

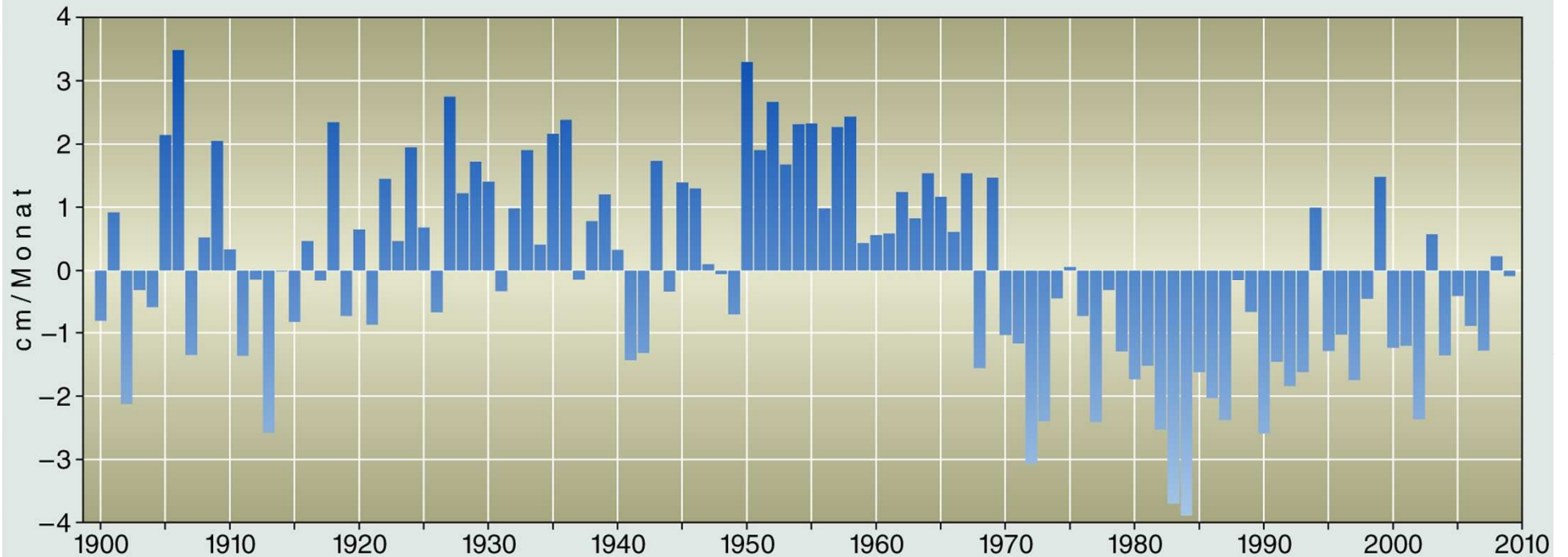
17.05.2019

Prof. Dr. Dieter Anhuf

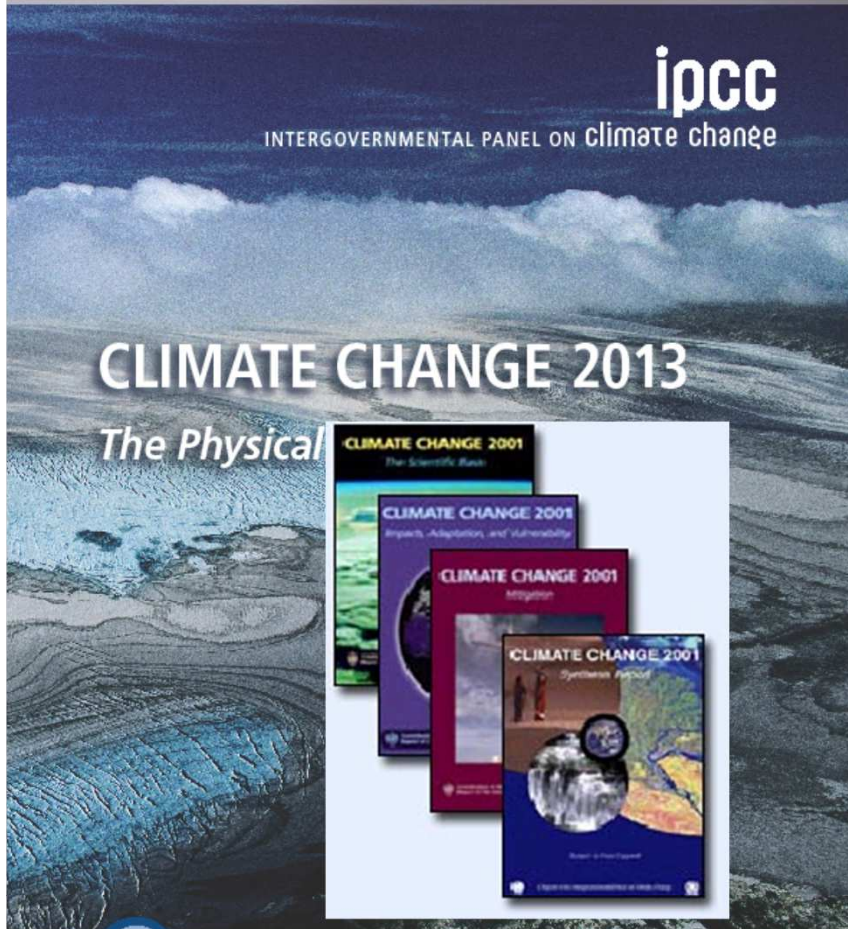
# Klimawandel

## Natürliche Steuerung und menschliche Eingriffe

Die Zukunft: zwischen Klimawandel und künstlicher Intelligenz.  
(Wie) wollen wir leben?

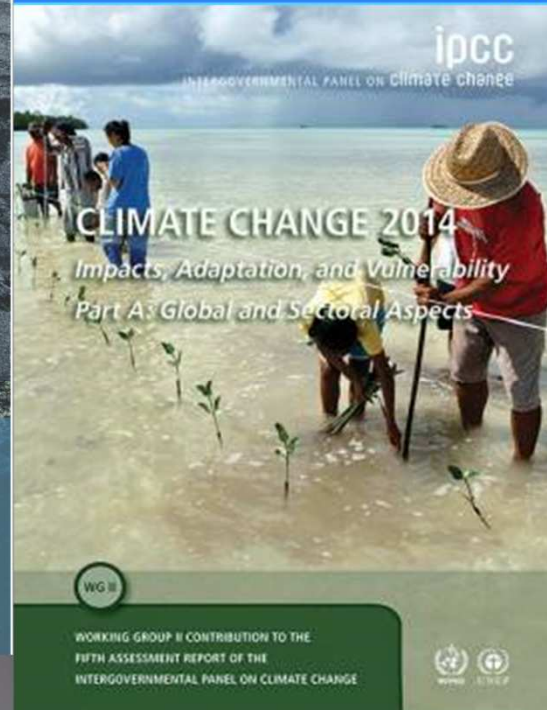
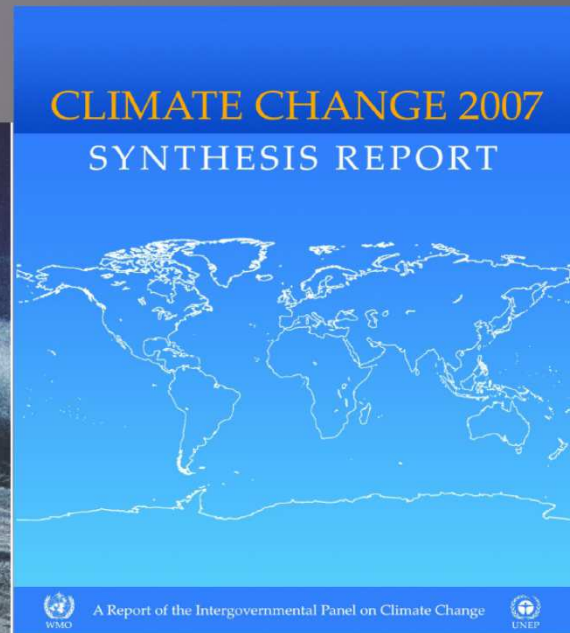


Abweichungen der jährlichen Niederschlagsmengen (Juni-Oktober) vom Mittelwert im Sahel von 1900 - 2009 (Einheit: cm / Monat)  
([http://jisao.washington.edu/data\\_sets/sahel/](http://jisao.washington.edu/data_sets/sahel/))



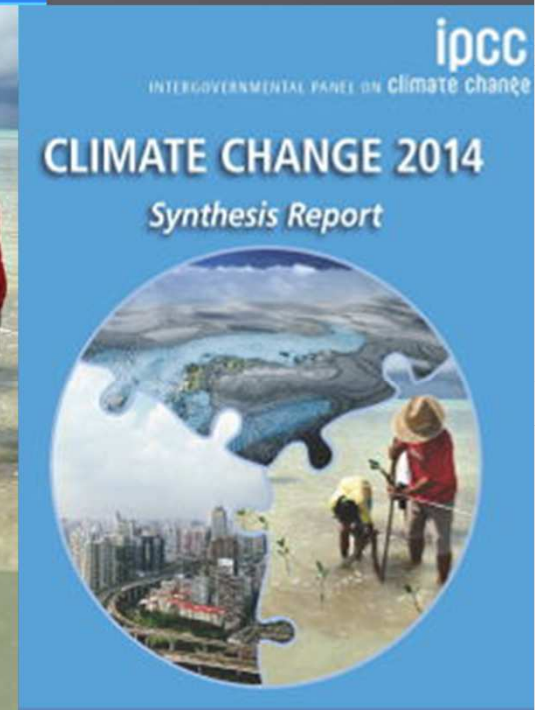
WG I

WORKING GROUP I CONTRIBUTION TO THE  
FIFTH ASSESSMENT REPORT OF THE  
INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE

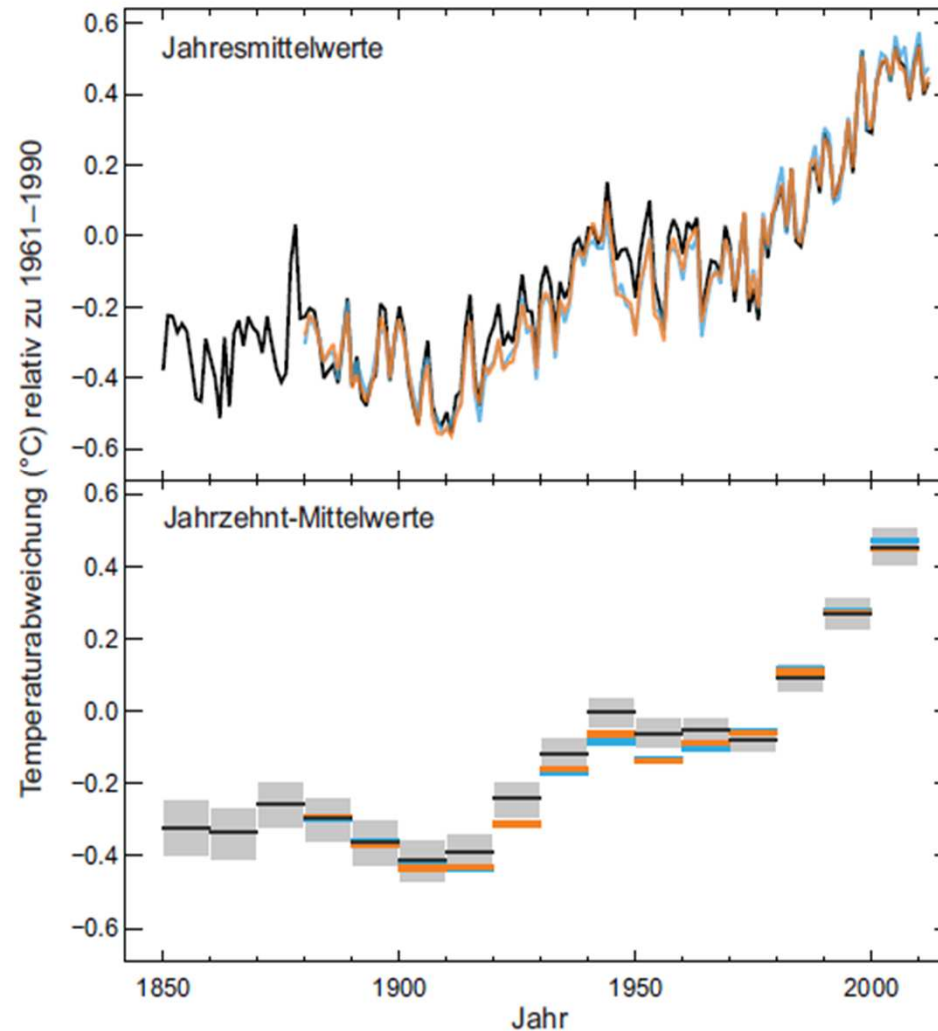


WG II

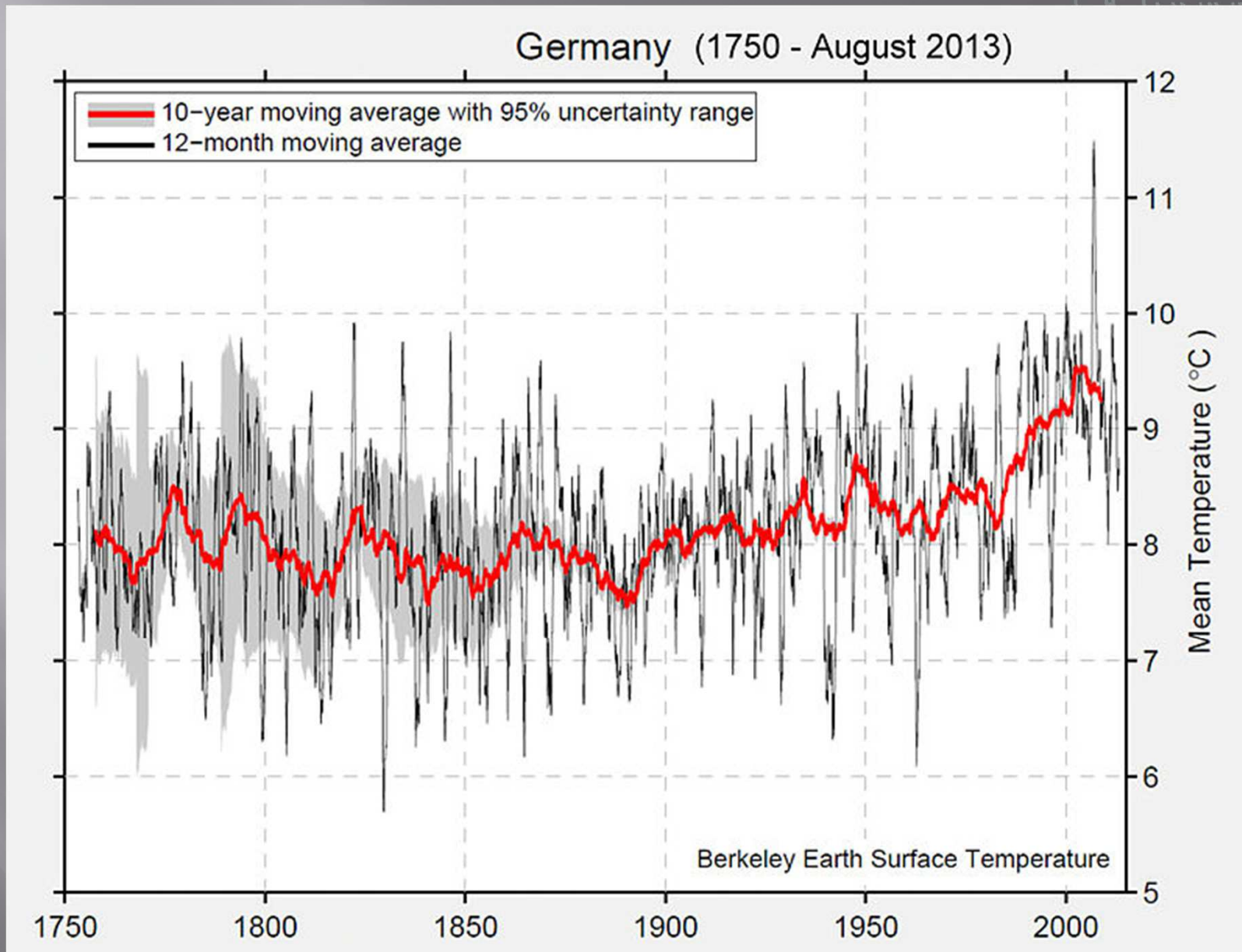
WORKING GROUP II CONTRIBUTION TO THE  
FIFTH ASSESSMENT REPORT OF THE  
INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE



(a) Beobachtete globale mittlere kombinierte Land- und Ozean-Oberflächentemperaturabweichung 1850–2012



Beobachtete Änderungen der mittleren globalen Erdoberflächentemperatur. Die Änderungen beziehen sich auf das Mittel des Zeitraums 1961–1990. (IPCC 2013, S. 4)

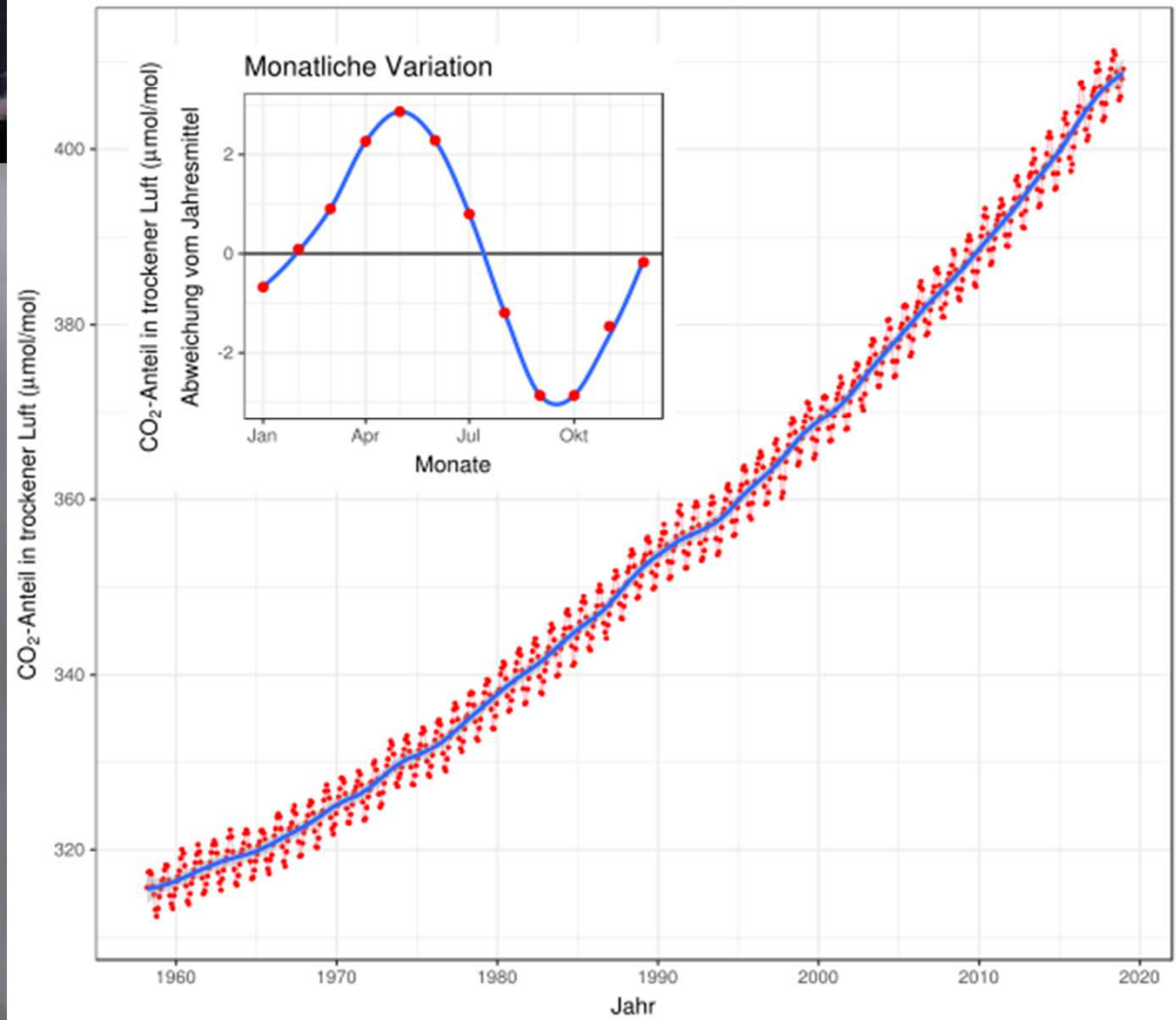


Daten vom DWD; <http://berkeleyearth.lbl.gov/regions/germany>



### Monatliche durchschnittliche CO<sub>2</sub>-Konzentration

Mauna Loa 1958 - 2018



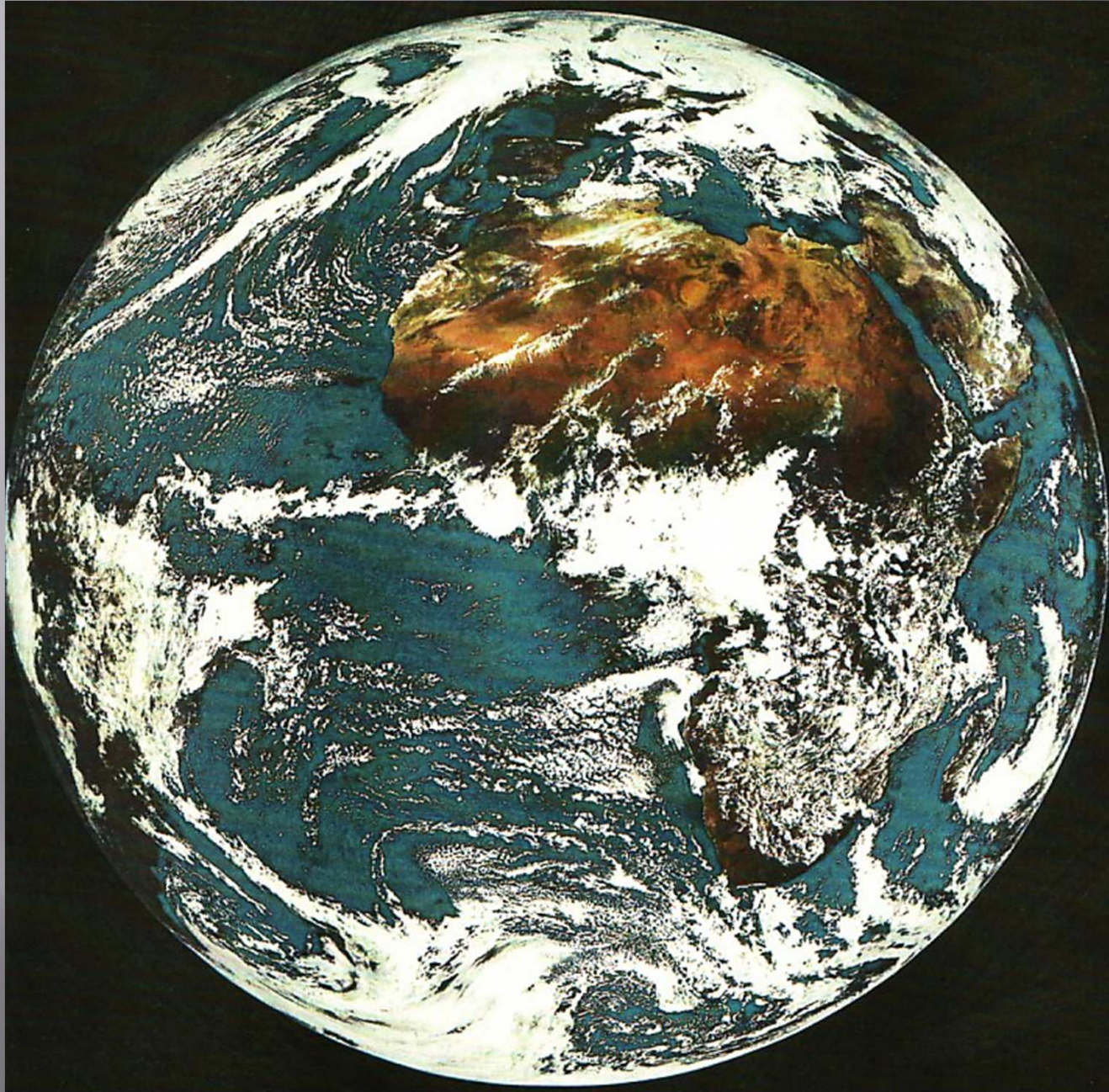
Quelle: R. F. Keeling, S. J. Walker, S. C. Piper und A. F. Bollenbacher  
Scripps CO<sub>2</sub> Program (<http://scrippsco2.ucsd.edu>). Zugänglich am 2019-01-06

	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O	FCKW	tropos. O <sub>3</sub>
Prozentanteil der anthropogenen Emissionen am gesamten Stofffluss in die Atmosphäre	5	70	40	100	?
mittlere Lebenszeit in Jahren nach anthropogener Emission	50-200	15	120	100	0,15
relatives Treibhauspotential für einen Zeithorizont von 100 Jahren	1	25	300	>4000	<2000
Prozentanteil am natürlichen Treibhauseffekt	22	2	4	—	8
Prozentanteil am anthropogenen Treibhauseffekt	60	15	4	11	8

**Tab. 1: Charakteristika wichtiger Treibhausgase (nach Schönwiese, 2003 und IPCC, 2007).**

aus: Endlicher, W. & Gerstengarbe, F.-W. (2007), S.10

## Die Erde aus dem All

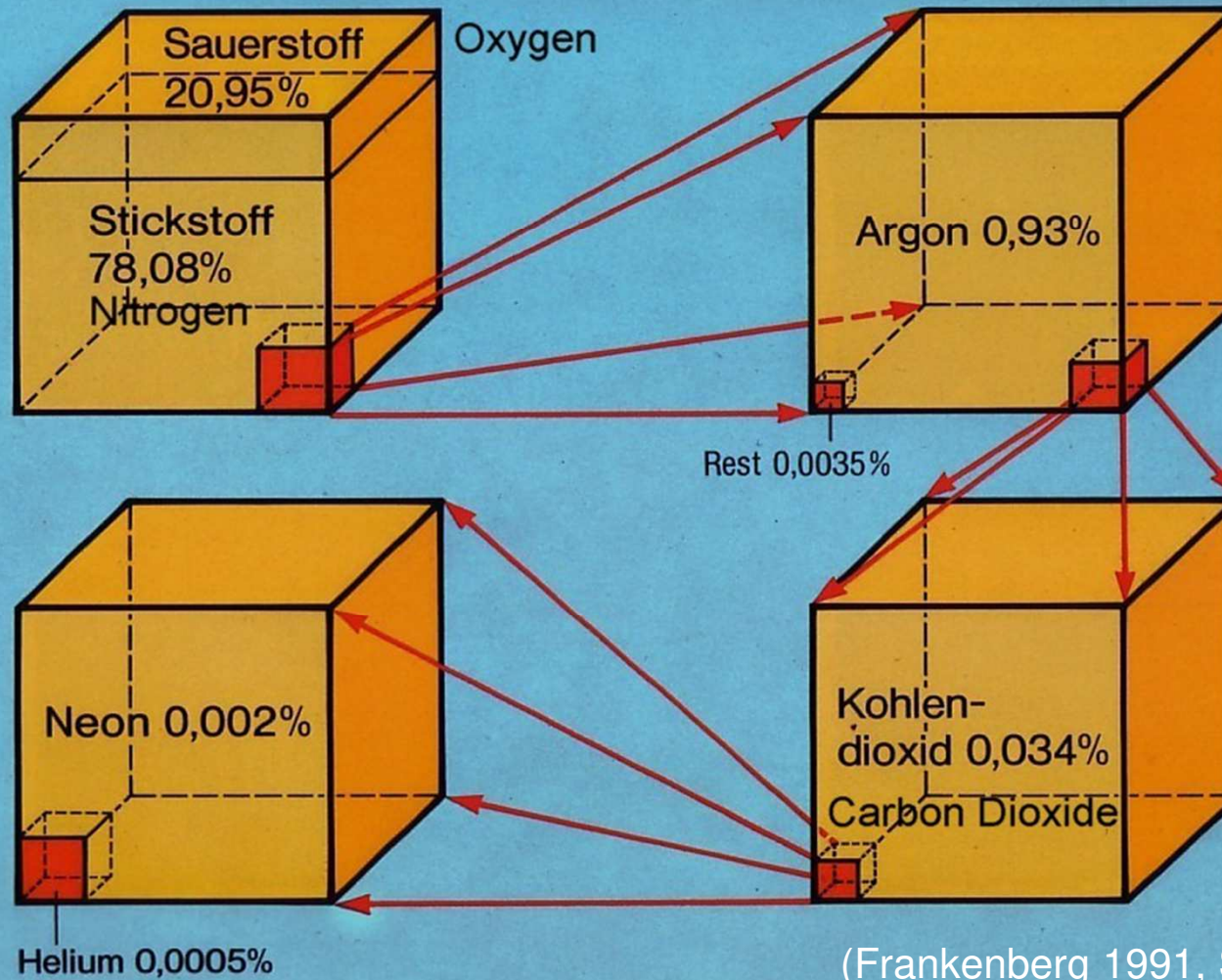


(NOAA)

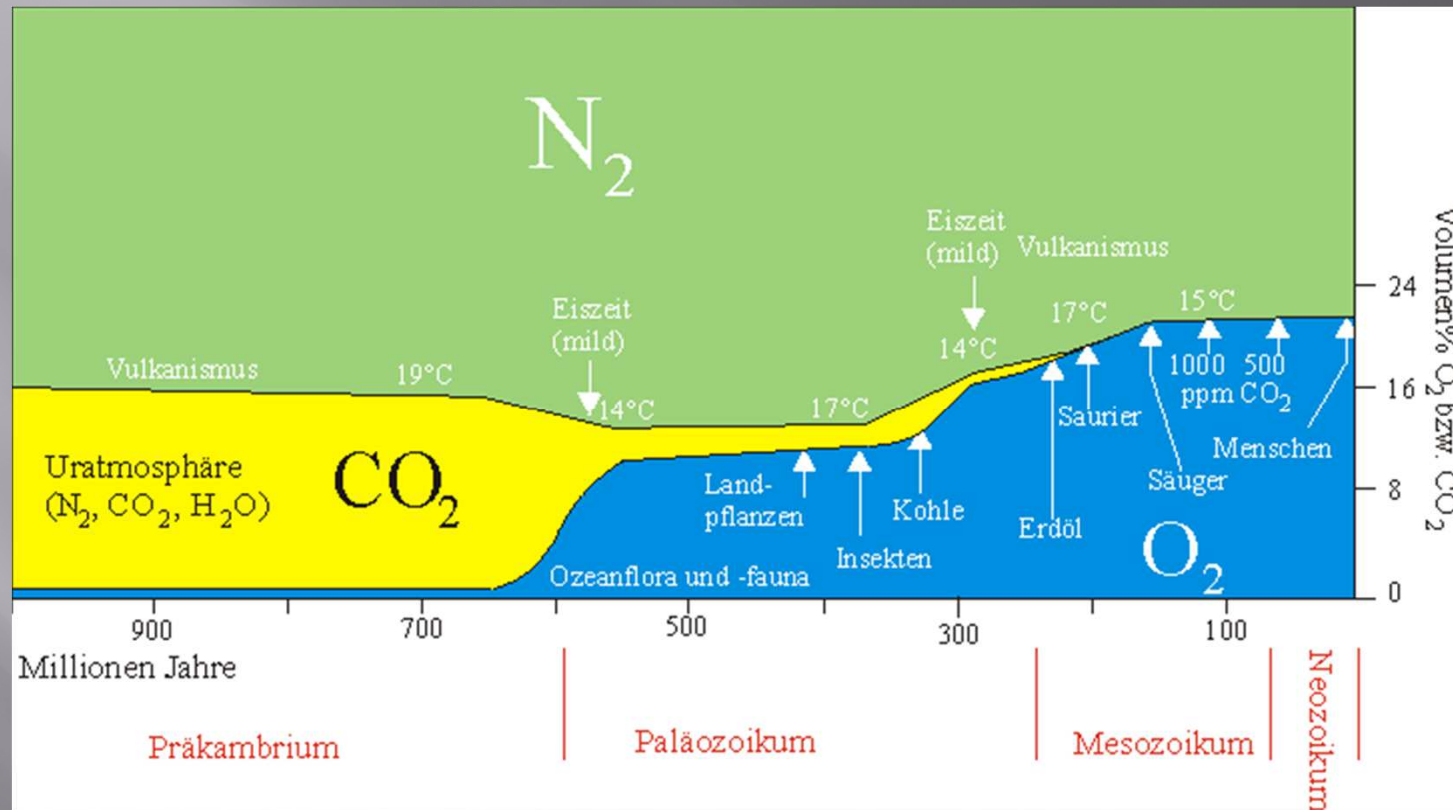


## Zusammensetzung der Luft (Volumenanteil in %)

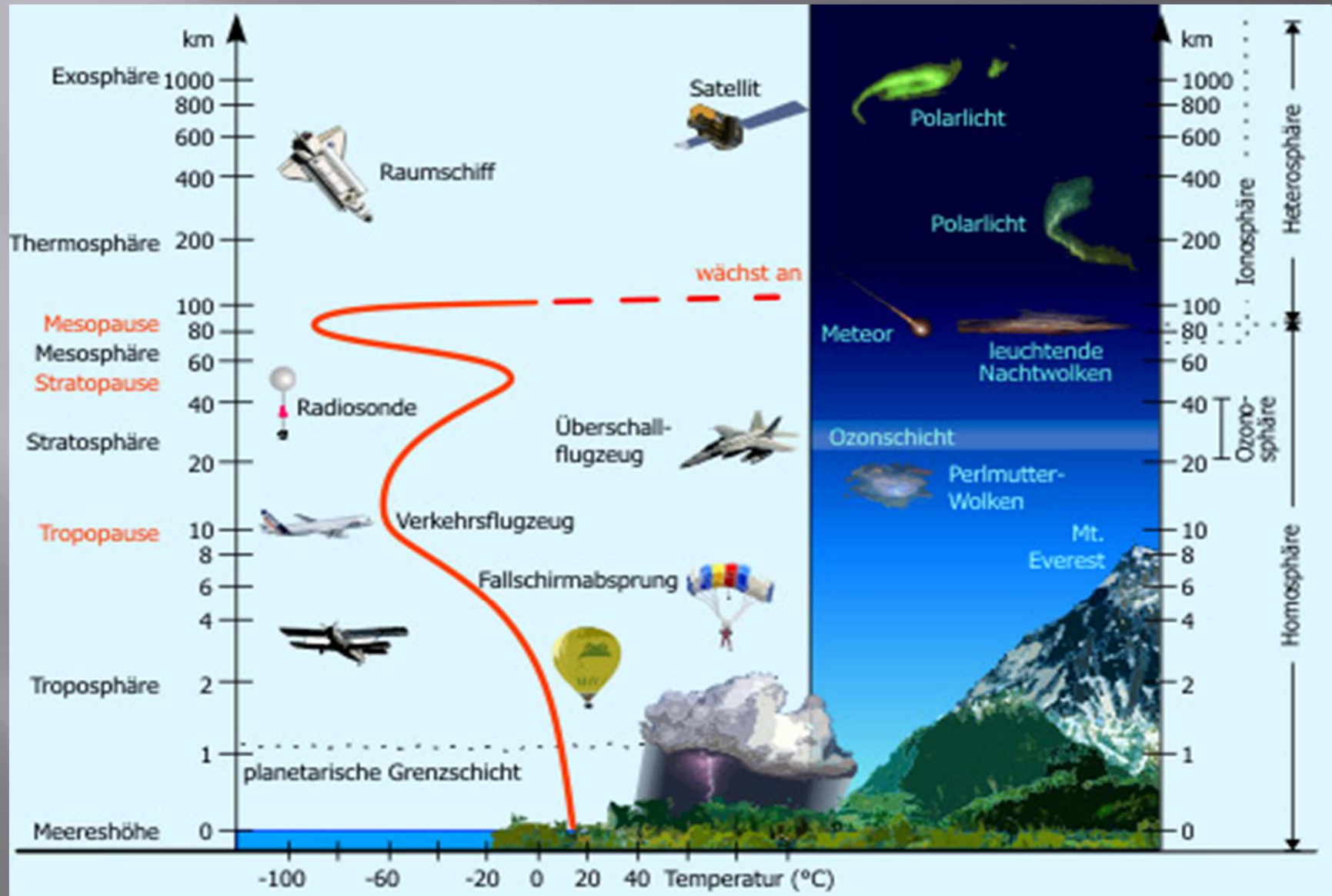
Chemical composition of the air (volume in %)



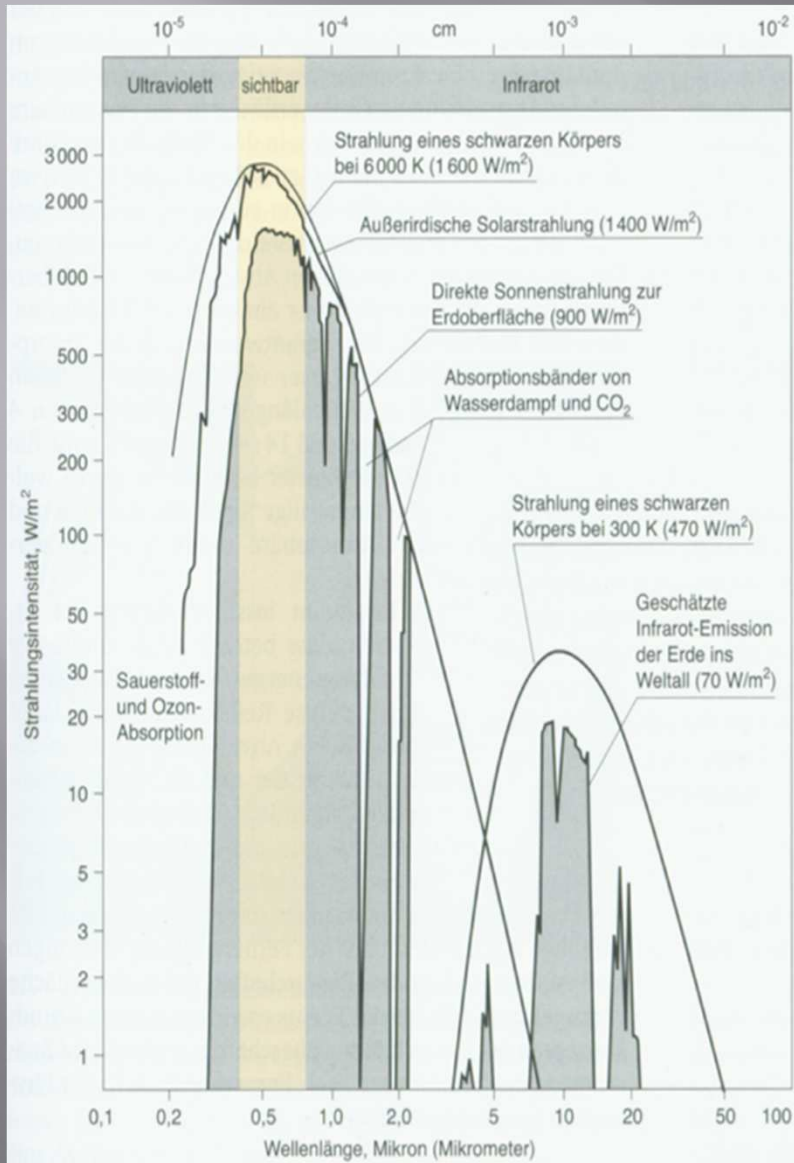
(Frankenberg 1991, S. 18)



# Der vertikale Aufbau der Atmosphäre



([www.kowoma.de](http://www.kowoma.de))

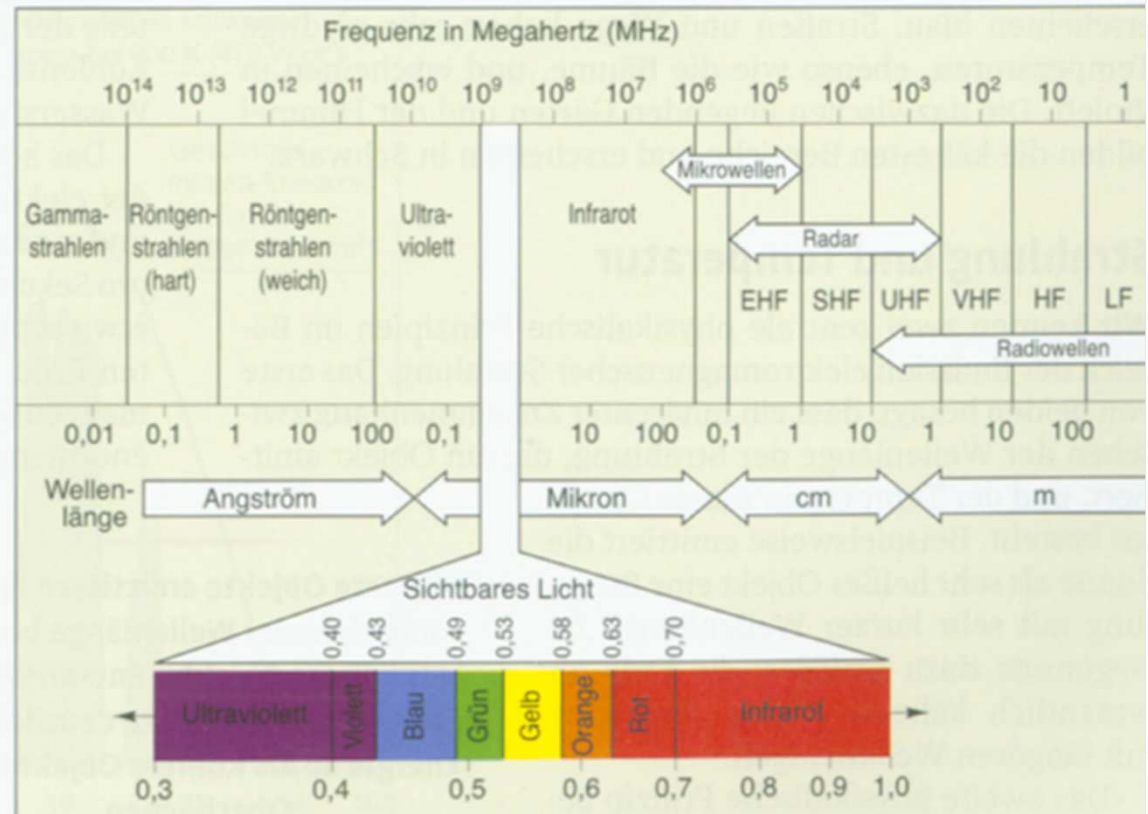


**2.4 Spektren der Solarstrahlung und der langwelligen Strahlung der Erde** Die Abbildung zeigt die von der Sonne ausgesendete kurzwellige Strahlung (linke Seite) und die langwellige Strahlung, die von der Erdoberfläche und der Erdatmosphäre emittiert wird (rechte Seite). (Nach W. D. Sellers, *Physical Climatology*, mit Genehmigung der University of Chicago Press.)

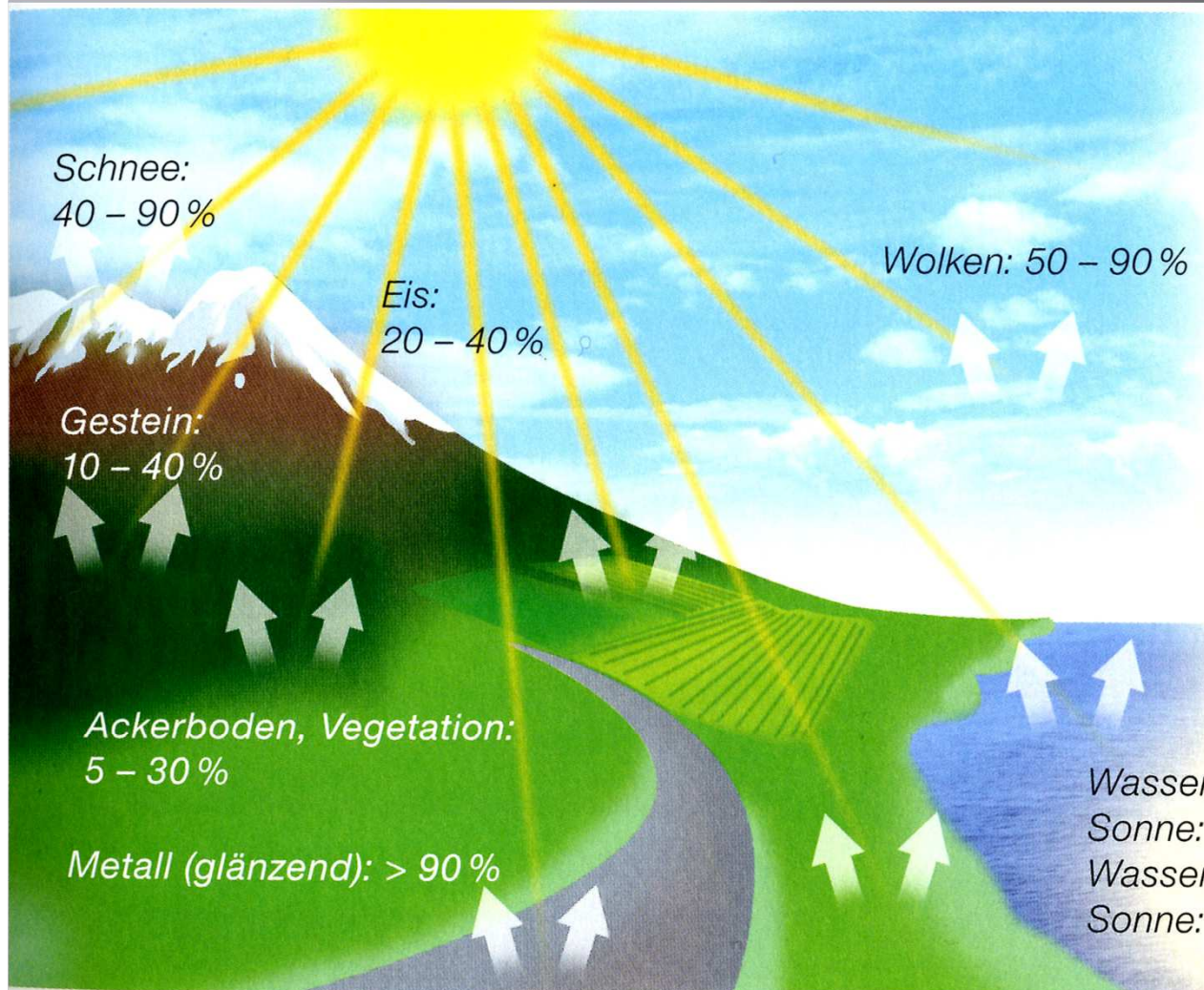
## Das elektromagnetische Energiespektrum

(Strahler 2009, S. 71)

**2.2 Das elektromagnetische Spektrum** Elektromagnetische Strahlung existiert in allen Wellenlängen. Normalerweise werden bestimmten Wellenlängenbereichen Namen zugeordnet, wie sie dieser Abbildung zu entnehmen sind.



(Strahler 2009, S. 69)

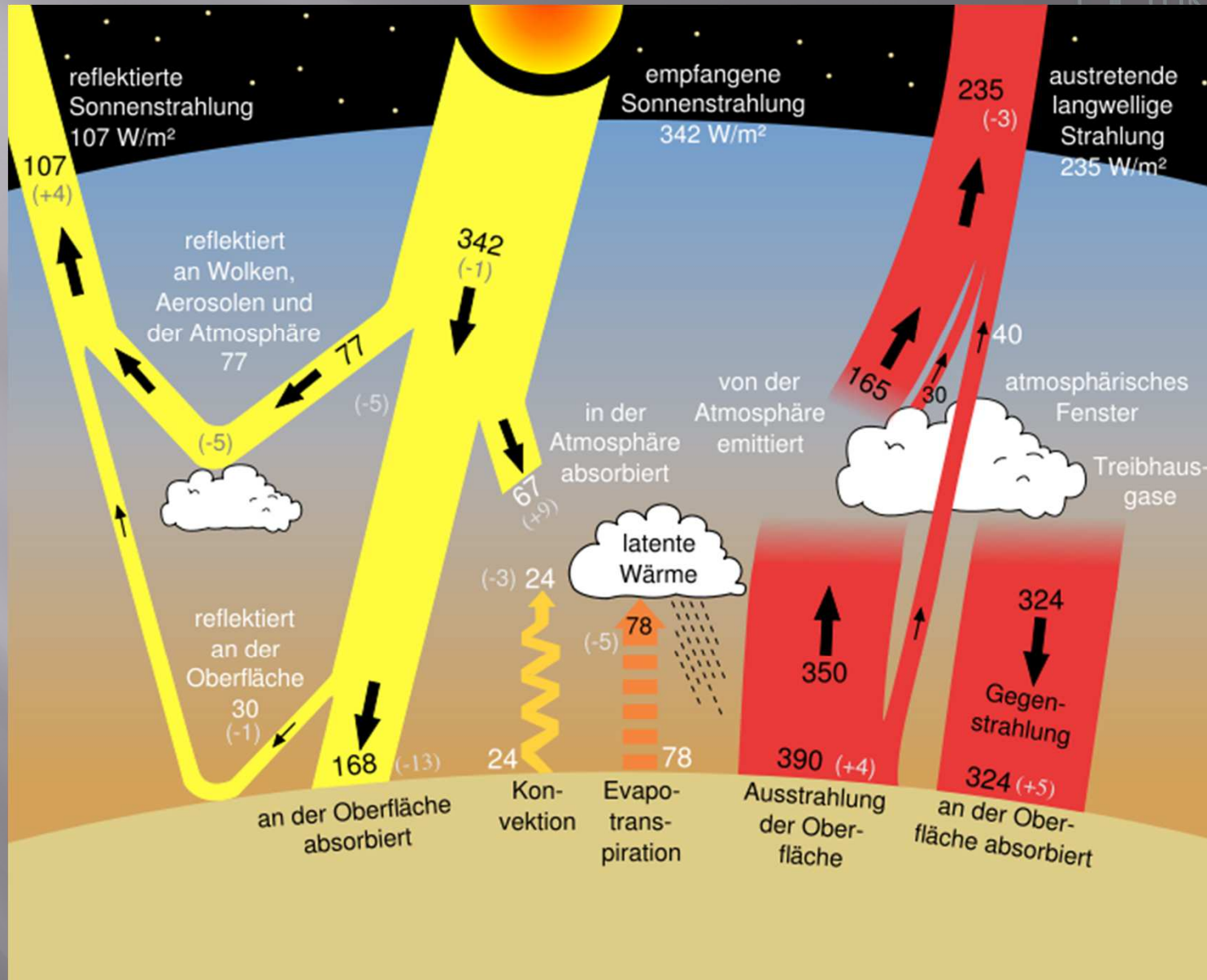


## ALBEDO $\alpha$ („DIFFUSE REFLEKTIVITÄT“)

Abb. 28: Über die gesamte Erde (Erdoberfläche und Atmosphäre) gemittelt ergibt sich als Richtwert für die Rückstreuung einfallender Sonneneinstrahlung:

$$\alpha = 30 - 33 \% \\ = 0,3 - 0,33$$

Buchal, Ch., Schönwiese, Ch.-D. (2010): Klima - Die Erde und ihre Atmosphäre im Wandel der Zeiten. Gütersloh. S. 69.



verändert nach IPCC 2001: aus The Scientific Basis, S. 90

# Strahlungsabsorption wichtiger atmosphärischer Gase

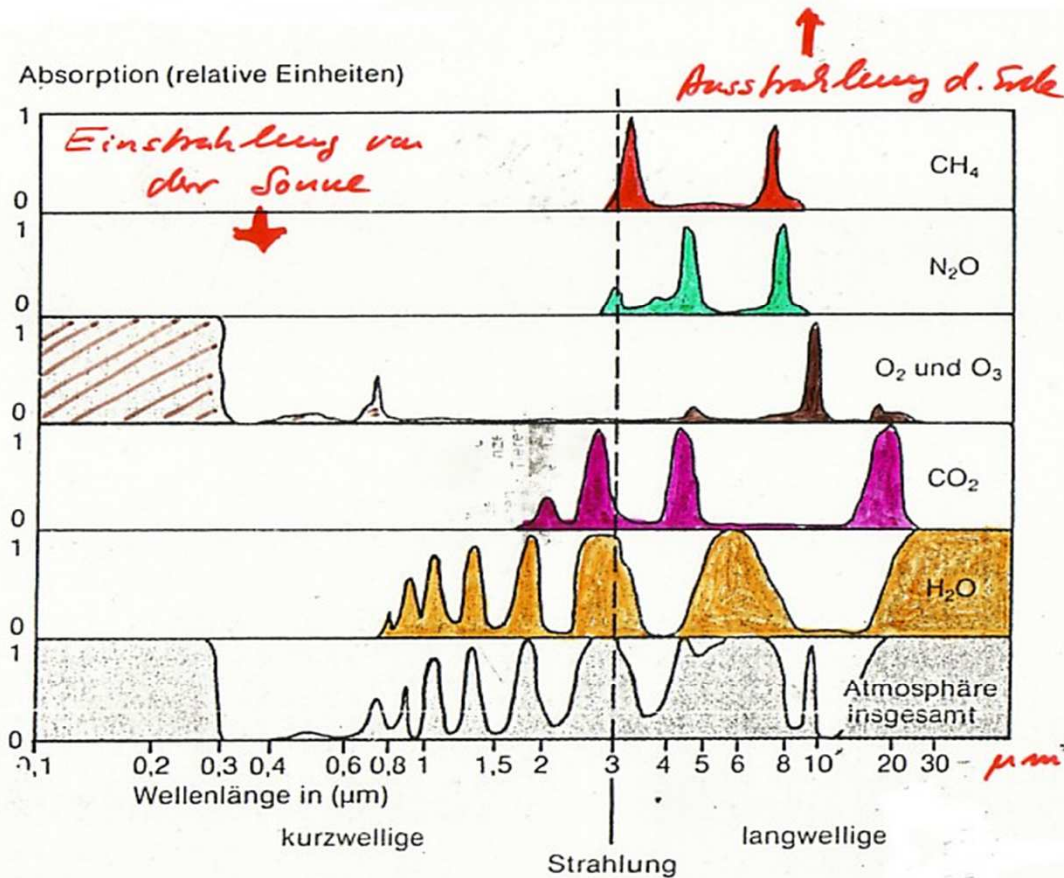
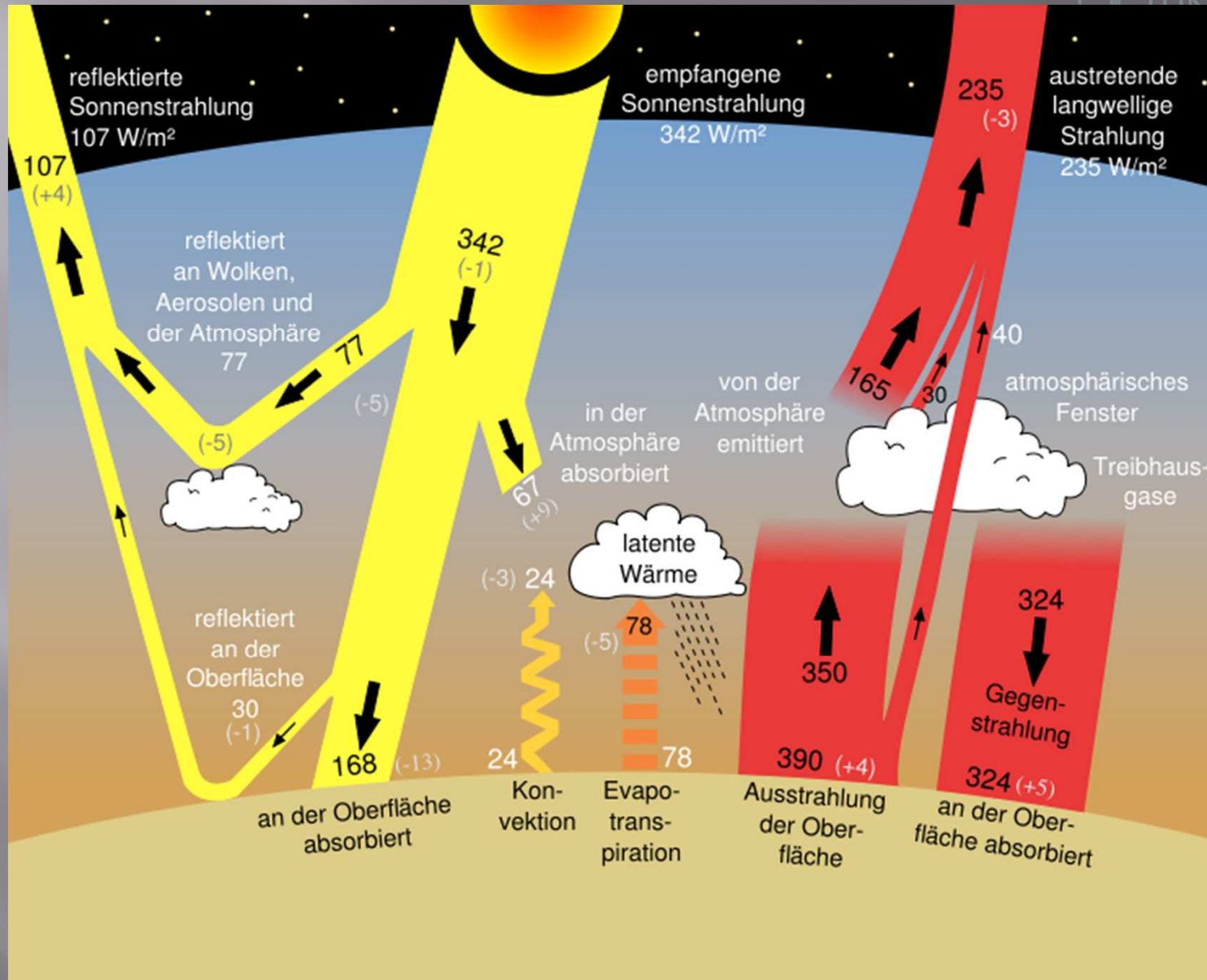


Abb. 42. Strahlungsabsorption wichtiger atmosphärischer Gase und der gesamten Atmosphäre (nach FLEAGLE und BUSINGER 1963, ergänzt nach Angaben bei MÖLLER 1973).

Quelle: Häckel (1985): 138

(Häckel 1985, S. 138)





verändert nach IPCC 2001: aus The Scientific Basis, S. 90

**TAB. 2: DIE BEITRÄGE DER WICHTIGSTEN SPURENGASE ZUM NATÜRLICHEN TREIBHAUSEFFEKT (33 °C)**

Molekül	Konzentration	Effektive Temperaturerhöhung	Relativer Beitrag zum natürl. Treibhauseffekt
<b>H<sub>2</sub>O</b>	<b>2,6 %</b>	<b>20 °C</b>	<b>60 %</b>
<i>Sehr stabiles Molekül, auch als Dampf theoretisch unbegrenzt verfügbar. Weil der Dampf im thermischen Gleichgewicht mit flüssigem Wasser steht und nach 10 Tagen wieder ausregnet, ist H<sub>2</sub>O ungefährlich. Zusätzlicher Wasserdampf von der durch den Treibhauseffekt erwärmten Erdoberfläche und aus den Meeren verstärkt die Wirkung der anderen Spurengase. Für eine „explosionsartige Selbstverstärkung“ des Wasserdampf-Treibhauseffektes durch Dampfbildung aus den Ozeanen ist die Erde aber viel zu kalt.</i>			
<b>CO<sub>2</sub></b>	<b>387 ppm = 0,0387 %</b>	<b>8,6 °C</b>	<b>26 %</b>
<i>Sehr stabiles Molekül, Partner verschiedener Kohlenstoffkreisläufe. Verbleib in der Luft: ca. 10 Jahre in biologischen Kreisläufen, aber sicher weit über 100 Jahre bei der Verbrennung fossiler Energieträger. Man schätzt, dass eine Verdopplung der CO<sub>2</sub>-Konzentration zu einer Temperaturerhöhung um mindestens 3 °C führt (Naiv würde man sogar für eine Verdopplung einen Temperaturanstieg um weitere 8,6 °C erwarten).</i>			
<b>O<sub>3</sub></b>	<b>0,04 ppm</b>	<b>2,3 °C</b>	<b>7 %</b>
<i>Hochwirksam, obwohl nur in sehr geringer Konzentration vorhanden. O<sub>3</sub> entsteht aus O<sub>2</sub> unter UV-Einwirkung, vgl. Seite 48.</i>			
<b>N<sub>2</sub>O</b>	<b>0,32 ppm</b>	<b>1,3 °C</b>	<b>4 %</b>
<i>„Lachgas“. Es entsteht u. a. bei übermäßiger Stickstoffdüngung und als Nebenprodukt bei Verbrennungsreaktionen. Lebensdauer: 100 Jahre.</i>			
<b>CH<sub>4</sub></b>	<b>1,8 ppm</b>	<b>1 °C</b>	<b>3 %</b>
<i>Methan („Sumpfgas, Erdgas, Faulgas“) entsteht bei vielen biologischen Prozessen, so auch in Reisfeldern und Rindermägen, vgl. S. 155. Hochwirksam, Lebensdauer in der Luft: ca. 12 Jahre.</i>			

### DIE ANTHROPOGENEN EMISSIONEN

Die **anthropogenen Emissionen** bewirken einen Anstieg des Treibhauseffektes. Der resultierende globale Erwärmungstrend beträgt +0,7 °C für den Zeitraum von 1901 bis 2000.

**Dieser Trend über die letzten 100 Jahre beträgt für Deutschland +1 °C.**

Zu diesem Temperaturanstieg von 1 °C trugen die anthropogenen Spurengasemissionen wie folgt bei:

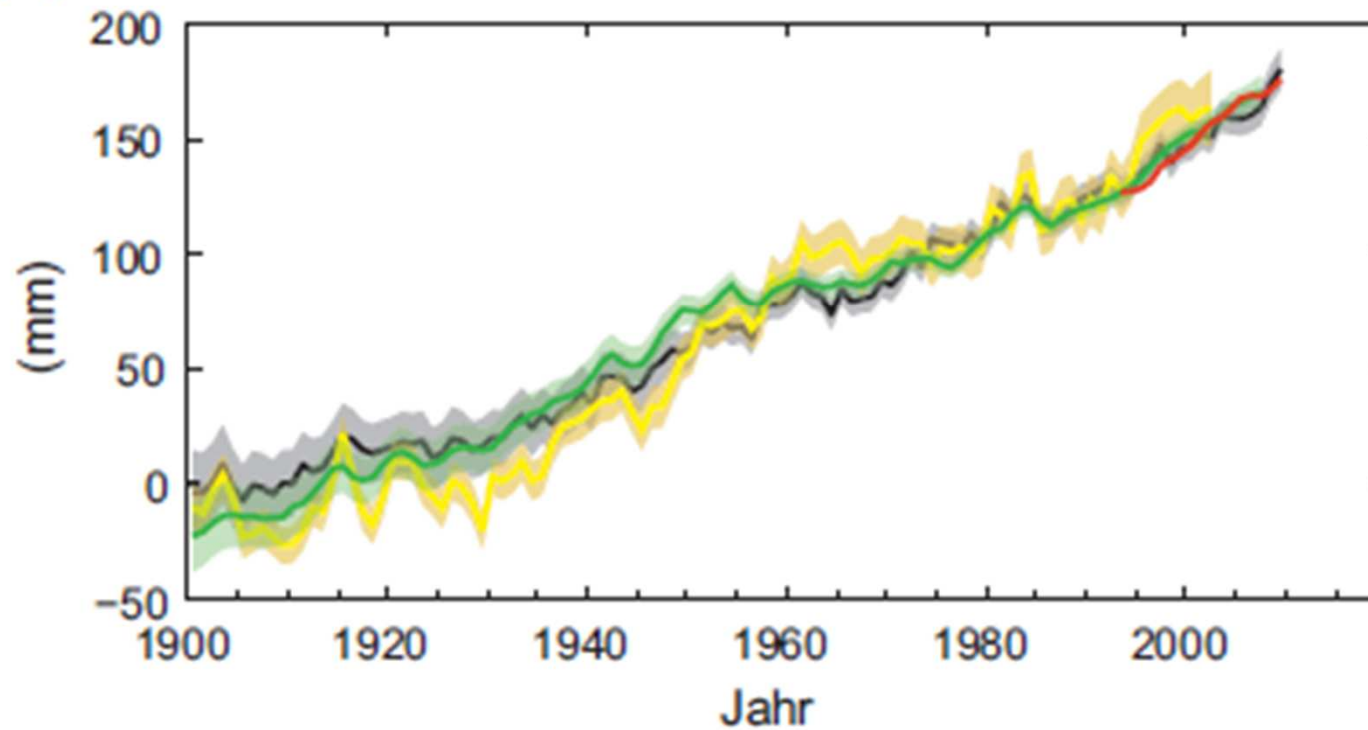
**CO<sub>2</sub>: +0,77 °C; CH<sub>4</sub>: +0,14 °C; N<sub>2</sub>O: +0,08 °C;**

Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKWs) insgesamt etwa 1 % (= 0,01 °C).

**Die CO<sub>2</sub>-Emissionen stellen derzeit offensichtlich das größte Problem dar.**

# Der globale Meeresspiegelanstieg

(d) Mittlere globale Änderung des Meeresspiegels



Die deutsche Nordseeküste mit einem Meeresspiegel, der 1 Meter über dem heutigen liegt



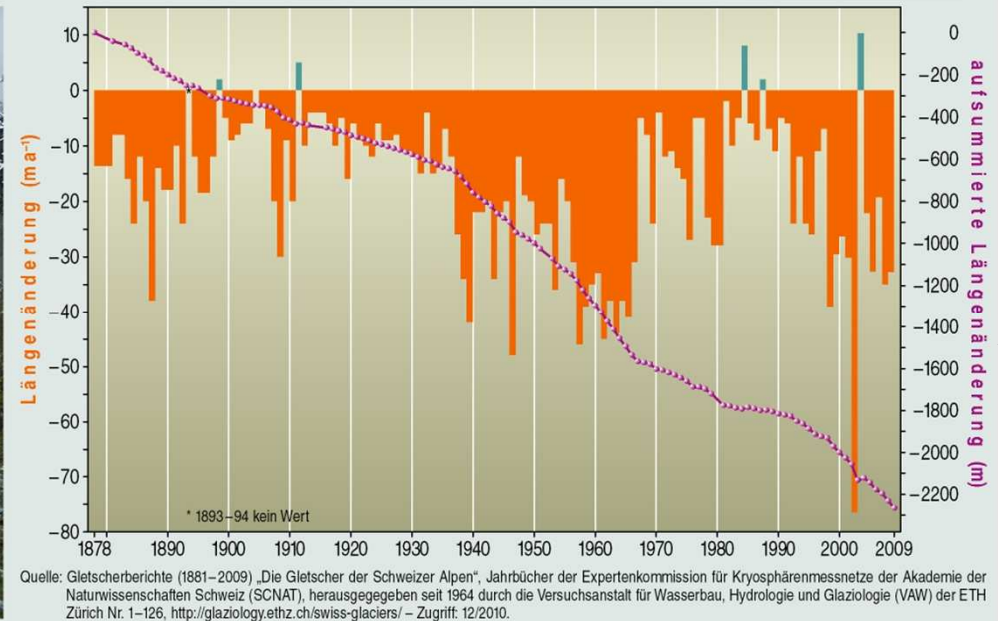
**Tabelle 11.** Klimamodellsimulationen der bis 2081–2100 gegenüber 1986–2005 erwarteten Klimaänderungen (bodennahe Lufttemperatur und Meeresspiegelhöhe, jeweils im globalen Mittel) nach den angegebenen Szenarien nach IPCC<sup>54</sup> (2014). Diese Szenarien geben den am Ende des simulierten Zeitintervalls erreichten Strahlungsantrieb (in  $\text{W/m}^2$ ) an und heißen repräsentative Konzentrationspfade (engl. Representative Concentration Pathways, RCP). Die angegebenen Zahlenwerte gelten zusätzlich zu den im Industriezeitalter bereits eingetretenen Änderungen (ca.  $1\text{ °C}$  Erwärmung, vgl. Tab. 7, ca. 20 cm Meeresspiegelanstieg). Derzeit folgen wir noch dem obersten Szenario.

Szenario	Temperaturanstieg	Meeresspiegelanstieg
RCP 2,6	0,3–1,7 °C	26–55 cm
RCP 4,5	1,1–2,6 °C	32–63 cm
RCP 6,0	1,4–3,1 °C	33–63 cm
RCP 8,5	2,6–4,8 °C	45–82 cm



Der große Aletschgletscher 1979 (l), 1991 (M) und 2002 (r)



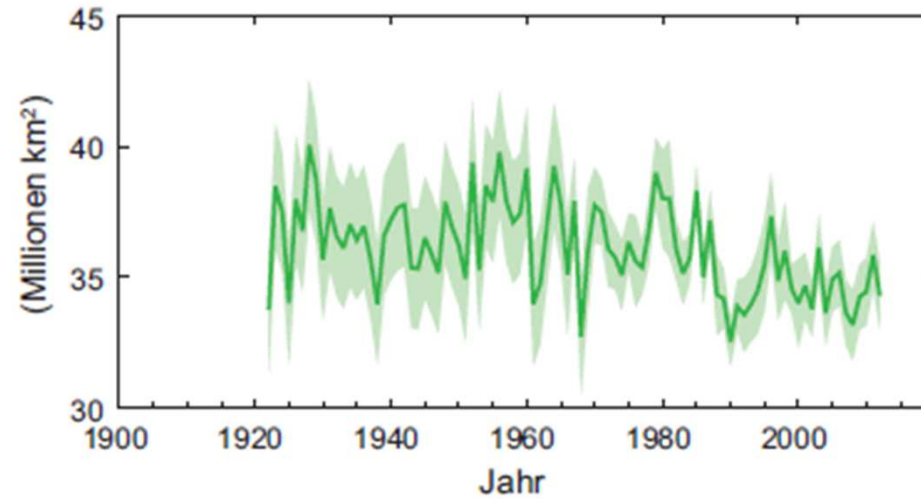


Anhuf, 2011, S. 13

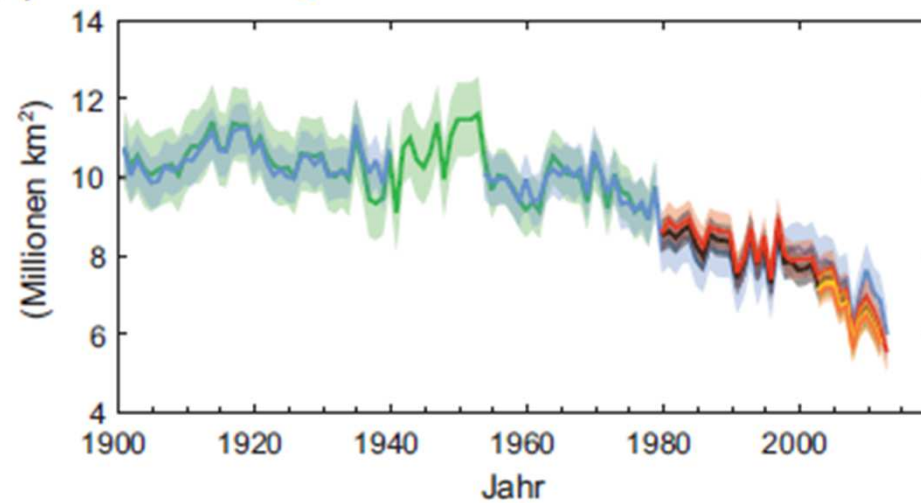
## Das Abschmelzen des Morteratsch Gletschers in den Bernina-Alpen (Schweiz) zwischen 1875 und 2009



(a) Ausdehnung der Schneedecke auf der Nordhemisphäre im Frühjahr



(b) Ausdehnung des arktischen Meereises im Sommer



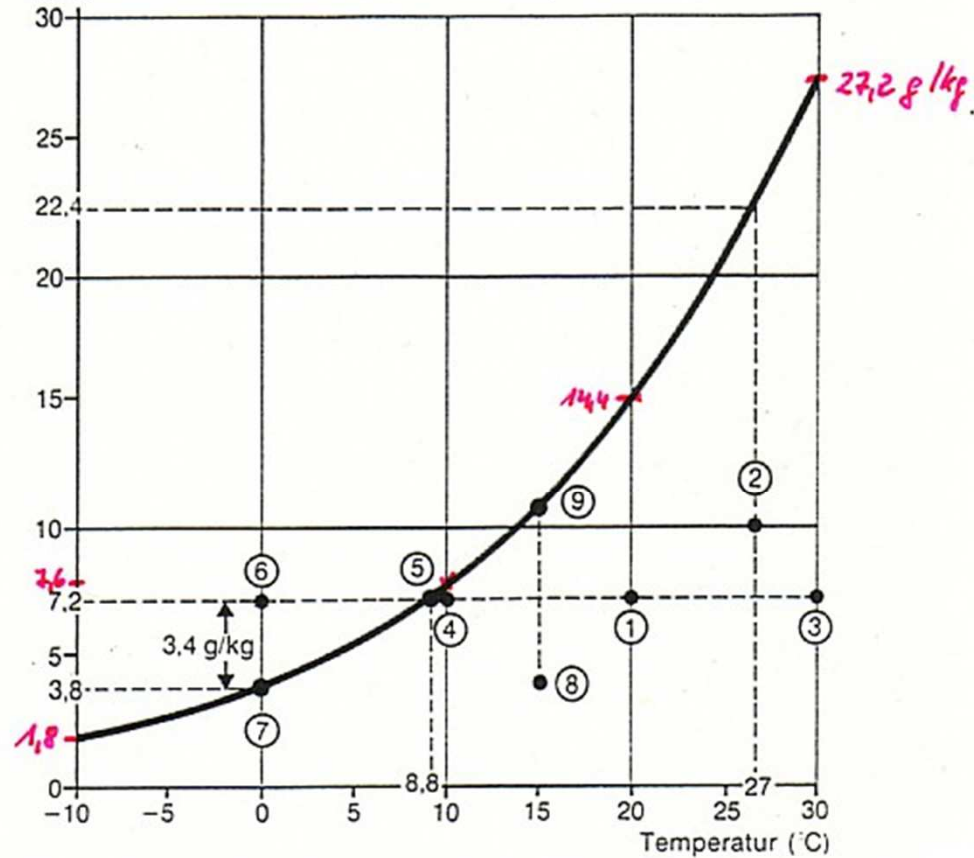
(IPCC 2013, 8)

**Tab. 11 Quantitative Übersicht der globalen Kryosphäre und Chionosphäre;**  
Quelle: IPCC (2007).

Bereich	Fläche in 10 <sup>6</sup> km <sup>2</sup>	Volumen in 10 <sup>6</sup> km <sup>3</sup>	Meeres- spiegel- äquivalent in m
<b>Landeis</b>			
Antarktis	12.3	24.7	56.5
Grönland	1.7	2.9	7.3
Schelfeis (Antarktis)	1.5	0.7	–
Gebirgsgletscher, kleine Eiskappen	0.53	0.09	0.26
	(0.51–0.54)	(0.05–0.13)	(0.15–0.37)
Summe	16.0	28.4	64.1
<b>Permafrost (Nordhemisphäre)</b>			
beständig	22.8	0.024	0.07
zeitweise (jahreszeitlich variabel)	5.9–48.1	0.006–0.065	–
<b>Meereis</b>	23	0.022	–
	(19–27)	(0.019–0.025)	
<b>Schnee (Nordhemisphäre, Land)</b>	23.6	0.003	0.006
	(1.9–45.2)	(0.0005–0.005)	(0.001–0.01)
<b>Gesamtsumme (beständig, Mittelwert)</b>	85.40	28.45	64.18

Aus: SCHÖNWIESE, C. (2013): Klimatologie. Stuttgart, S. 159.

Sättigungsfeuchte der Luft  
(g/kg feuchter Luft bei 1013 mbar Luftdruck)



Sättigungsfeuchte in Abhängigkeit von der Lufttemperatur

Saturation moisture (g/kg) in dependec of the air temperature

Häckel, 1999: 55

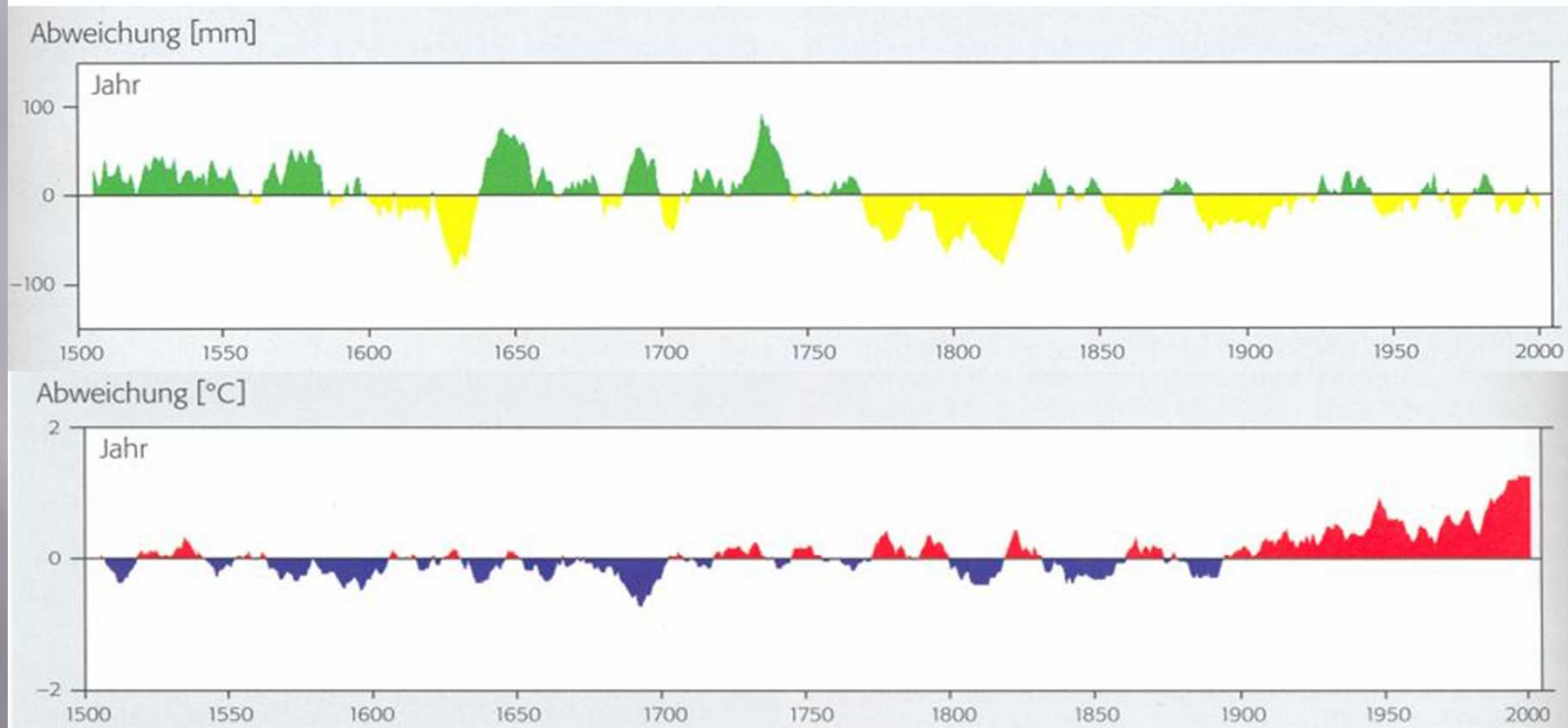
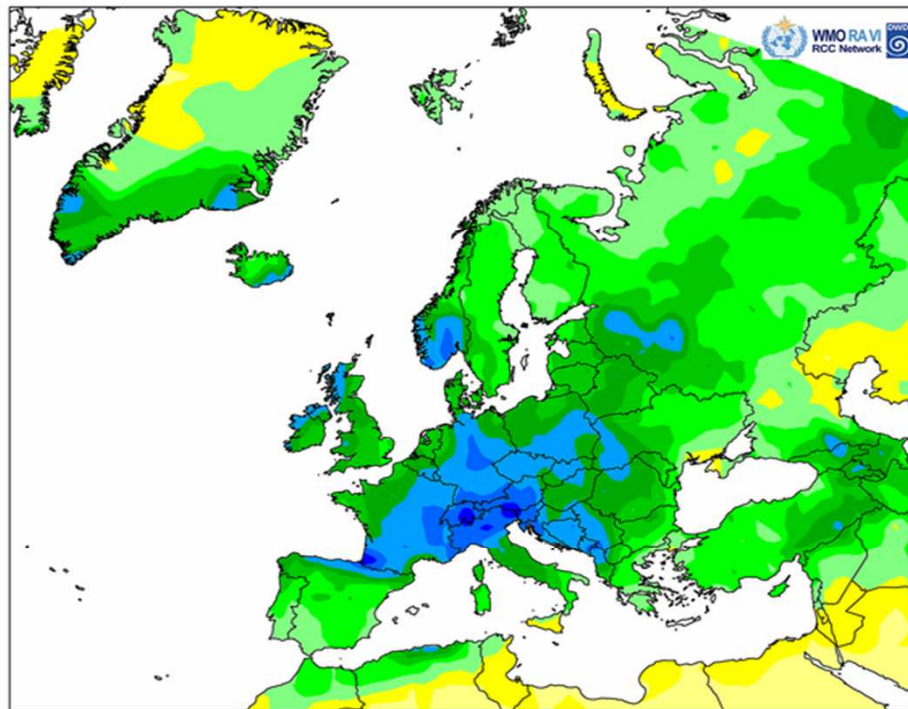


Abb. 31: Temperatur- und Niederschlagsentwicklung seit 1500.

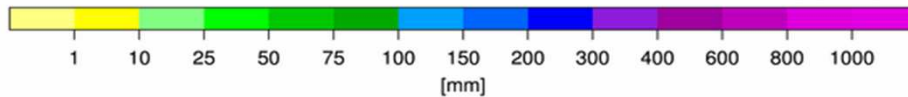
Glaser 2008, S. 94/95

# Hochwasser in Passau

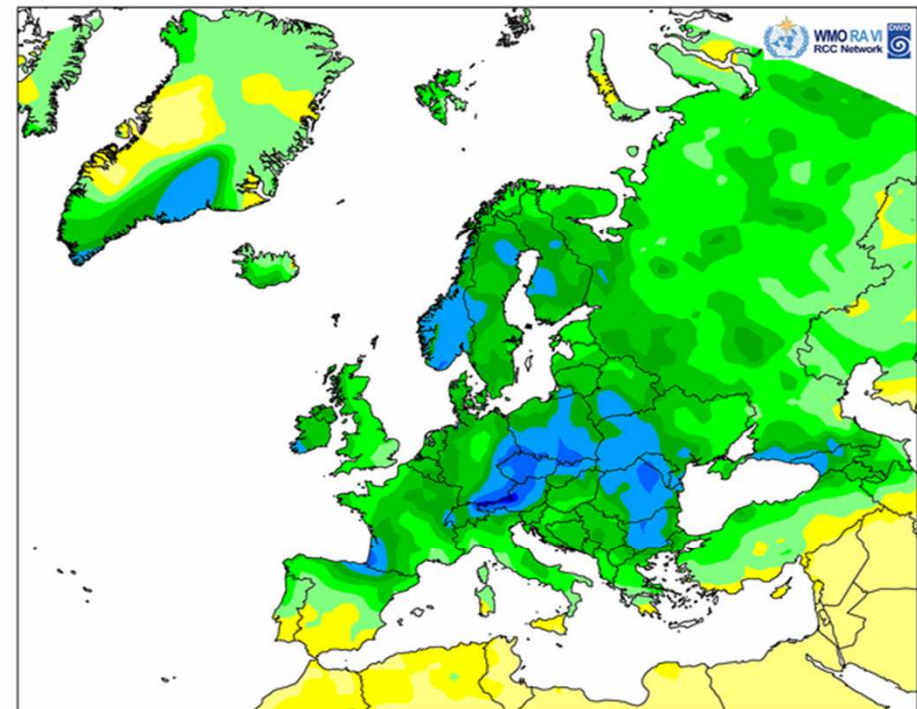
Total Precipitation GPCC Monitoring Product May 2013



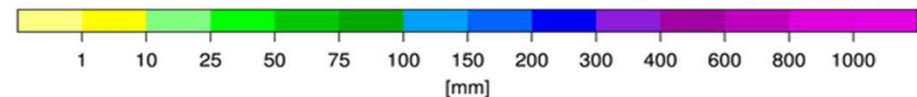
© DWD 20/01/2014



Total Precipitation GPCC Monitoring Product June 2013



© DWD 20/01/2014



[https://www.dwd.de/DE/leistungen/rcccm/int/rcccm\\_int\\_rrr.html](https://www.dwd.de/DE/leistungen/rcccm/int/rcccm_int_rrr.html)

# Hochwasser am 03.06.2013



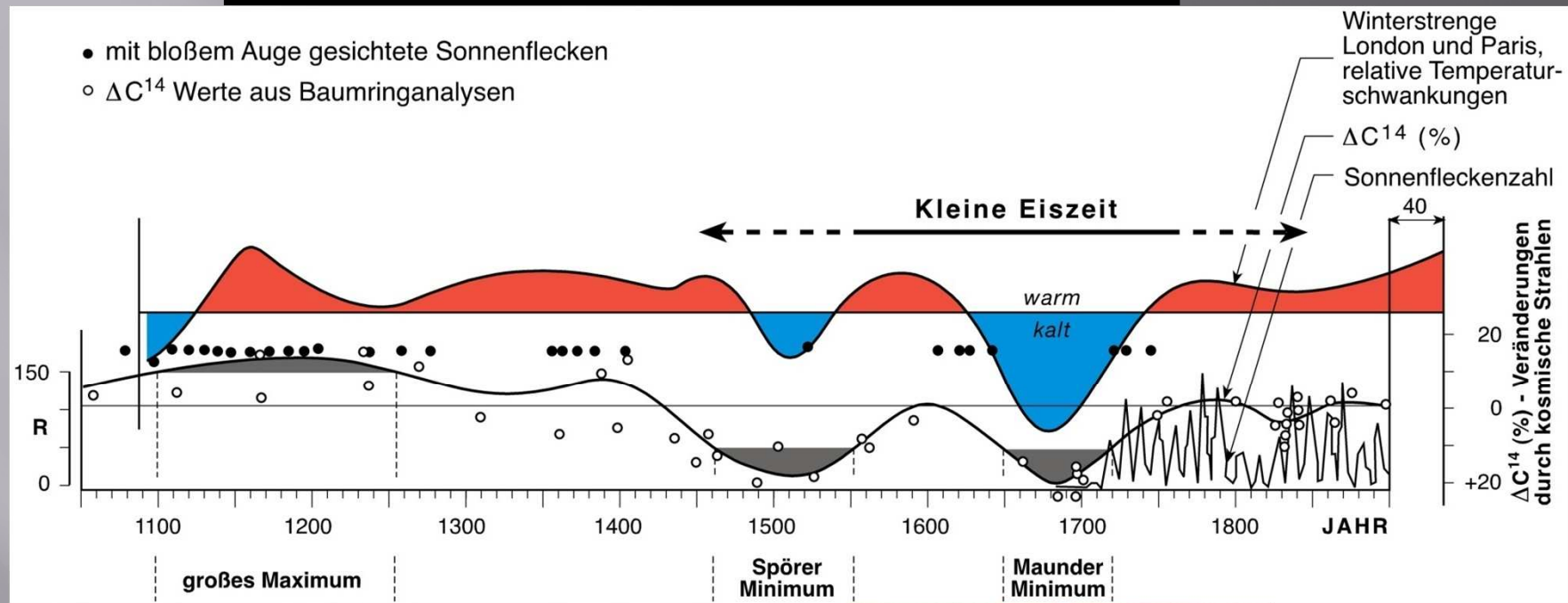
## Autobahnkreuz Deggendorf im Juni 2013

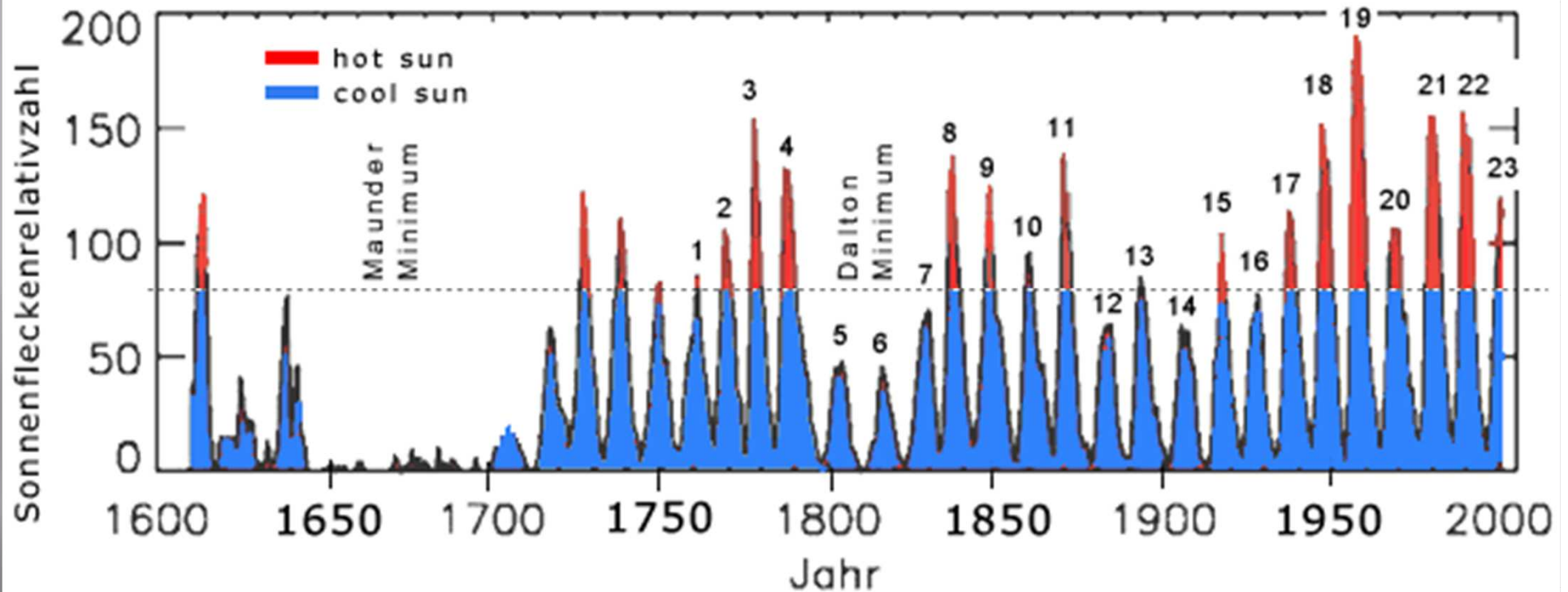






# Klimavariabilität





<http://lv-twk.oekosys.tu-berlin.de/...ckenzyklen.htm>



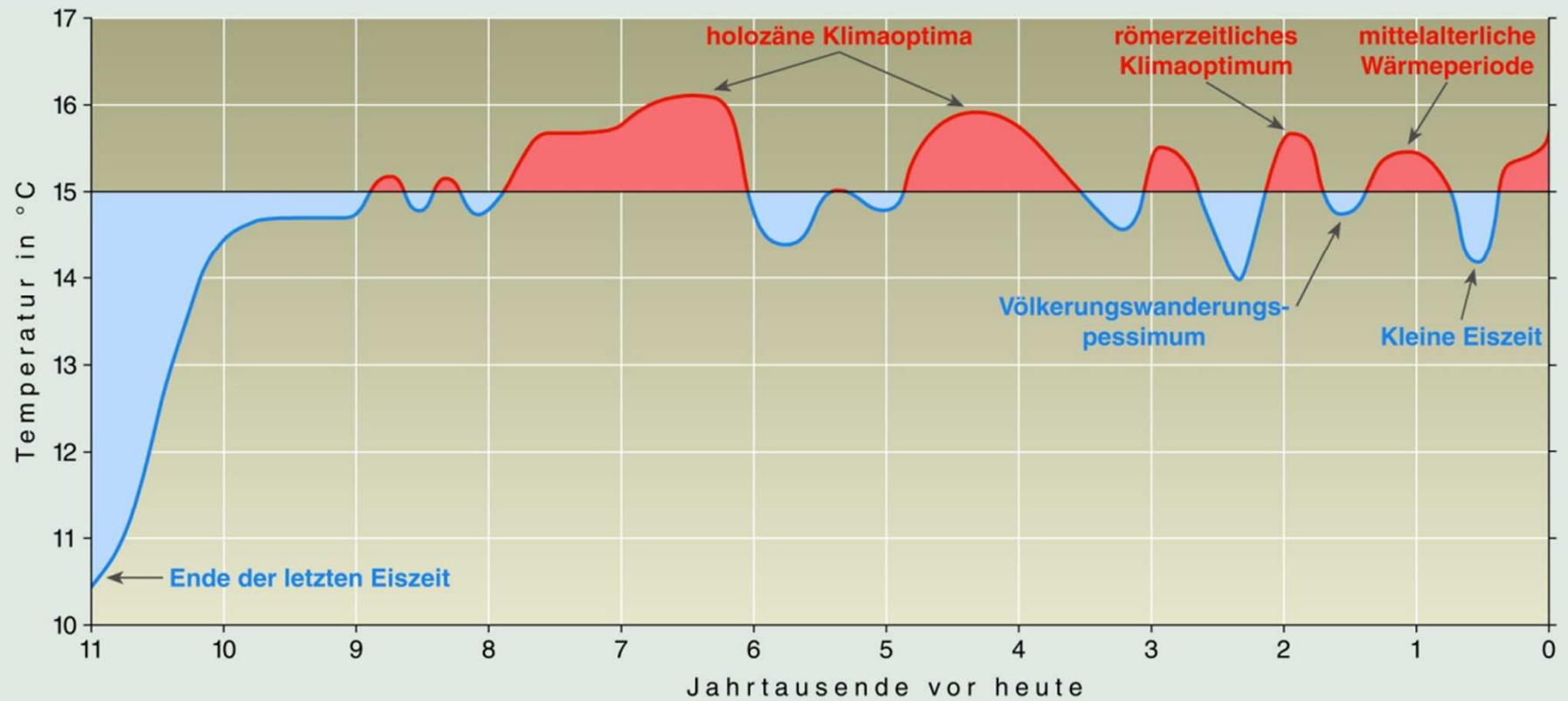
**A Frost Fair on the Thames at Temple Stairs by Abraham Hondius - c. 1684**  
**The winter of 1683-4 was ferocious and the Thames froze upstream of London Bridge.**



# Die kleine Eiszeit



Gabriele Bella (1730-1799) Die gefrorene Lagune von Venedig (Italien) im Jahre 1708/1709





Hannibal auf seinem Feldzug in den Alpen auf einer Darstellung aus dem frühen 16. Jahrhundert (Jacopo de Ripanda (bottega), *Annibale varca le Alpi*, 1505-1506, affresco, Palazzo dei Conservatori, Musei Capitolini, Roma.



Dieselbe Landschaft am Sustenpass, wie sie etwa zur Römerzeit vor ca. 2000 Jahren ausgesehen haben könnte, als sich der Steigletscher ungefähr auf die Höhe der Tierberglühütte (2795 m) zurückgezogen hatte. Entsprechend hoch lag auch die Waldgrenze, und die Landschaft zeigte ein völlig anderes Bild als heute.

Zeichnung: Ueli Jörin

Foto: Christian Schlüchter

Zeichnung:

Schlüchter, C. & Jörin, U. 2004, S. 41



## Der große Aletsch-Gletscher

- a) Römisches Optimum 200 BC – AD 50
- b) 1856
- c) 2000
- d) 2050 (vergleichbar mit dem bronzezeitlichen Optimum)

(Holzhauser et al.2005)



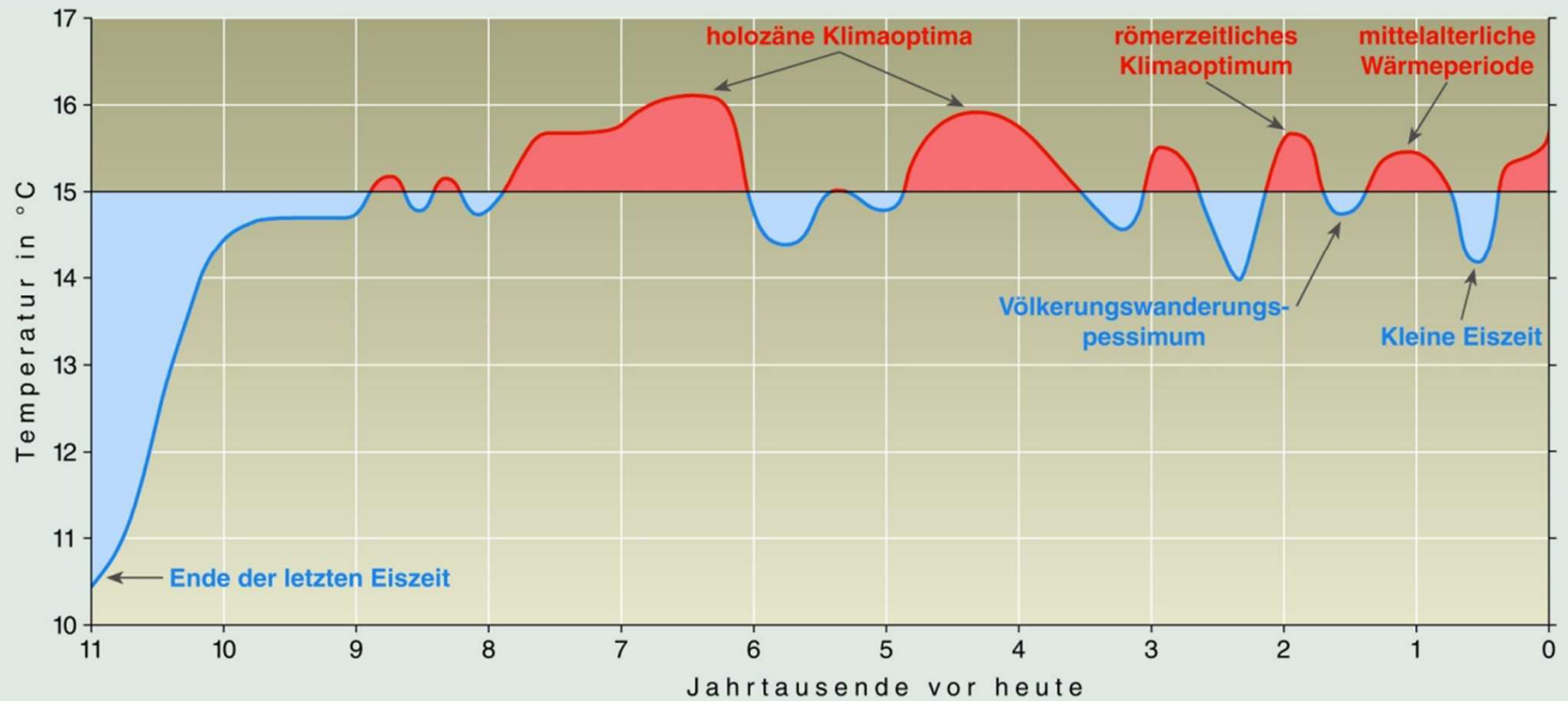
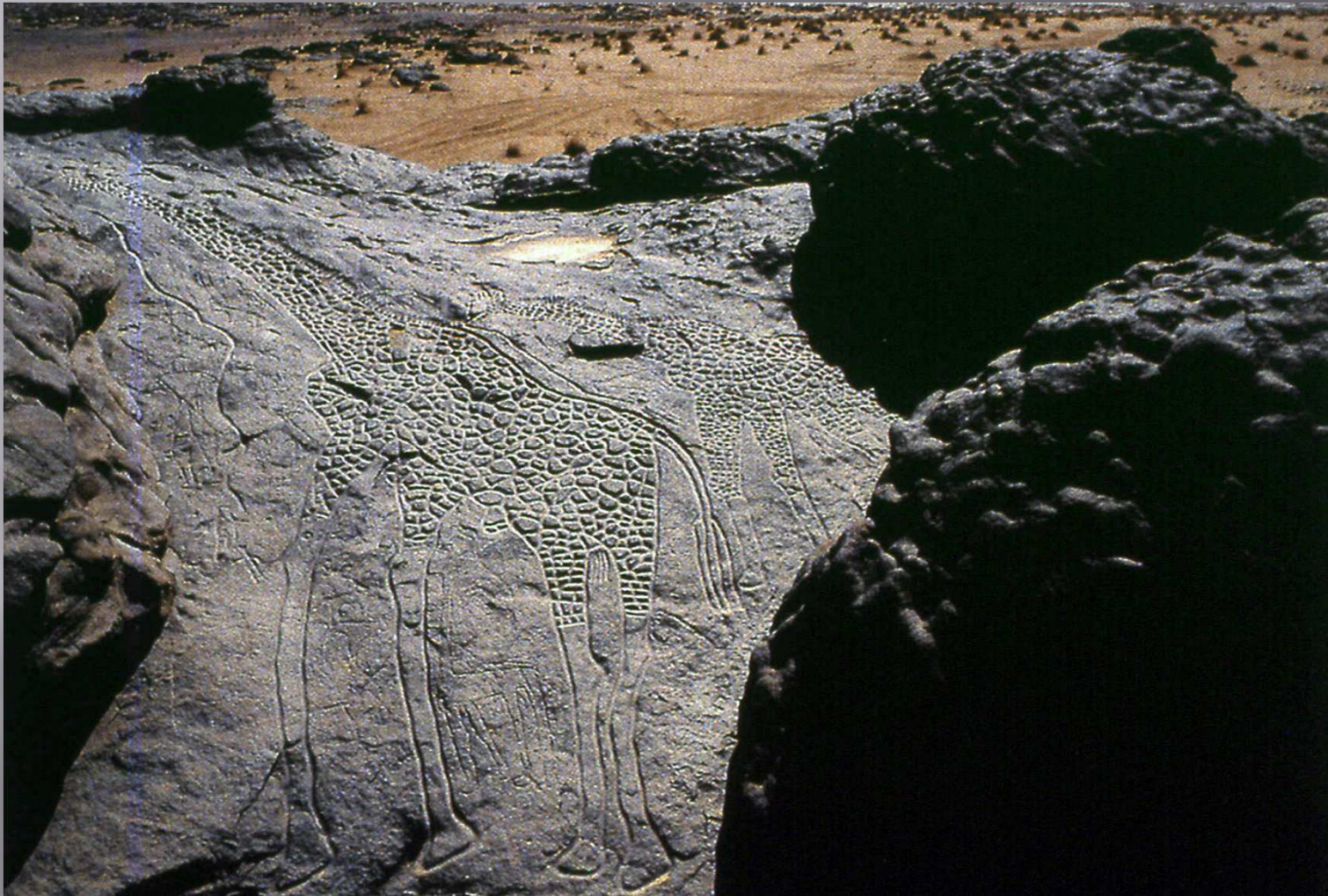




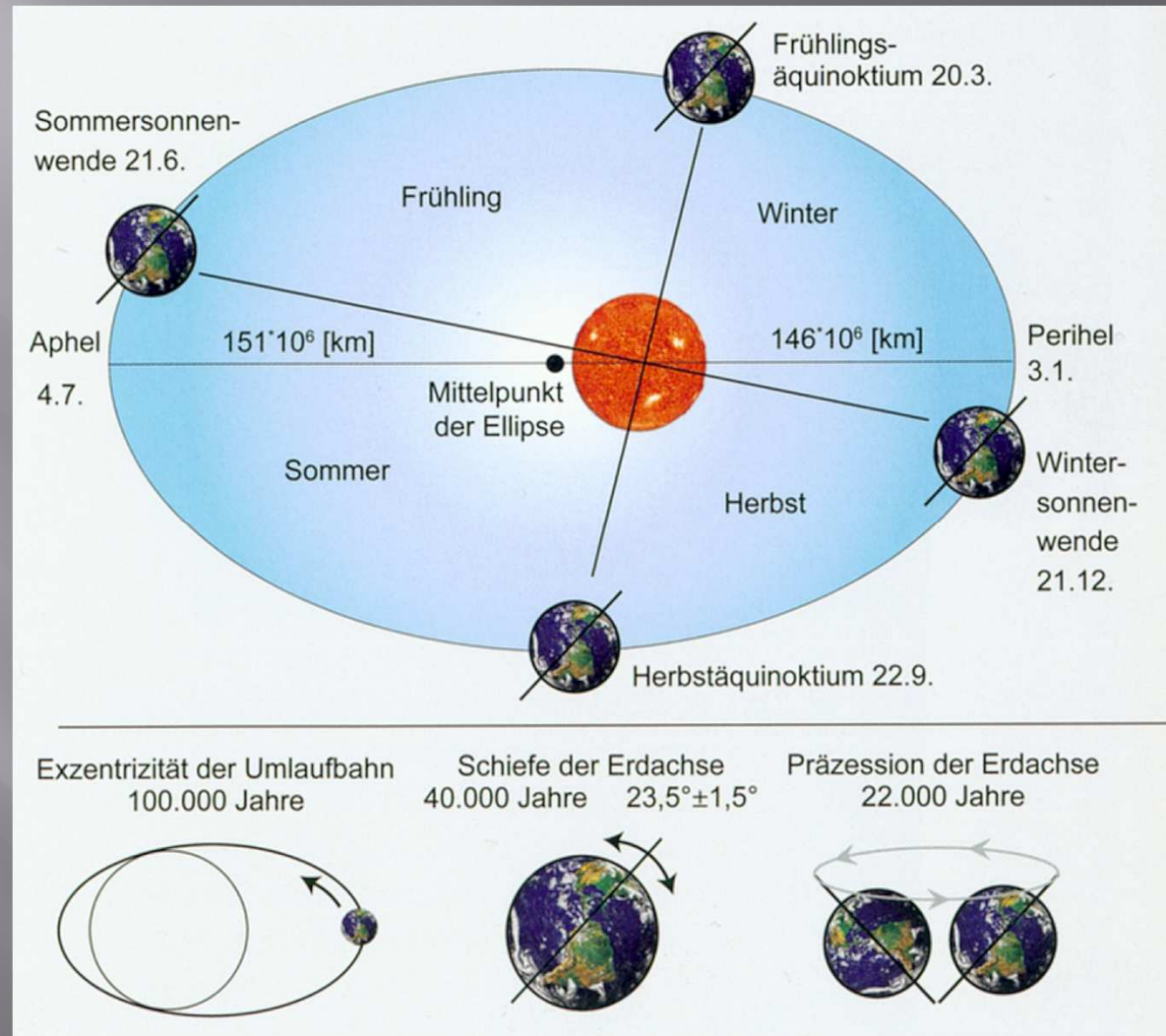
Abb. 11.23: Schematische Darstellung der Verschiebung der Vegetationszonen zum frühholozänen Klimaoptimum (blaue Linie) im Vergleich zu heute (grüne Linie) aufgrund des Vordringens monsunaler Niederschlagssysteme.

Quelle: Klitzsch, E. et al. (Hrsg.) 1999, S.492

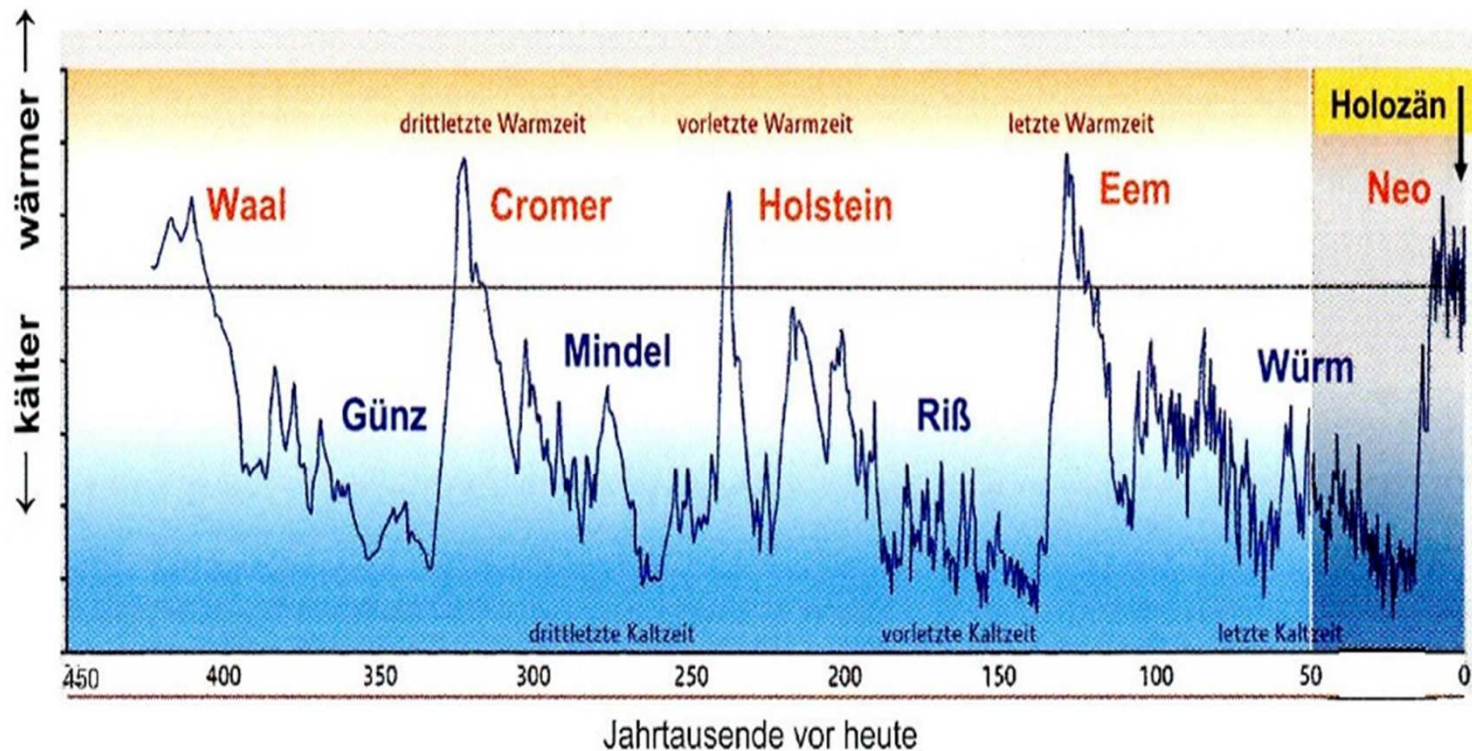


Steingravuren im Tibesti Gebirge (Tschad), das heute zu den extrem trockenen Bereichen der Sahara gehört (Anhuf)

# Orbitale Konstellationen der Sonne und der Erde

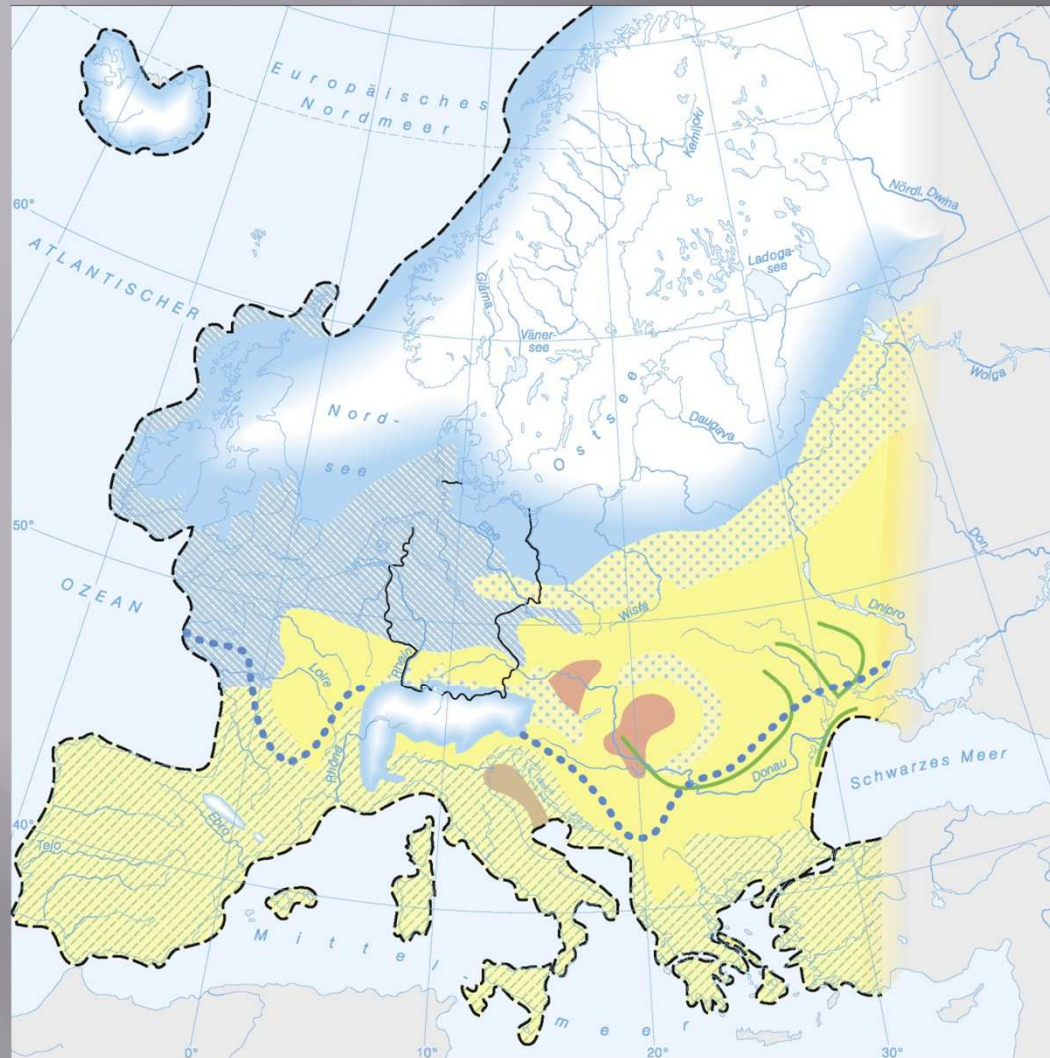


Sirocko, 2009, S. 53



**Abb. 14.** Relative Änderungen der global gemittelten bodennahen Lufttemperatur in den letzten rund 420 Jahrtausenden; nach BUBENZER und RADTKE<sup>12</sup>, verändert.

Aus: SCHÖNWIESE, C. (2019): Klimawandel kompakt – Ein globales Phänomen wissenschaftlich erklärt. Stuttgart, S. 57.



**Vegetationsklassen**

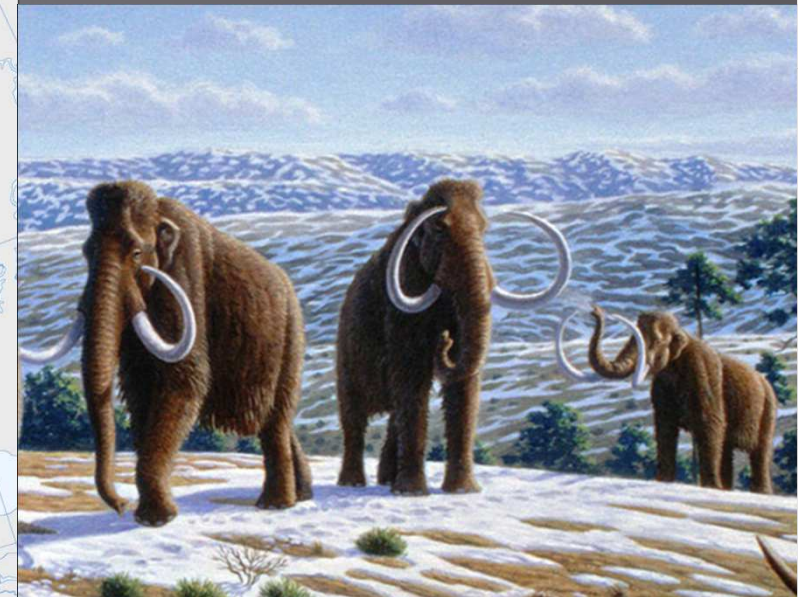
-  tundraähnliche Vegetation
-  sehr offene Frostschütttundra
-  Steppe, lokal mit Tundraelementen
-  Lösssteppe
-  halbwüstenartige Vegetation
-  sehr lichte Waldsteppe
-  Galeriewald

**sonstige Landbedeckung**

-  vergletschertes Gebiet
-  Niedermoor
-  Südgrenze des Dauerfrostgebietes
-  Rekonstruktion der Küstenlinie vor 20 000 Jahren (100m unter NN)
-  heutige Küstenlinie
-  heutiger Flussverlauf

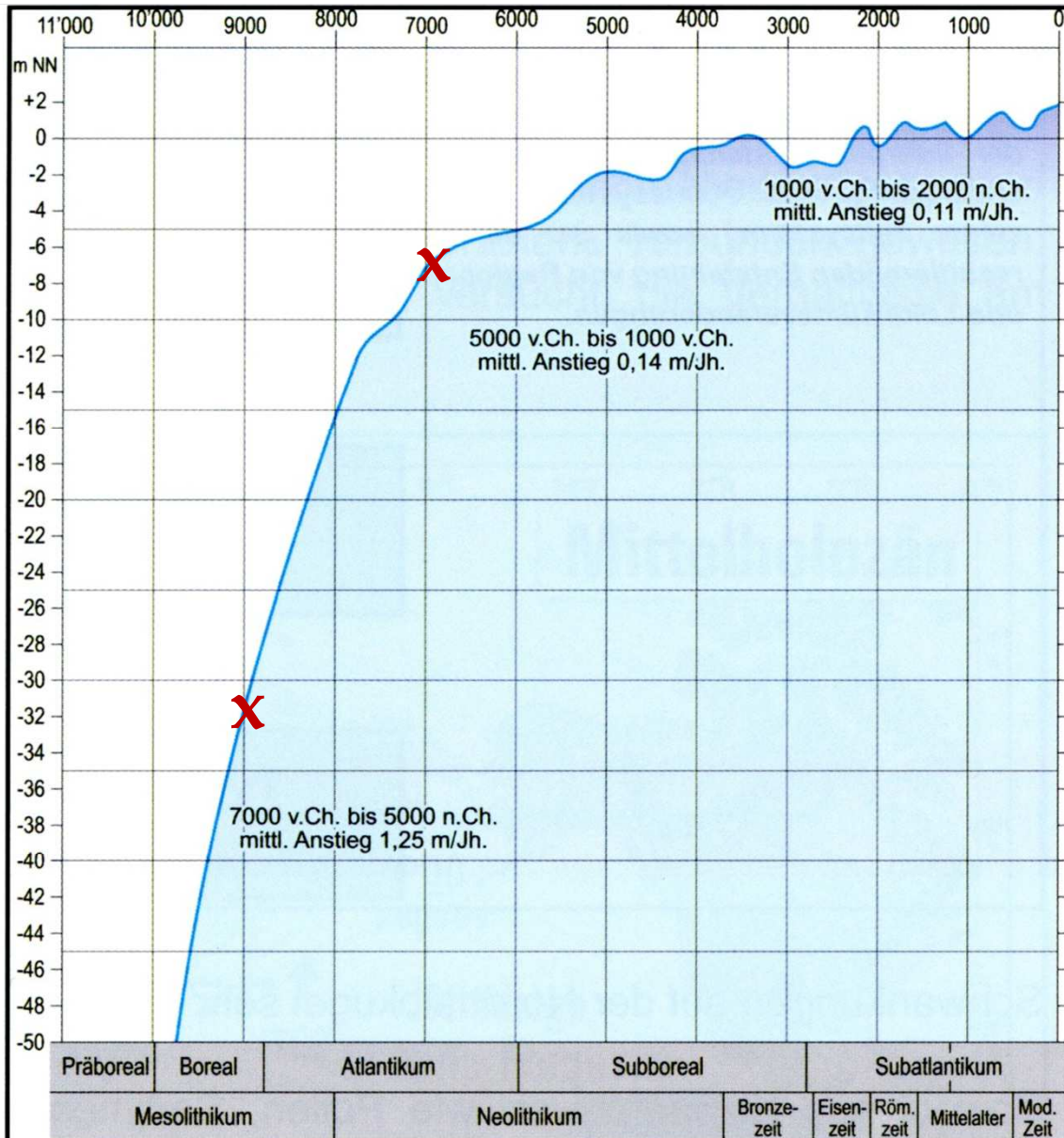
0 250 500 750 1000 km

Autoren: D. Anhuf, A. Bräuning,  
B. Frenzel, M. Stumböck



Mauricio Antón / PLOS Biology,  
doi: 10.1371/journal.pbio.0060099.

Vegetation Europas vor 20.000  
Jahren (Anhuf et al. 2003, S. 88)



**Abb. 1: Meeresspiegelveränderungen im Bereich der südlichen Nordsee. Die Zeitangabe umfasst kalibrierte Kalenderjahre (nach Behre 2003).**

**Tab. 11** Quantitative Übersicht der globalen Kryosphäre und Chionosphäre;  
Quelle: IPCC (2007).

Bereich	Fläche in 10 <sup>6</sup> km <sup>2</sup>	Volumen in 10 <sup>6</sup> km <sup>3</sup>	Meeres- spiegel- äquivalent in m
<b>Landeis</b>			
Antarktis	12.3	24.7	56.5
Grönland	1.7	2.9	7.3
Schelfeis (Antarktis)	1.5	0.7	–
Gebirgsgletscher, kleine Eiskappen	0.53	0.09	0.26
Summe	(0.51–0.54)	(0.05–0.13)	(0.15–0.37)
<b>Permafrost (Nordhemisphäre)</b>			
beständig	22.8	0.024	0.07
zeitweise (jahreszeitlich variabel)	5.9–48.1	0.006–0.065	–
<b>Meereis</b>			
	23	0.022	–
	(19–27)	(0.019–0.025)	
<b>Schnee (Nordhemisphäre, Land)</b>			
	23.6	0.003	0.006
	(1.9–45.2)	(0.0005–0.005)	(0.001–0.01)
Gesamtsumme (beständig, Mittelwert)	85.40	28.45	64.18

Schönwiese, 2013, S. 159

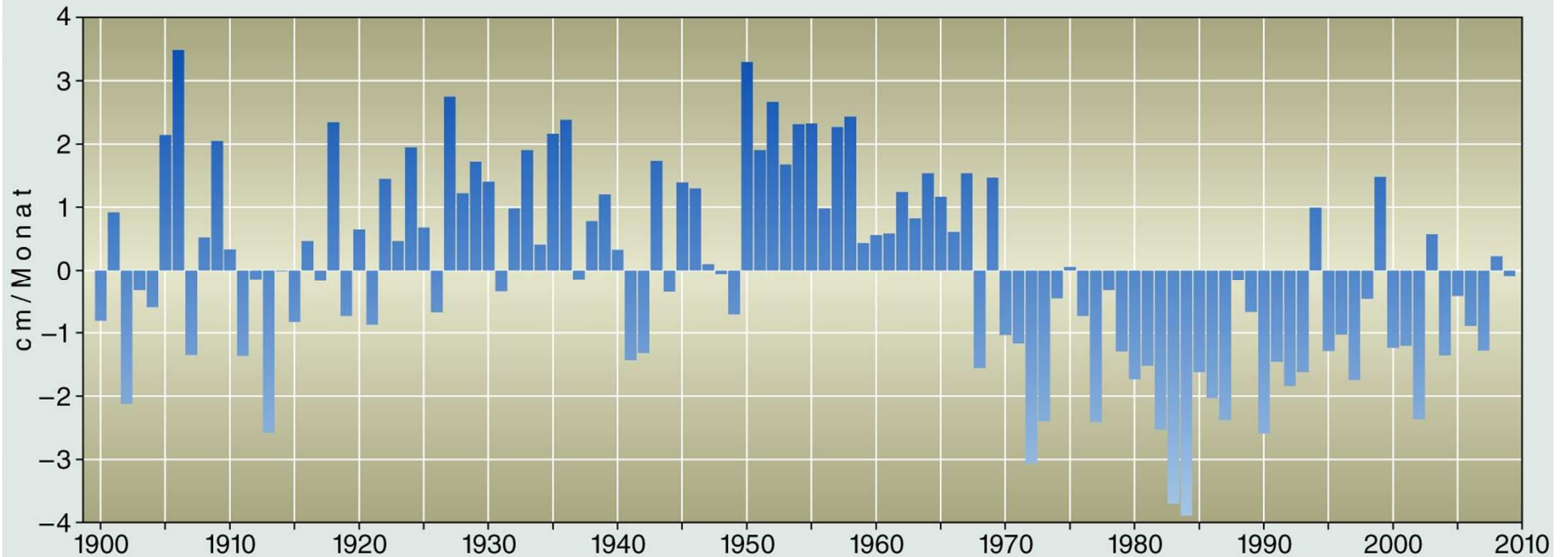
Wanner 2007, S. 27)



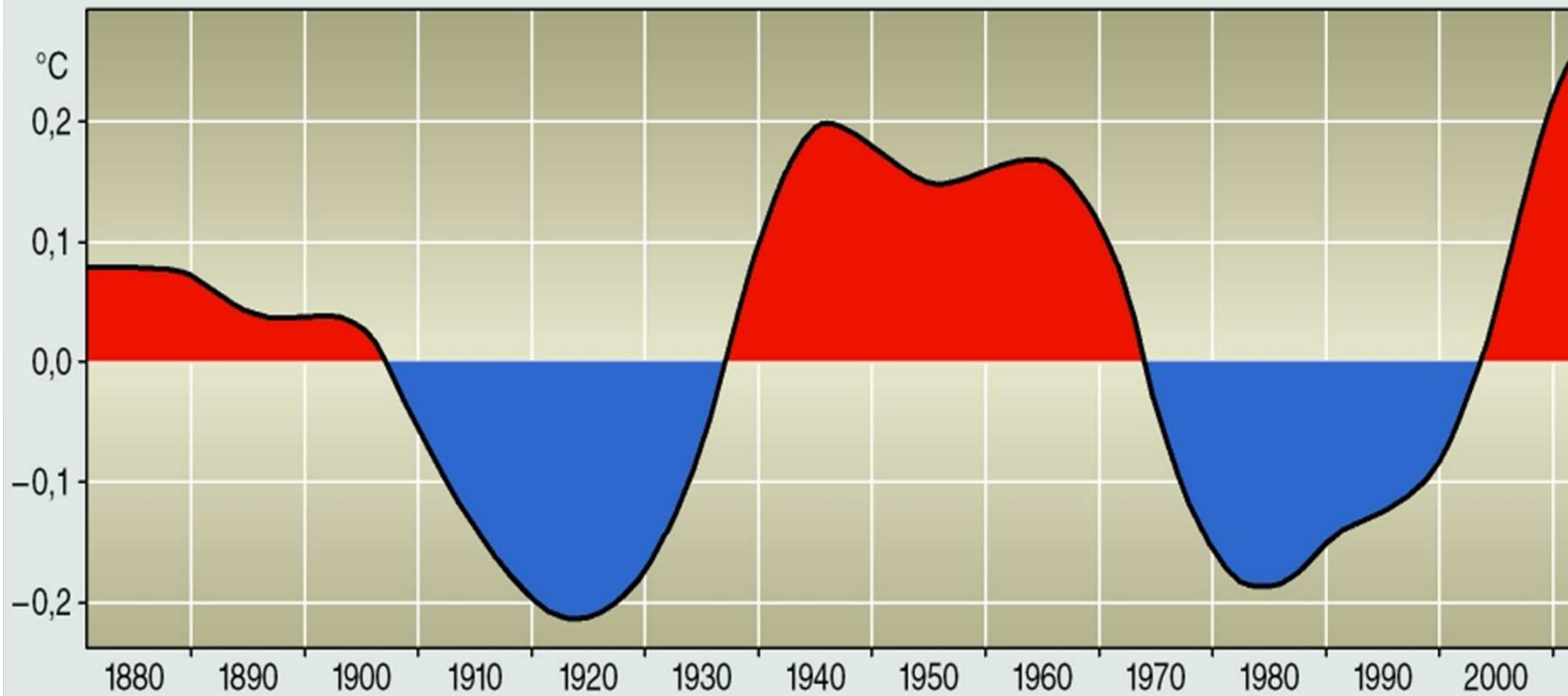
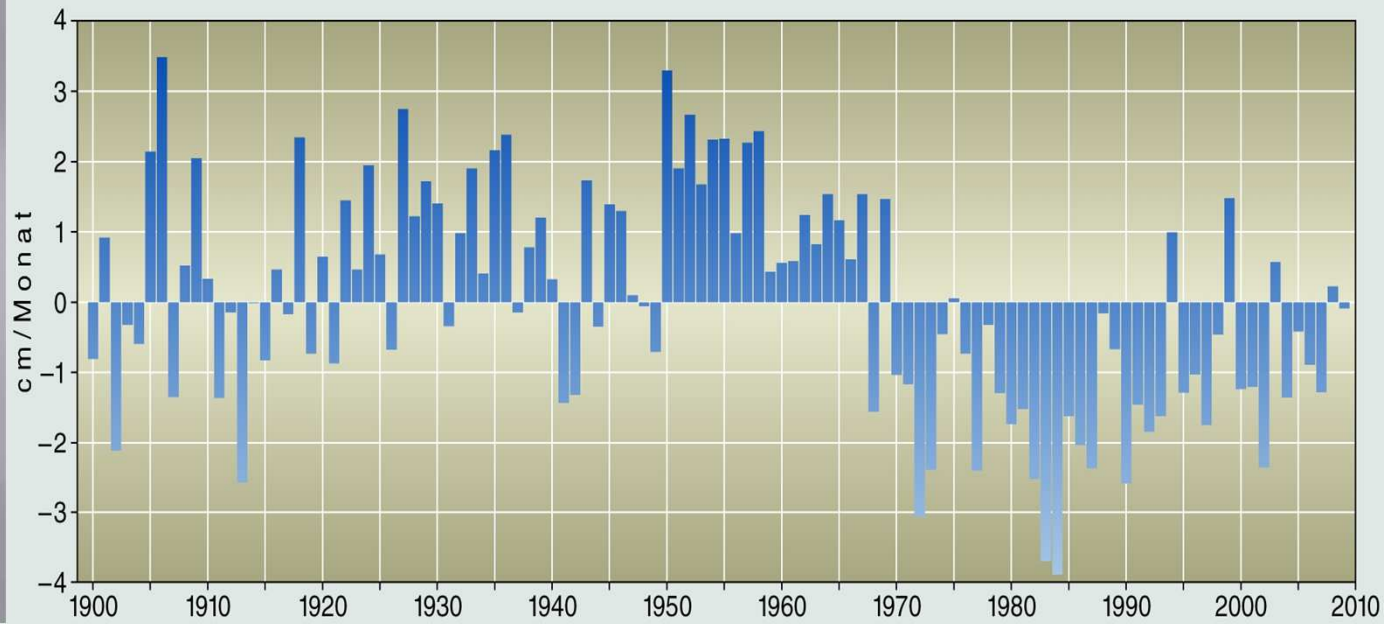
## Der erste Brexit

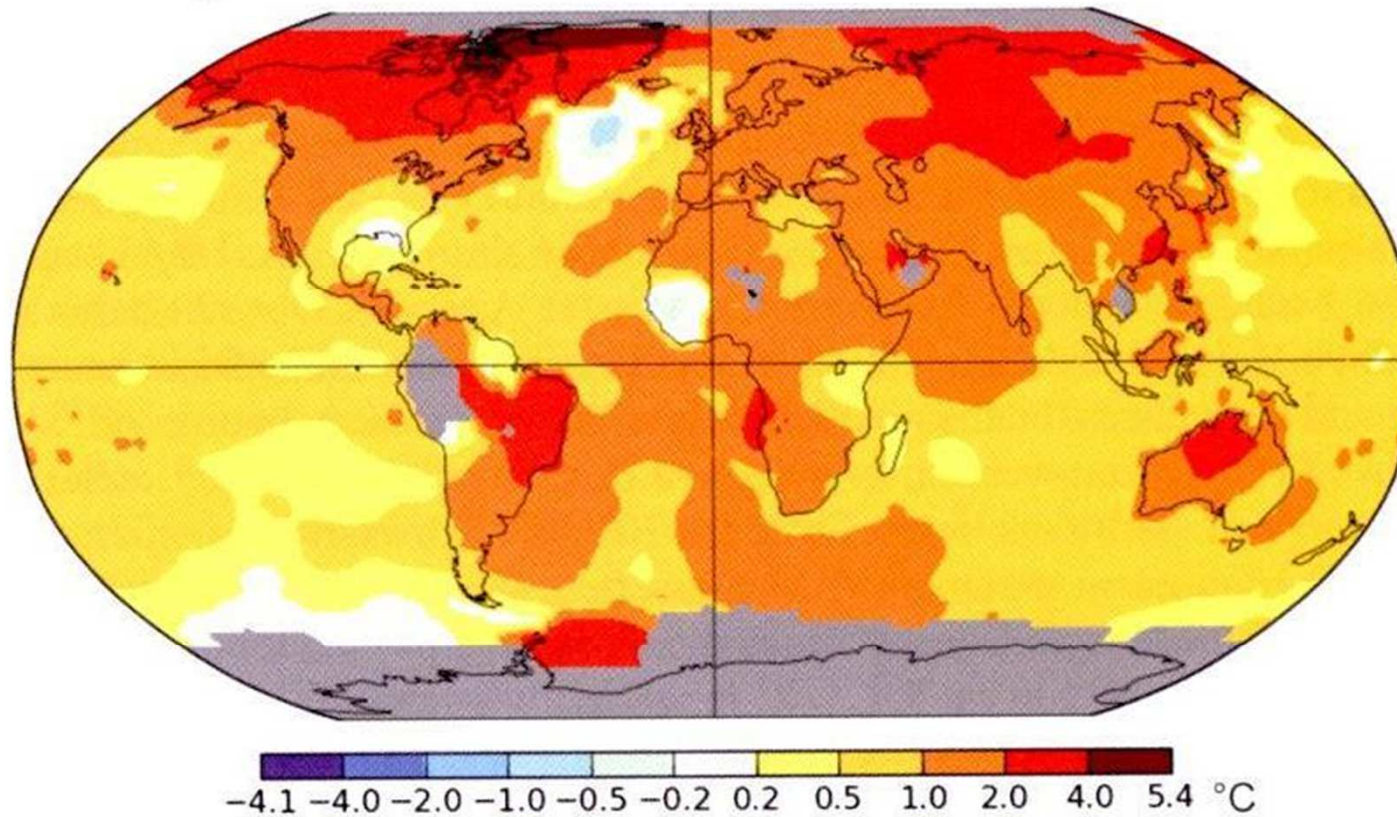
*Es hat auch damals schon eine ganze Weile gedauert.....*





Abweichungen der jährlichen Niederschlagsmengen (Juni-Oktober) vom Mittelwert im Sahel von 1900 - 2009 (Einheit: cm / Monat)  
([http://jisao.washington.edu/data\\_sets/sahel/](http://jisao.washington.edu/data_sets/sahel/))





**Abb. 20a.** Globalkarte der Trends 1880–2017 der bodennahen Lufttemperatur, erzeugt vom GISS<sup>39</sup>-Rechner aufgrund der dortigen Datenbasis.

Schönwiese, 2019, S. 72

# Natürliche Klimadynamik

Alter (in 1000 Jahren)

