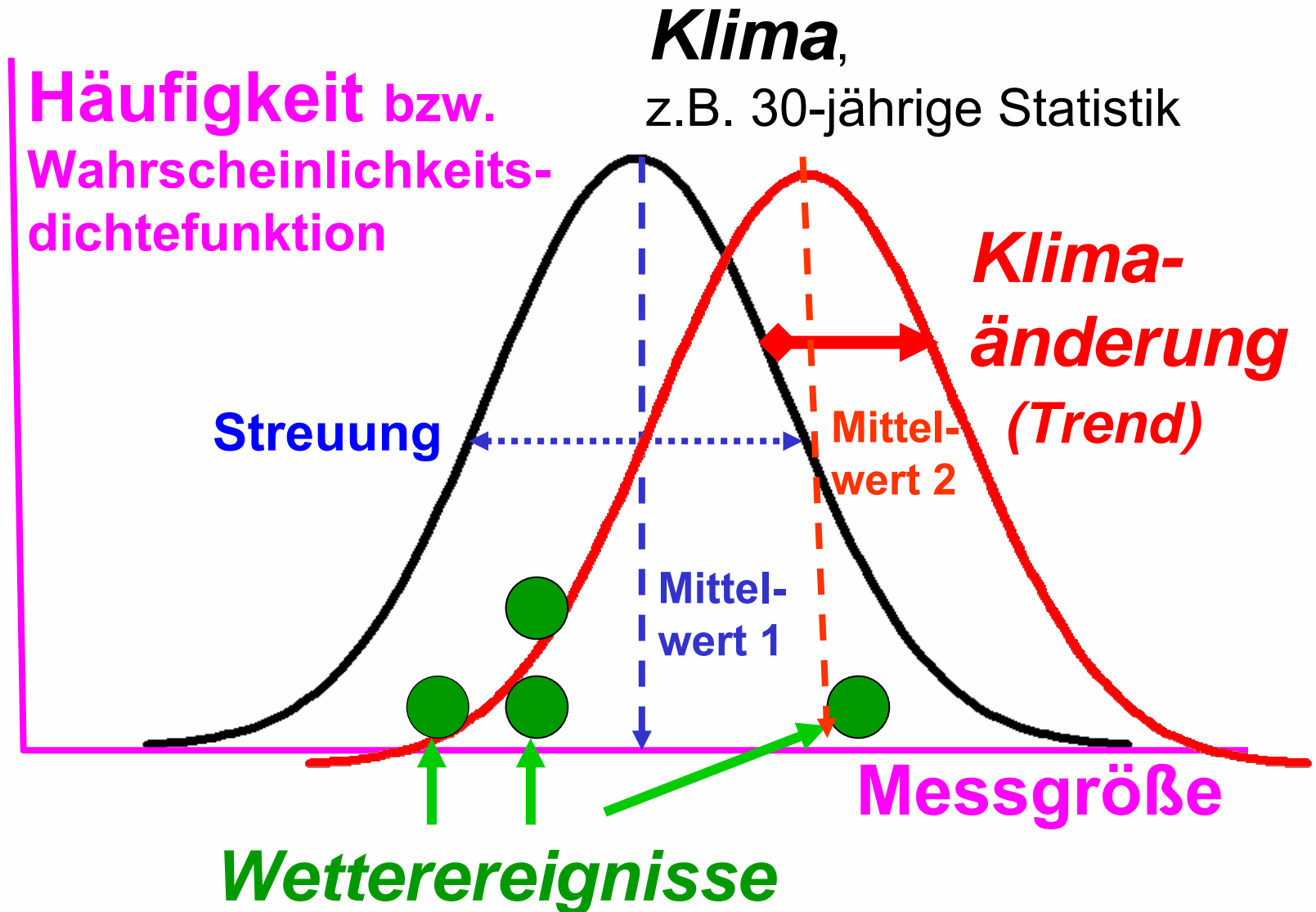
Vortragsgliederung

- Begriffsklärung „Klima“
- Übersicht der Klimaänderungen seit Erdentstehung
- Klimaänderungen im Industriezeitalter
- Ursachendiskussion (Industriezeitalter)
- Extremereignisse und Klimafolgen
- Klimazukunft
- Ethische Aspekte und Klimapolitik

Klima ≠ Wetter

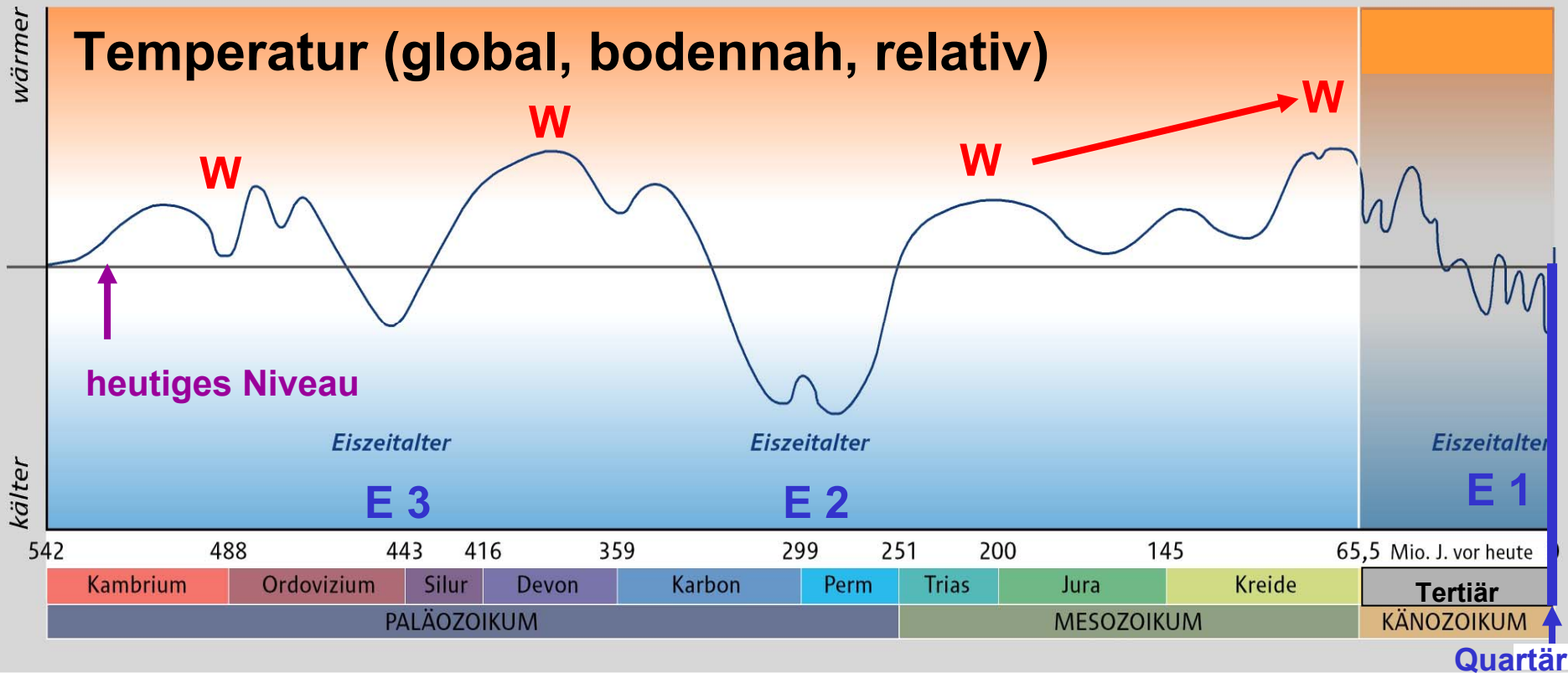
Klima ist die statistische Beschreibung der relevanten Klimaelemente (Temperatur, Niederschlag usw.) in einer relativ großen Zeitskala (i.a. von Jahrzehnten an aufwärts), und dies lokal, regional und global.

Begriffsklärung: Wetter, Klima, Klimaänderung



**Klima ist stets variabel
in Zeit und Raum
und dies aus den
unterschiedlichsten
Gründen.**

Klimaänderungen, letzte ~ 550 Mill. Jahre



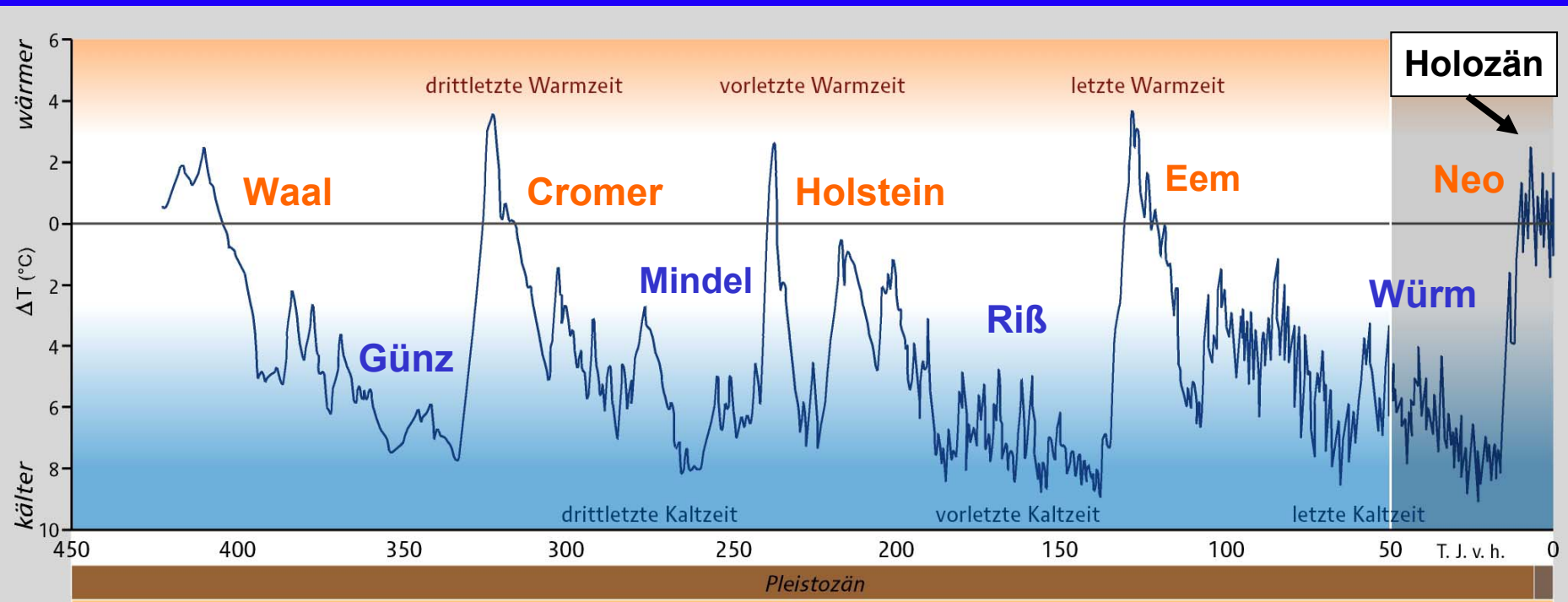
W: Warmklima ohne Eisvorkommen (akryogen)

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

Primäre Ursache: Kontinentaldrift, Eis-Albedo-Rückkopplung

Klimaänderungen, letzte 450 000 Jahre

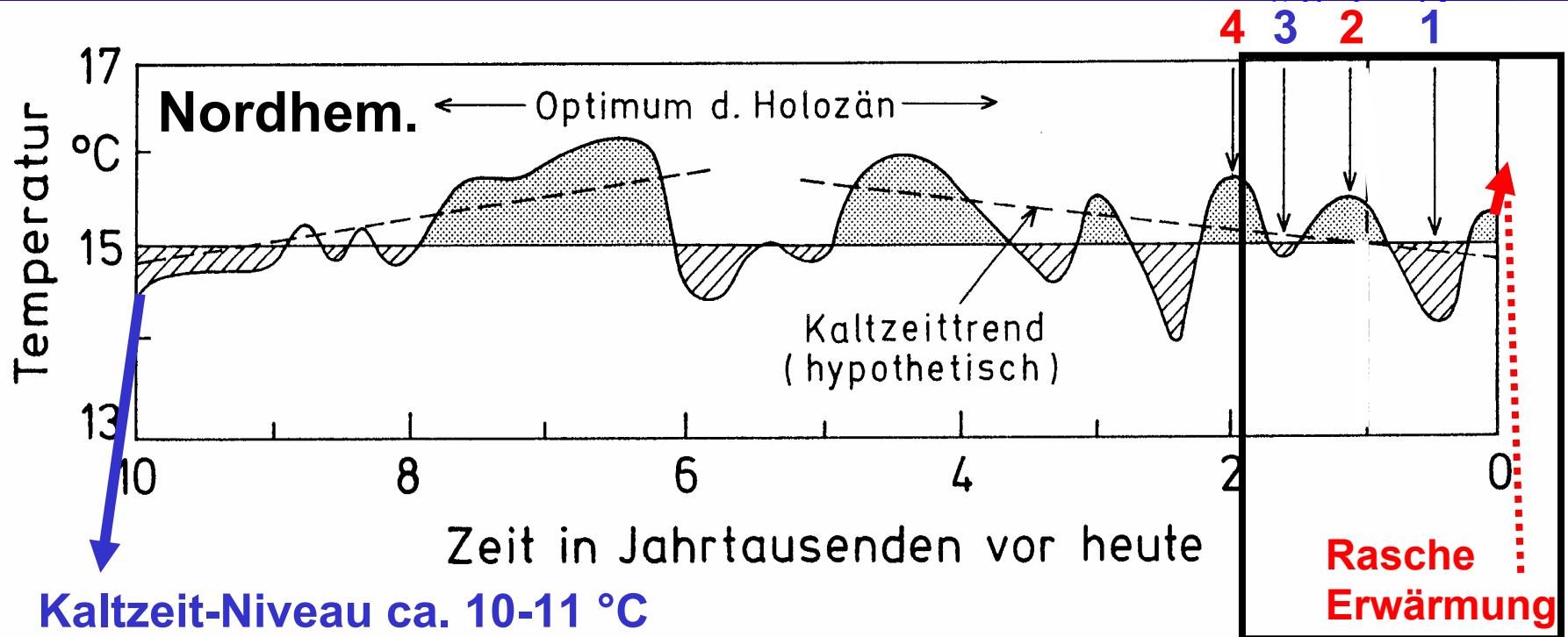
Temperatur (global, bodennah)



Warm- und Kaltzeiten („Eiszeiten“) innerhalb des (noch andauernden) Quartären Eiszeitalters – mittlerer Temperaturunterschied Würm(K) - Neo(W): 4- 5 $^{\circ}\text{C}$ (IPCC)

Primäre Ursache: Orbitalparameter, starke Rückkopplungen (Eis-Albedo, Spurengase, Vegetation)

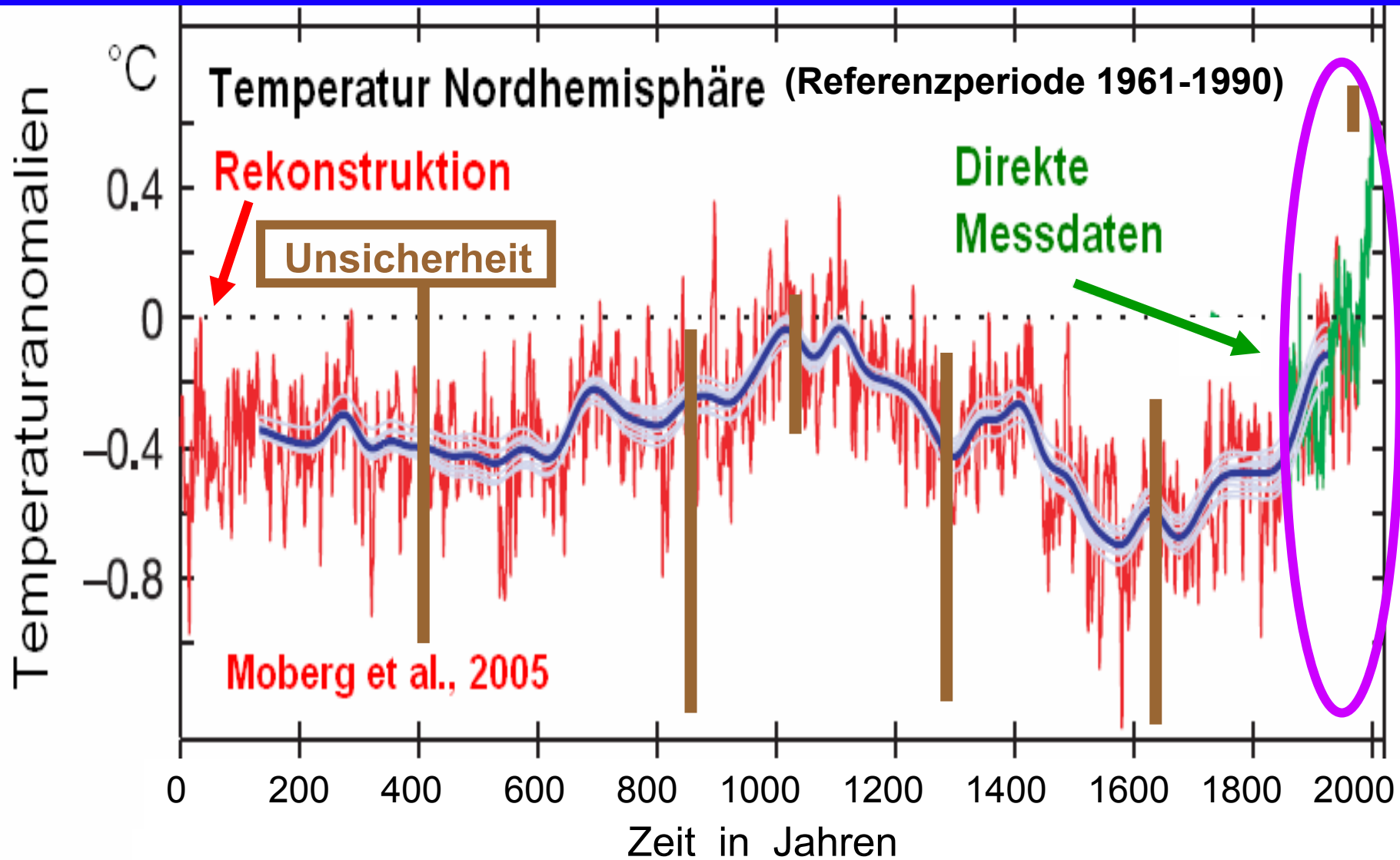
Klimaänderungen, letzte 10 000 Jahre



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

Ursachen (vielfältig): Sonnenaktivität, Vulkaneruptionen; Besonderheiten ozeanischer und atmosphär. Zirkulation

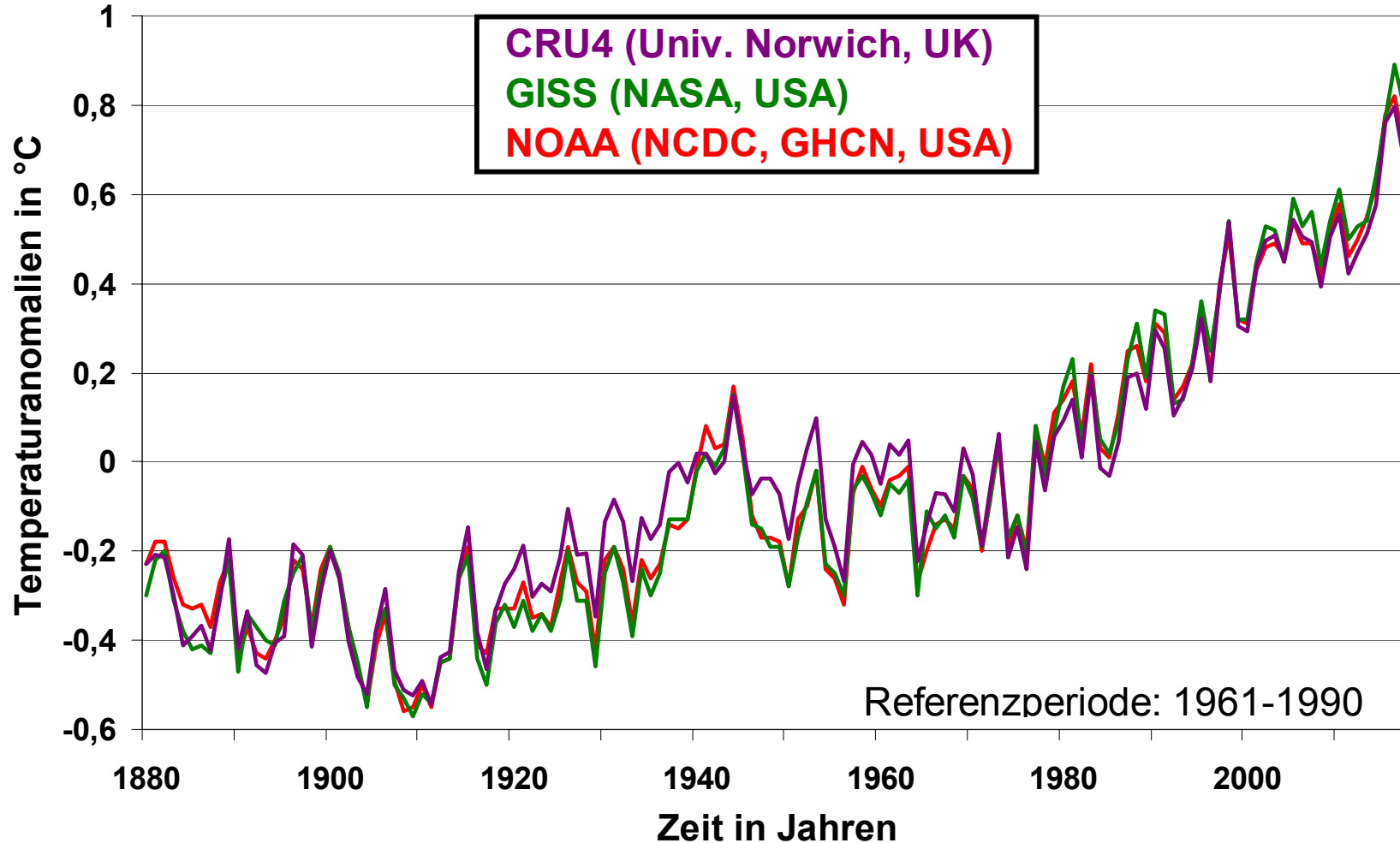
Klimaänderungen, letzte 2000 Jahre



Dazu gibt es etliche Alternativen (IPCC, 2007, 2014) → Unsicherheit
Ab ca. 1800/1850 (Industriezeitalter): sicherer, „globale Erwärmung“

Klimaänderungen im Industriezeitalter

Globaltemperatur, Jahresanomalien 1880-2017



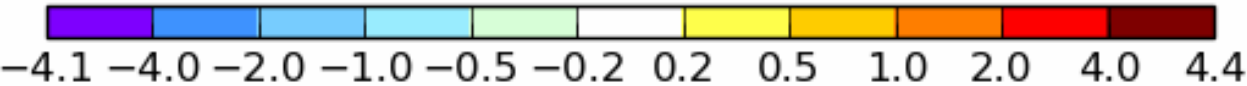
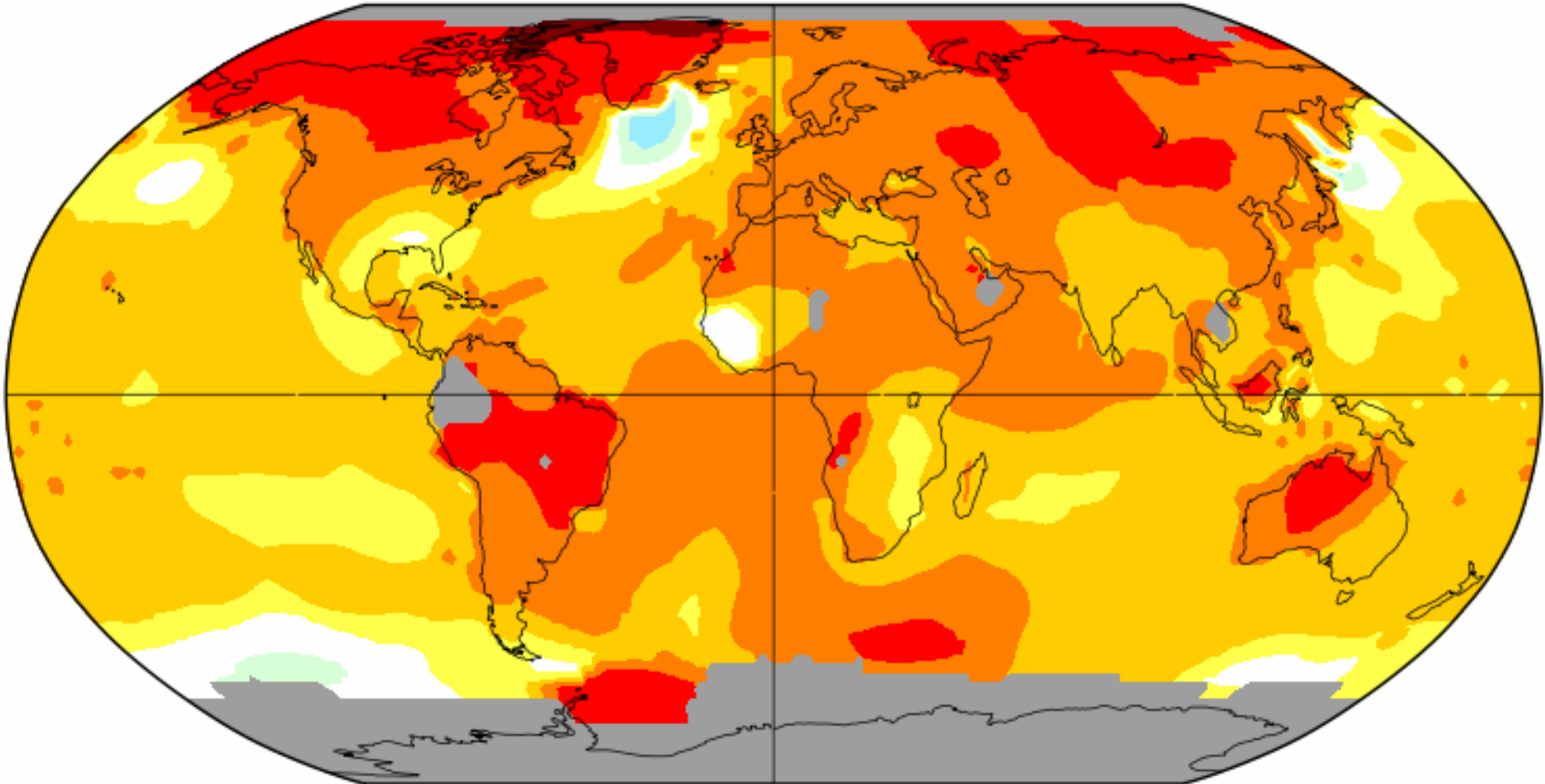
Seit 1880 ist die Globaltemperatur um rund 1 °C angestiegen (linearer Trend).
Aktuelle Datenbasis (je nach Quelle): rund 5600-7300 Stationen

Regionale Strukturen der Temperaturentrends 1880 - 2016

Annual J-D

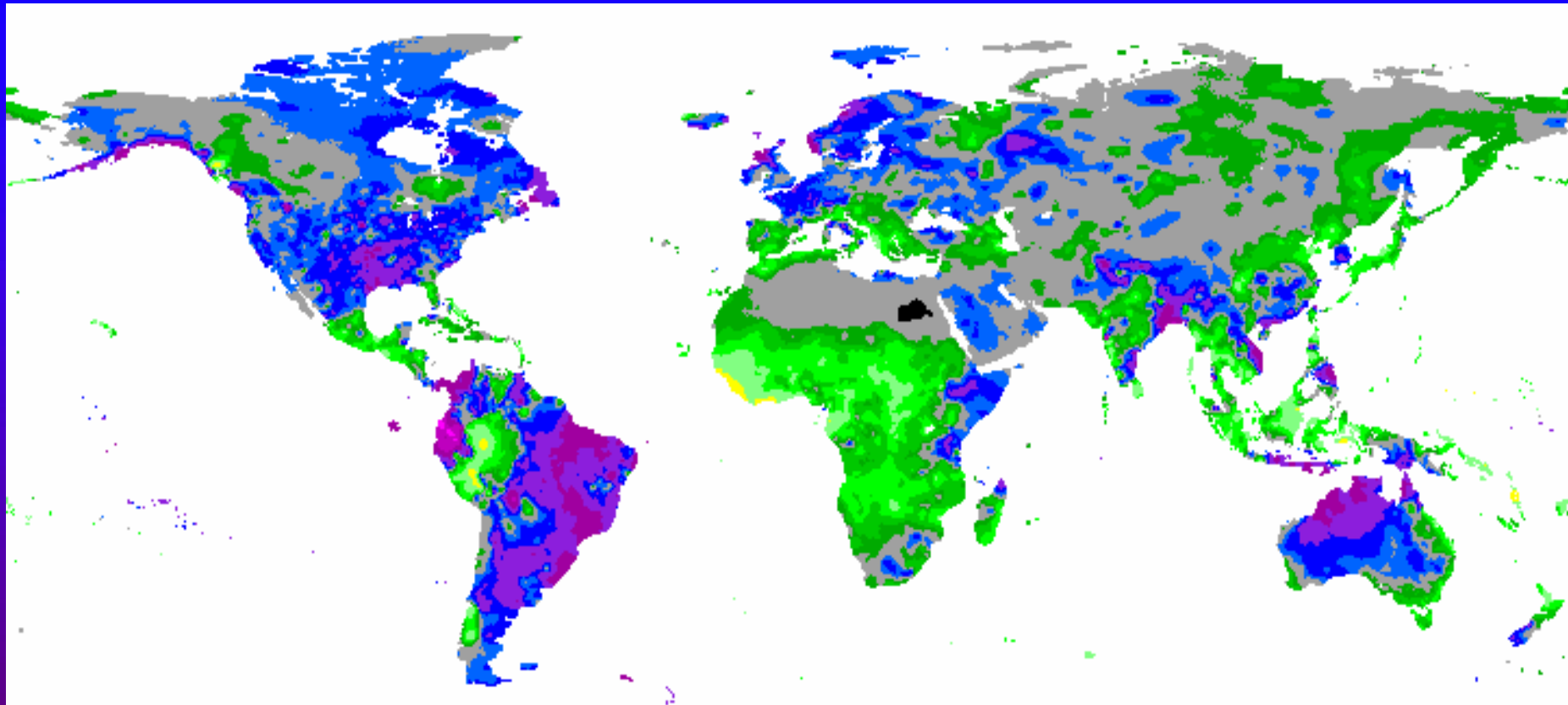
L-OTI(°C) Change 1880-2016

1.02

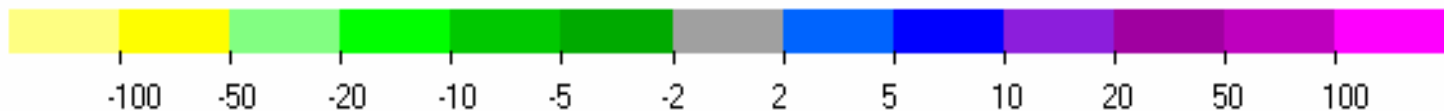


GISS (NASA, USA) , 2017

Regionale Strukturen der Niederschlagstrends 1951-2000



Lineare Trends der Jahreswerte in mm



Year

Grid Resolution .5°x.5°

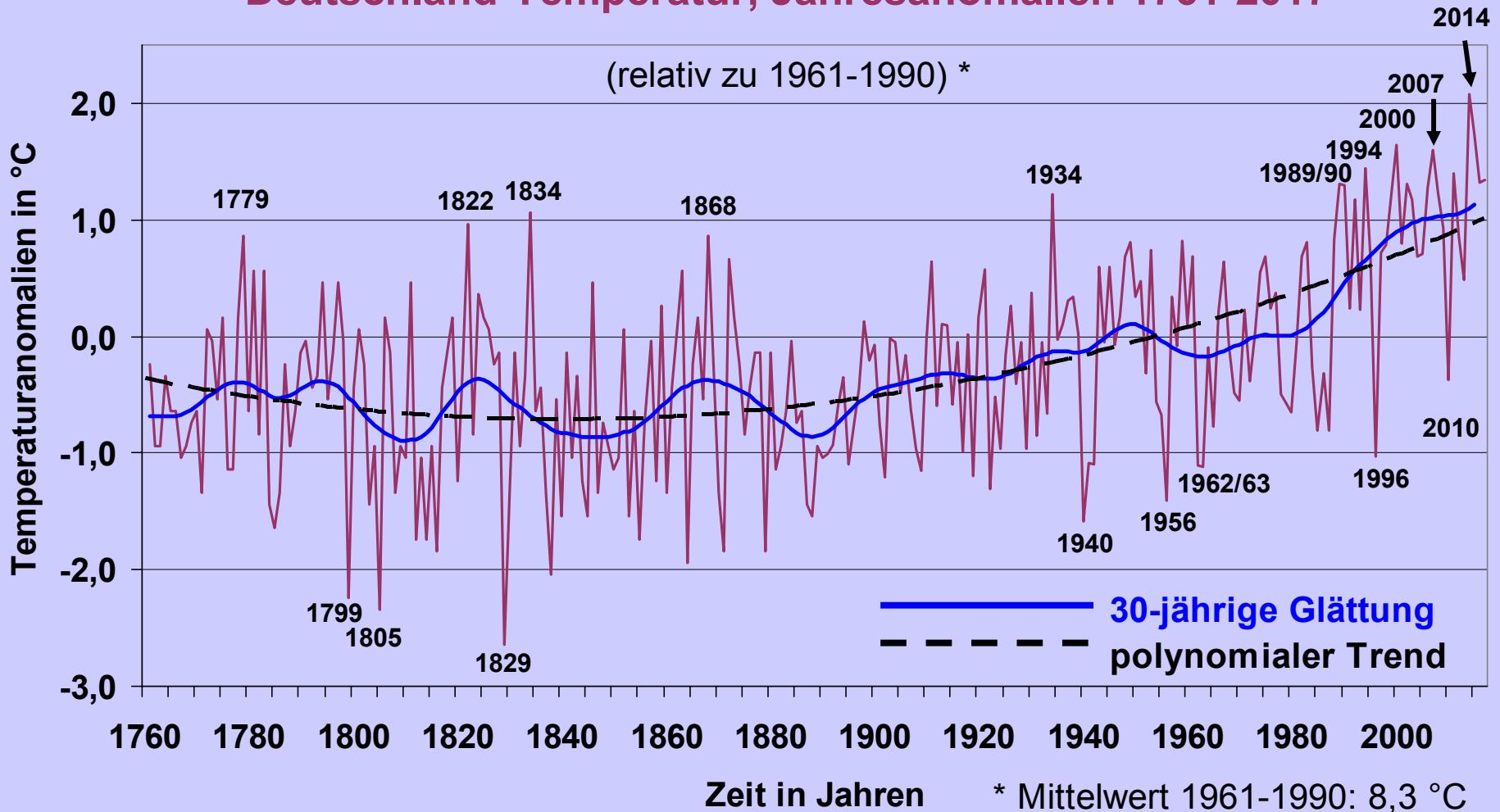
© GPCP at DWD, DEKLIM-VASClm0, 7/29/2005

Beck, Rudolf, Schönwiese, Trömel und Staeger, 2007

**Je kleinräumiger
die Betrachtung,
umso größer sind die
den Langfristtrends
überlagerten Fluktuationen**

Ein Blick auf Deutschland

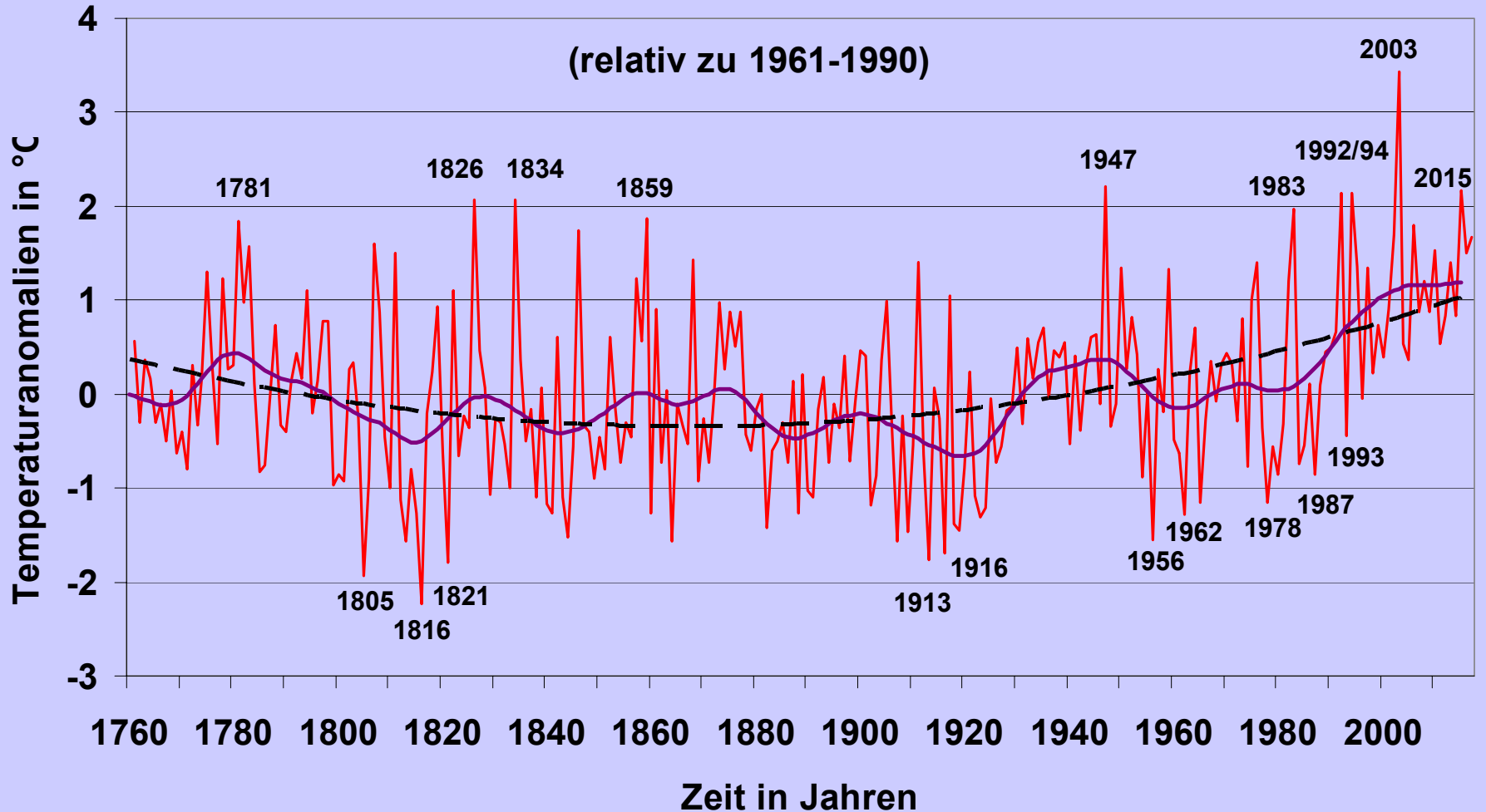
Deutschland-Temperatur, Jahresanomalien 1761-2017



Datenquelle: Rapp, 2000; DWD, 2000-2018; Analyse: Schönwiese, 2018
(hier wie im folgenden: Flächenmittelwerte bzgl. der heutigen Grenzen)

Ein Blick auf Deutschland

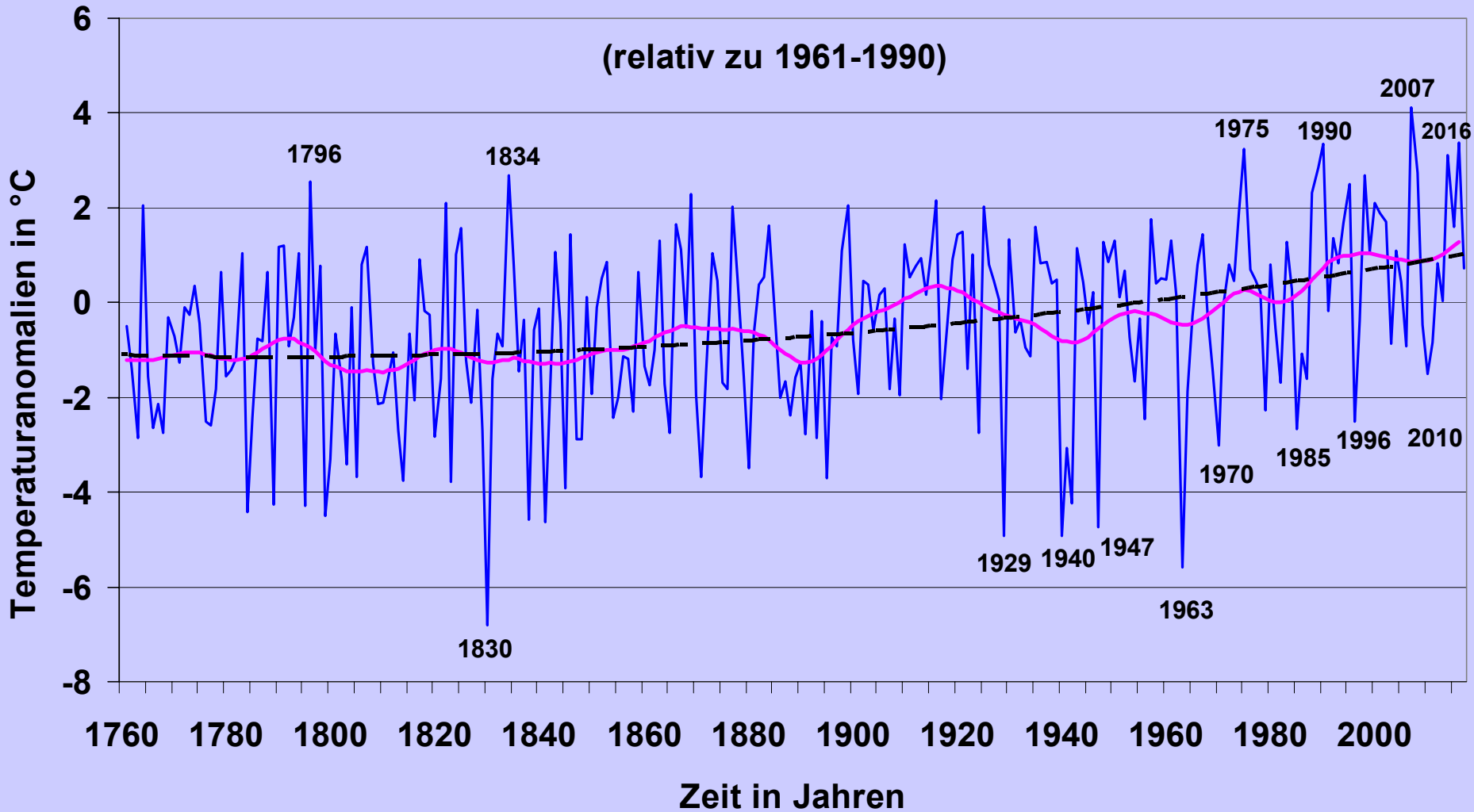
Deutschland-Temperatur, Sommeranomalien 1761-2017



Datenquelle: Rapp, 2000; DWD, 2000-2018; Analyse: Schönwiese, 2018

Ein Blick auf Deutschland

Deutschland-Temperatur, Winteranomalien 1761-2017



Datenquelle: Rapp, 2000; DWD, 2000-2018; Analyse: Schönwiese, 2018

Ein Blick auf Deutschland

Übersicht der jahreszeitlichen Klimatrends in Deutschland (Flächenmittelwerte bzgl. der heutigen Grenzen)

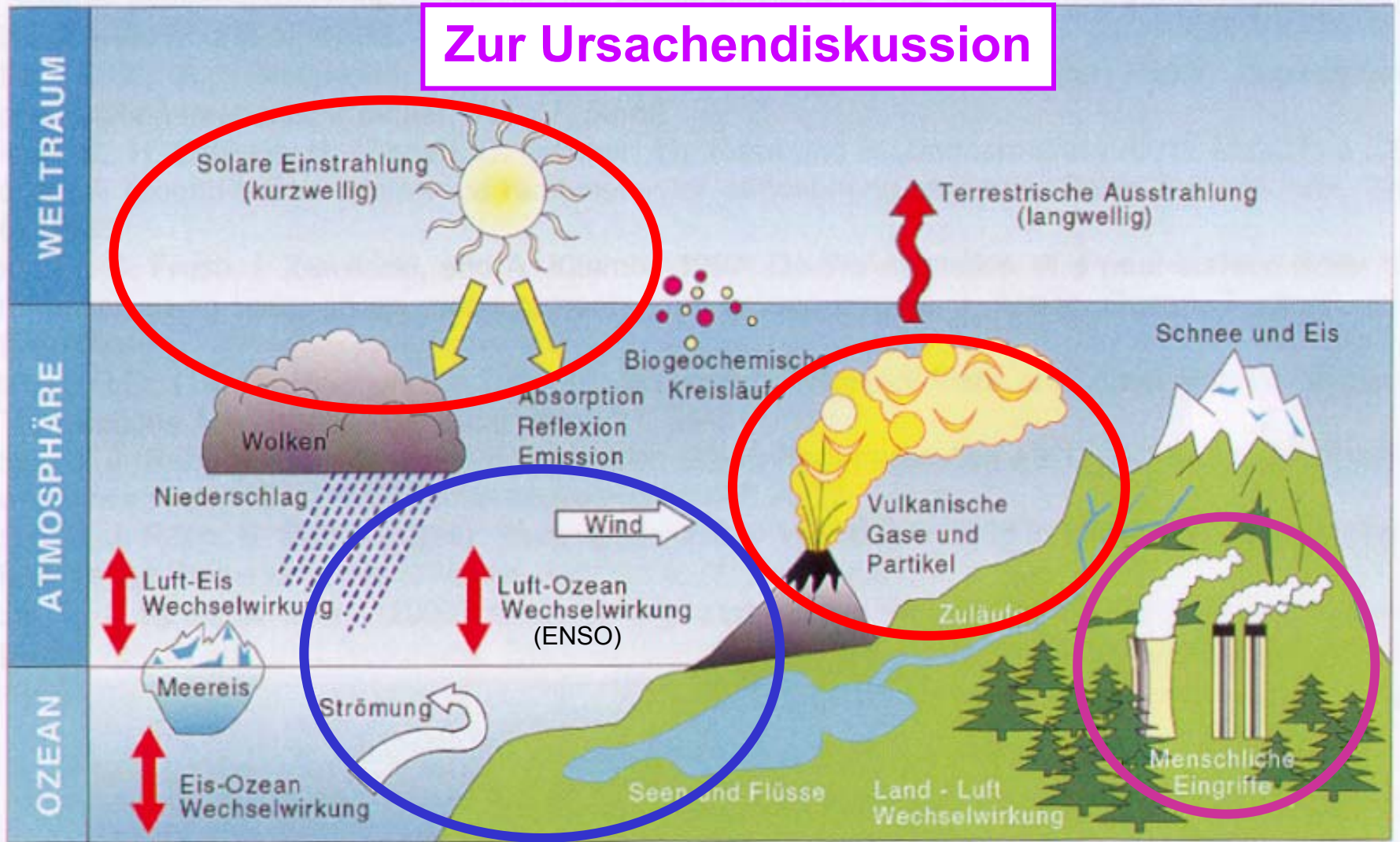
Klimaelement, Zeitintervall	Frühling	Sommer	Herbst	Winter	Jahr
Temperatur, 1901 – 2000	+ 0,8 °C	+ 1,0 °C	+ 1,1 °C	+ 0,8 °C	+ 1,0 °C
1971 – 2000	+ 1,7 °C	+ 0,9 °C	+ 0,7 °C	+ 0,7 °C	+ 1,0 °C
1986 – 2015	+ 0,8 °C	+ 1,2 °C	+ 1,4 °C	+ 0,1 °C	+ 1,0 °C
Niederschlag, 1901 – 2000	+ 13 %	- 3 %	+ 9 %	+ 19 %	+ 9 %
1971 – 2000	+ 13 %	+ 4 %	+ 14 %	+ 34 %	+ 16 %
1986 – 2015	- 15 %	+ 5 %	- 10 %	- 13 %	- 9 %

Datenquelle: DWD, 2000-2018; Analyse: Schönwiese und Janoschitz, 2005; Schönwiese, 2018

Insbesondere beim regionalen Niederschlag sind die dekadischen und interannuären Fluktuationen sehr ausgeprägt. (Daher oben: „Trendumkehrungen“.)

Im Industriezeitalter ist neben natürlichen Einflüssen der Mensch mehr und mehr zu einem zusätzlichen Klimafaktor geworden.

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)

Klimafaktor Mensch: Kohlendioxid (CO₂)

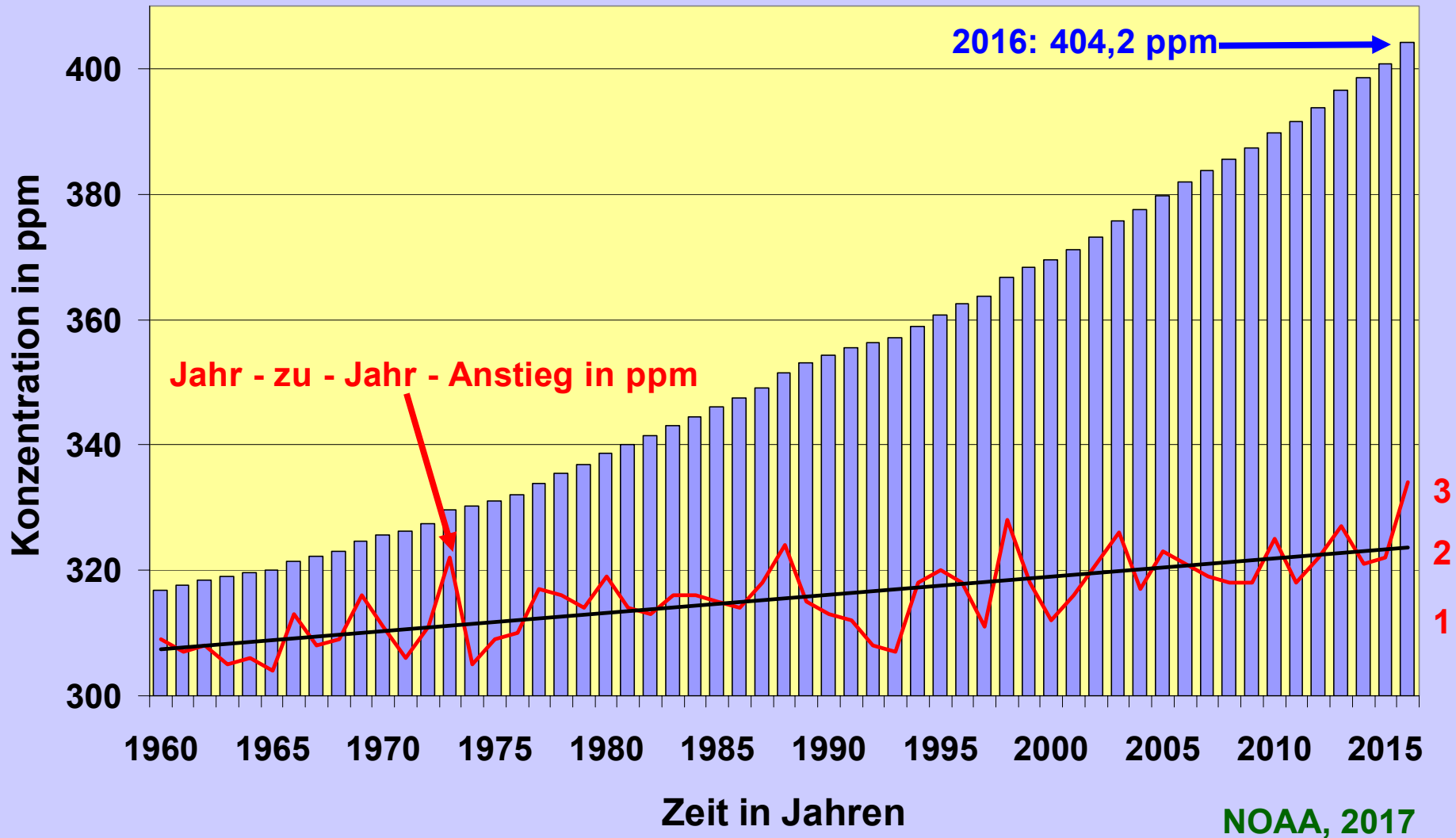
**Anthropogener CO₂-Ausstoß: ca. 42 Gt/Jahr (11,4 GtC/J.)*,
davon durch fossile Energie: 36,4 Gt/Jahr (9,9 GtC/J.)*,
rasant steigend (1900 noch insgesamt ca. 2 Gt CO₂/Jahr).**



* Bezugsjahr 2016

Global Carbon Project 2016 (2017)

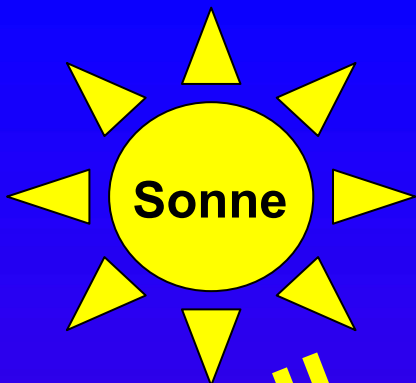
Atmosphär. Kohlendioxidkonzentration, Mauna Loa



Konzentration ~ 1880: ca. 290, in den letzten 10 000 Jahren ca. 270-280, in der letzten Jahrtausend zwischen ca. 180-200 (Kaltzeiten) und 260-280 ppm (Warmzeiten). Weitere wichtige „Treibhausgase“. CH₄, N₂O, FCKW, O₃, ...

Prinzip des Treibhauseffekts

1. Jeder Körper strahlt aufgrund seiner Oberflächentemperatur Energie aus, so auch die Sonne (UV, Licht, Wärme).



2. Ein Teil der Sonnenenergie wird in der Atmosphäre absorbiert bzw. gestreut.

O₃
H₂O

H₂O, CO₂, CH₄, N₂O, FCKW, O₃, ...

3. Einen weiteren Teil absorbiert die Erdoberfläche und erwärmt sich.

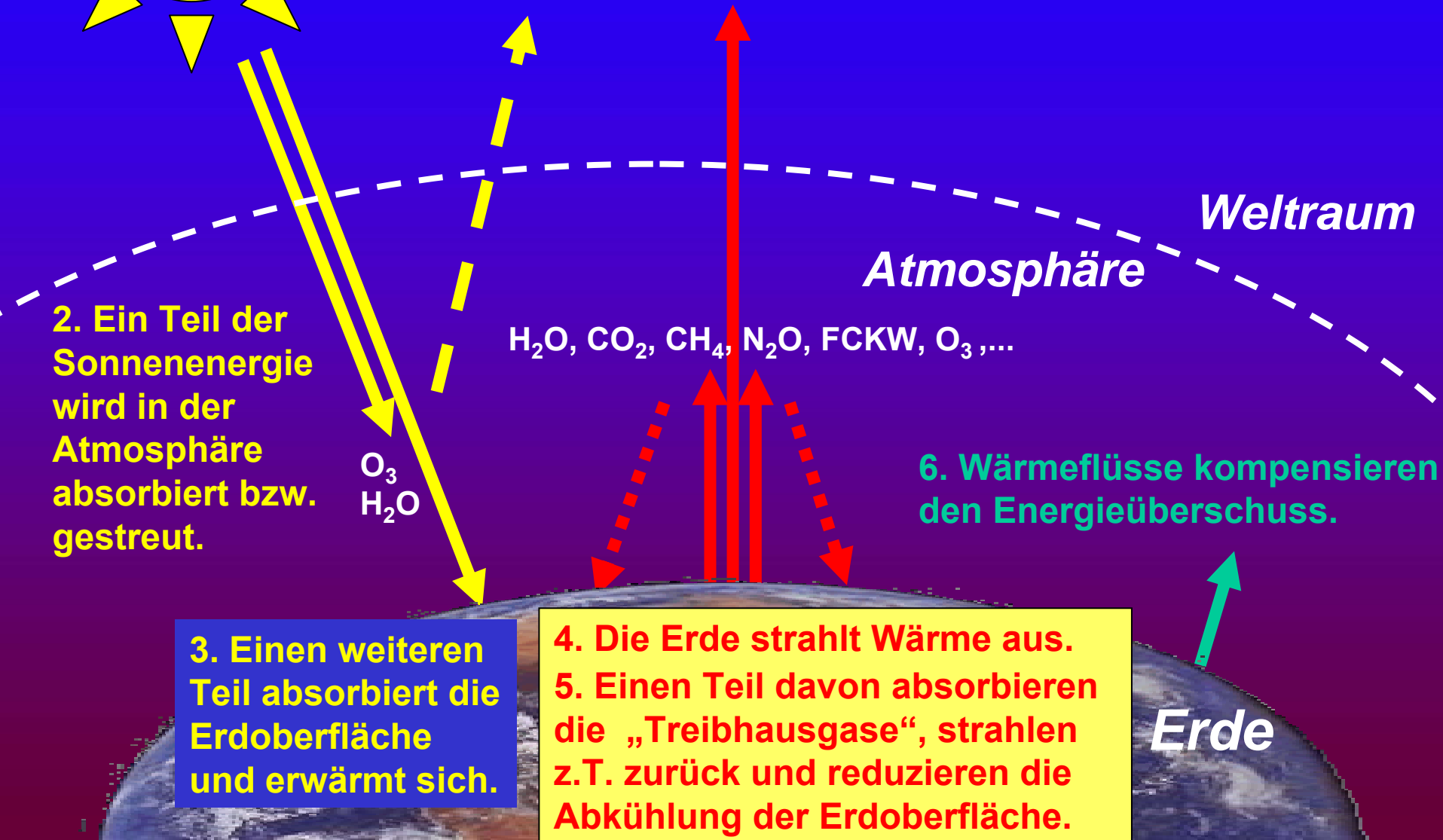
4. Die Erde strahlt Wärme aus.
5. Einen Teil davon absorbieren die „Treibhausgase“, strahlen z.T. zurück und reduzieren die Abkühlung der Erdoberfläche.

6. Wärmeflüsse kompensieren den Energieüberschuss.

Weltraum

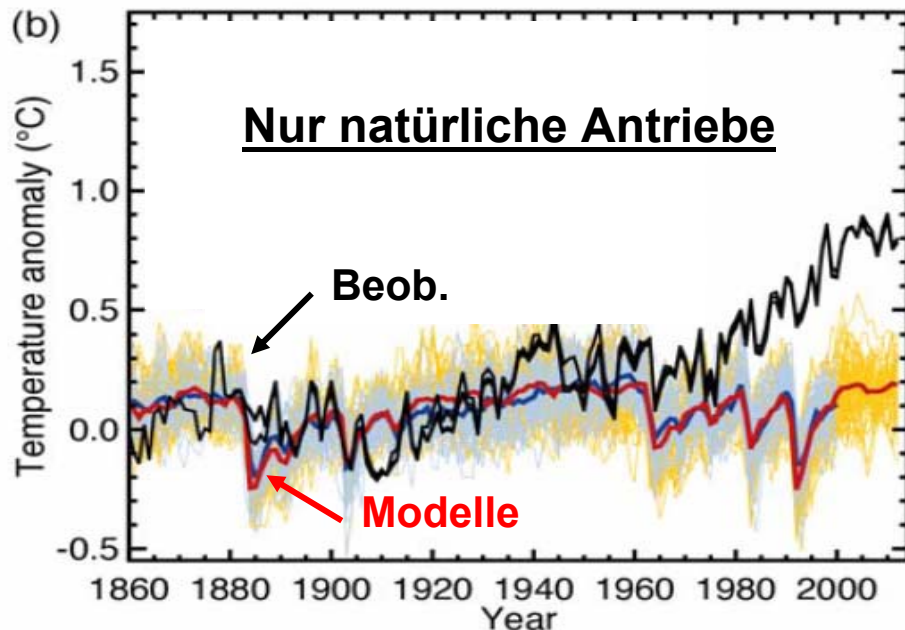
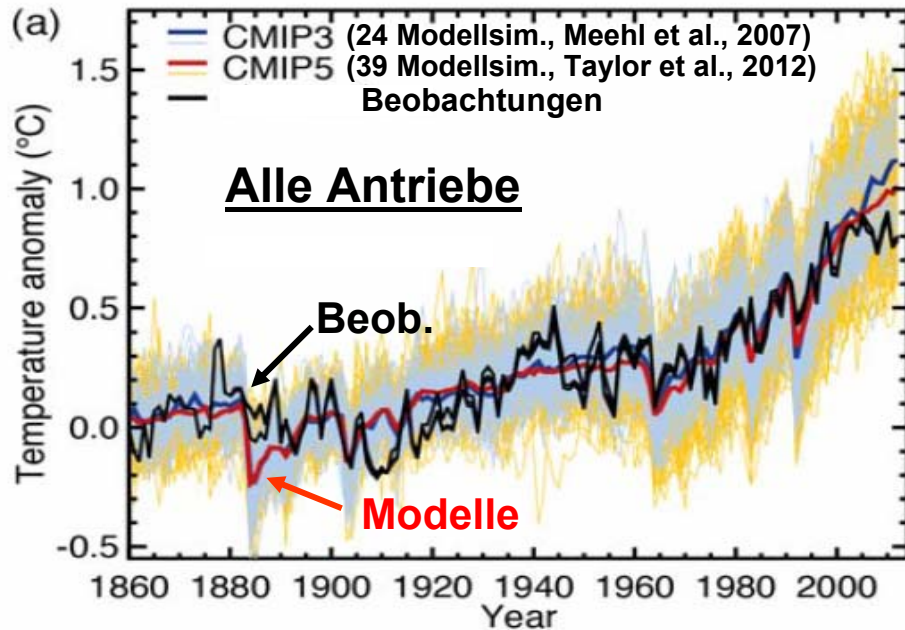
Atmosphäre

Erde



Modellsimulationen Globaltemperatur, 1860-2012

Referenzperiode: 1880-1919



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

* $p > 95\%$ ** bodennah und global

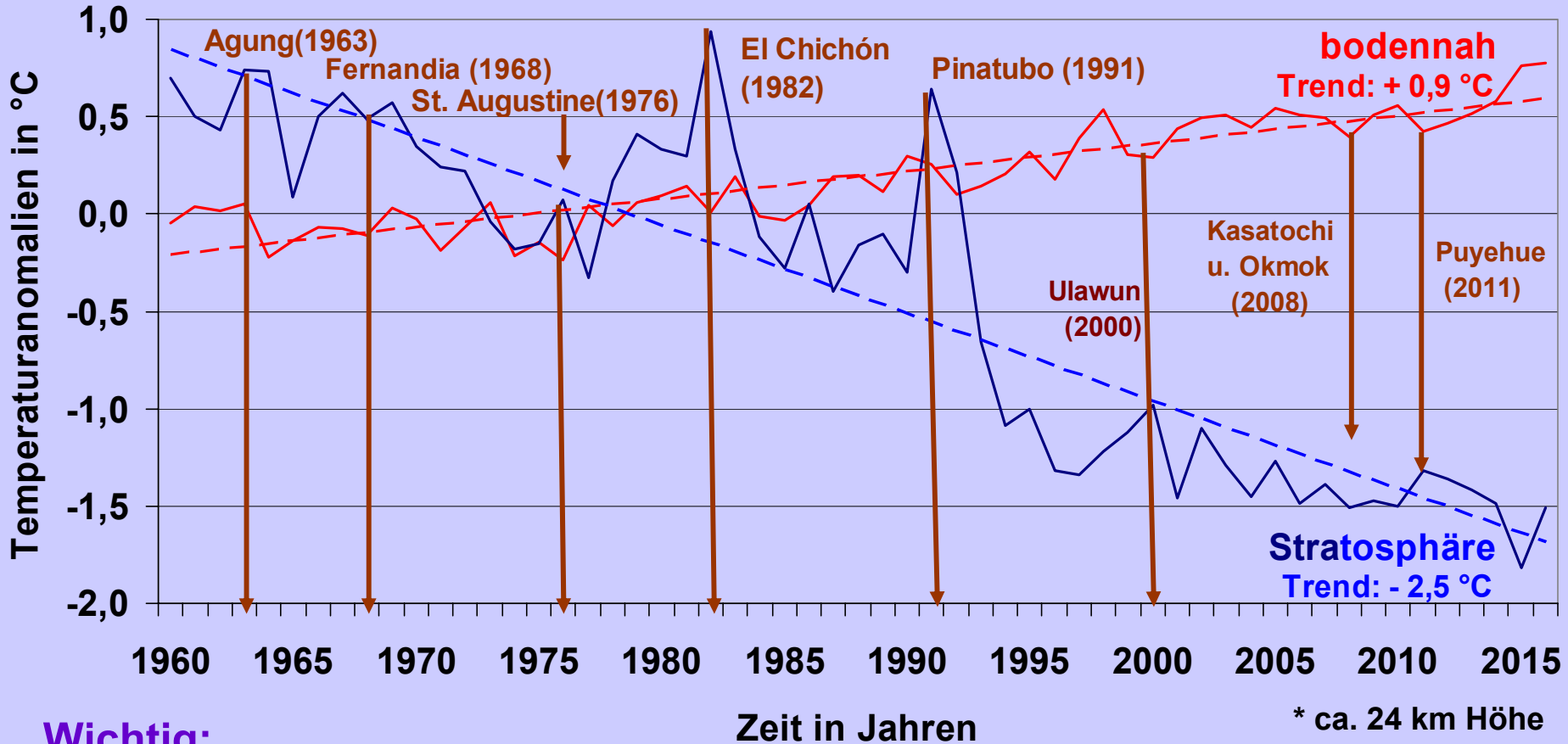
Mit Hilfe neuronaler Netze* lässt sich folgende ursächliche Zuordnung der Variabilität abschätzen: anthropogen 61 % (~ Trend); natürlich 27 %; zufallsartig 12 % (jeweils überlagerte Fluktuationen, die den Trend zeitweise abschwächen/unterbrechen).

IPCC, 2014; *Schönwiese et al., 2010 (dabei Datenbasis 1860-2008)

Globaltemperatur, Anomalien 1960 - 2016

Vergleich **bodennah (CRU)** und **Stratosphäre (30 hPa,* NOAA)** sowie einige **explosive Vulkanausbrüche**

Referenzperioden: Stratosphäre 1979-2004, bodennah 1961-1990



Wichtig:

Vulkanismus kühlt die Troposphäre (untere Atmosphäre) und wärmt die Stratosphäre (vgl. oben); Sonnenaktivität wärmt bzw. kühlt beides; „Treibhausgase“ wärmen die Troposphäre und kühlen die Stratosphäre; interne Wechselwirkungen (z.B. ENSO) beeinflussen nur die Troposphäre.

Wird das Klima extremer?



Dresden,
Aug. 2002



Düsseldorf, Aug. 2003

Münchener Rück
Munich Re Group



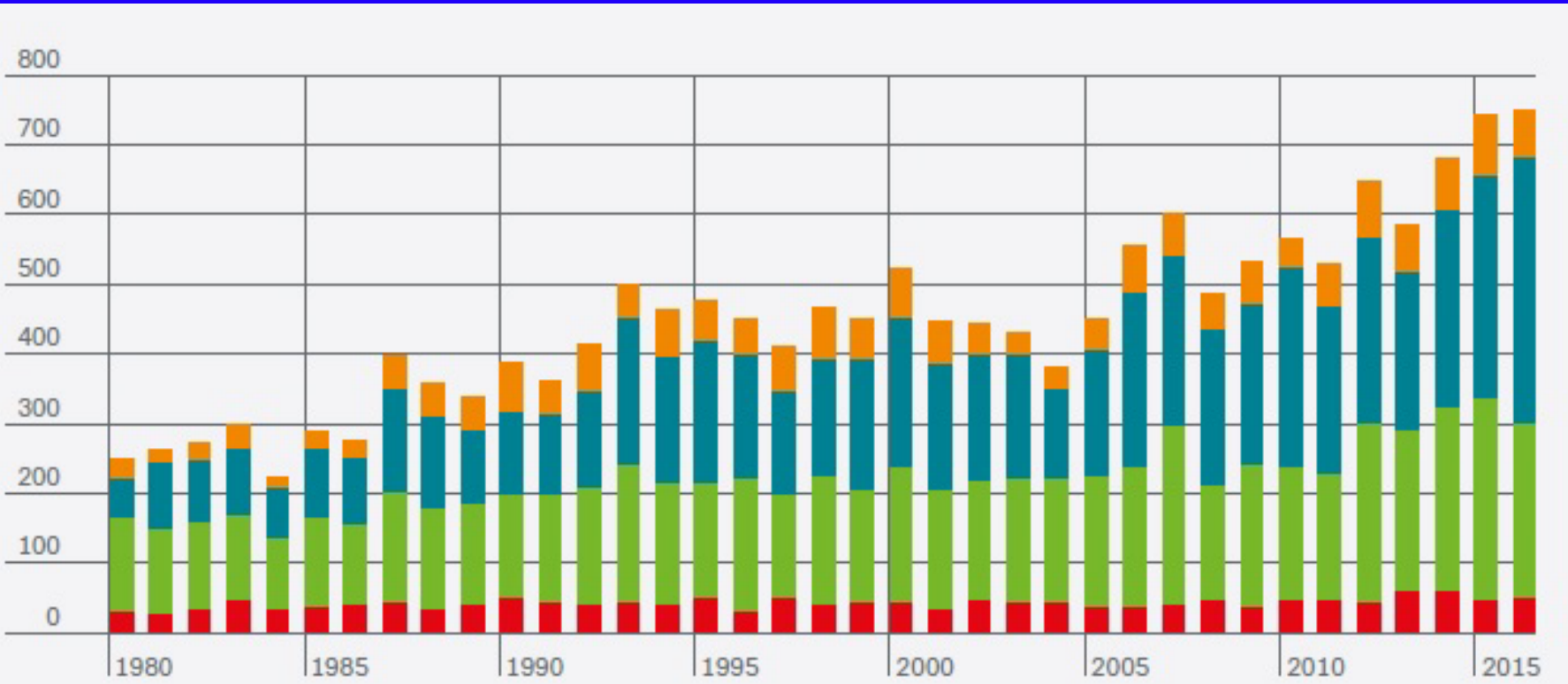
New Orleans, Aug. 2005



Motten (Rhön), Okt. 2005

Schadenereignisse (global) durch Naturkatastrophen

Anzahl der Ereignisse 1980-2016



Geophysikalische Ereignisse:
Erdbeben, Tsunami, vulkanische Aktivität

Meteorologische Ereignisse:
Tropischer Sturm, außertropischer Sturm, konvektiver Sturm, lokaler Sturm

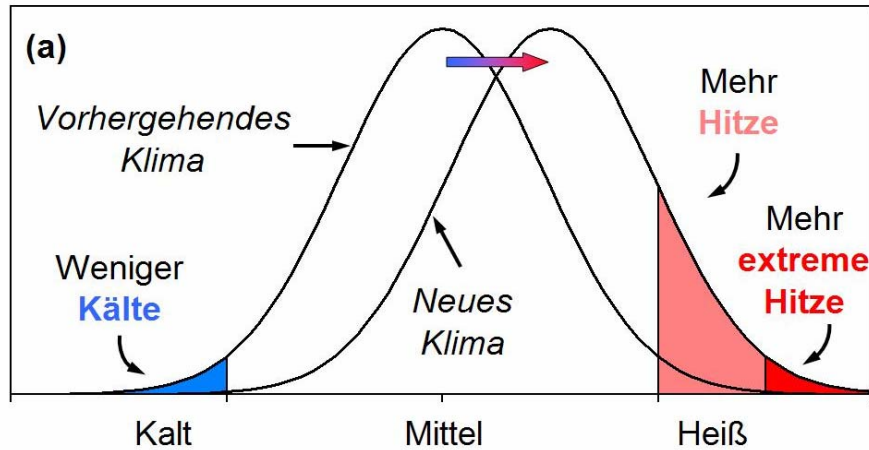
Hydrologische Ereignisse:
Überschwemmung, Massenbewegung

Klimatologische Ereignisse:
Extremtemperaturen, Dürre, Waldbrand

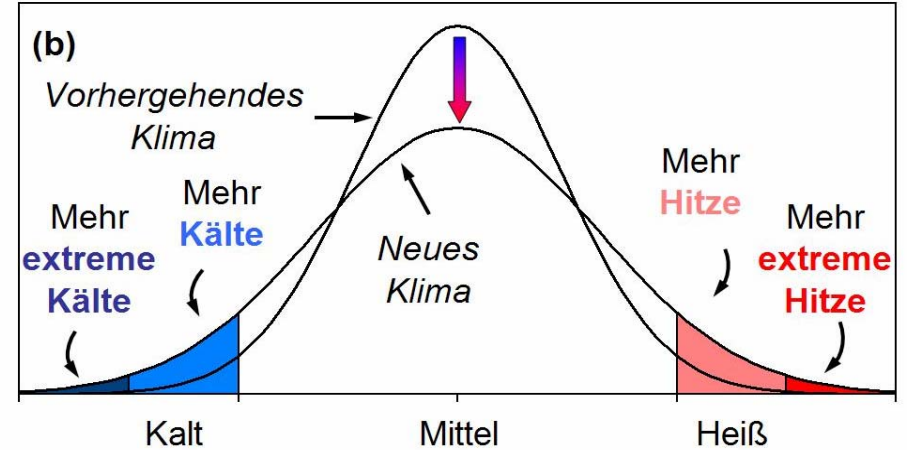
Quelle: MüRück, NatCatService, 2017

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

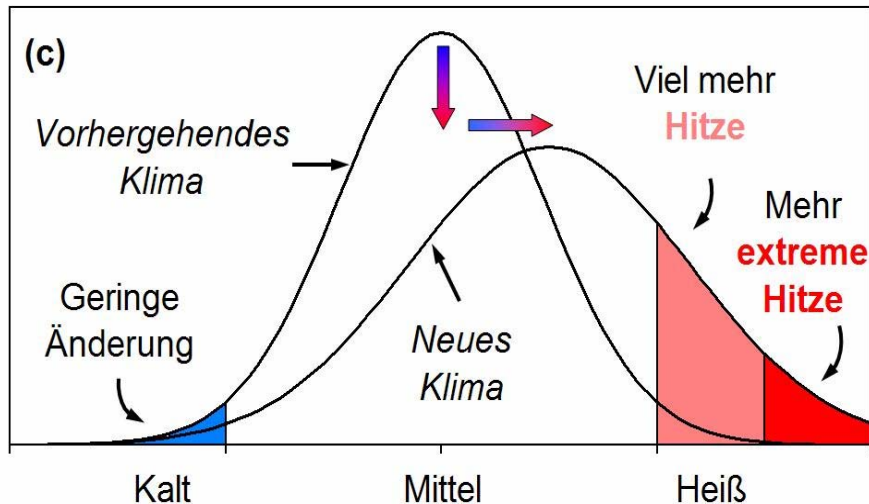
Zunahme des Mittelwerts



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.

Und die Zukunft?

Klimaprognosen, vergleichbar den Wetterprognosen, sind prinzipiell nicht möglich, da

- die natürlichen Einflüsse auf das Klima (z.B. Vulkanismus) nicht vorhersagbar
- und die menschlichen Einflüsse (Emission von Treibhausgasen und Partikeln usw.) im künftigen Verlauf zumindest quantitativ unsicher sind.

Man behilft sich daher mit Projektionen

- unter der Annahme, dass der menschliche Einfluss (insbesondere durch Treibhausgase) dominiert
- und aufgrund alternativer Szenarien des in Zukunft möglichen menschlichen Verhaltens, insbesondere hinsichtlich der Treibhausgas-Emissionen.

Die wichtigsten Klimamodell-Zukunftsprojektionen (IPCC, 2014; oberes Szenario, derzeitig wirksam)

- Rasante weitere Erwärmung der unteren Atmosphäre: global bis 2100 um 2,6 - 4,8 °C, wahrscheinlichster Bereich 3 - 4 °C, Maxima im Winter polwärts der Tropen.
- Weitere Abkühlung der Stratosphäre (begünstigt den dortigen Ozonabbau, erschwert Schutzmaßnahmen)
- Niederschlagsumverteilungen (→ z.B. Mittelmeer-Region trockener, Skandinavien u. Polarregionen feuchter, Mitteleuropa Winter feuchter / Sommer trockener)
- Weiterer Meeresspiegelanstieg global bis 2100 um 45 - 82 cm; nach alternativen halbempir. Schätzungen bis ca. 2 m (seit 1900 bisher ca. 20 cm).
- Regional häufigere/intensivere Extremereignisse, z.B. Hitzewellen, Dürren bzw. Starkniederschläge, Hagel, Tornados – aber im einzelnen teilweise sehr unsicher; eventuell häufigere, jedenfalls aber intensivere tropische Wirbelstürme; Tendenz außertropischer Stürme fraglich.

Die Folgen der Klimaänderungen...

...sind teils positiv (weniger Heizbedarf, Touristik im Norden, potentiell längere Vegetationsperiode),

weitaus überwiegend aber negativ:

- Rückgang von Meereis (insbes. Arktis) und Gebirgsgletschern
- Meeresspiegelanstieg (global seit 1900 bereits ca. 20 cm)
- Wasserprobleme (Überschwemmungen, Dürren);
- Belastungen der Ökosysteme (Schäden, Artenschwund);
- Landwirtschaftliche Probleme (teilweise kompensierbar);
- Ökonomische Schäden (insbes. durch Extremereignisse)
- Gesundheitsprobleme (Hitze, Tropenkrankheiten usw.)
- Regional besondere Gefährdung (Küsten, Gebirge, Städte, ...)



Stern Review, 2007: Klimaschutz kostet ca. 1% WSP*, Klimaschäden bewirken hingegen 5-20% WSP/Jahr; Schaden durch anthropog. Emission pro Tonne CO₂: 85 US \$/Jahr (▶ 36 Mrd. t CO₂ ▶ 3060 Mrd. US \$/Jahr). Allerdings nennt das IPCC (2007) dafür die große Spanne von 3 - 95 US \$/Jahr. * Weltsozialprodukt

**Das Risiko weiterer
Klimaänderungen (Zukunft)
gehört zu den wichtigsten
Weltproblemen. Darauf
sollten wir verantwortungs-
bewusst reagieren.**

Ethische Aspekte

Im Zentrum der ethischen Aspekte stehen das *Nachhaltigkeits-* und das *Gerechtigkeitsprinzip*.

Das Nachhaltigkeitsprinzip wurde erstmals in der sächsischen Forstwirtschaft explizit genannt (Hans Carl von Carlowitz, 1713) und lautet sinngemäß: Den Wald so bewirtschaften, dass er in seiner Quantität (und Qualität!) nutzbar („tragfähig“) für die nachfolgenden Generationen („nachhaltig“) erhalten bleibt.

WCED, 1987: Heutige Bedürfnisse so befriedigen, dass die zukünftigen nicht beeinträchtigt werden.

UNCED, 1992, Rio-Deklaration: „Das Recht auf Entwicklung muss so erfüllt werden, dass den Entwicklungs- und Umweltbedürfnissen heutiger und künftiger Generationen gerecht entsprochen wird.“

Klimarahmenkonvention: „Endziel ist es, die atmosphärischen Treibhausgaskonzentrationen auf einem für das Klimasystem ungefährlichen Niveau zu stabilisieren“.

Handlungsbedarf

- Anpassung an bereits nicht mehr vermeidbare Klimaänderungen und deren Folgen
- Vorsorge, um den Klimawandel und seine Folgen auf einem erträglichen Niveau zu begrenzen („Klimaschutz“), d.h. Verringerung der Emission klimawirksamer Spurengase (CO₂ ...) durch:
 - Effizientere bzw. sparsamere Energienutzung
 - Weitgehende Substitution kohlenstoffhaltiger Energieträger (Kohle, Öl, Gas); möglichst CCS*
 - Maßnahmen im Verkehrsbereich
 - Ökonomische Maßnahmen (Emissionshandel)
 - Vegetationsschutz bzw. Aufforstungen
 - . . .

*CCS: Carbon Capture and Storage (CO₂-Abscheidung u. Speicherung)

Zur Klimapolitik

- **Weltklimakonferenzen (WCC) 1979*, 1990, 2009**
* Aufruf, mögl. anthropog. Klimawandel zu verhindern
- **Einrichtung des „Weltklimarats“ (IPCC) durch UN (WMO, UNEP) 1988, ausführliche Berichte 1990 ... 2013/2014**
- **UN-Konferenz über Umwelt und Entwicklung (UNCED) 1992 mit Klimarahmenkonvention (FCCC): Stabilisierung der Treibhausgaskonzentrationen auf ungefährl. Niveau**
- **Vertragsstaatenkonferenzen (COP) seit 1995**
- **COP3 (1997, Kyoto): Emissionsreduktion einiger „Treibhausgase“ um 5,2% (Mittel IL) bis 2008-2012 rel. zu 1990**
- **COP21 (2015, Paris): Temperaturanstieg rel. zum vorind. Niveau auf 2°C, möglichst 1,5°C begrenzen, Maßnahmen im Detail freiwillig, aber Pflicht zur Berichterstattung**
- **Deut. Klimaschutzplan (präsentiert bei COP22, 2016): CO₂-Emissionsreduktion um $\geq 40\%$ → 2020, $\geq 55\%$ → 2030, 80-95% → 2050, jeweils relativ zu 1990**



Vielen Dank
für Ihr Interesse

Homepage des Autors:

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