



# **Globaler Klimawandel im Industriezeitalter**

## **Phänomene, Ursachen und Folgerungen**

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

# Motivation

Warum beschäftigt sich nicht nur die Wissenschaft, sondern auch die Öffentlichkeit intensiv mit dem Problemerkis Klimawandel?

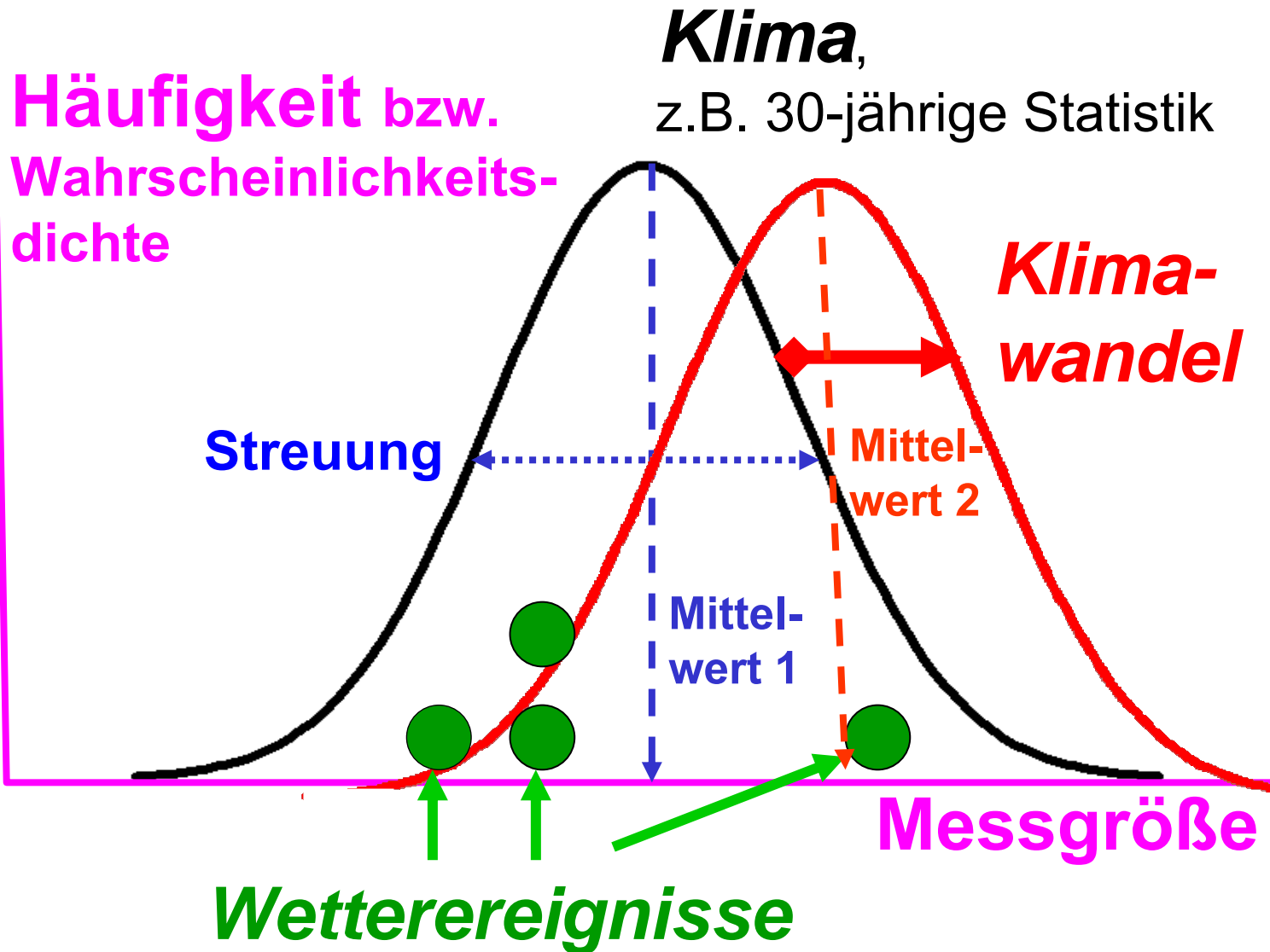
- ▶ Einerseits ist die Menschheit hochgradig von der Gunst des Klimas abhängig, andererseits nimmt sie selbst immer mehr darauf Einfluss.
- ▶ Das Phänomen Klimawandel kann uns daher nicht gleichgültig sein.

**Folglich findet nach langem Schattendasein der Klimawandel seit einigen Jahren auch in der aktuellen Politik enorme Beachtung.**

# Vortragsgliederung

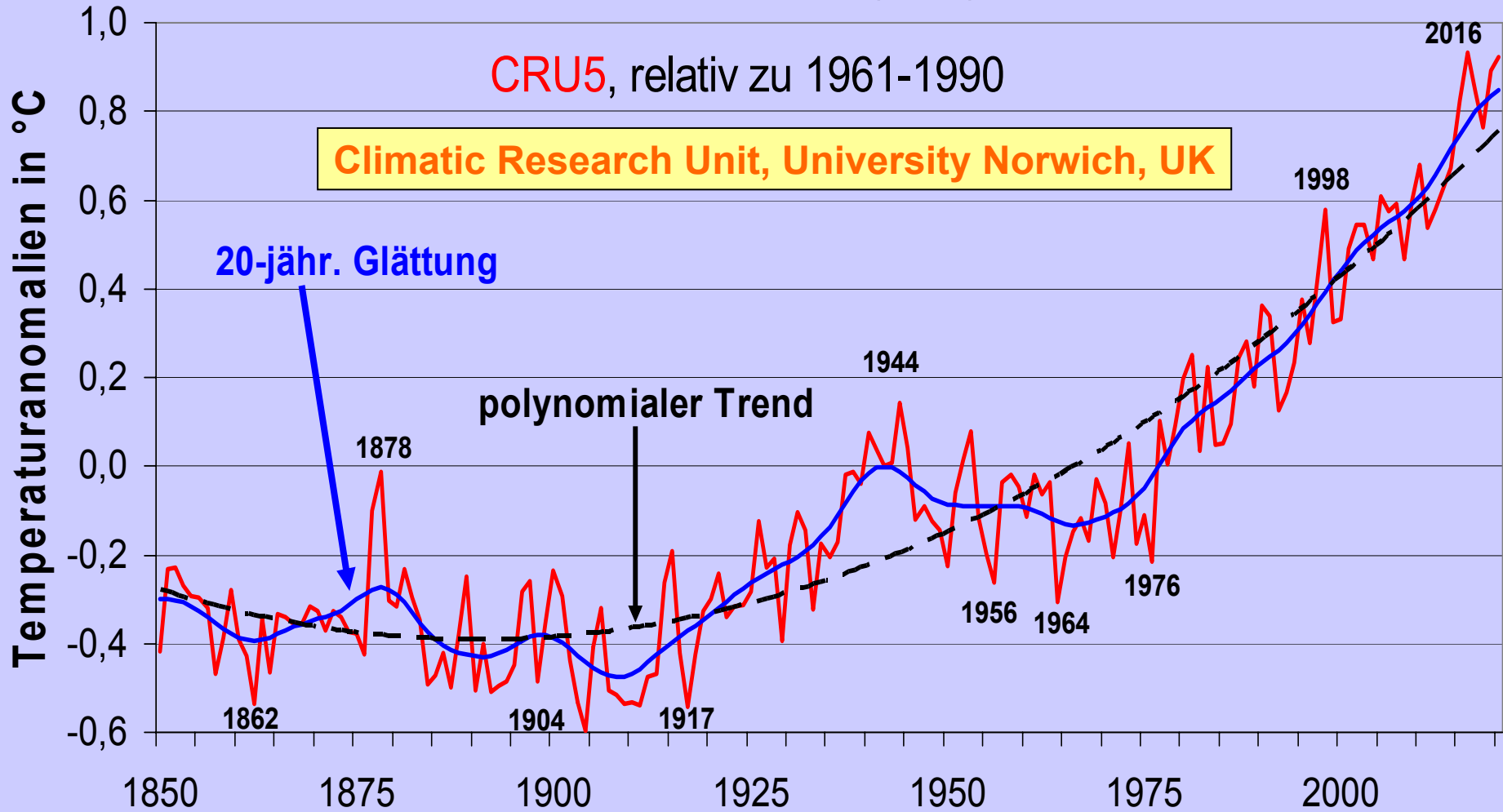
- **Wetter – Klima – Klimawandel: Begriffsklärung**
- **Globaler Temperaturanstieg**
- **Regionale Klimawandel - Aspekte**
- **Ursachendiskussion (Globaltemperatur)**
- **Wird das Klima extremer?**
- **Auswirkungen des Klimawandels**
- **Folgerungen: Handlungsbedarf und Klimapolitik**

# Begriffsklärung: Wetter - Klima - Klimawandel



# Globaltemperatur, Jahresanomalien 1850 - 2020

Land und Ozean (SST)



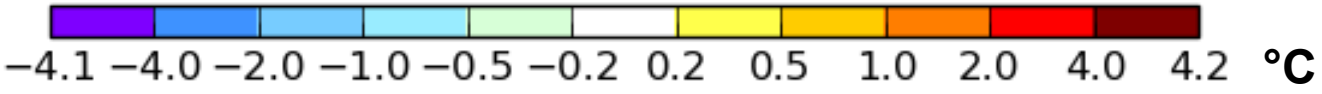
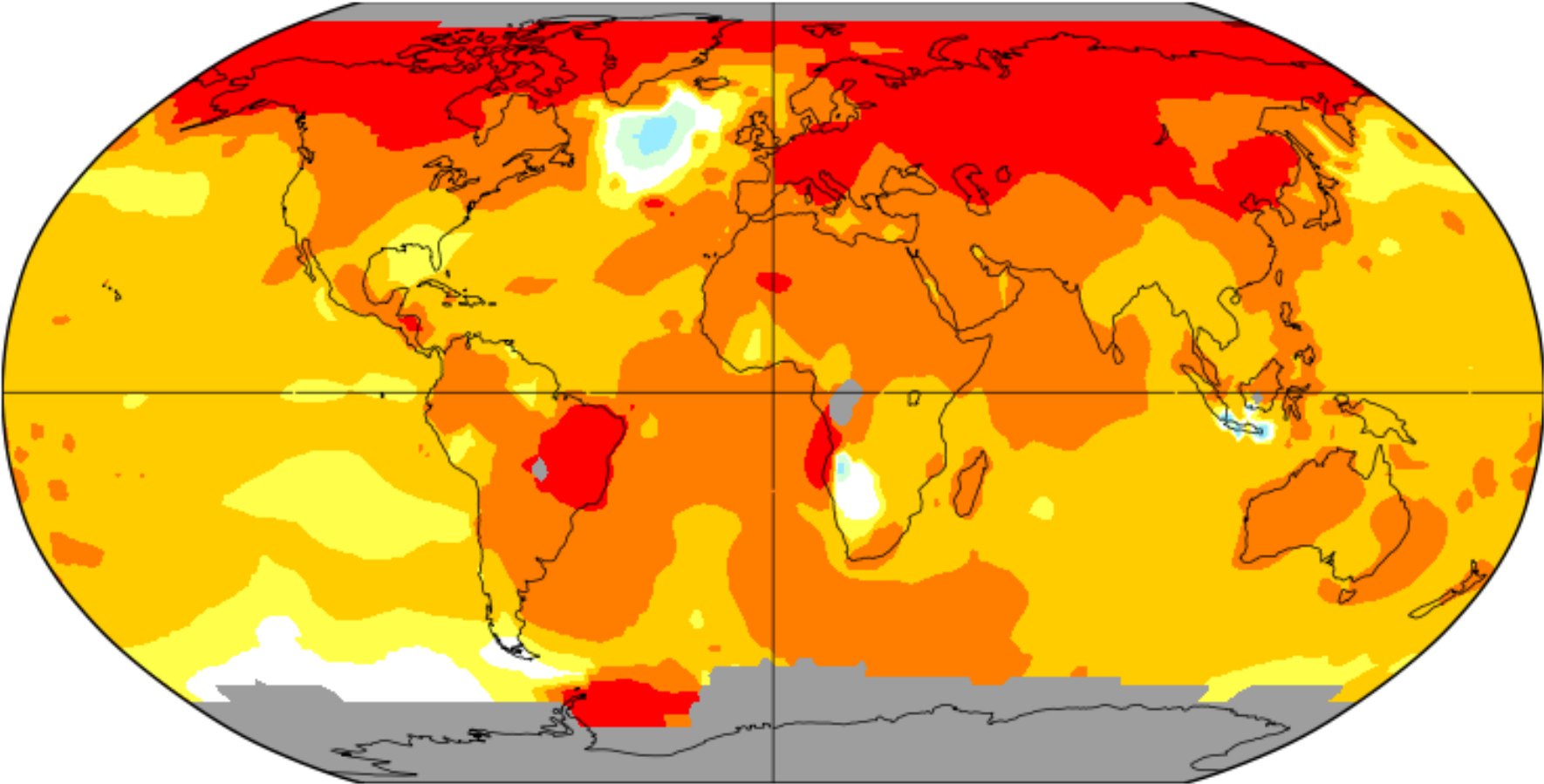
Temperaturanstieg (lin. Trend) seit 1880 (verschied. Quellen; IPCC, 2021): 1,2 °C

# Regionale Strukturen der Temperaturentrends 1880 - 2020

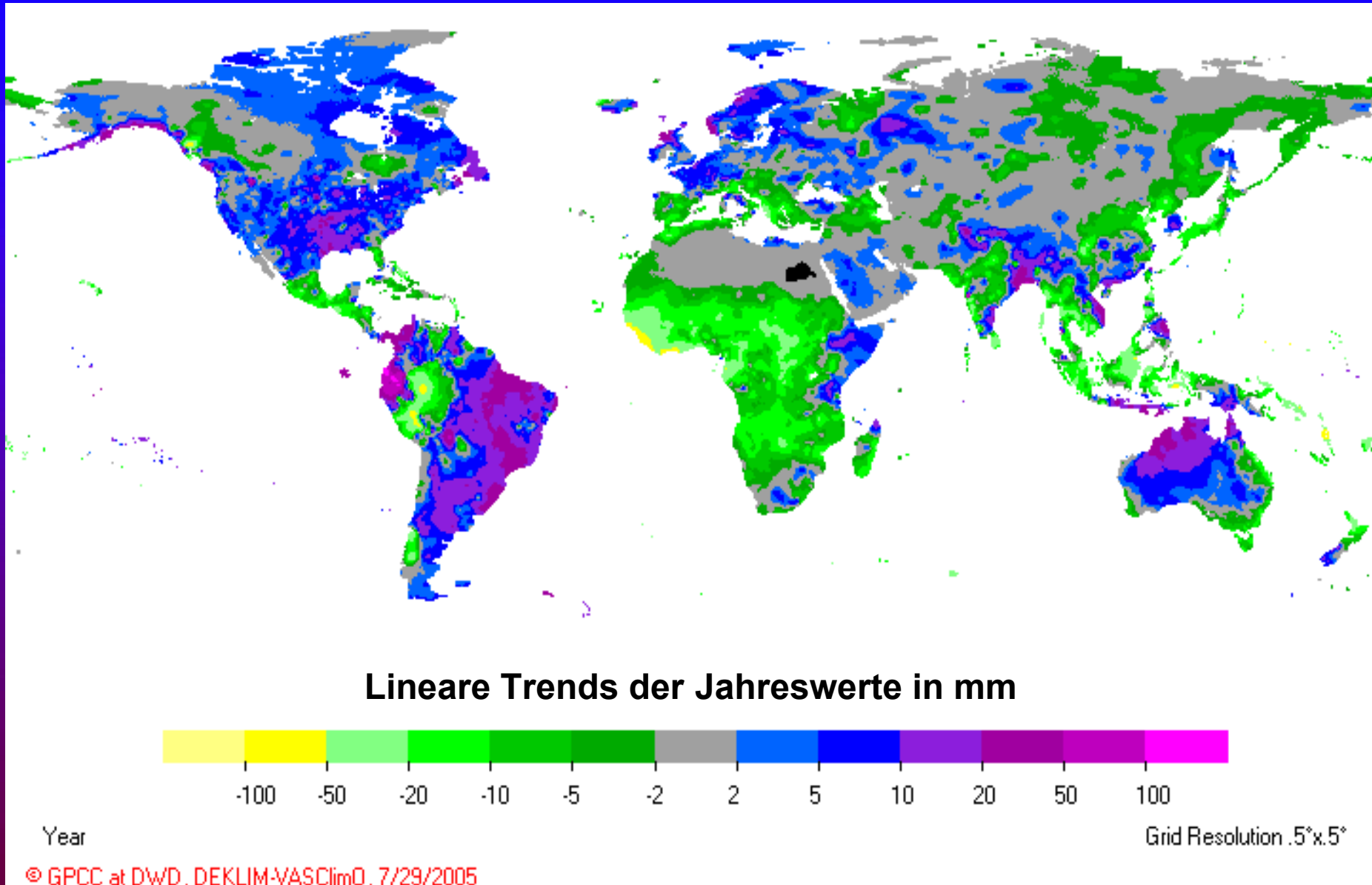
Annual J-D

L-OTI(°C) Change 1880-2020

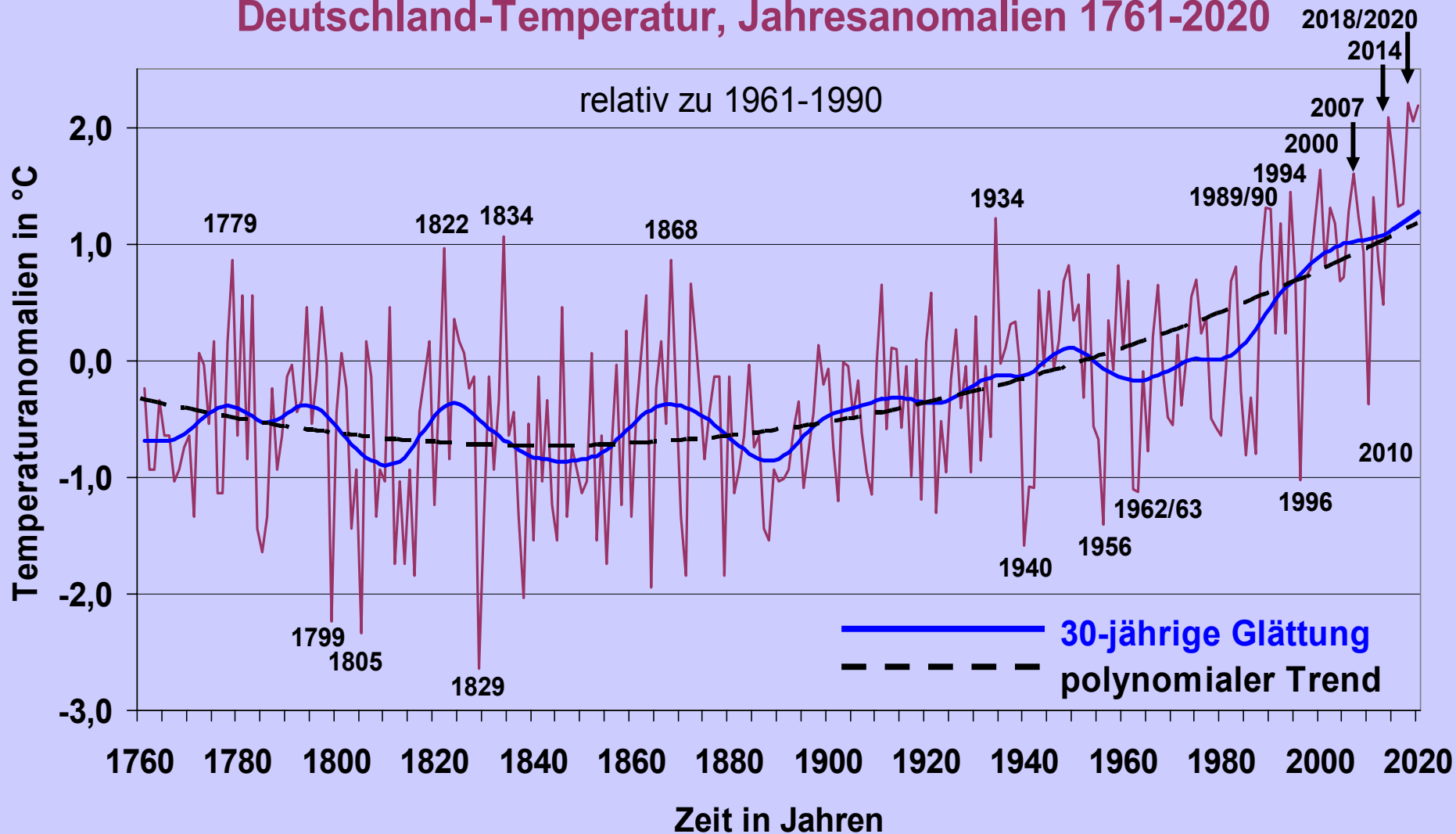
1.09



# Regionale Strukturen der Niederschlagstrends 1951-2000



# Deutschland-Temperatur, Jahresanomalien 1761-2020



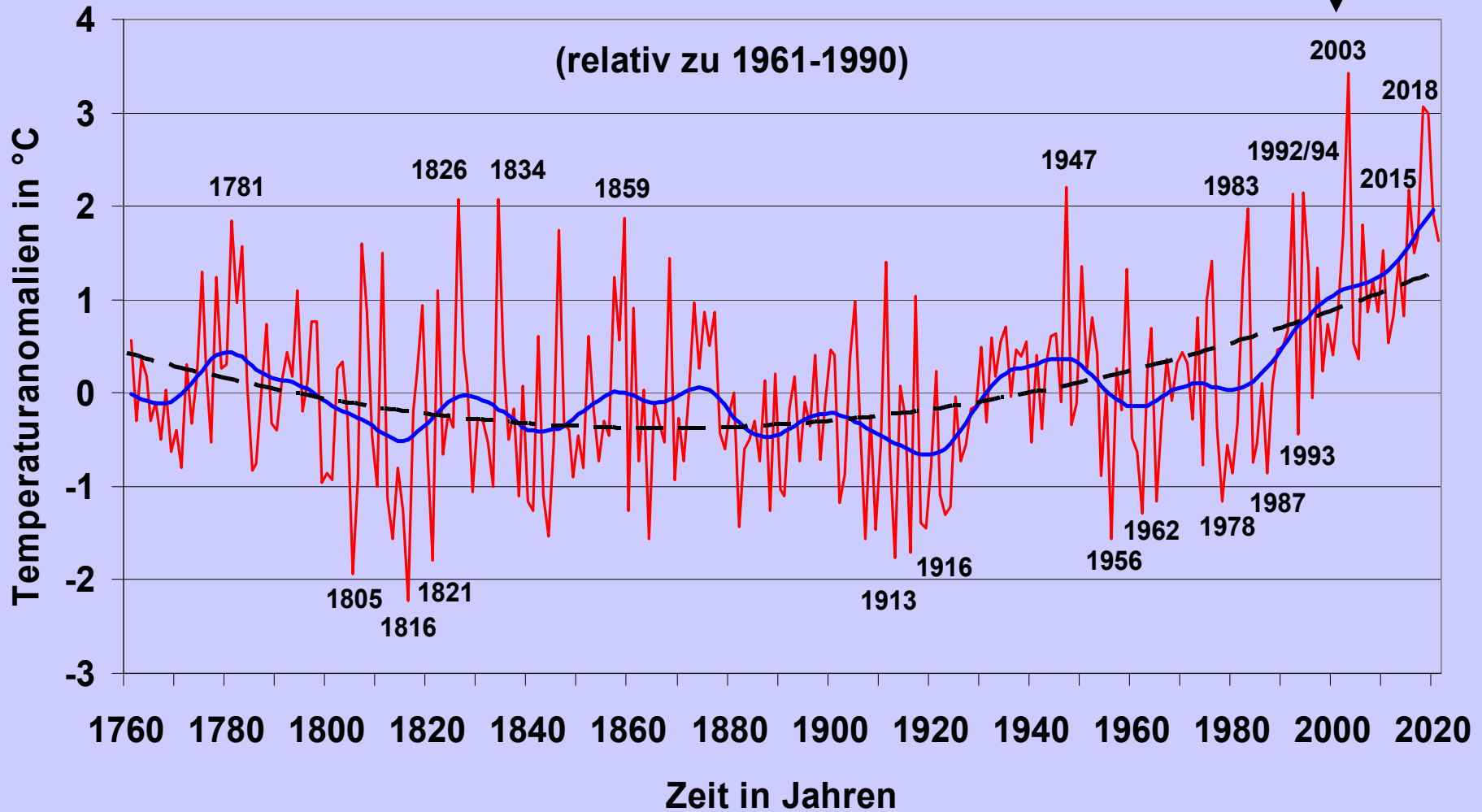
Datenquelle: Rapp,  
2000; DWD, 2021;  
Analyse: Schönwiese

**Mittelwert (1961-1990): 8,3 °C; 2018: 10,5 °C**

**Linearer Trend 1881-2020: 2,0 °C**



# Deutschland-Temperatur, Sommeranomalien 1761-2021



Datenquelle: Rapp,  
2000; DWD, 2021;  
Analyse: Schönwiese

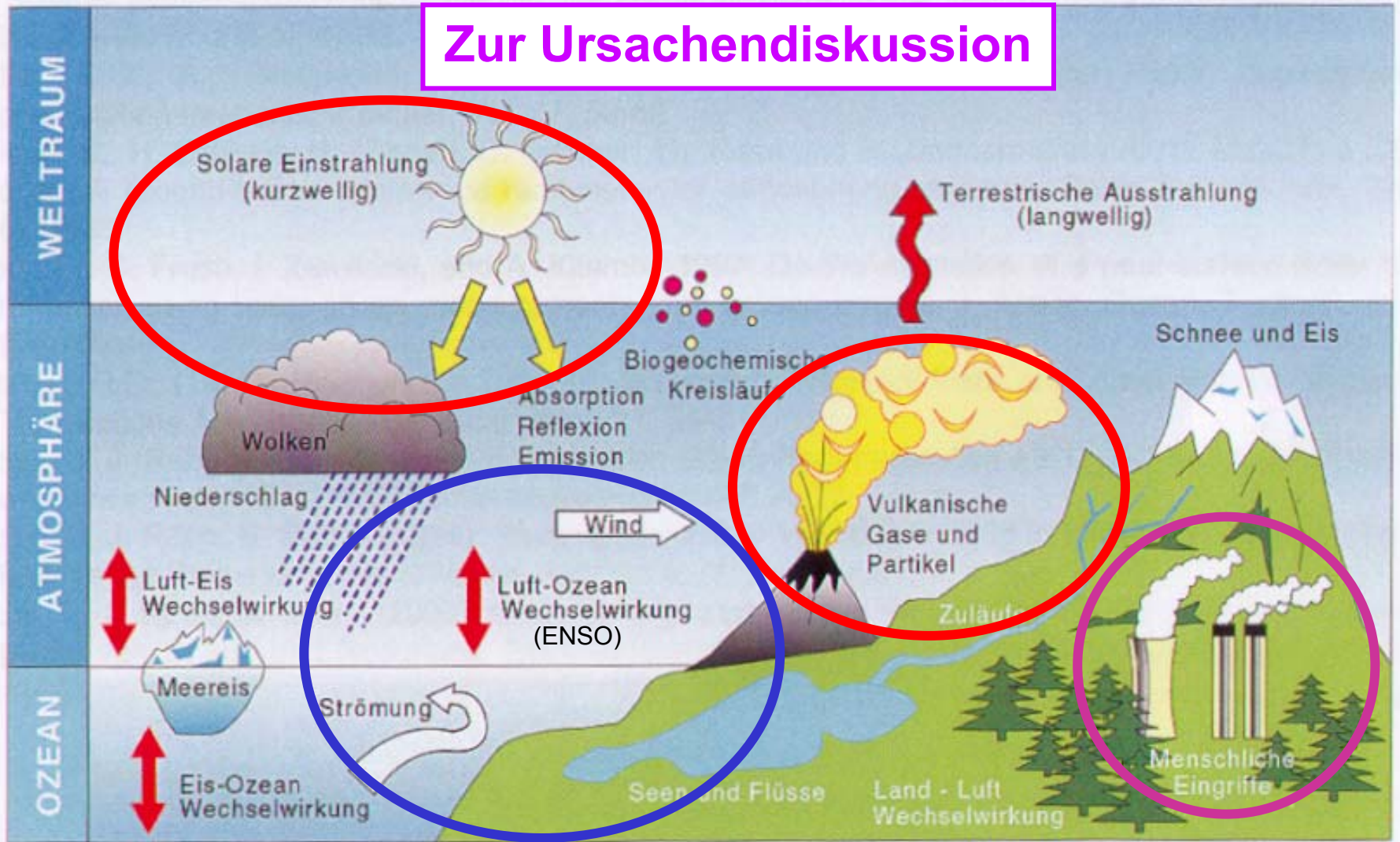
**Mittelwert (1961-1990): 16,2 °C; 2003: 19,6 °C;  
2018: 19,3 °C; Linearer Trend 1881-2020: 1,9 °C**

# Übersicht der jahreszeitlichen Klimatrends in Deutschland

Flächenmittelwerte, Neuberechnung, Datenquelle: DWD, 2021

Klimaelement, Zeitintervall	Frühling	Sommer	Herbst	Winter	Jahr
Temperatur, 1881 – 2020	+ 1,9 °C	+ 1,9 °C	+ 1,9 °C	+ 2,0 °C	+ 2,0 °C
1961 – 1990	+ 0,8 °C	+ 0,4 °C	+ 0,1 °C	+ 1,7 °C	+ 0,7 °C
1991 – 2020	+ 0,8 °C	+ 1,2 °C	+ 1,8 °C	+ 1,5 °C	+ 1,3 °C
Niederschlag 1881 – 2020	+ 8,1 %	- 4,0 %	+ 5,3 %	+ 28,4 %	+ 8,2 %
1961 – 1990	- 6,8 %	- 9,1 %	+ 14,5 %	+ 21,7 %	+ 4,2 %
1991 – 2020	- 22,0 %	- 6,6 %	- 23,7 %	- 0,5 %	- 13,0 %

# 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)**

\* El Niño (Ozean-Oberflächentemp.) / Südl. (Luftdruck-) Oszillation

# Klimafaktor Mensch: Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>)

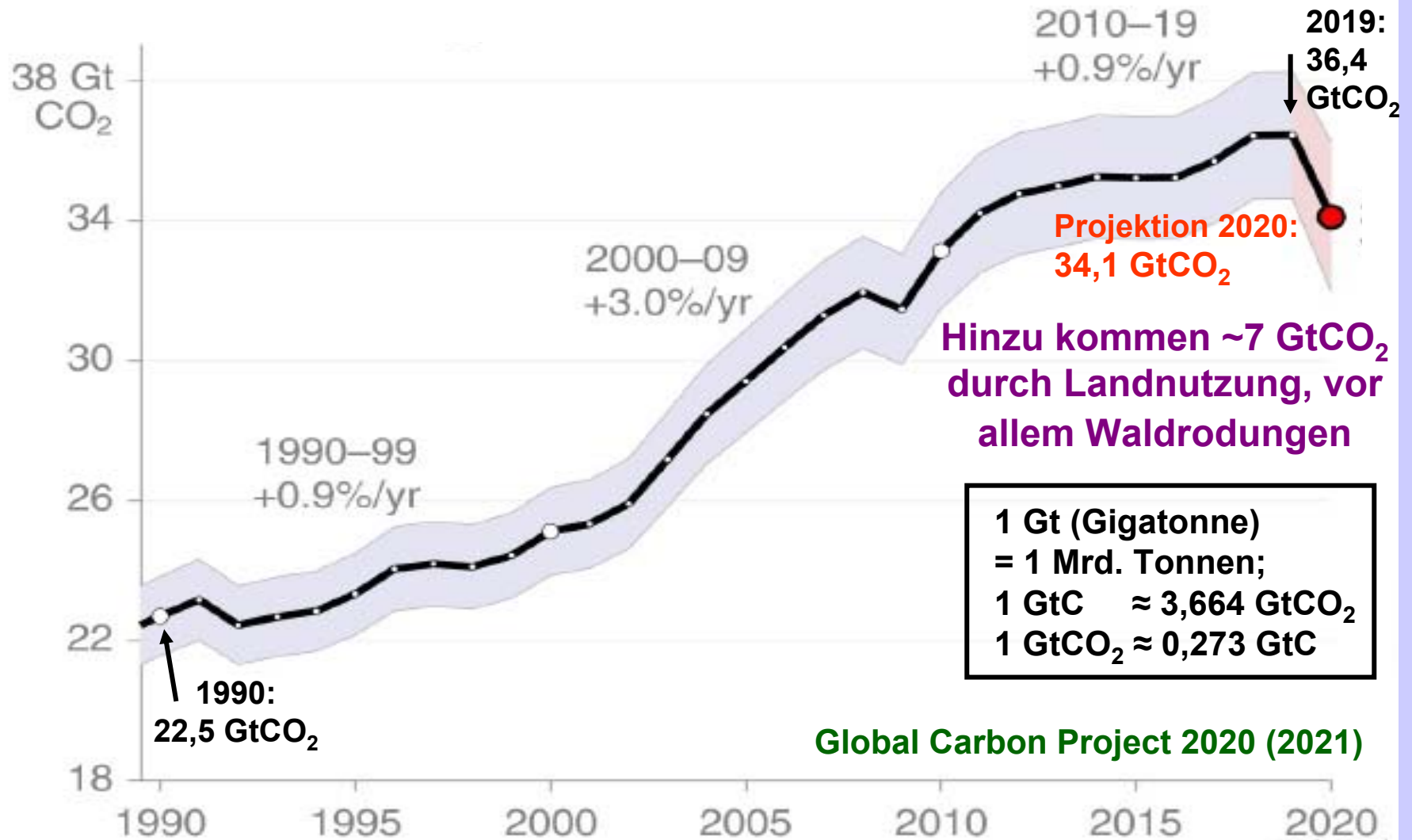
**Anthropogener CO<sub>2</sub>-Ausstoß: ca. 41 Gt/Jahr (~11,2 GtC/J.)\*,  
davon durch fossile Energie: 34,1 Gt/Jahr (~9,3 GtC/J.)\*,  
rasant steigend (1900 noch insgesamt rund 2 Gt CO<sub>2</sub>/Jahr).**



\* Bezugsjahr 2020

Global Carbon Project 2020 (2021)

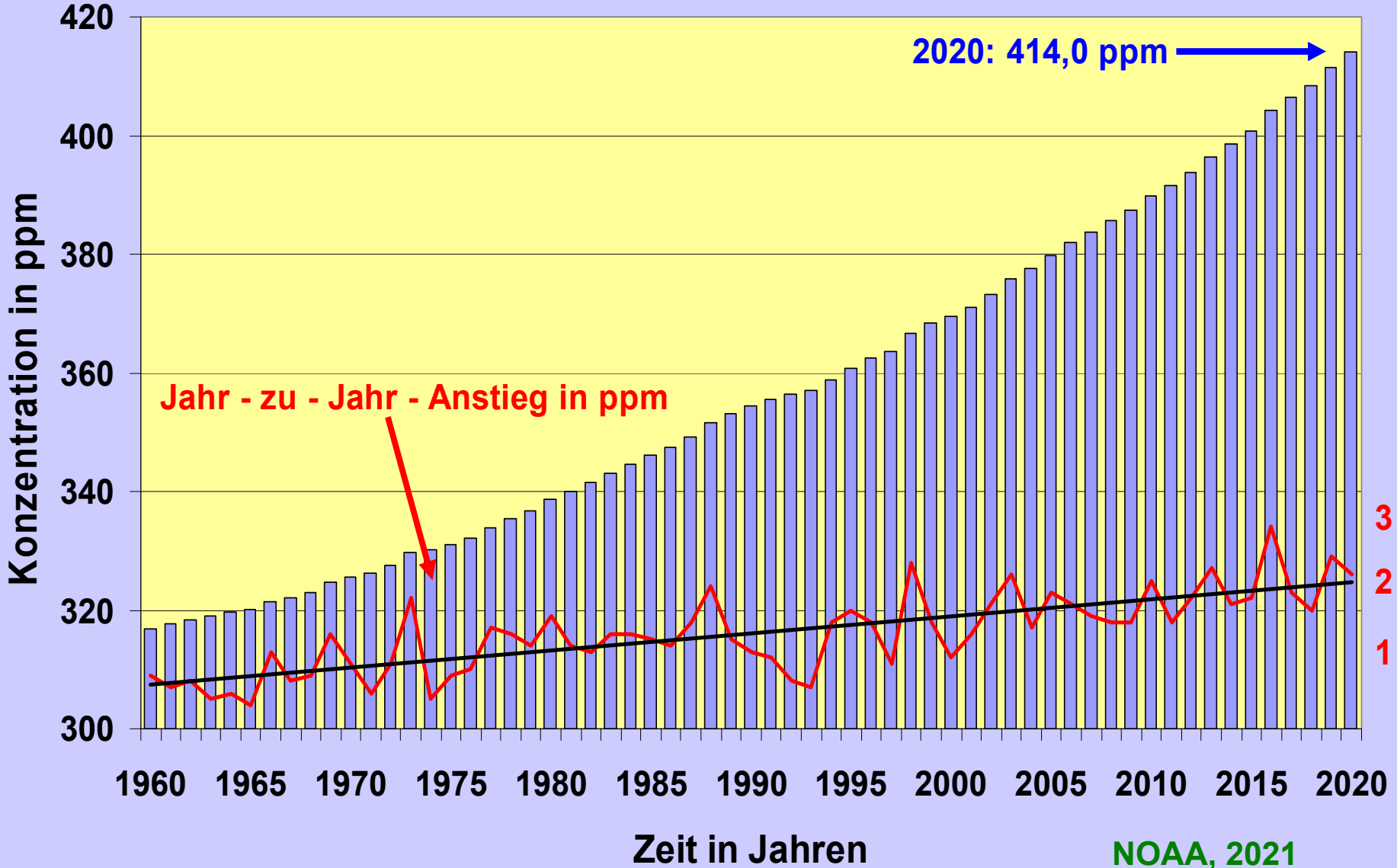
# Globale CO<sub>2</sub>-Emission durch fossile Energieträger (und Zementproduktion) pro Jahr, 1990 - 2020



Zum Vergleich ► 1900: 2,0; 1920: 3,4; 1940: 5,6; 1960: 9,4; 1970: 14,9; 1980: 19,3 GtCO<sub>2</sub>\*

\* Quaschnig 2020

# Atmosphär. Kohlendioxidkonzentration, Mauna Loa



NOAA, 2021

Konzentration um 1900: ~290 ppm, um 1800/Holozän: ~280 ppm

# Spurengasübersicht

Emissionen 2020 (CO<sub>2</sub>) bzw. ~ 2010, Konzentrationen (Mauna Loa) 2020, vorindustriell (~1750) in Klammern, und Anteile am Treibhauseffekt

Spurengas, Symbol	Anthropogene Emission	Atmosphärische Konzentration	Treibh. natürlich	Treibh. anthrop.*
<b>Kohlendioxid, CO<sub>2</sub></b>	<b>41 Gt a<sup>-1</sup></b>	<b>414,2 (280) ppm</b>	<b>26 %</b>	<b>55,3 %</b>
<b>Methan, CH<sub>4</sub></b>	<b>300-370 Mt a<sup>-1</sup></b>	<b>1,90 (0,72) ppm</b>	<b>2 %</b>	<b>31,6 %</b>
<b>FCKW</b>	<b>gering</b>	<b>F12: 0,50 (0) ppb</b>	<b>-</b>	<b>5,2 %</b>
<b>Distickstoffoxid, N<sub>2</sub>O</b>	<b>3-12 Mt a<sup>-1</sup></b>	<b>0,33 (0,27) ppm</b>	<b>4 %</b>	<b>7,9 %</b>
<b>Ozon, O<sub>3</sub></b>	<b>~0,5 Gt a<sup>-1</sup> (?)</b>	<b>~ 34 (24) ppb **</b>	<b>8 %</b>	<b>?</b>
<b>Wasserdampf, H<sub>2</sub>O</b>	<b>relativ gering</b>	<b>2,6 (2,6) % **</b>	<b>60 %</b>	<b>(indirekt)</b>

Quellen: IPCC,2014,2021; GCP,2021; NOAA,2021; u.a.; natürl. Treibhauseffekt nach Kiehl u. Trenberth,1997;

\* Relation der anthrop. Strahlungsantriebe 1750 - 2019 (IPCC, 2021) \*\* räumlich/zeitlich stark variabel

## Aufschlüsselung der Emissionsquellen (nach IPCC, 2014)

**CO<sub>2</sub>: 74 % fossile Energie, 23 % Waldrodungen, 3 % Zementproduktion \***

**CH<sub>4</sub>: 27 % fossile Energie, 23 % Viehhaltung, 17 % Reisanbau, 16 % Abfälle (Müll, Abwasser), 11 % Biomasse-Verbrennung, 6 % Tierexkremete**

**N<sub>2</sub>O: 23-48 % Bodenbearbeitung/Düngung, 15-38 % chem. Industrie, 17-23 % fossile Energie, 15-19 % Biomasse-Verbrennung**

**O<sub>3</sub>: indirekt über Vorläufersubstanzen, insbes. Stickoxide (NO, NO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)**

**\* Nach GCP (2020): 82 % foss. Energie, 15 % Waldrodungen, 3 % Zementprod. (IPCC)**

# Globale Strahlungsantriebe 1750-2019 (IPCC, 2021) und Klimasignale 1860-2008 (statistische Schätzungen\*)

Ursache (Faktor)	Strahlungsantrieb	TGL*-Signal	Signalstruktur
<b>Treibhausgase</b>	<b>+ 3,8 (3,2 ↔ 4,4) Wm<sup>-2</sup></b>	<b>0,9 - 1,3 °C</b>	<b>Progressiver Trend</b>
<b>Partikel (Aerosole), insbesondere Sulfat</b>	<b>- 0,9 (- 0,2 ↔ - 1,6) Wm<sup>-2</sup></b>	<b>0,2 - 0,4 °C</b>	<b>Uneinheitlicher Trend</b>
<b>Kombiniert</b>	<b>(formal + 2,9 Wm<sup>-2</sup>)</b>	<b>0,5 - 0,7 °C</b>	<b>Uneinheitlicher Trend</b>
<b>Landnutzung-Albedo</b>	<b>- 0,15 Wm<sup>-2</sup></b>	<b>&lt; 0,1 °C</b>	<b>Langzeittrend</b>
<b>Flugverkehr ***</b>	<b>+ 0,01 Wm<sup>-2</sup></b>	<b>Sehr gering</b>	<b>Langzeittrend</b>
<b>Vulkaneruptionen</b>	<b>max. - (1 - 3) Wm<sup>-2</sup> **</b>	<b>0,1 - 0,2 °C</b>	<b>Episodisch (1-3 Jahre)</b>
<b>Sonnenaktivität</b>	<b>+ 0,05 (0 - 0,1) Wm<sup>-2</sup></b>	<b>0,1 - 0,2 °C</b>	<b>Fluktuativ</b>
<b>ENSO (SOI) ****</b>	<b>-</b>	<b>0,2 - 0,3 °C</b>	<b>Episodisch (Monate)</b>

\* Global gemittelte bodennahe Lufttemperatur, Analyse mittels neuronaler Netze (Schönwiese et al., 2010); das kombinierte Signal 1850 - 2020 liegt nach IPCC (2021) mittlerweile bei ca. 1,2 °C

\*\* Pinatubo-Ausbruch 1991: 2,4 Wm<sup>-2</sup>, 1992: 3,2 Wm<sup>-2</sup>, 1993: 0,9 Wm<sup>-2</sup> (McCormick et al., 1995)

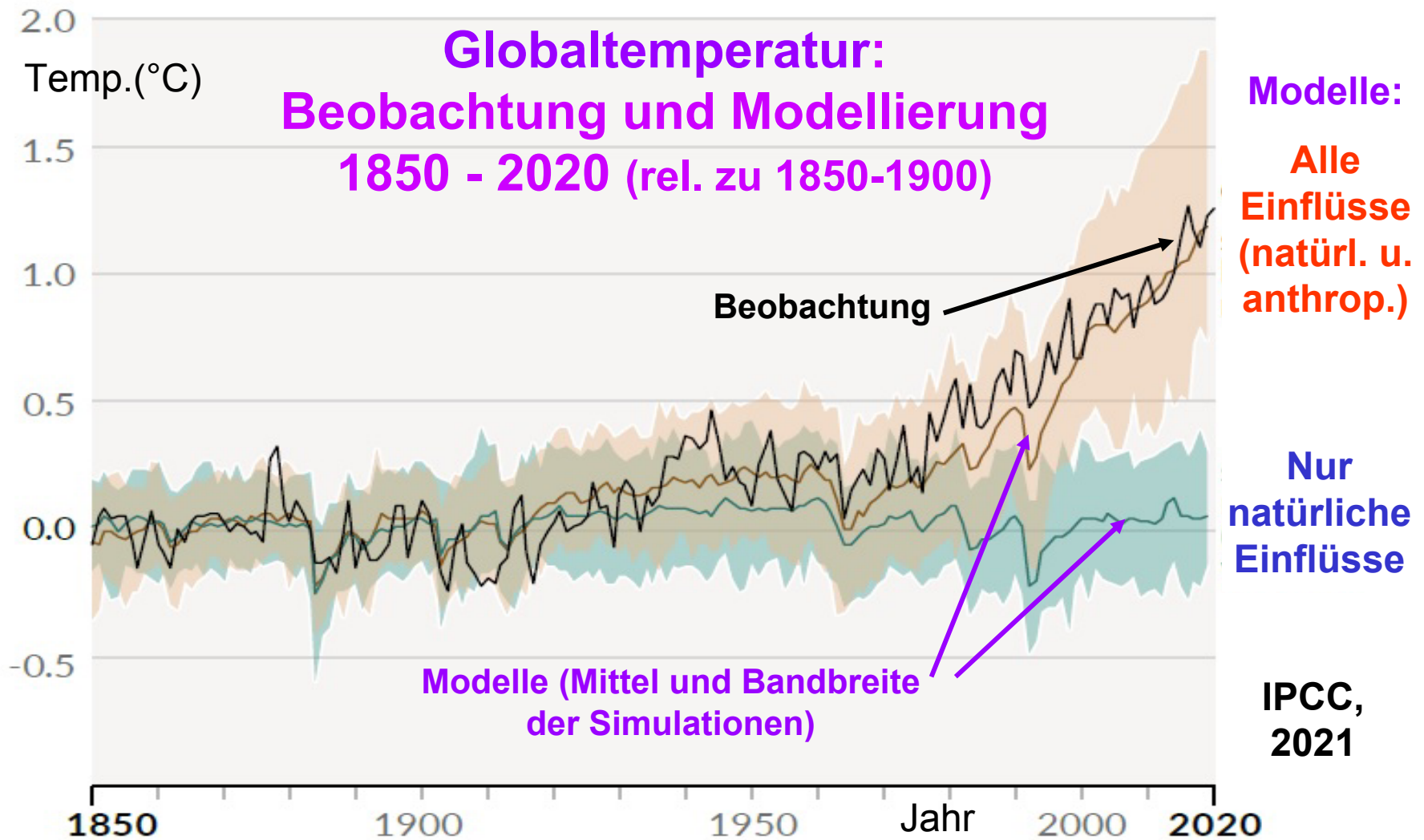
\*\*\* Bildung von Kondensstreifen und Abgase

\*\*\*\* El Niño / Southern Oscillation (ENSO, hier Southern Oscillation Index); interne Wechselwirkung

**Statistische Schätzungen der erklärten Varianz\* erbringen: ca. 60 % anthropogen (vorwiegend Langfristtrend), ca. 30 % natürlich (überlagerte rel. kurzfristige Fluktuationen) und ca. 10 % Zufallsprozesse)**



# Globaltemperatur: Beobachtung und Modellierung 1850 - 2020 (rel. zu 1850-1900)



Offenbar ist insbesondere der Temperaturanstieg seit ca. 1965 nur anthropogen erklärbar. Die Abkühlung ca. 1945-1970 geht auf Sulfat- und andere Partikel zurück, ist somit ebenfalls anthropogen. Die überlagerten kurzfristigen Fluktuationen ( $\pm 0,2$  °C) sind natürlich.

# Und die Zukunft?

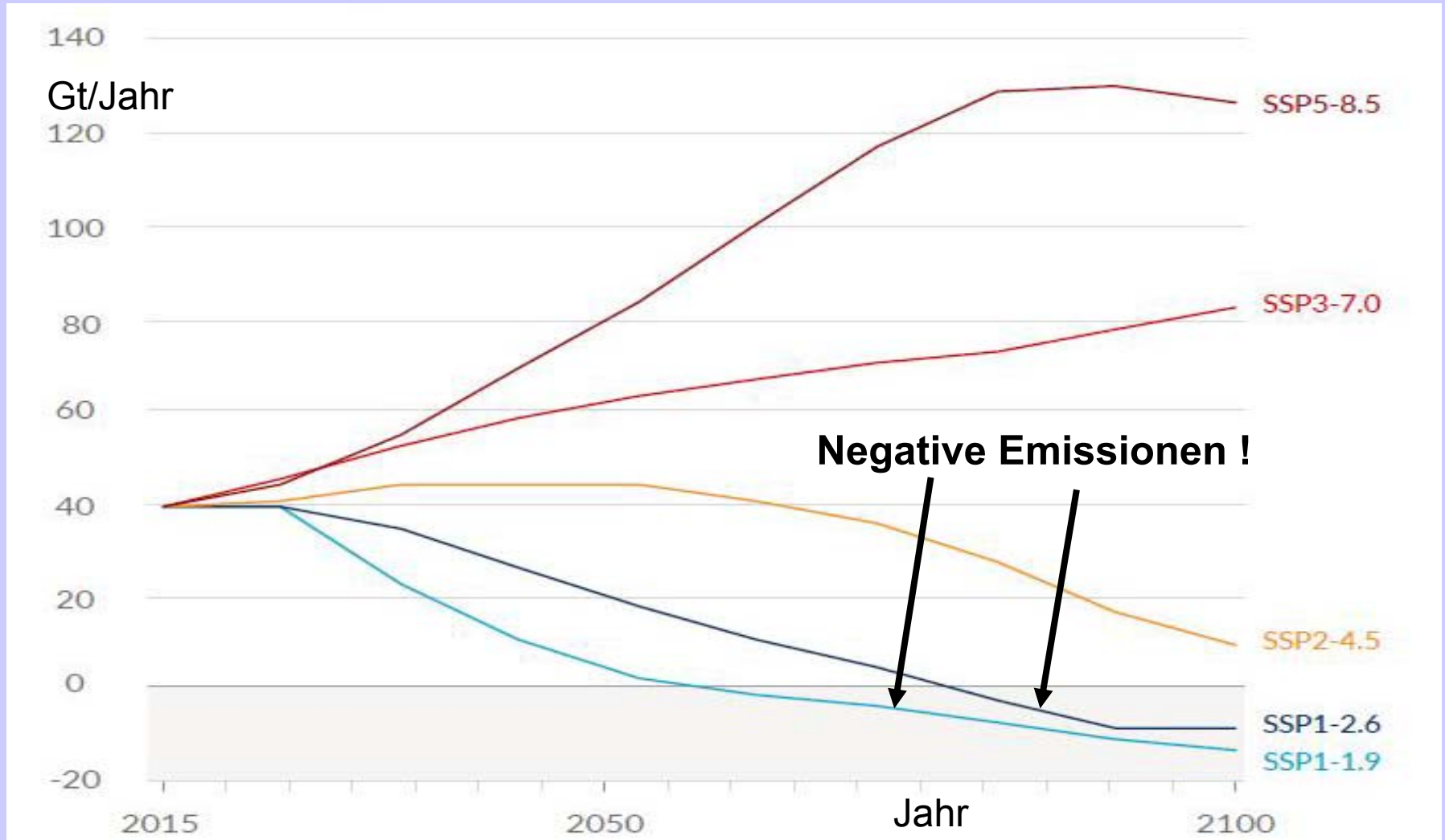
**Klimaprognosen, vergleichbar den Wetterprognosen, sind prinzipiell nicht möglich, da**

- 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**

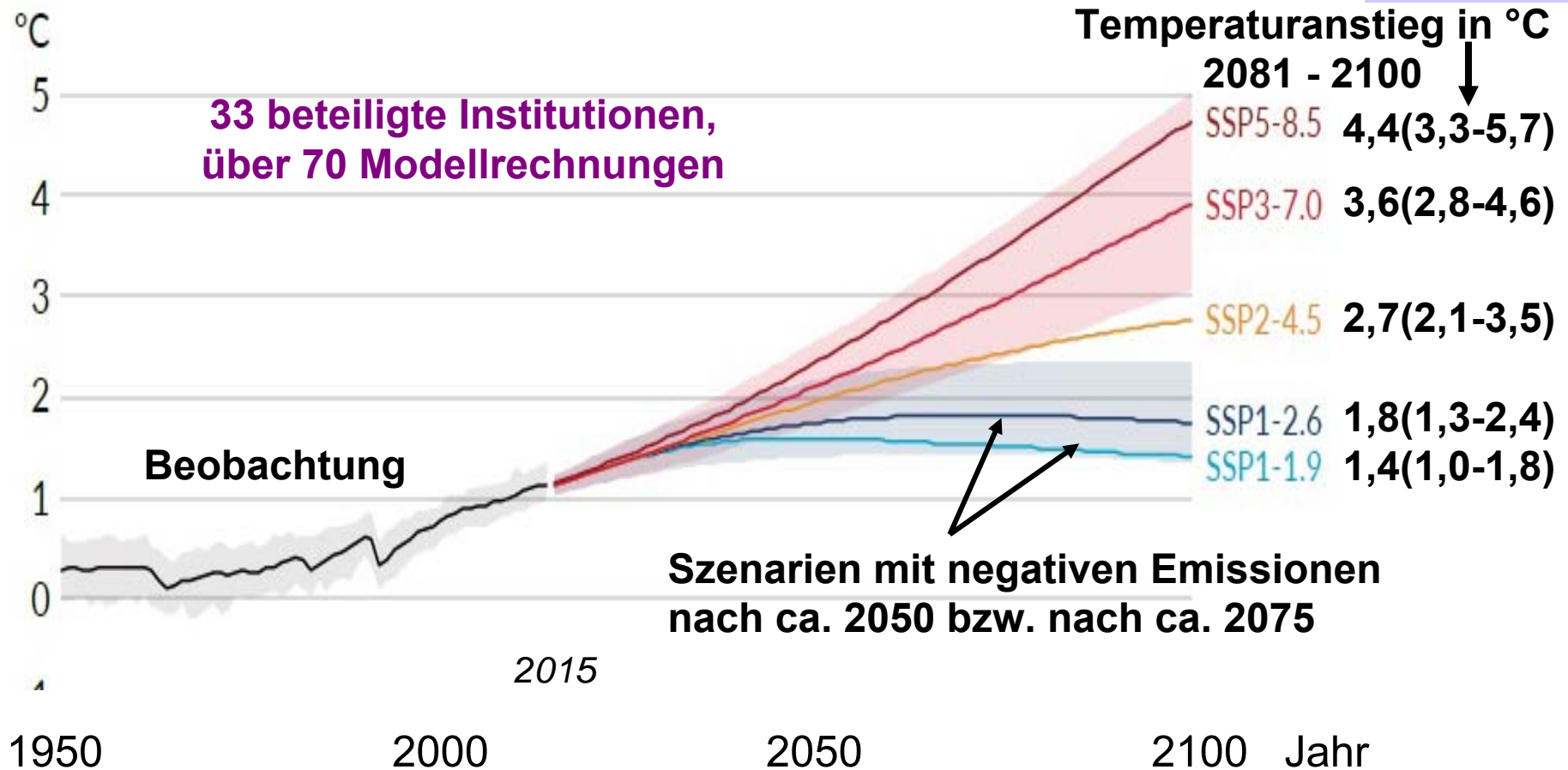
- unter der Annahme, dass der menschliche Einfluss (insbesondere durch Treibhausgase) dominiert
- und aufgrund alternativer Szenarien des in Zukunft möglichen menschlichen Verhaltens, insbesondere hinsichtlich der Treibhausgas-Emissionen.

# Szenarien der globalen CO<sub>2</sub>- Emission 2015 - 2100 (IPCC, 2021)



Die Szenarien (SSP = Shared Socio-Economic Pathways) geben den im Jahr 2100 durch die „Treibhausgase“ erreichten Strahlungsantrieb (1,9 - 8,5 Wm<sup>-2</sup>) gegenüber dem vorindustriellen Niveau (1850 - 1900) an.

# Szenarien-basierte Klimamodelrechnungen (CMIP6\*) des globalen Temperaturanstiegs 2015 - 2100 (20-jähr.Mittel) relativ zu 1850 - 1900\*\* und Beobachtung 1950 - 2015



\* Coupled Model Intercomparison Project der WMO, 6. Phase (IPCC, 2021)

\*\* Vorindustrielles Niveau, gilt näherungsweise auch für das Jahr 1880.

**Bis 2019 tatsächlich erreichter Strahlungsantrieb: ca. 3 Wm<sup>-2</sup>  
(„Treibhausgase“ abzüglich Partikel-Effekt)**

# Die wichtigsten Klimamodell-Zukunftsprojektionen (IPCC, 2021; ohne Szenarien mit negativen Emissionen)

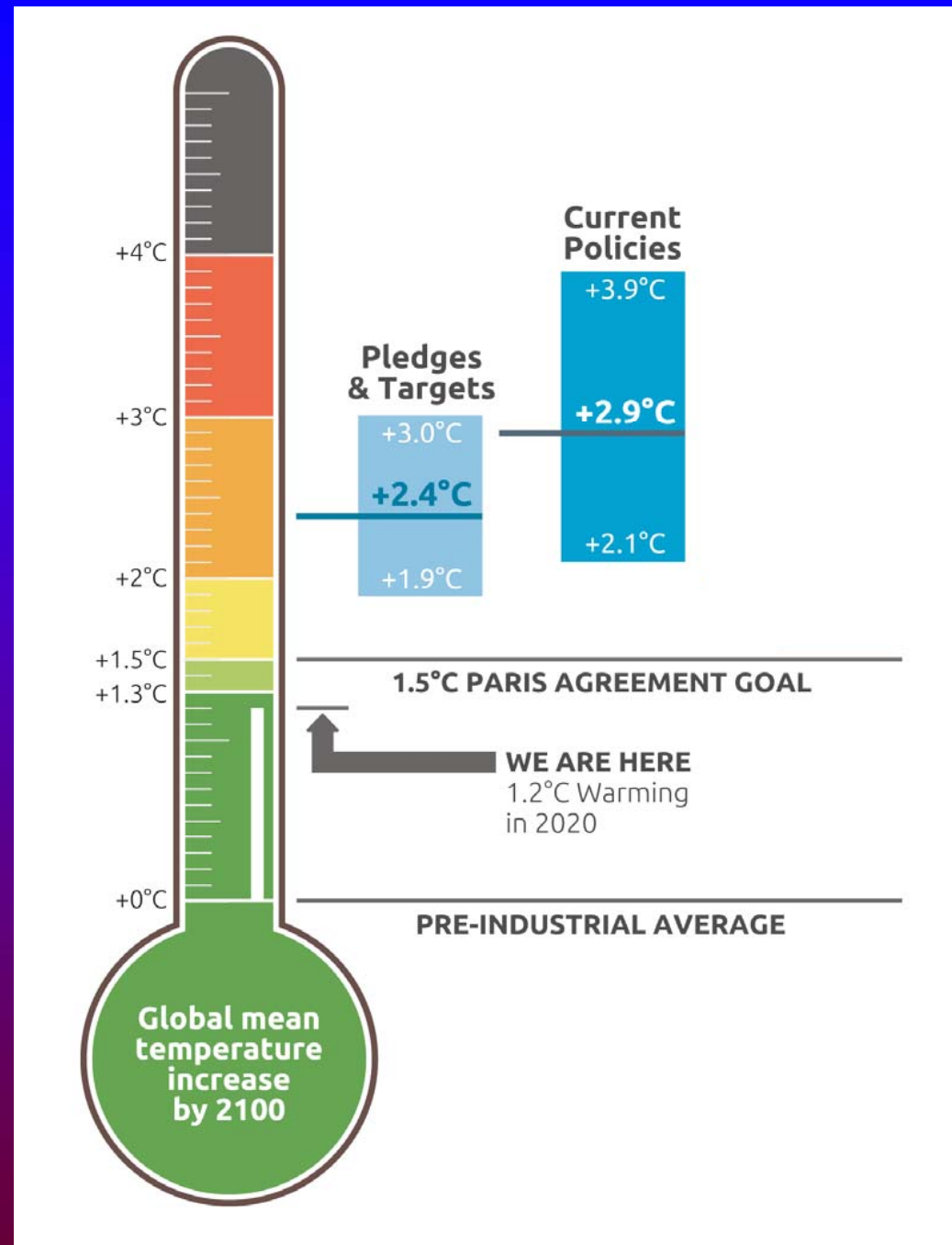
- Rasante weitere Erwärmung der unteren Atmosphäre: global bis 2100 um 2,1 - 5,7 °C, wahrscheinlichster Bereich ca. 3 - 4 °C, aber regional sehr unterschiedlich.
- Weitere Abkühlung der Stratosphäre (begünstigt den dortigen Ozonabbau, erschwert Schutzmaßnahmen)
- Niederschlagsumverteilungen (z.B. Mittelmeer-Region trockener, Skandinavien u. Polarregionen feuchter, Mitteleuropa Winter feuchter / Sommer trockener)
- Weiterer Meeresspiegelanstieg global bis 2100 um rund 45 cm - 1 m; im Fall plötzlicher Eisschild - Instabilität sowie nach halbempir. Schätzungen bis ca. 2 m möglich.
- Regional häufigere/intensivere Extremereignisse, insbesondere Hitzewellen, Dürren bzw. Starkniederschläge, Hagel, Tornados – aber im einzelnen teilweise sehr unsicher; häufigere, vor allem aber intensivere tropische Wirbelstürme; sonstige Sturm-Tendenz jedoch fraglich.

**Derzeitig (Mai 2021)  
erwarteter Anstieg der  
Globaltemperatur bis  
2100 rel. zum vorindu-  
striellen Niveau nach  
ClimateActionTracker\***

**Pledges: Planungen**

**Current Policies: bisher  
umgesetzte Klimapolitik**

**\* Nach Modellauswertungen  
folgender Institute:  
New Climate Institute, Köln;  
Climate Analytics, Berlin;  
jeweils von der European  
Climate Foundation finanzierte  
Forschungsgesellschaften.**



# Wird das Klima extremer?

**Überschwemmung,  
Dresden, Aug. 2002**



**37 Tote, 13,5 Mrd. US\$ Schäden**

**Hitze/Dürre, Düsseldorf,  
Aug. 2003**



**Mitteleuropa: 70 000 Tote, 13 Mrd. US\$**

**Taifun Haiyan, Philippinen, Nov. 2013**



**6235 Tote, 10,5 Mrd. US\$**

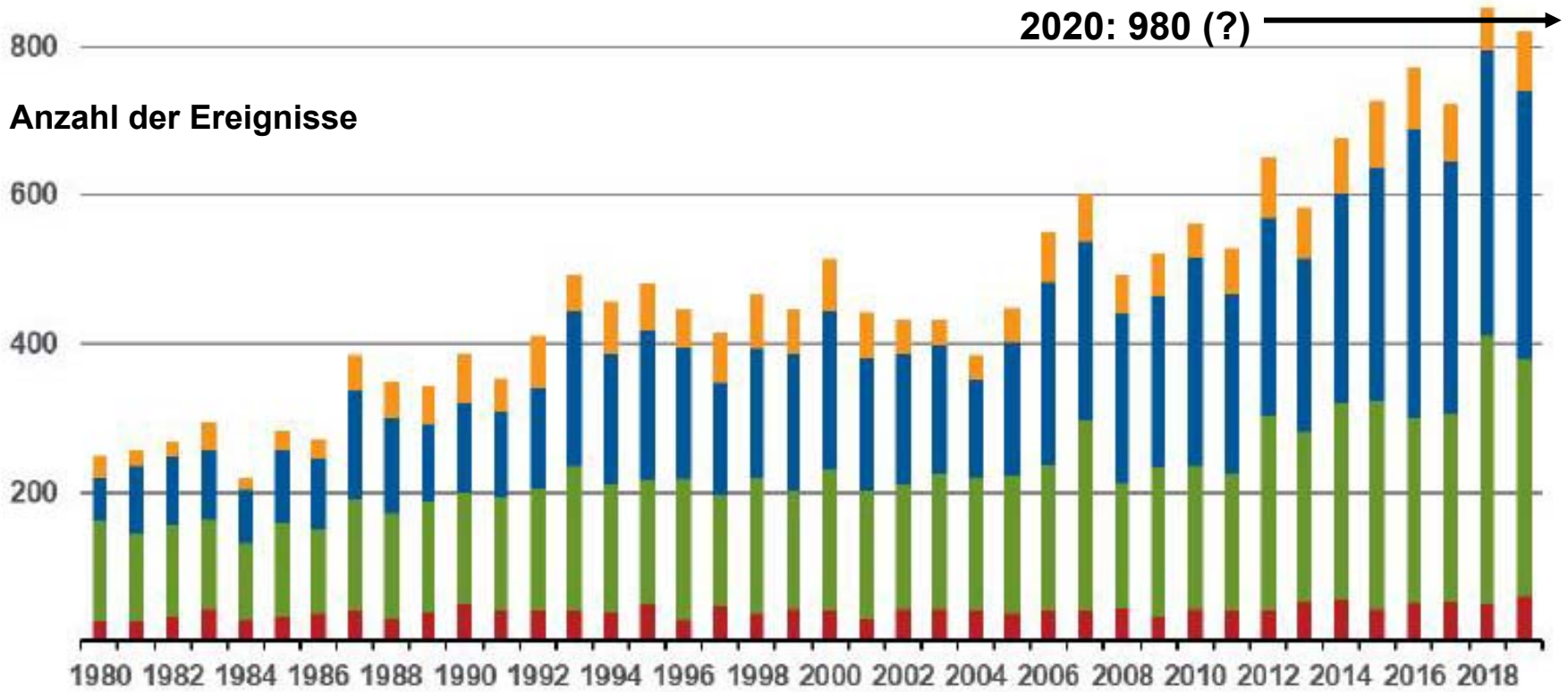
**Tornado, Luzice u.a., CSR, Juni 2021**



**5 Tote, >200 Verletzte, Mio.-Schäden**

# Schadenergebnisse (global) durch Naturkatastrophen

Anstieg der wirtschaftlichen Schäden von ca. 50 auf ca. 250 Mrd. US\$.  
*Bisherige „Spitzenjahre“ 2011 und 2017 mit jeweils ca. 350 Mrd. US\$.*



**■ Geophysikalische Ereignisse:**  
Erdbeben, Tsunami, vulkanische Aktivität

**■ Hydrologische Ereignisse:**  
Überschwemmung, Massenbewegung

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

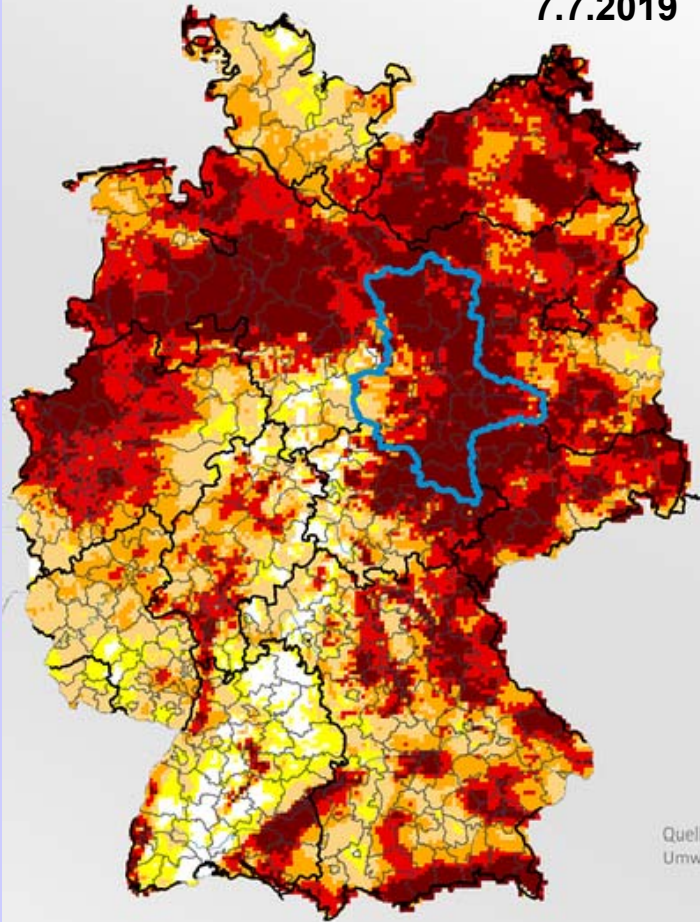
**■ Klimatologische Ereignisse:**  
Extremtemperaturen, Dürre, Waldbrand

Quelle: MüRück, NatCatService, 2021



# Dürreperiode (heiß - rel. trocken), Deutschland, 2018 - 2019

7.7.2019

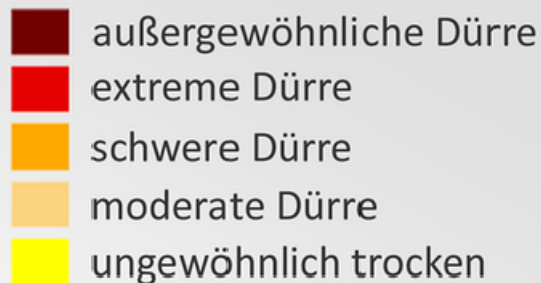


Temperatur- und Niederschlagsanomalien,  
Sommer, relativ zu 1961 - 1990 (16,2 °C/239 mm):  
2018: +3,1 °C / -110 mm; 2019: +3°C / -64 mm

Die Folge: u.a. massive Waldschäden. Nach dem Waldschadensbericht 2020 (BMEL, 2021) betrug die Kronenverlichtungen (2019 in Klammern) beispielsweise bei

Fichte: 44% (26%), ohne Schäden 21% (28%)  
Buche: 55% (47%), ohne Schäden 11% (16%)  
Eiche: 50% (38%), ohne Schäden 20% (17%)

UFZ - Dürremonitor, Leipzig



Quelle:  
Umwelt

# Flächenbrände: Wald und Siedlungen



USA, Kalifornien, Nov. 2018



Kanada, Lytton, Juni 2021

**8.- 25. Nov. 2018: Kalifornien (USA), 88 Tote (bisheriger Rekord), allein in Paradise 14 000 Wohnhäuser abgebrannt, wirtschaftl. Schäden insgesamt 16,5 Mrd., davon versichert 12,5 Mrd. US\$.**

**2019/2020 erneut ausgedehnte Waldbrände in Kalifornien (USA), 2019 außerdem auch in Australien und anderen Regionen.**

**29. Juni 2021: Hitzerekord (49,6 °C) in Lytton, Kanada, 486 Tote, Flächenbrände; 4. Juli 2021: Hitzerekord (54 °C) im Death Valley, Kalifornien, USA, wieder ausgedehnte Waldbrände.**

**Temperatur-Weltrekord: 58 °C, 13.9.1922, Al-Aziziyah, Libyen;**

**Deutschland-Rekord: 40,3 °C, 5.7./7.8.2015, Kitzingen/Main;**

**Messung 42,6 °C, 26.7.2019, Lingen (Emsland), laut DWD fraglich.**

**Quellen: MunichRe, 2018-2021; Tagespresse**

# Überschwemmungen in Rheinland-Pfalz (RP) und Nordrheinwestfalen (NRW), Juli 2021

Ahr in Schuld (Eifel) bei Alzenau (RP), 14.7.2021

↓ 15.7.2021



**Tote: RP 133, NRW 47, insgesamt 180 (Wikipedia, Stand Sept. 2021)**  
**Schäden: 4,5 - 5,5 Mrd. € (Bundeszentr.Polit.Bild., vorläufige Schätzung)**

# Die Folgen des Klimawandels...

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

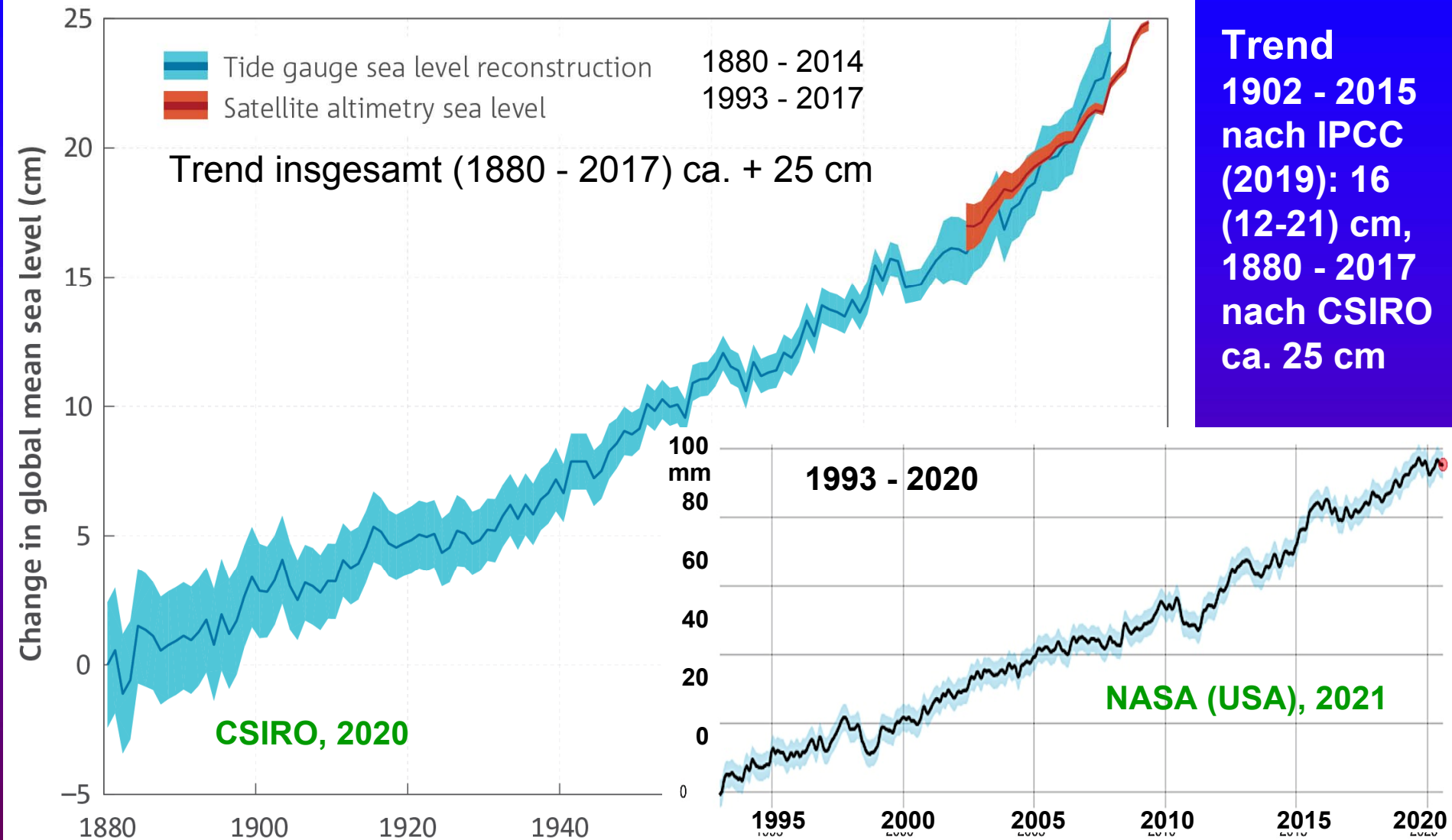
**weitaus überwiegend aber negativ:**

- Rückgang von Meereis (insbes. Arktis), Gebirgsgletschern und Permafrost mit u.a. der Folge von Hanginstabilitäten
- Meeresspiegelanstieg (global seit 1880 bereits ca. 25 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 CO<sub>2</sub>: 85 US \$/Jahr (▶ 37 Mrd. t CO<sub>2</sub> ▶ 3145 Mrd. US \$/Jahr); nach IPCC (2007) 3 - 95 US \$/Jahr. \* Weltsozialprodukt

# Globaler Meeresspiegelanstieg 1880 - 2017/2020



Anstieg nach CSIRO: 1901 - 2010 ▶ 1,7 ( $\pm 0,2$ ), 1971 - 2010 ▶ 2,0 ( $\pm 0,3$ ),  
1993 - 2020 ▶ 3,5 ( $\pm 0,4$ ) bzw. nach NASA 3,3 mm/Jahr .

CSIRO = Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation, Australia

# 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 (CO<sub>2</sub> ...) 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 (CO<sub>2</sub>-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. Klimaschutzgesetz, Novelle vom 12.4.2021: CO<sub>2</sub>-Emissionsreduktion um 65 % → 2030, 88 % → 2040, rel. zu 1990; Klimaneutralität bis 2045; spezielle Maßnahmen u.a. CO<sub>2</sub>-Bepreisung, „Kohleausstieg“ bis 2038**



Vielen Dank  
für Ihr Interesse



Christian-D. Schönwiese

# Klimawandel kompakt

Ein globales Problem  
wissenschaftlich erklärt

3. aktualisierte Auflage

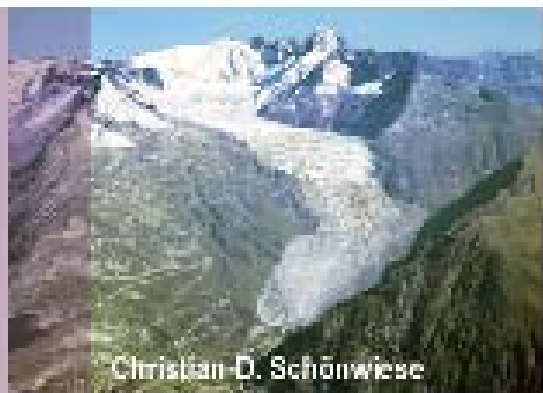
2020. V, 132 Seiten, 34 Farbabb., 11 Tab., 21 x 15 cm, Broschur

ISBN 978-3-443-01169-7      19.90 €

Borntraeger-Verlag, Stuttgart

Homepage des Autors:

[www.geo.uni-frankfurt.de/iau/klima](http://www.geo.uni-frankfurt.de/iau/klima)



Christian-D. Schönwiese

**Klimawandel  
kompakt** 3. aktualisierte  
Auflage

Ein globales Problem  
wissenschaftlich erklärt



Borntraeger