



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 Problembereich Klimawandel?

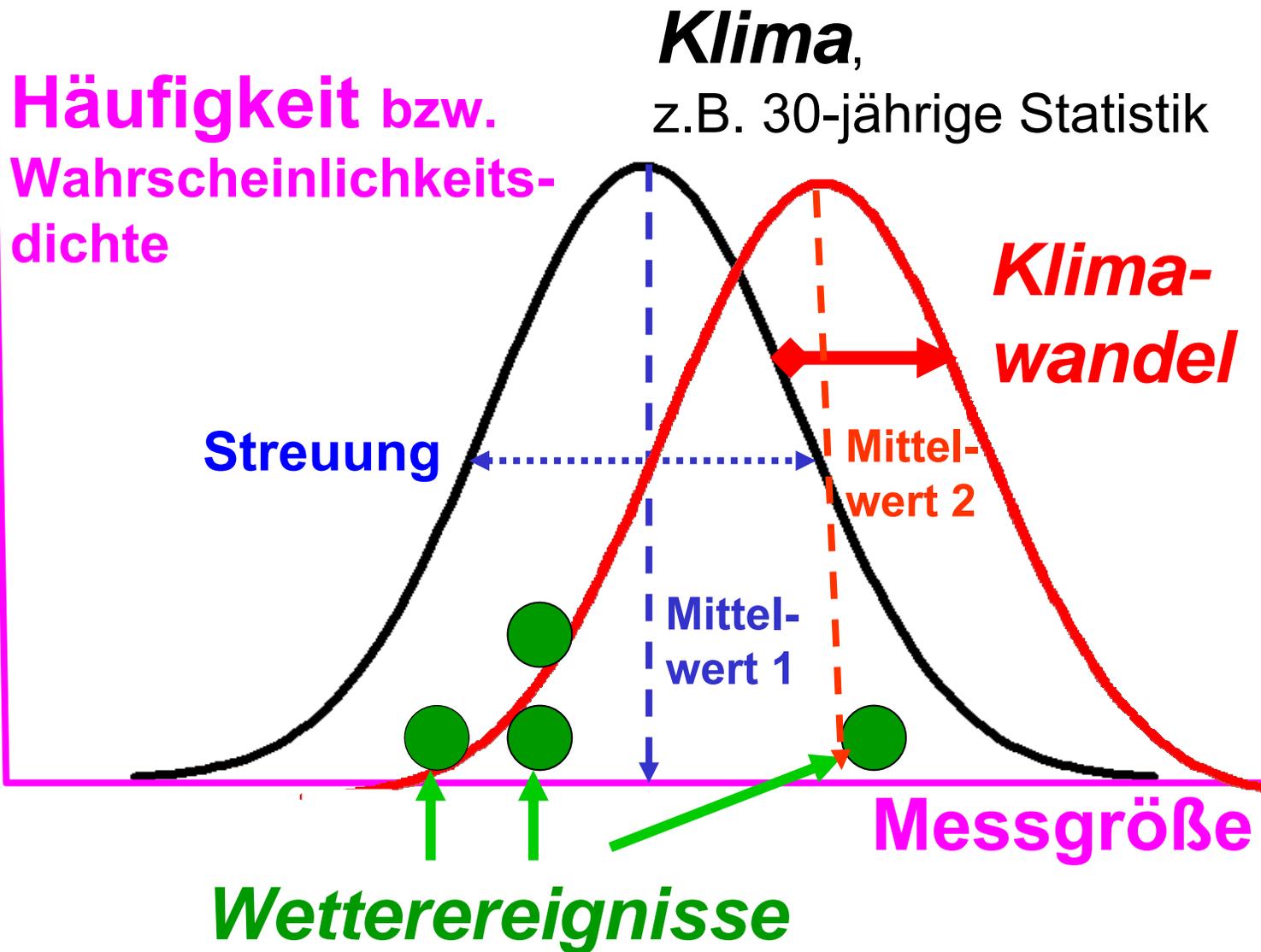
- ▶ Einerseits ist die Menschheit hochgradig von der Gunst des Klimas abhängig, andererseits nimmt sie selbst immer mehr darauf Einfluss.
- ▶ Das Phänomen Klimawandel kann uns daher nicht gleichgültig sein.

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

Vortragsgliederung

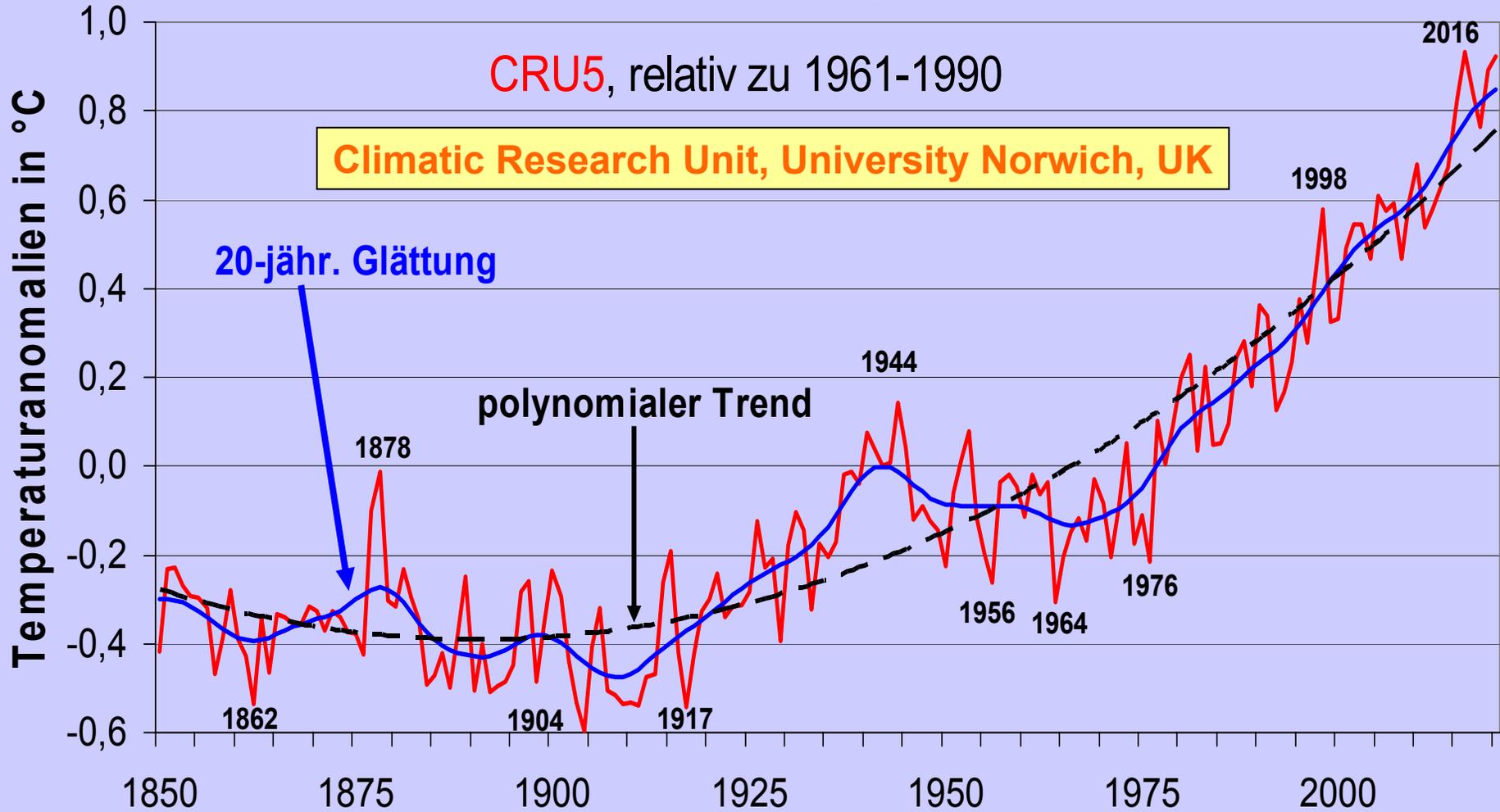
- **Wetter – Klima – Klimawandel: Begriffsklärung**
- **Globaler Temperaturanstieg**
- **Regionale Klimawandel - Aspekte**
- **Ursachendiskussion (Globaltemperatur)**
- **Wird das Klima extremer?**
- **Auswirkungen des Klimawandels**
- **Folgerungen: Handlungsbedarf und Klimapolitik**

Begriffsklärung: Wetter - Klima - Klimawandel



Globaltemperatur, Jahresanomalien 1850 - 2020

Land und Ozean (SST)



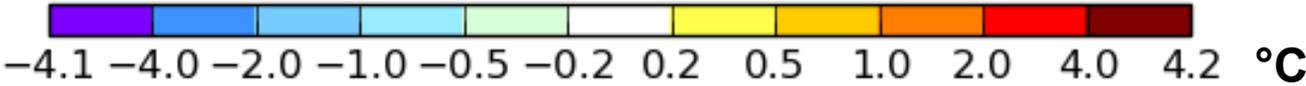
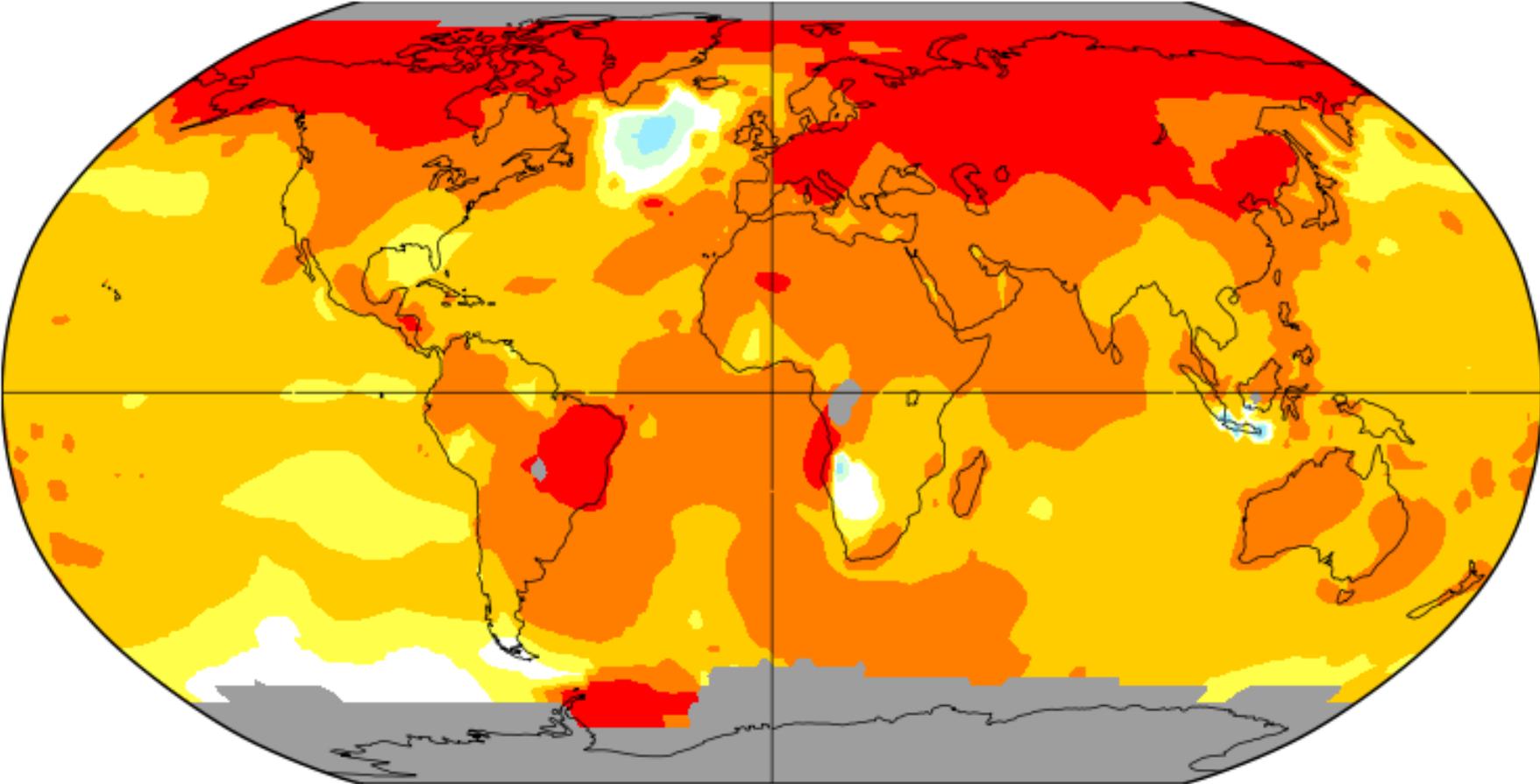
Temperaturanstieg (lin. Trend) seit 1880 (verschied. Quellen; IPCC, 2021): 1,2 °C

Regionale Strukturen der Temperaturentrends 1880 - 2020

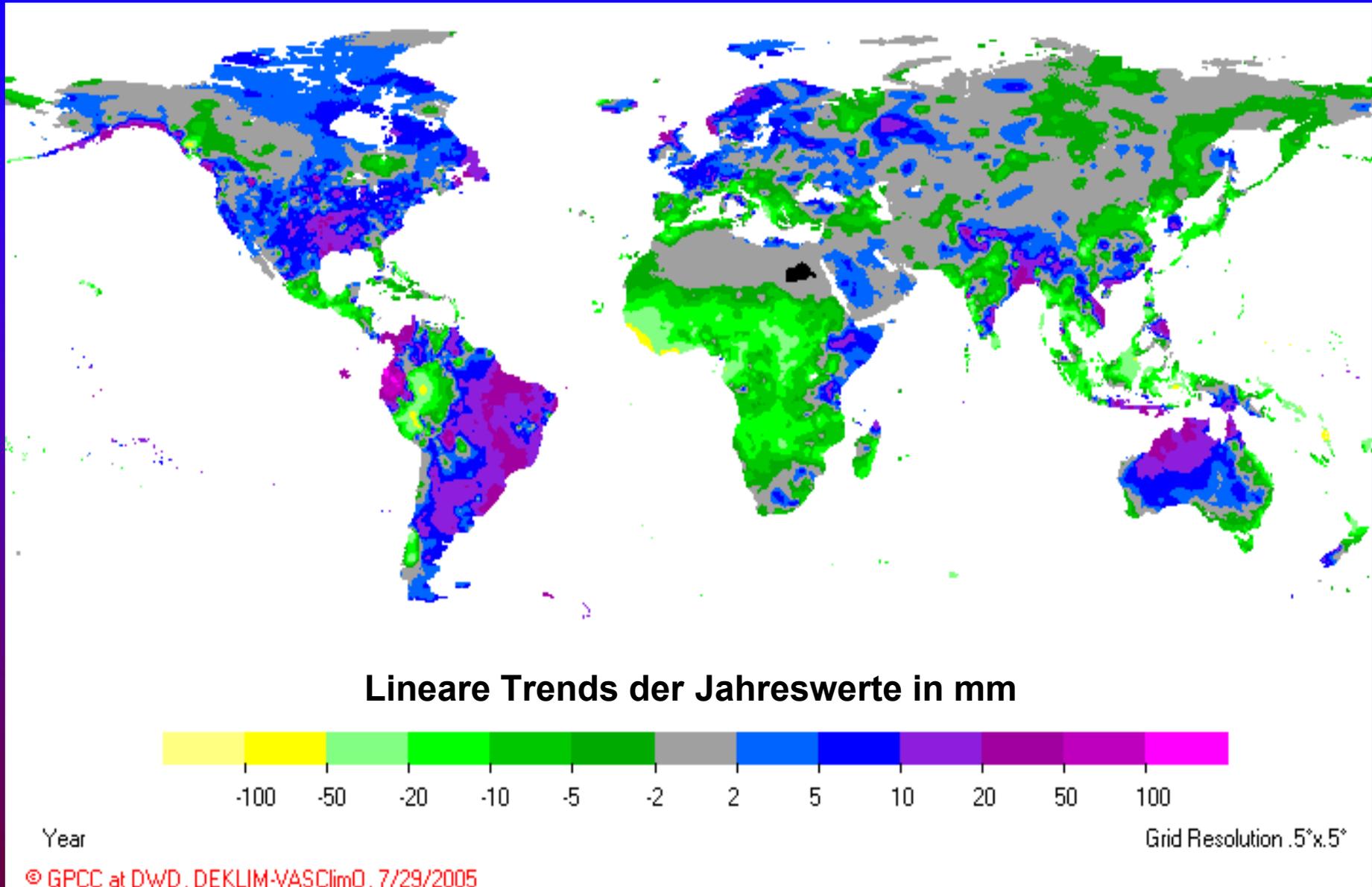
Annual J-D

L-OTI(°C) Change 1880-2020

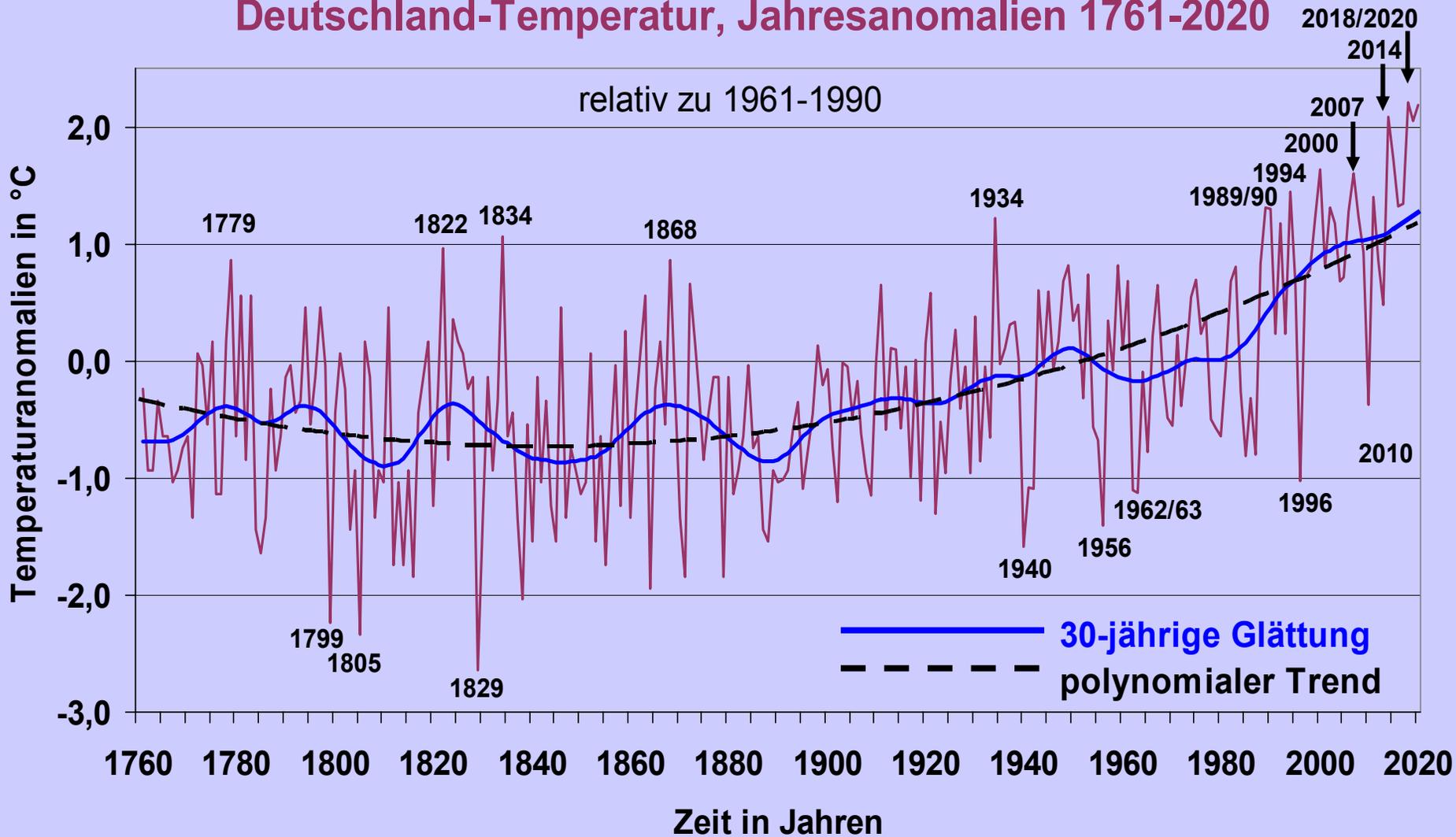
1.09



Regionale Strukturen der Niederschlagstrends 1951-2000



Deutschland-Temperatur, Jahresanomalien 1761-2020

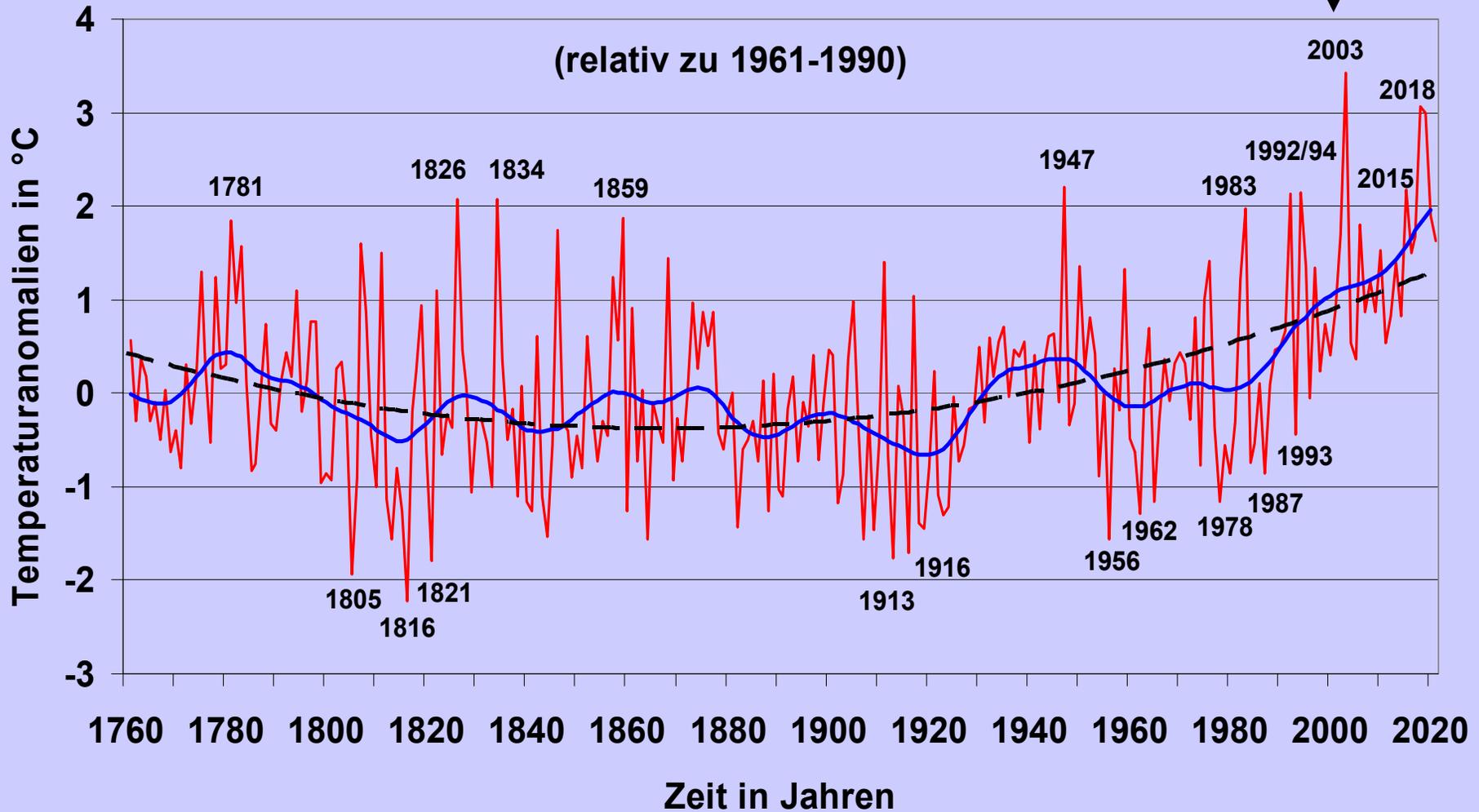


Datenquelle: Rapp,
2000; DWD, 2021;
Analyse: Schönwiese

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

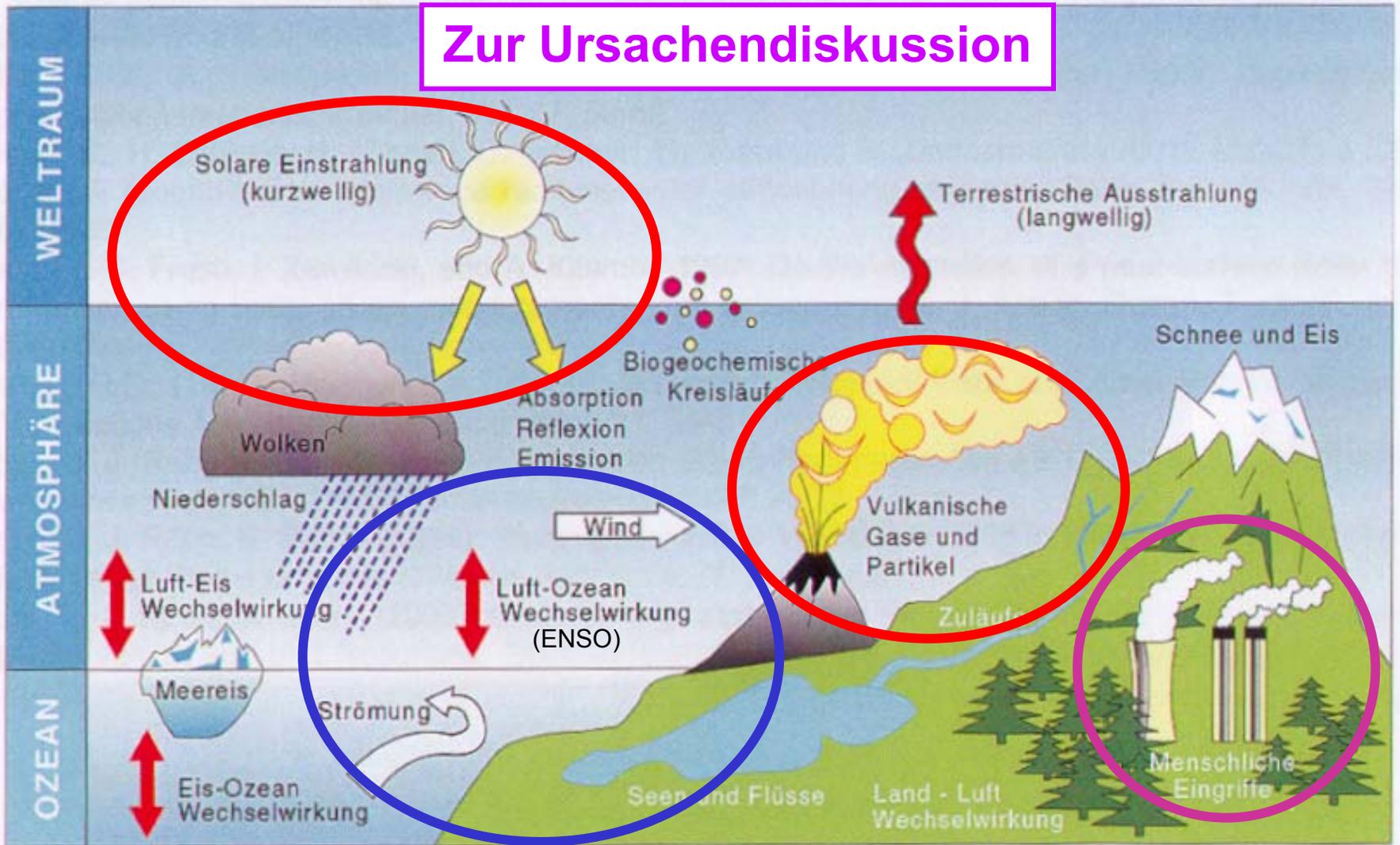
**Mittelwert (1961-1990): 16,2 °C; 2003: 19,6 °C;
2018: 19,3 °C; Linearer Trend 1881-2020: 1,9 °C**

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
	+ 0,8 °C	+ 0,4 °C	+ 0,1 °C	+ 1,7 °C	+ 0,7 °C
	+ 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 %
	- 6,8 %	- 9,1 %	+ 14,5 %	+ 21,7 %	+ 4,2 %
	- 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 (CO₂)

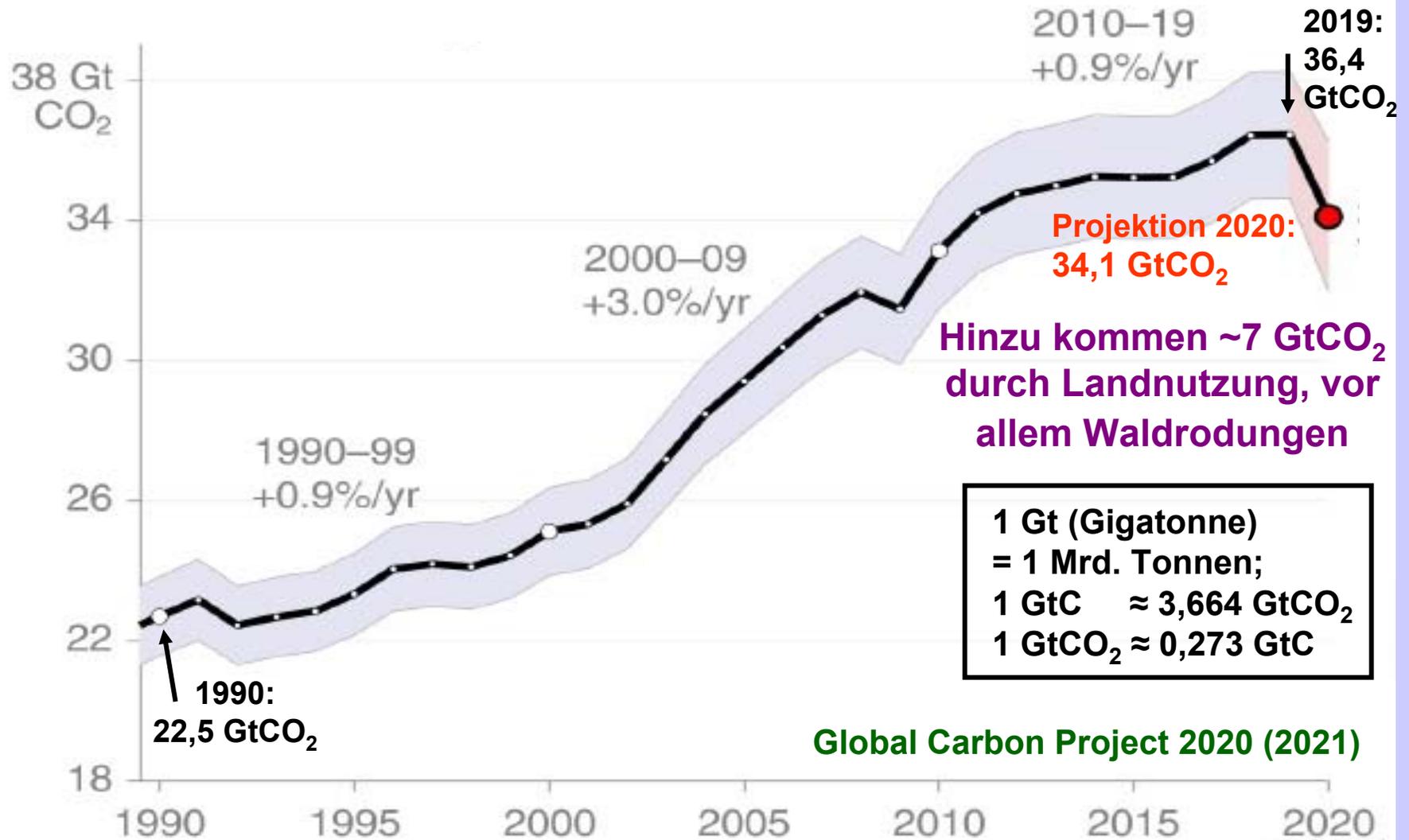
**Anthropogener CO₂-Ausstoß: ca. 41 Gt/Jahr (~11,2 GtC/J.)*,
davon durch fossile Energie: 34,1 Gt/Jahr (~9,3 GtC/J.)*,
rasant steigend (1900 noch insgesamt rund 2 Gt CO₂/Jahr).**



* Bezugsjahr 2020

Global Carbon Project 2020 (2021)

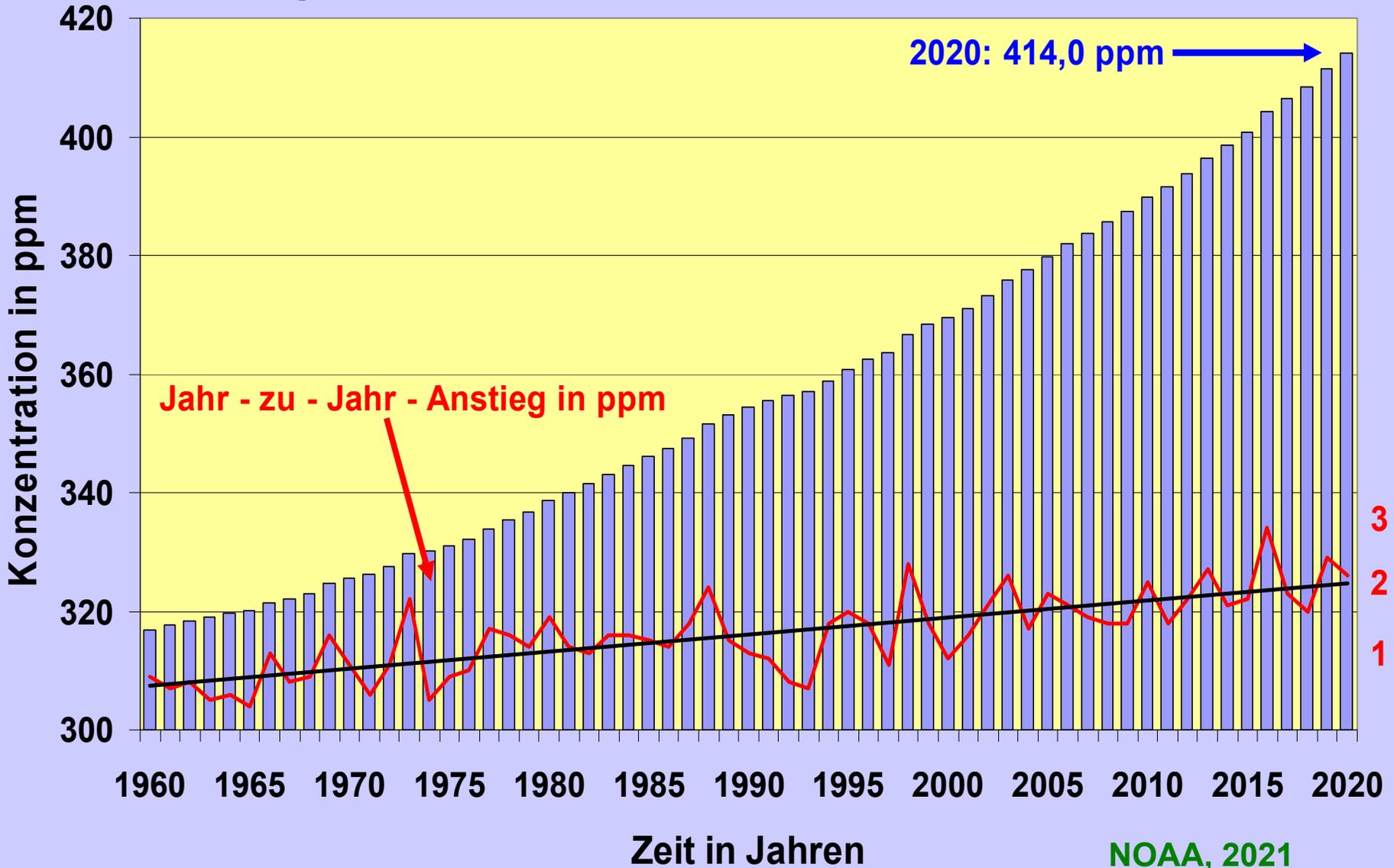
Globale CO₂-Emission durch fossile Energieträger (und Zementproduktion) pro Jahr, 1990 - 2020



Zum Vergleich ► 1900: 2,0; 1920: 3,4; 1940: 5,6; 1960: 9,4; 1970: 14,9; 1980: 19,3 GtCO₂*

* Quaschnig 2020

Atmosphär. Kohlendioxidkonzentration, Mauna Loa



NOAA, 2021

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

Spurengasübersicht

Emissionen 2020 (CO₂) bzw. ~ 2010, Konzentrationen (Mauna Loa) 2020, vorindustriell (~1750) in Klammern, und Anteile am Treibhauseffekt

Spurengas, Symbol	Anthropogene Emission	Atmosphärische Konzentration	Treibh. natürlich	Treibh. anthrop.*
Kohlendioxid, CO₂	41 Gt a⁻¹	414,2 (280) ppm	26 %	55,3 %
Methan, CH₄	300-370 Mt a⁻¹	1,90 (0,72) ppm	2 %	31,6 %
FCKW	gering	F12: 0,50 (0) ppb	-	5,2 %
Distickstoffoxid, N₂O	3-12 Mt a⁻¹	0,33 (0,27) ppm	4 %	7,9 %
Ozon, O₃	~0,5 Gt a⁻¹ (?)	~ 34 (24) ppb **	8 %	?
Wasserdampf, H₂O	relativ gering	2,6 (2,6) % **	60 %	(indirekt)

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)

CO₂: 74 % fossile Energie, 23 % Waldrodungen, 3 % Zementproduktion *

CH₄: 27 % fossile Energie, 23 % Viehhaltung, 17 % Reisanbau, 16 % Abfälle (Müll, Abwasser), 11 % Biomasse-Verbrennung, 6 % Tierexkremete

N₂O: 23-48 % Bodenbearbeitung/Düngung, 15-38 % chem. Industrie, 17-23 % fossile Energie, 15-19 % Biomasse-Verbrennung

O₃: indirekt über Vorläufersubstanzen, insbes. Stickoxide (NO, NO₂, N₂O₅)

*** 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
Treibhausgase	+ 3,8 (3,2 ↔ 4,4) Wm⁻²	0,9 - 1,3 °C	Progressiver Trend
Partikel (Aerosole), insbesondere Sulfat	- 0,9 (- 0,2 ↔ - 1,6) Wm⁻²	0,2 - 0,4 °C	Uneinheitlicher Trend
Kombiniert	(formal + 2,9 Wm⁻²)	0,5 - 0,7 °C	Uneinheitlicher Trend
Landnutzung-Albedo	- 0,15 Wm⁻²	< 0,1 °C	Langzeittrend
Flugverkehr ***	+ 0,01 Wm⁻²	Sehr gering	Langzeittrend
Vulkaneruptionen	max. - (1 - 3) Wm⁻² **	0,1 - 0,2 °C	Episodisch (1-3 Jahre)
Sonnenaktivität	+ 0,05 (0 - 0,1) Wm⁻²	0,1 - 0,2 °C	Fluktuativ
ENSO (SOI) ****	-	0,2 - 0,3 °C	Episodisch (Monate)

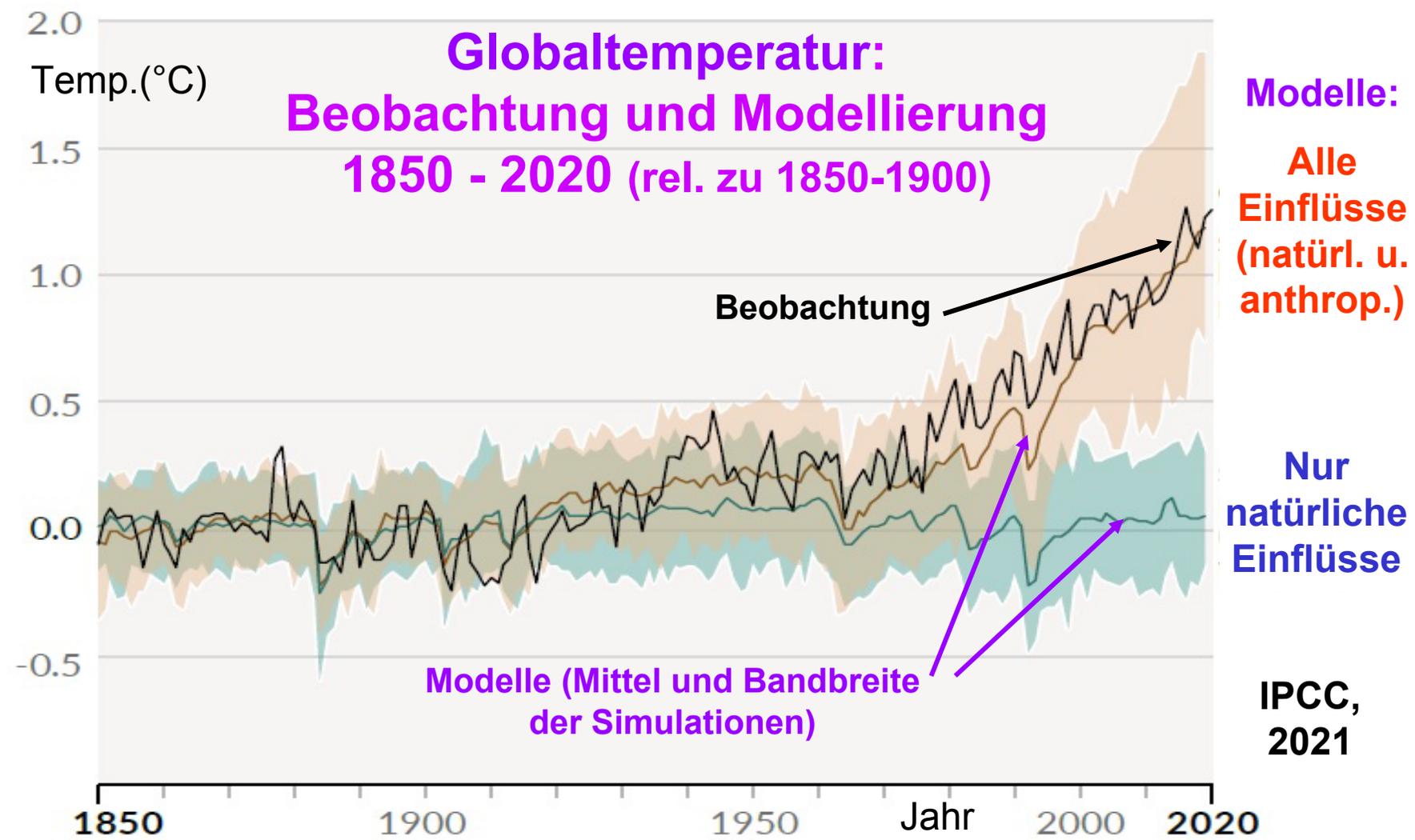
* Global gemittelte bodennahe Lufttemperatur, Analyse mittels neuronaler Netze (Schönwiese et al., 2010); das kombinierte Signal 1850 - 2020 liegt nach IPCC (2021) mittlerweile bei ca. 1,2 °C

** Pinatubo-Ausbruch 1991: 2,4 Wm⁻², 1992: 3,2 Wm⁻², 1993: 0,9 Wm⁻² (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)



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 ($\pm 0,2 \text{ }^\circ\text{C}$) sind natürlich.

Und die Zukunft?

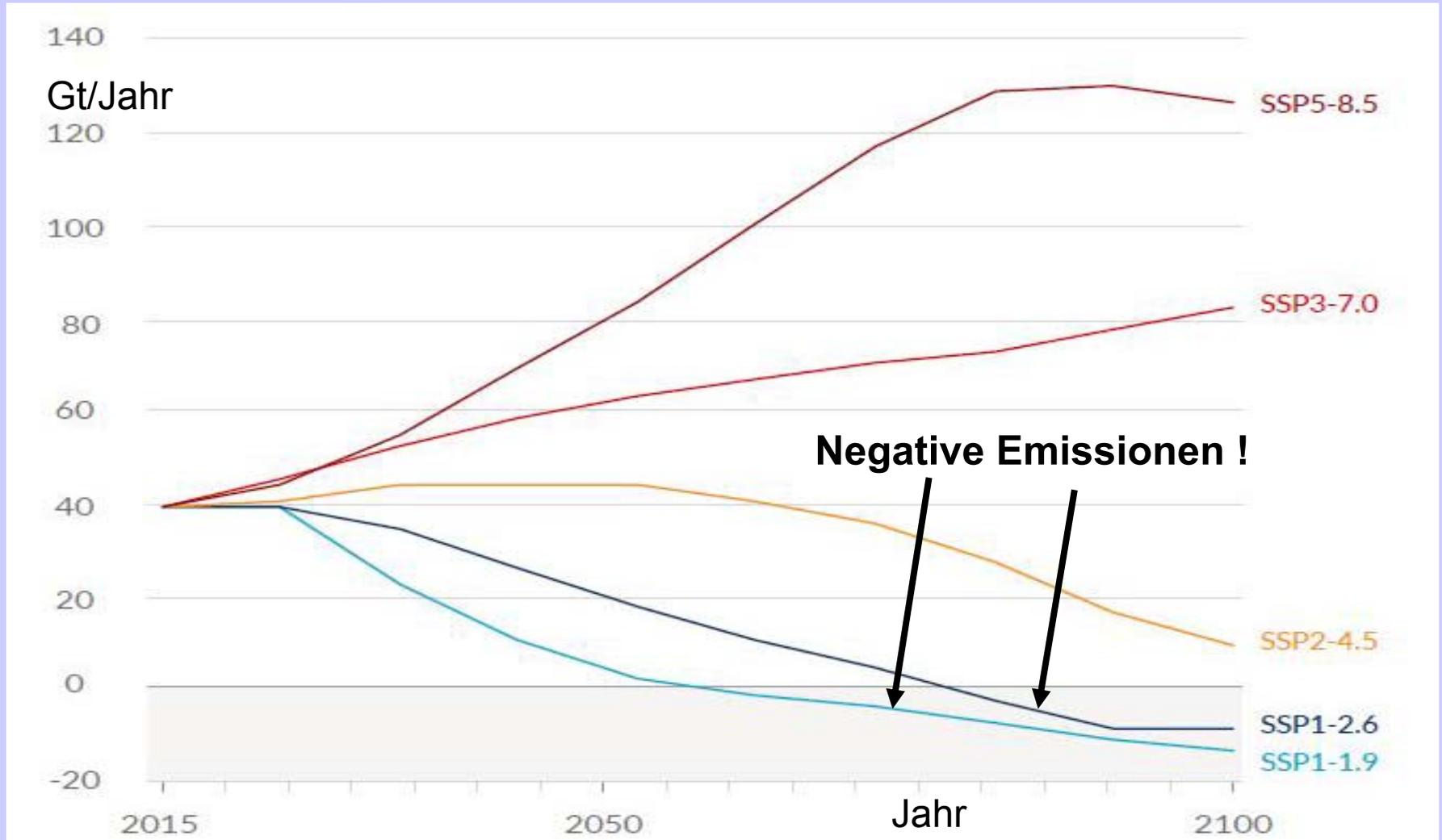
Klimaprognosen, vergleichbar den Wetterprognosen, sind prinzipiell nicht möglich, da

- 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

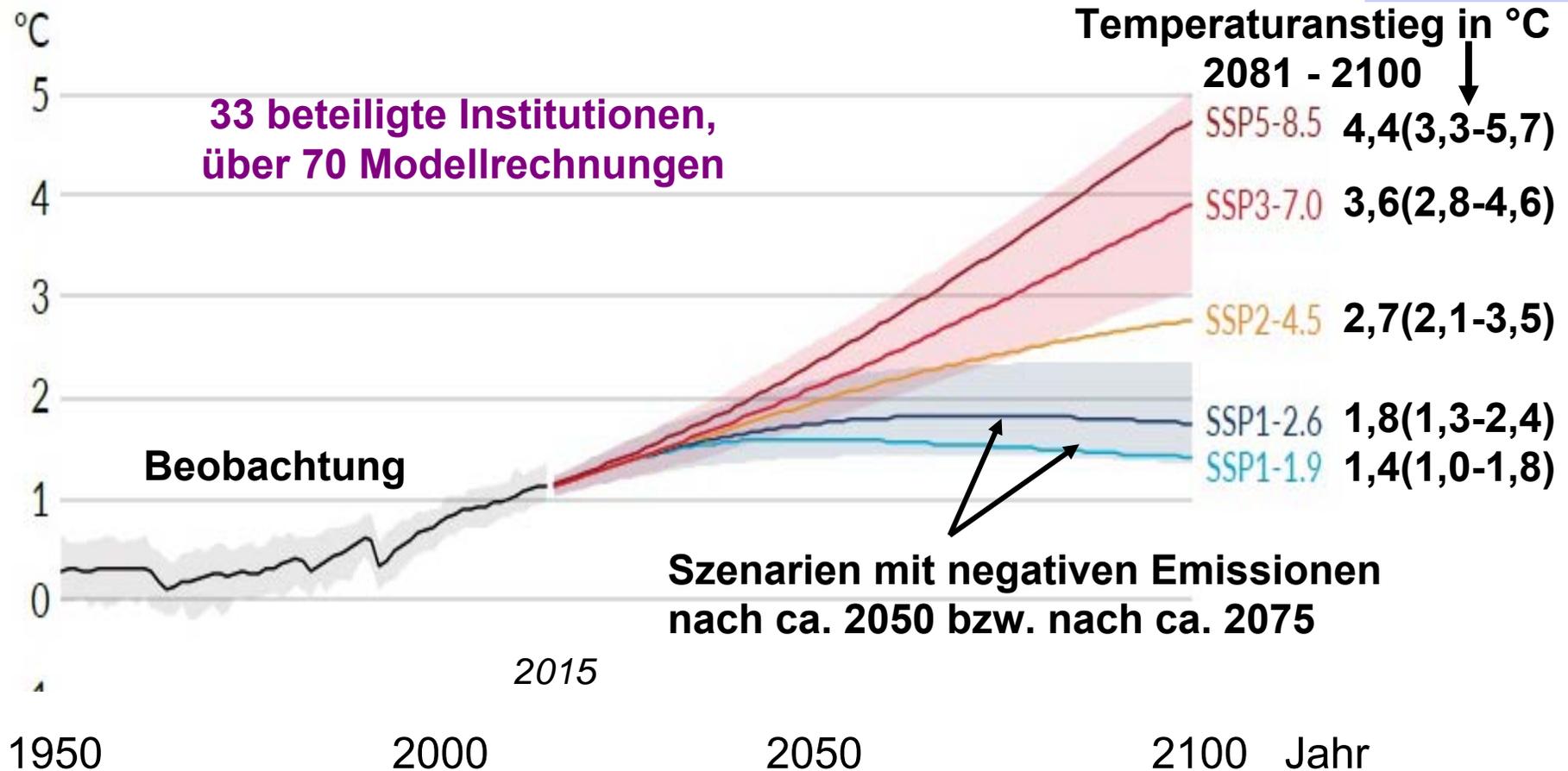
- unter der Annahme, dass der menschliche Einfluss (insbesondere durch Treibhausgase) dominiert
- und aufgrund alternativer Szenarien des in Zukunft möglichen menschlichen Verhaltens, insbesondere hinsichtlich der Treibhausgas-Emissionen.

Szenarien der globalen CO₂- 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⁻²) 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^{-2}
(„Treibhausgase“ abzüglich Partikel-Effekt)**

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

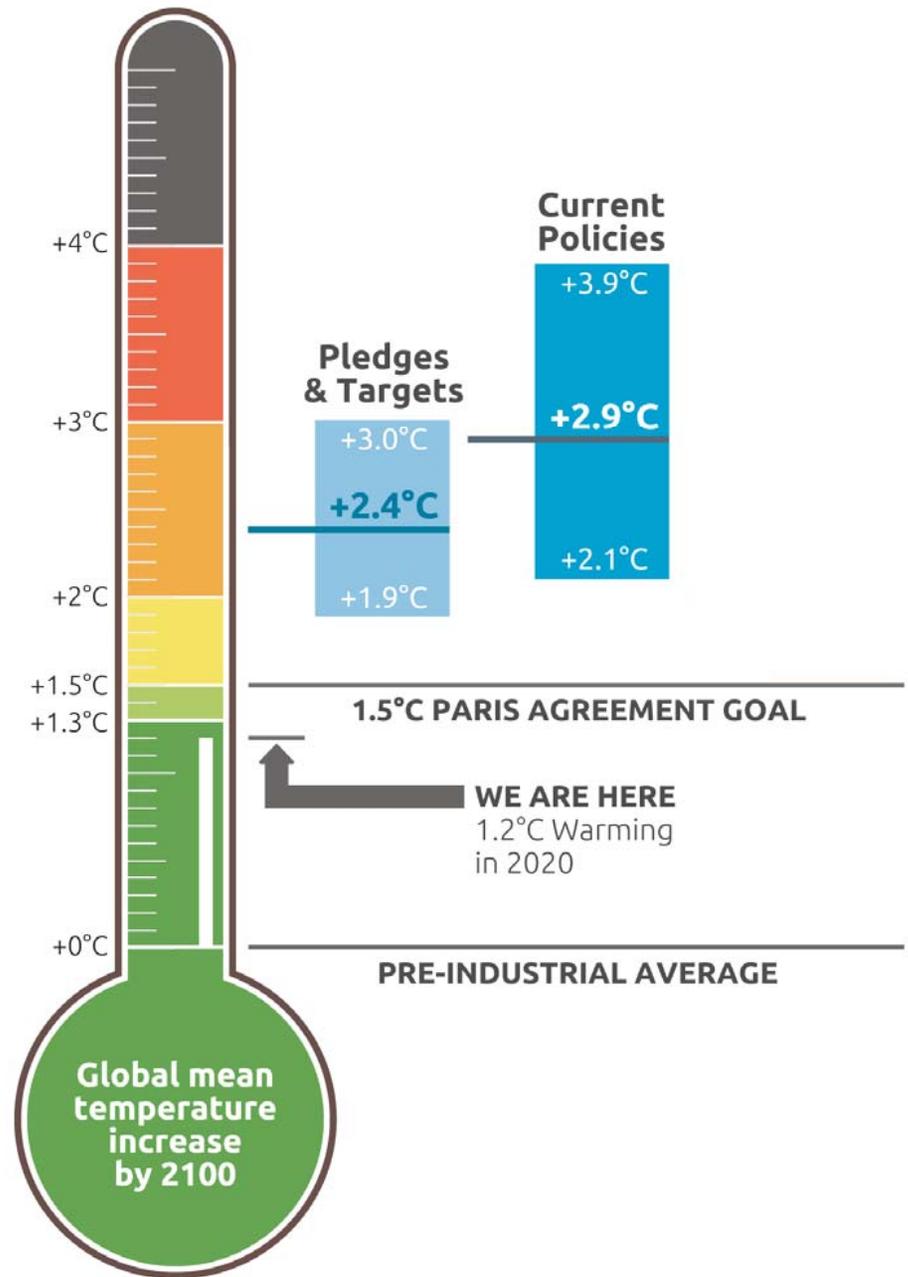
- Rasante weitere Erwärmung der unteren Atmosphäre: global bis 2100 um 2,1 - 5,7 °C, wahrscheinlichster Bereich ca. 3 - 4 °C, aber regional sehr unterschiedlich.
- Weitere Abkühlung der Stratosphäre (begünstigt den dortigen Ozonabbau, erschwert Schutzmaßnahmen)
- Niederschlagsumverteilungen (z.B. Mittelmeer-Region 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\$

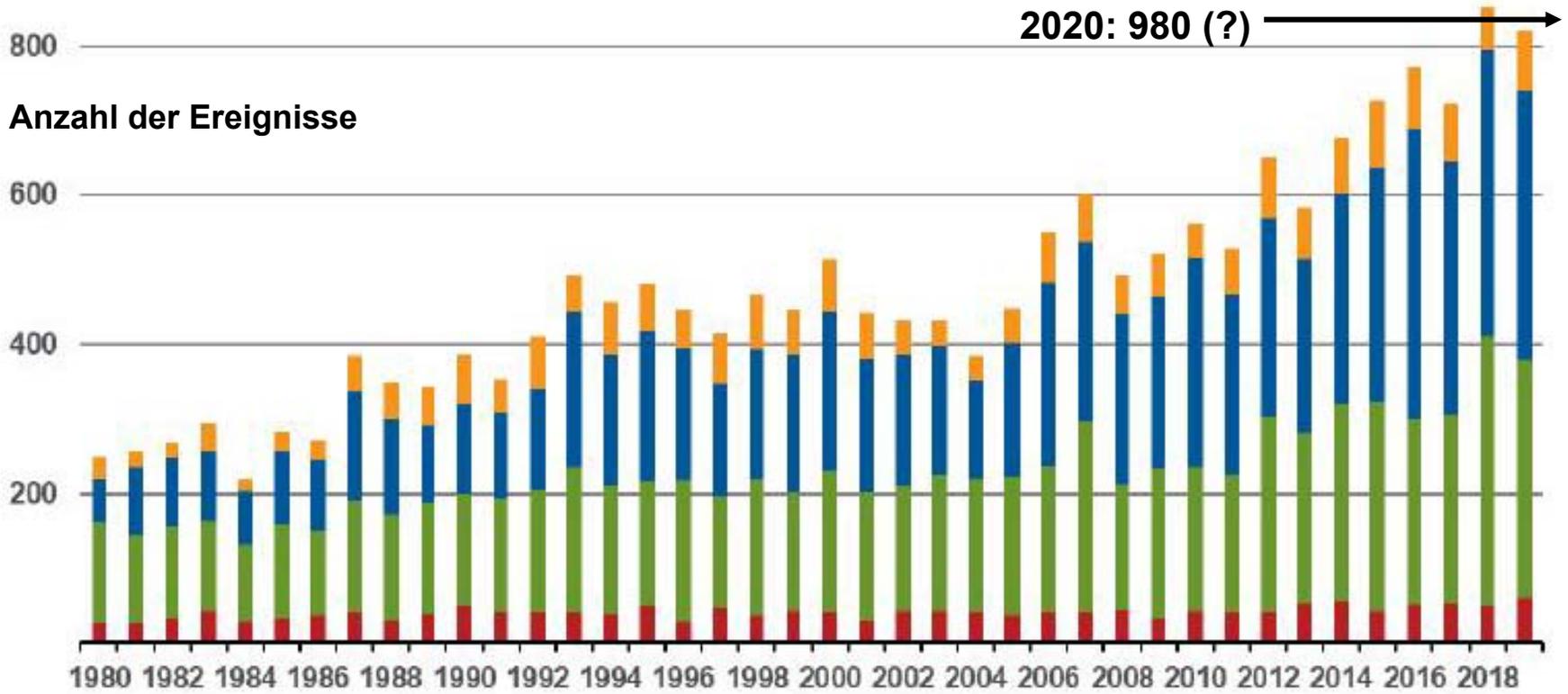
Tornado, Luzice u.a., CSR, Juni 2021



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

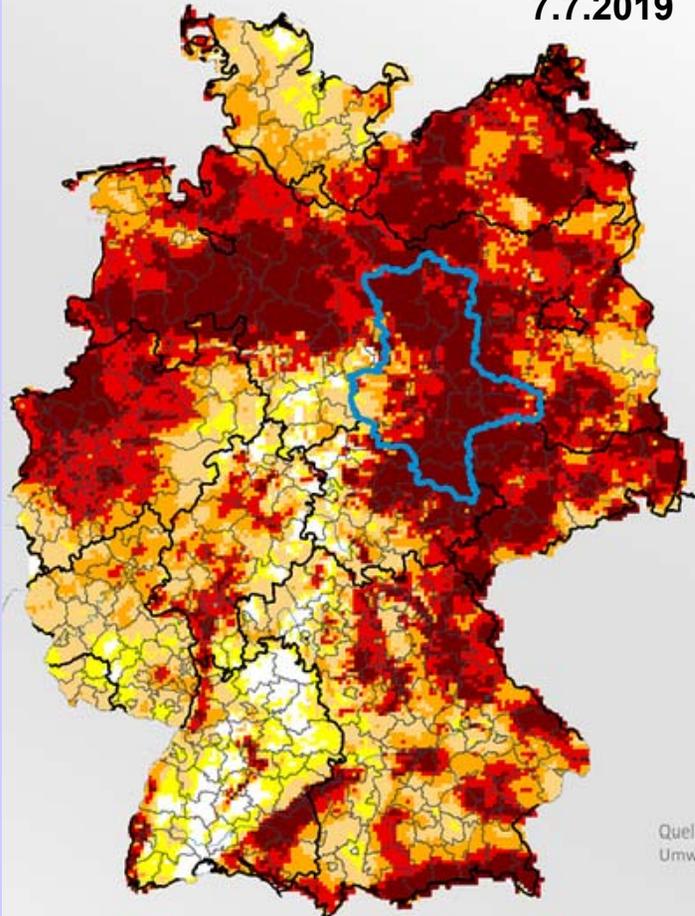
■ Meteorologische Ereignisse:
Tropischer Sturm, außertropischer Sturm, konvektiver Sturm, lokaler Sturm

■ Klimatologische Ereignisse:
Extremtemperaturen, Dürre, Waldbrand

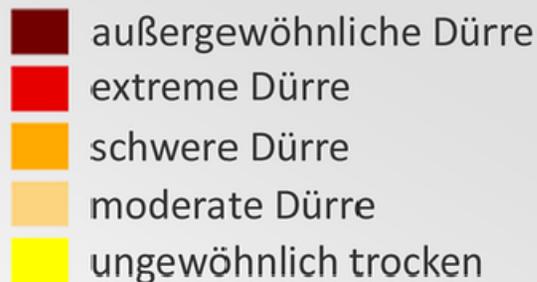
Quelle: MüRück, NatCatService, 2021

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

7.7.2019



UFZ - Dürremonitor, Leipzig



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%)



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.),

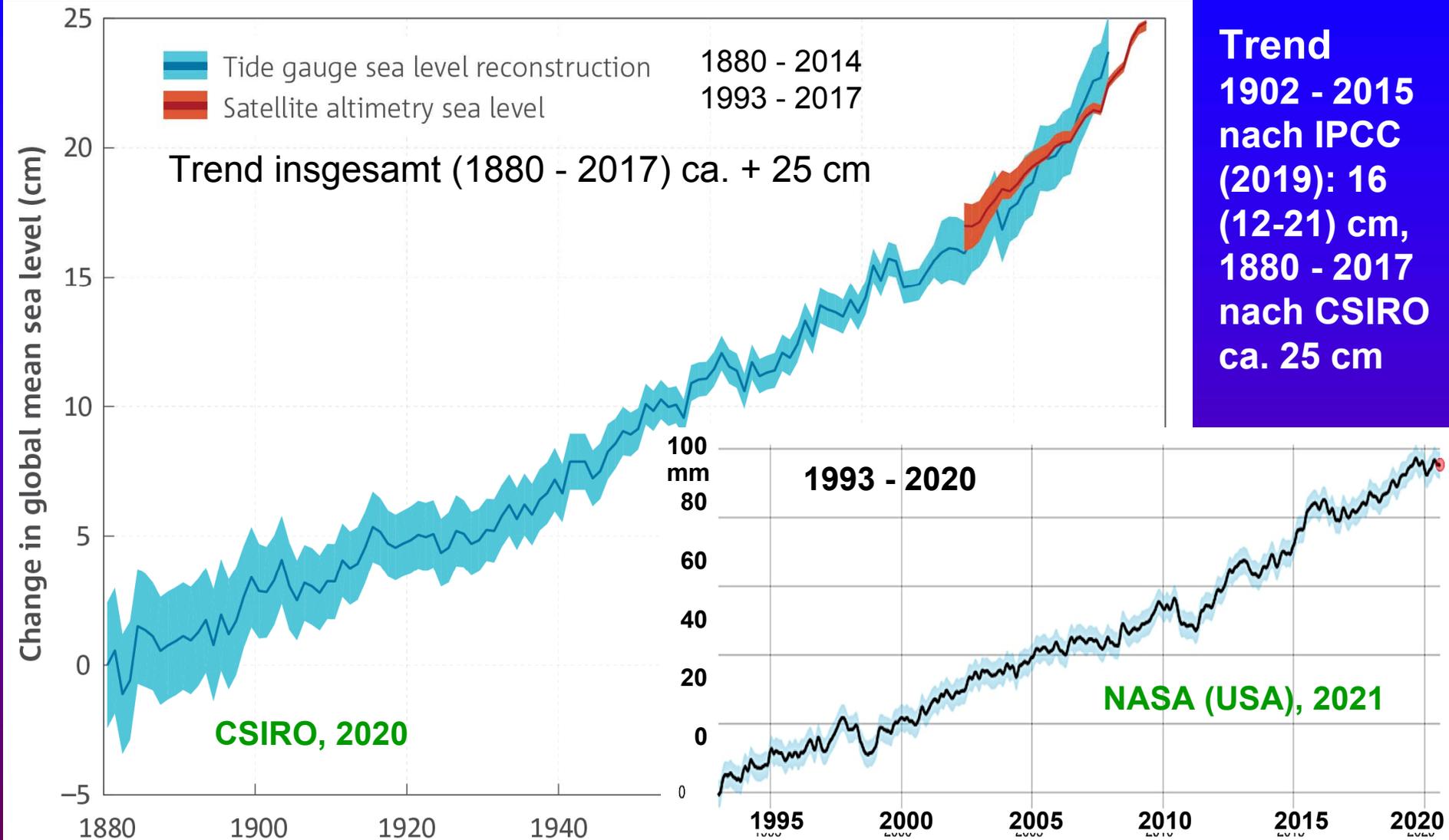
weitaus überwiegend aber negativ:

- 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 CO₂: 85 US \$/Jahr (▶ 37 Mrd. t CO₂ ▶ 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 (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. Klimaschutzgesetz, Novelle vom 12.4.2021: CO₂-Emissionsreduktion um 65 % → 2030, 88 % → 2040, rel. zu 1990; Klimaneutralität bis 2045; spezielle Maßnahmen u.a. CO₂-Bepreisung, „Kohleausstieg“ bis 2038**

A satellite-style image of Earth, showing the African continent and surrounding oceans. The image has a dark, textured overlay, possibly representing a data visualization or a stylized representation of the planet. The text is overlaid on the image.

Vielen Dank
für Ihr Interesse

Christian-D. Schönwiese

Klimawandel kompakt

Ein globales Problem
wissenschaftlich erklärt

3. aktualisierte Auflage

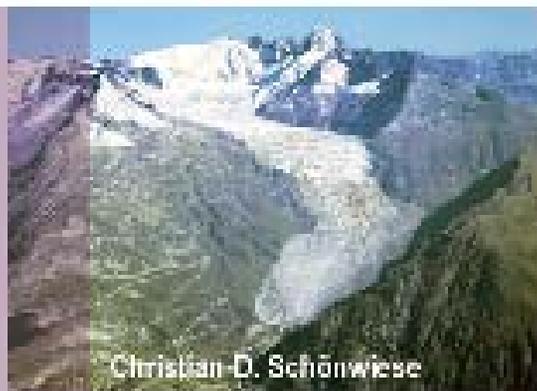
2020. V, 132 Seiten, 34 Farbabb., 11 Tab., 21 x 15 cm, Broschur

ISBN 978-3-443-01169-7 19.90 €

Borntraeger-Verlag, Stuttgart

Homepage des Autors:

www.geo.uni-frankfurt.de/iau/klima



Christian-D. Schönwiese

Klimawandel kompakt

3. aktualisierte
Auflage

Ein globales Problem
wissenschaftlich erklärt



Borntraeger