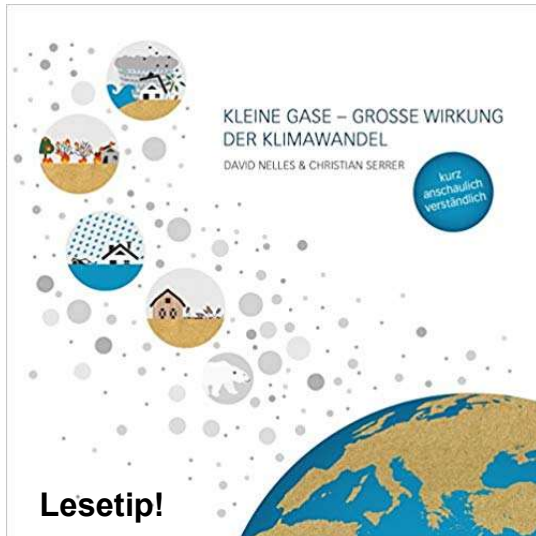


# Globale und regionale Indikatoren der anthropogenen Klimaänderung



**Prof. Dr. K. Pfeilsticker**  
**Institut für Umwelphysik**  
**Universität Heidelberg**  
**INF 229**  
**69120 Heidelberg**  
(22. März 2019)



Matsuura Takeshirô, ein  
'Grenzgänger' (Naturforscher)  
auf Hokkaido (1845-58)

All das war ‚aufs Engste miteinander verbunden‘, denn in der Vergangenheit hatten die Wälder das Erdreich vor Sonneneinstrahlung geschützt und dadurch die Verluste durch Verdunstung reduziert. Hier, am Valencia-See, entwickelte A. Humboldt seine Idee vom von **Menschen verursachten Klimawandel** (A. Humboldt, 1800)!

Zitat aus dem höchst interessanten Buch von Andrea Wulf  
*Alexander von Humboldt und die Erfindung der Natur*  
(beide Bücher gibt es am Büchertisch Mayer)

## Zwei Vorbemerkungen zu oft geäußerten Irrtümern

I. **Wissenschaftliche Erkenntnisse sind nicht **eine** unter vielen Meinungen (oder sogar ein Glaube)**

→ denn sie unterliegen einer ständigen Infragestellung und sollten grundsätzlich falsifizierbar also widerlegbar sein (Karl Raimund Popper, 1902 - 1994), z.B.

1. durch die (beobachteten) Realität (oder physikalisch gesprochen) dem Zustand
2. durch sachkundigen Widerspruch
3. ....

II. **Eine Hauptfrage der Klimaforschung ist: **Wie häufig traten/treten bestimmte Wetter- bzw. Klimaereignisse in der Vergangenheit, Gegenwart und in Zukunft auf?****

→ und nicht die Vorhersage und die Erklärung einzelner Wetterphänomene, per se! Deswegen ist z.B. die oft anzutreffende Aussage **solche Wetter gab es schon immer** keine Aussage zum Klima, sondern bestenfalls zum Wettergeschehen!



UNIVERSITÄT  
HEIDELBERG  
ZUKUNFT  
SEIT 1386



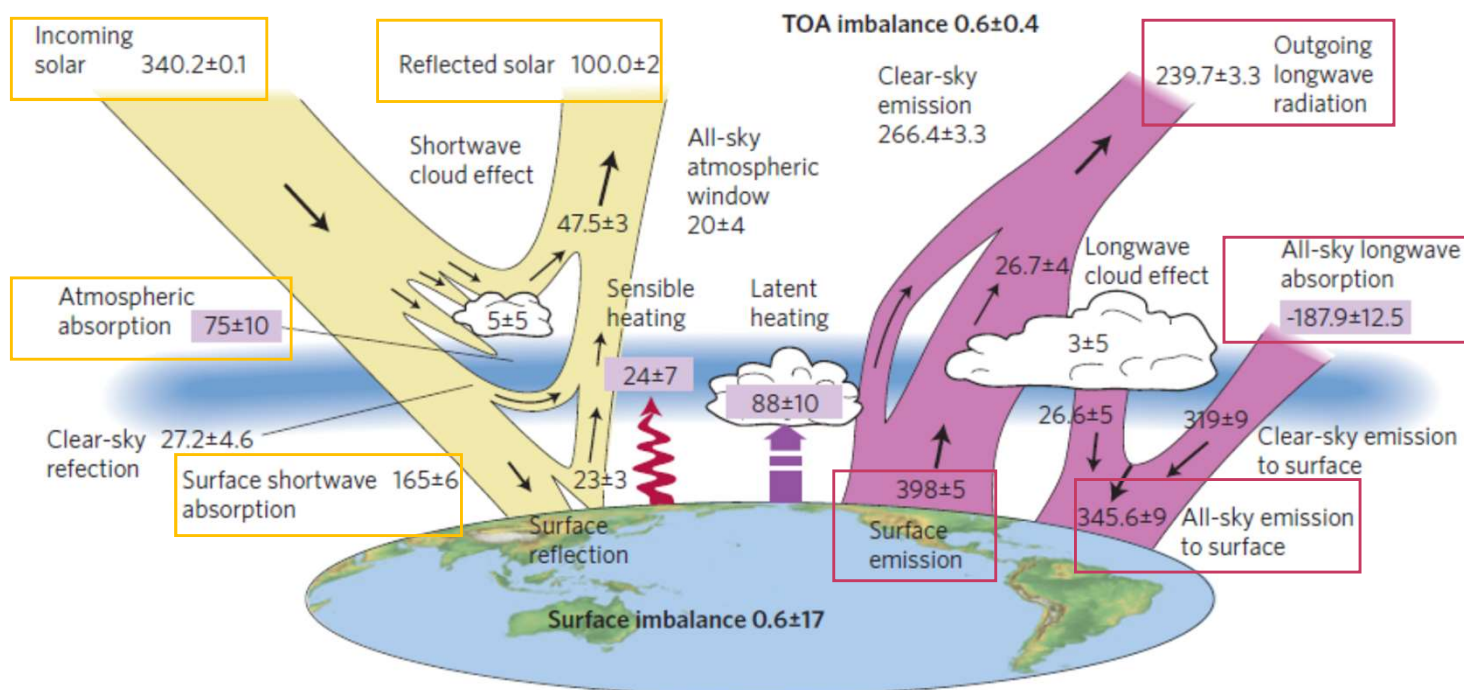
Institut für Umweltphysik  
University of Heidelberg



## Was kommt nun (Gliederung)?

1. Einige Grundlagen der Klimaänderung (Strahlungsphysik, Kohlenstoffkreislauf,.....)
2. Evidenzen für den anthropogen Klimawandel (T-Anstieg, Wärmezunahme im Weltmeer, Änderung des arktischen Meereises, einige regionale Klimaänderungsindikatoren,....)
3. Klimaprojektionen für Mitteleuropa (mit Simulationen vom dt. Klimarechenzentrum), mittl. Jahrestemperaturänderung, mutmaßliche Änderungen im Nieder- und Starkniederschlag
4. Das Pariser (1.5/2 °C bzw.) **330 ppm Ziel!** → **Hans-Josef Fell**
5. Diskussion

## Strahlungshaushalt der Erde: Ein delikates Gleichgewicht!

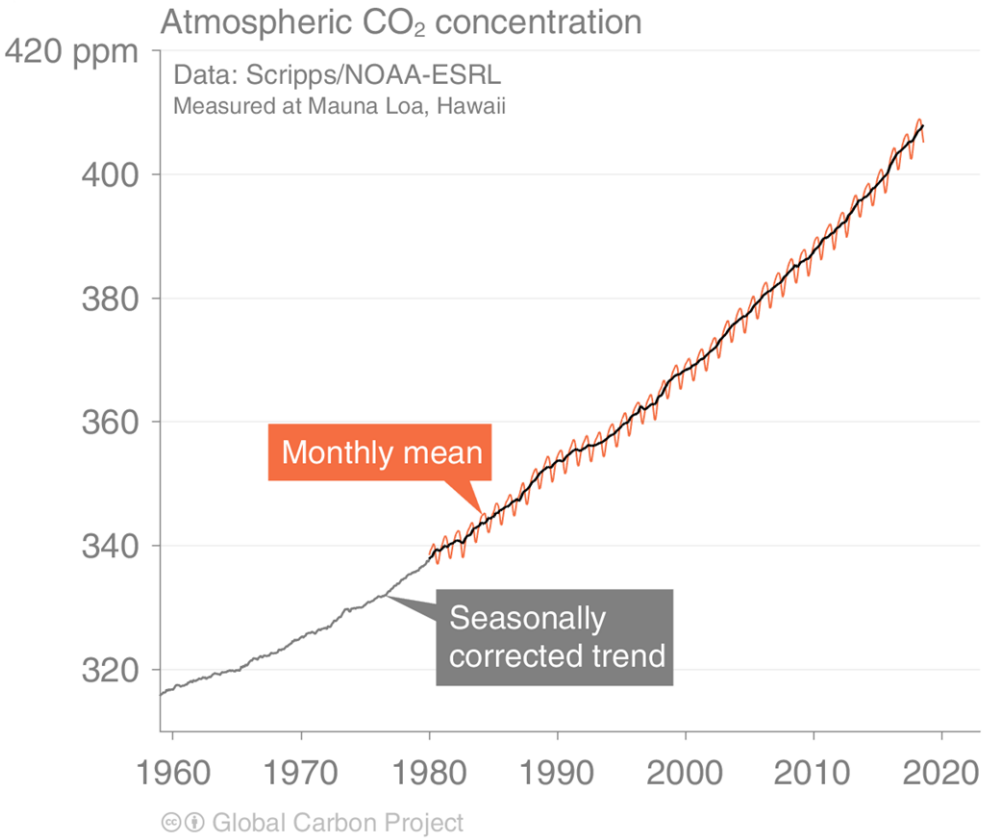


Die globale Strahlungsbilanz für die Jahre 2000 - 2010. Die solaren Strahlungsflüsse sind in gelb und die infraroten (Wärme) Strahlungsflüsse sind in violett in  $W/m^2$  angegeben. Für die Energiebilanz am Boden sind auch die Flüsse an latenter und fühlbarer Wärme wichtig. Die Treibhausgase ( $H_2O$ ,  $CO_2$ ,  $CH_4$ ,  $N_2O$ , CFC, HCFC, ...) beeinflussen vor allem die Größe der sogenannte atmosphärischen Gegenstrahlung ( $345.6 \pm 9 W/m^2$ ). Durch den Anstieg der Treibhausgase ist das Klimasystem derzeit mit  $0.6 \pm 0.17 W/m^2$  aus dem Gleichgewicht, und heizt vor allem die Weltmeere auf (Abbildung aus: Stephens et al., Nature Geoscience, 2012).

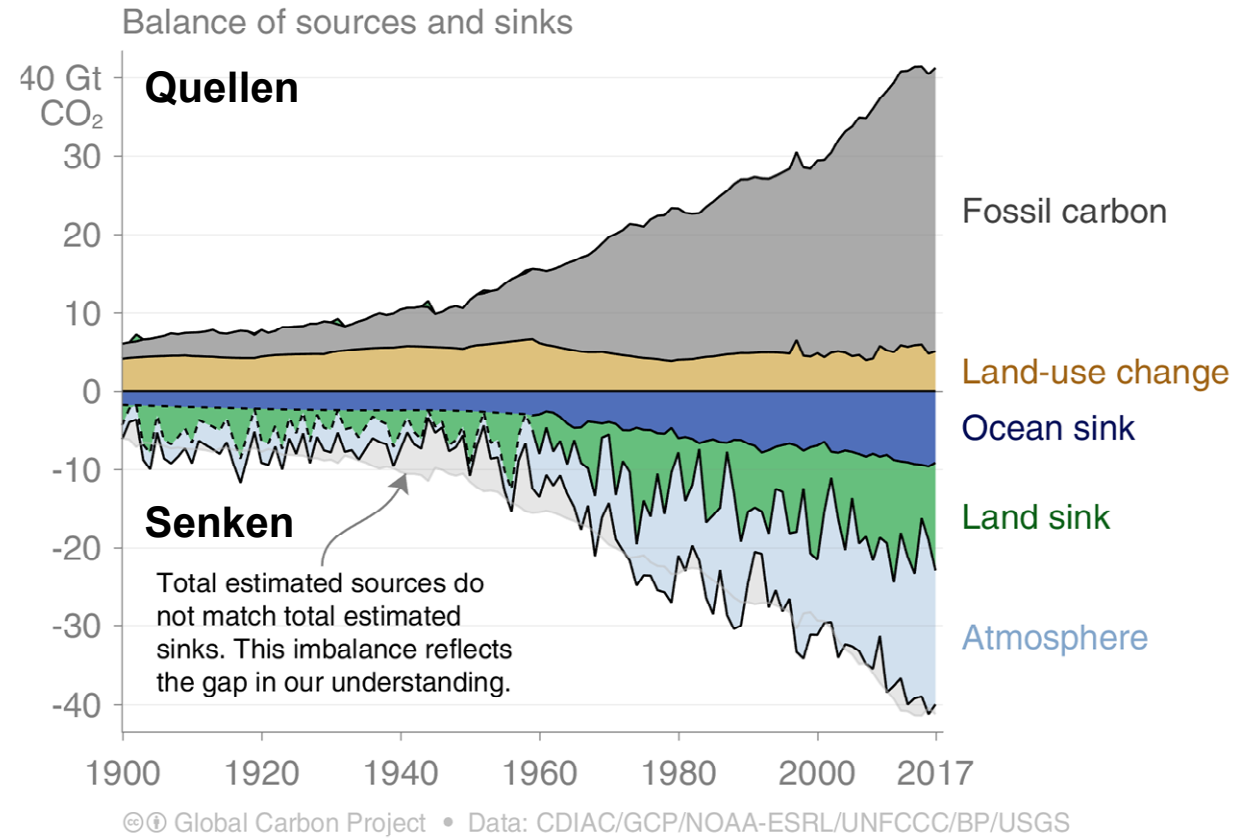
## Treibhausgase

Die Idee, dass Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) und andere Gase (wie H<sub>2</sub>O, N<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub>, CFC, HCFCs....) Treibhausgase sind, stammt von **Svante Arrhenius (1896)**. Deren Auswirkung (und Änderung) auf die atmosphärische Gegenstrahlung wird heute hochgenau mit spektroskopischen Methoden gemessen (e.g., Philipona et al., 2004; Feldmann et. al., 2015; und andere)





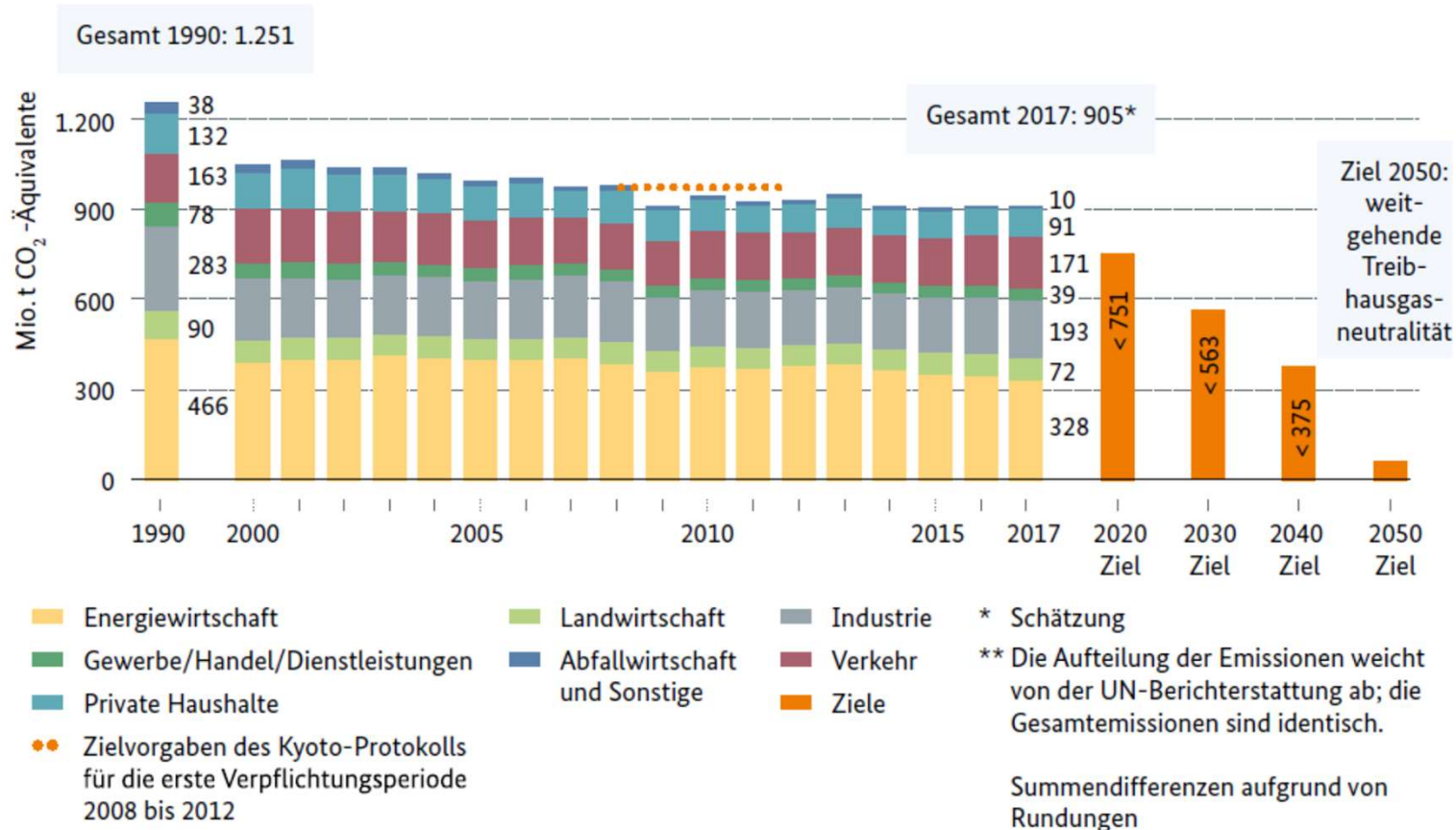
Global gemittelte atmosphärische CO<sub>2</sub> Konzentration am Boden seit 1960. Nach 1980 sind es NOAA-ESRL Daten.



Die Kohlenstoffquellen der fossilen Kraftstoffe, der Industrie und der Landnutzungsänderung sollten durch die Senken im Ozean, auf dem Land und dem atmosphärischen Reservoir gerade aufgehoben werden.



# Treibhausgasemissionen Deutschlands 1990 - 2017 (Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> Äquivalent)

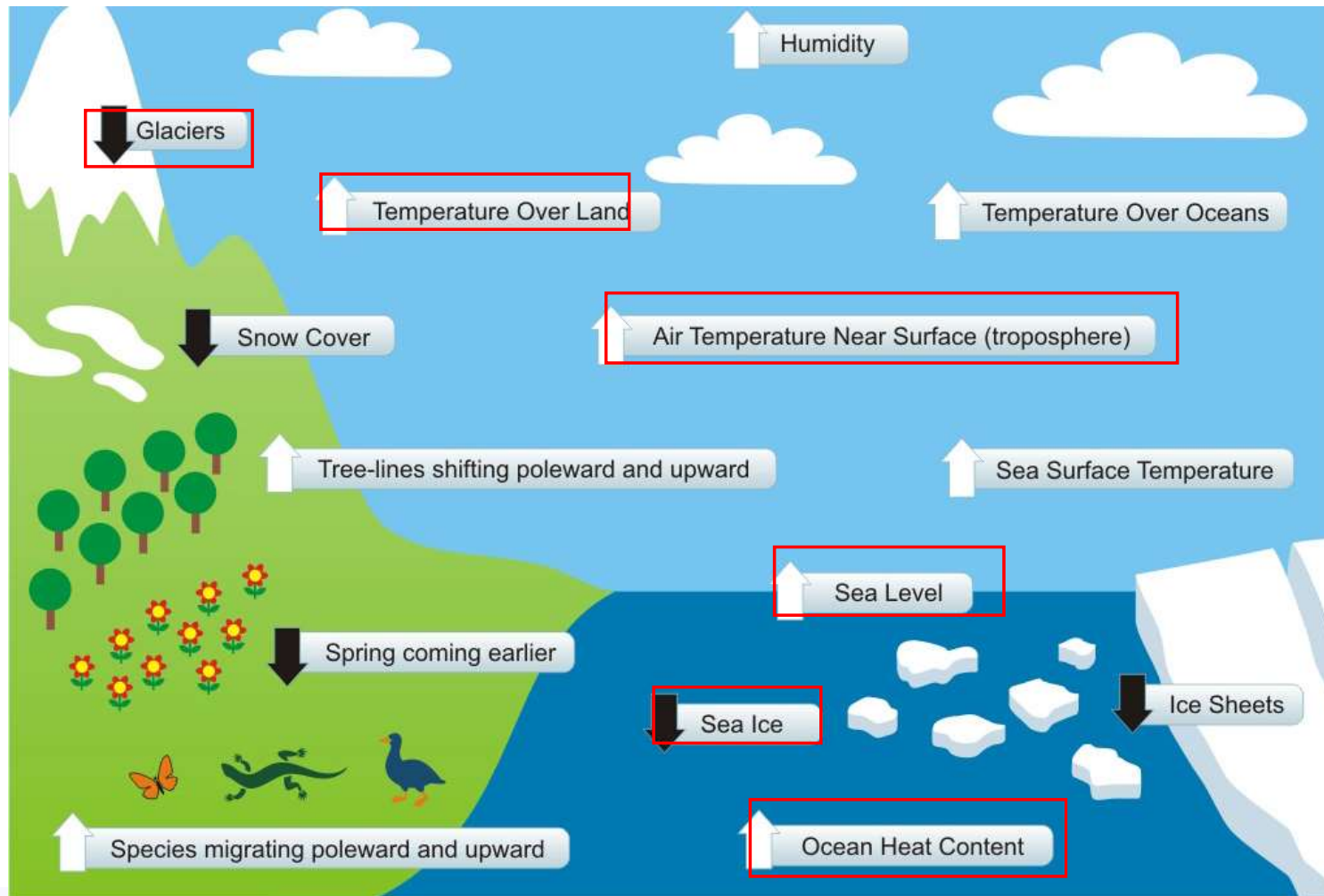


Quelle: UBA (2018a); Schätzungen 2017 basierend auf Pressemitteilung 09/2018

**Bundesumweltamt, 2018**

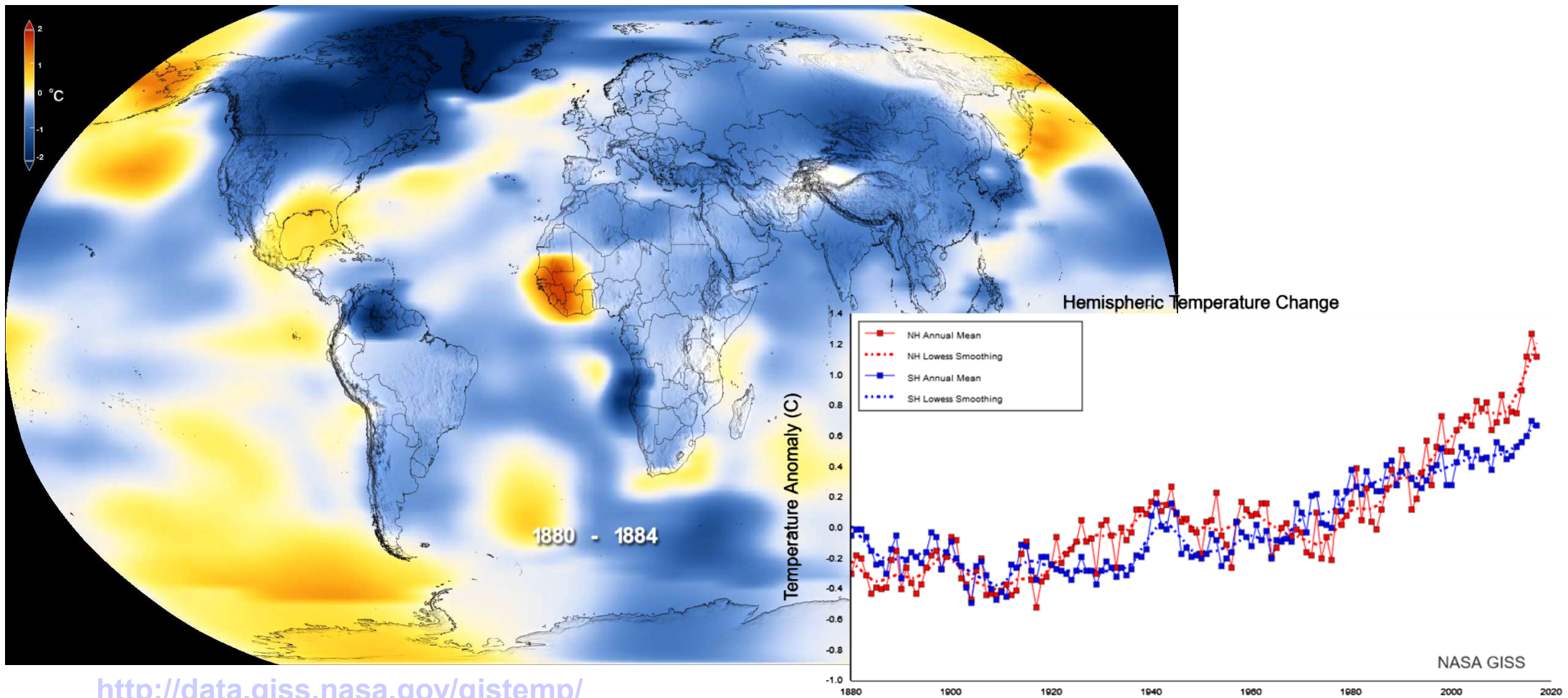


## Indikatoren für die globale Erwärmung





## Globale Indikatoren für die Klimaänderung: Hemisphärische Temperaturanomalie seit 1880

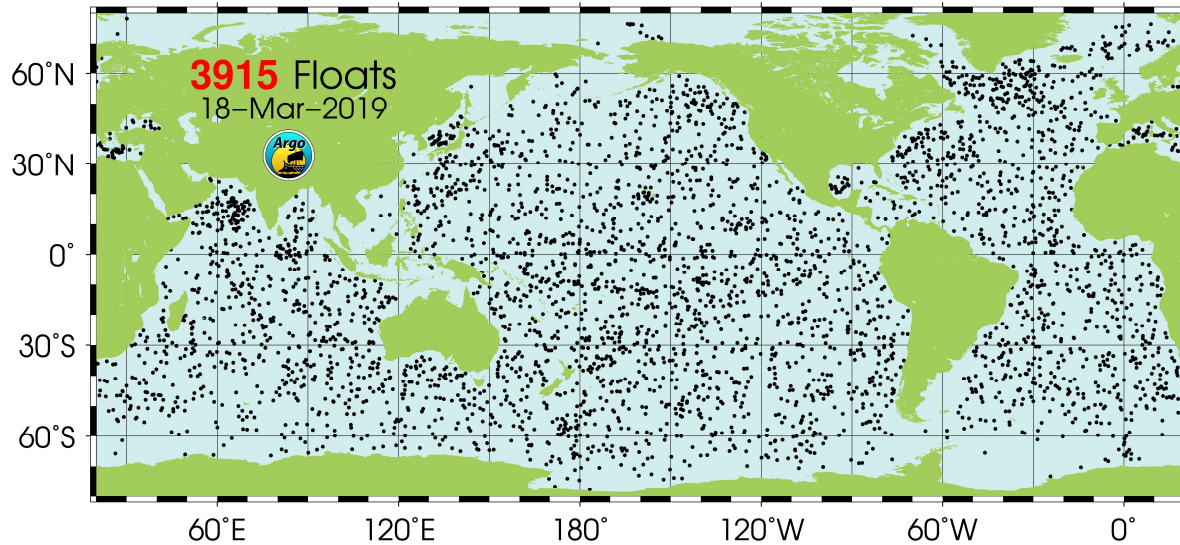


<http://data.giss.nasa.gov/gistemp/>

## Wärmeflüsse in das Klimasystem: Das Meer als Kalorimeter

Der Wärmeinhalt der Weltmeere wird heute u.a. mit Hilfe sogenannter Argo floats (tauchende Messroboter) genau vermessen siehe <http://www.argo.ucsd.edu/>

Verteilung der Argo floats am 18. März 2019



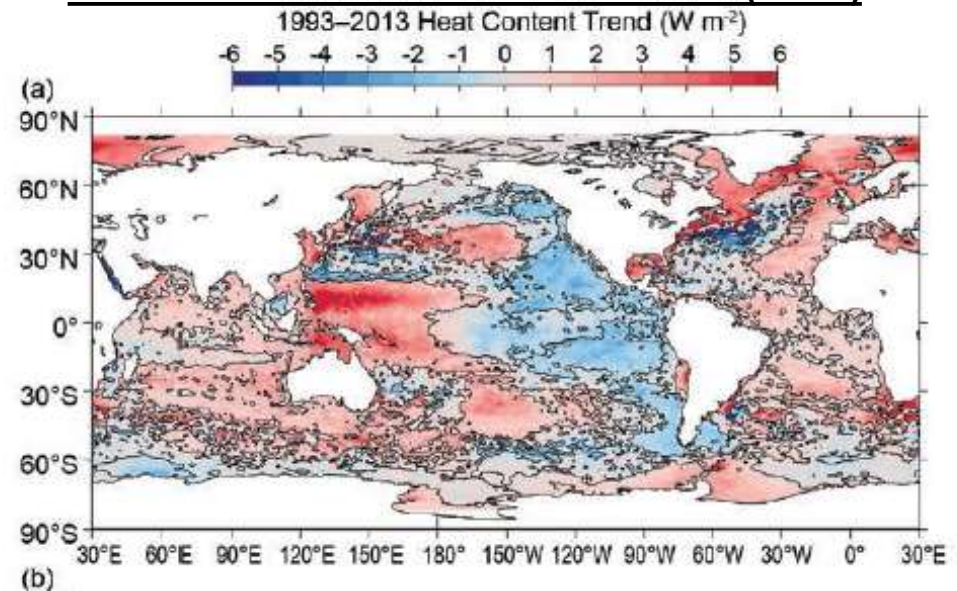
$$\text{Wärmefluss: } J_{\text{Ocean}} = c \cdot \Delta T_T / \Delta t / A_{\text{Ocean}(0-2000\text{m})}$$

$$= 0.54 \pm 0.02 \text{ W/m}^2$$

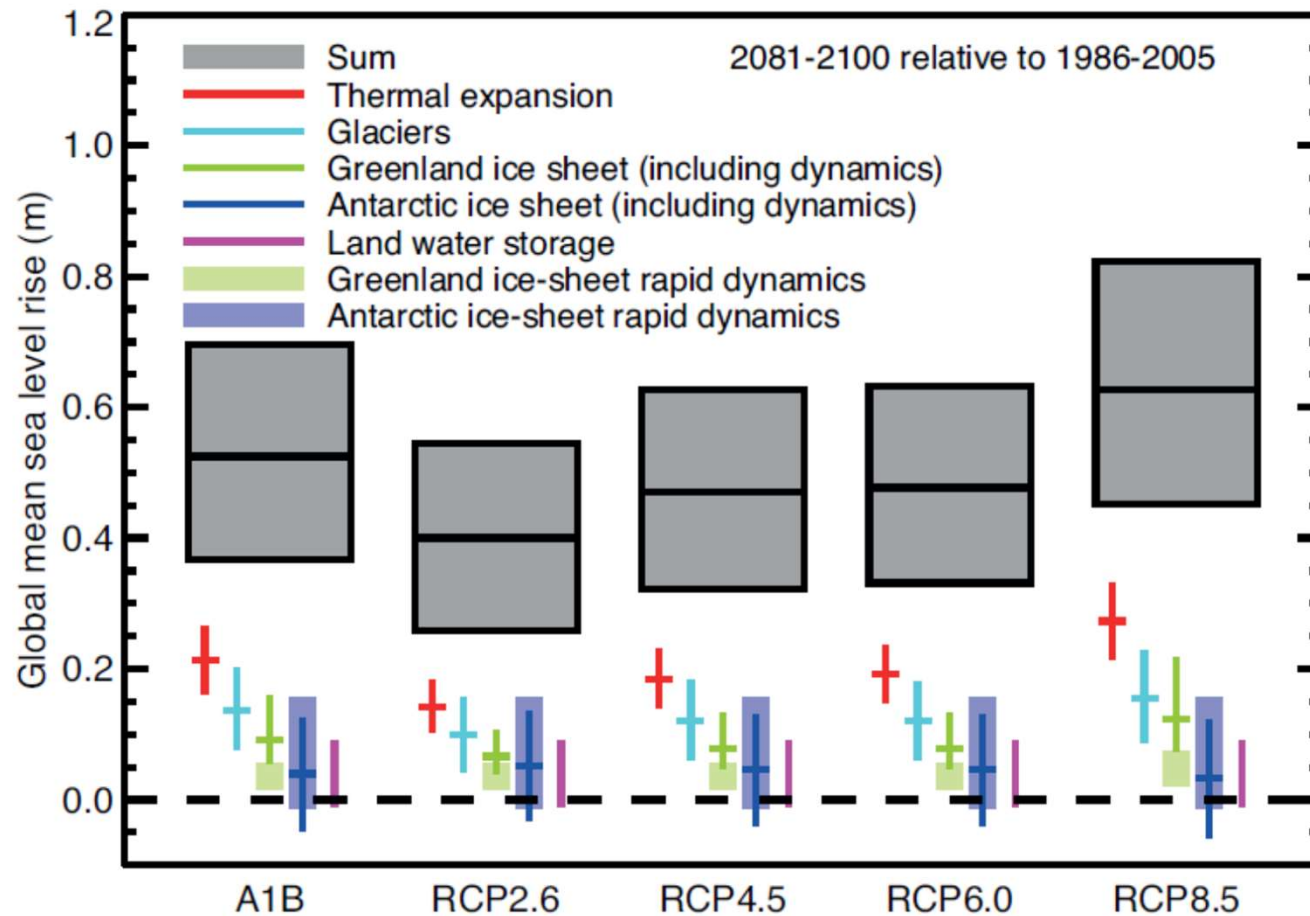
(für die Jahre 2005 – 2017)



Wärmefluss in den Ozean 1993 - 2013 (W/m<sup>2</sup>)



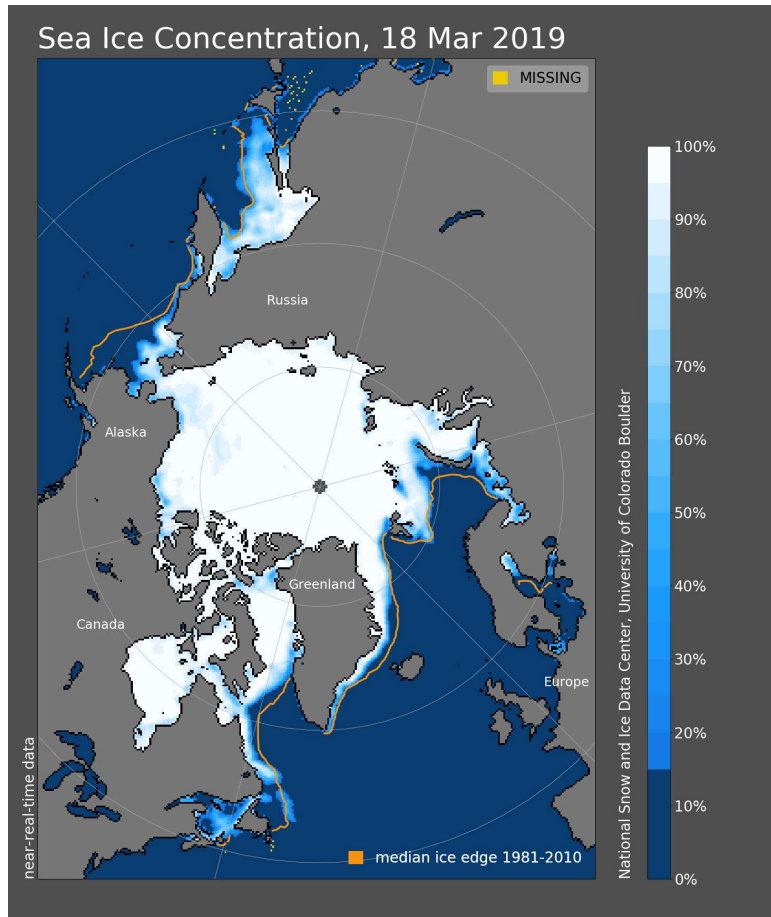
## Globale Indikatoren für die Klimaänderung: Meeresspiegelanstieg (2081-2100 relativ zu 1986-2005)



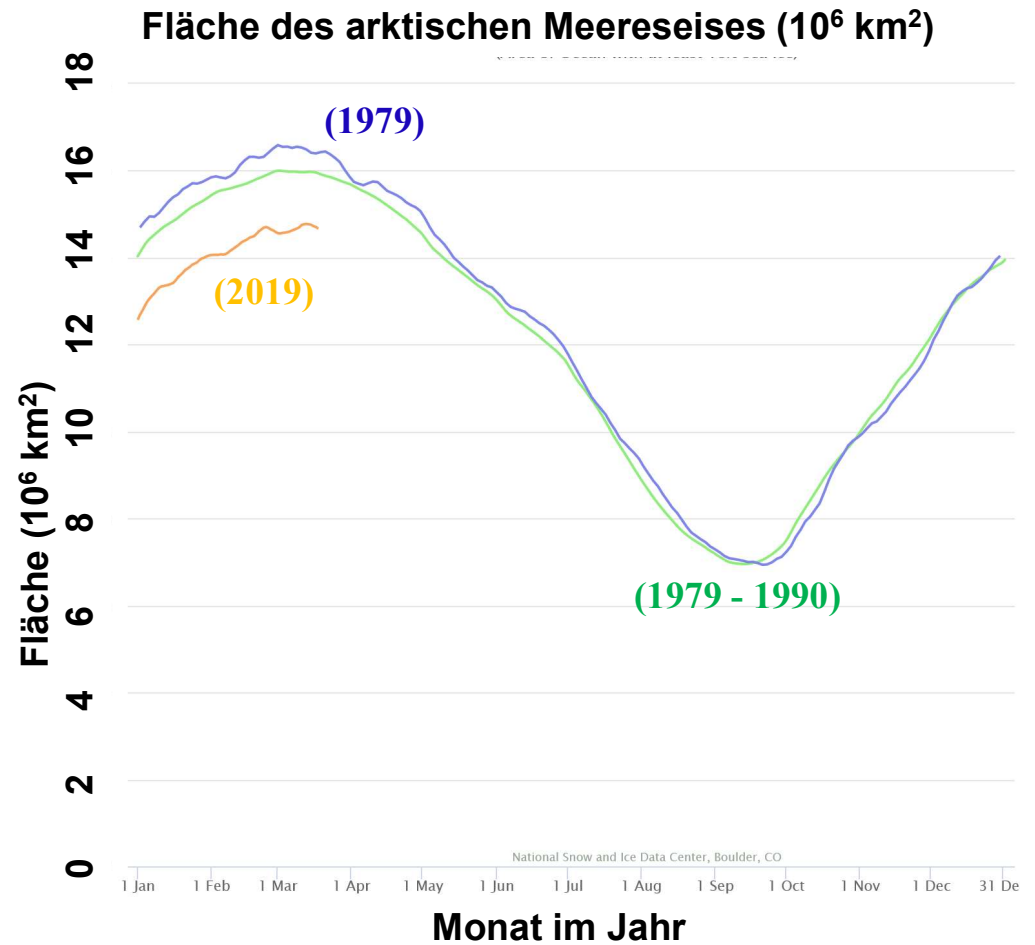
Church et al., IPCC-2013, Fig. 13.10



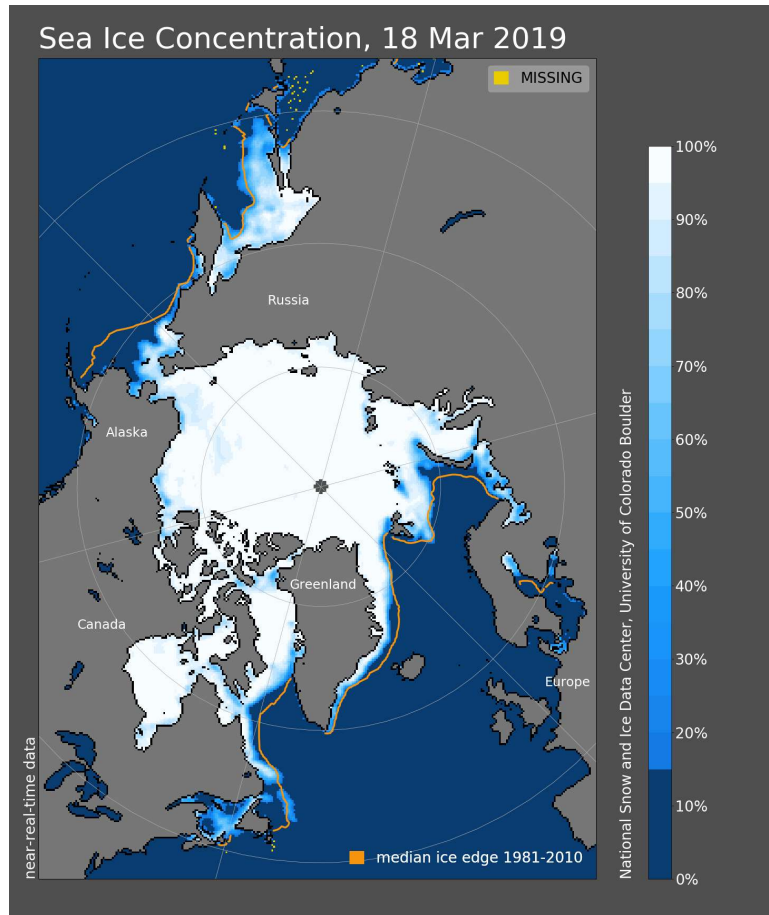
# Globale Indikatoren für die Klimaänderung: Änderung des arktischen Meereises



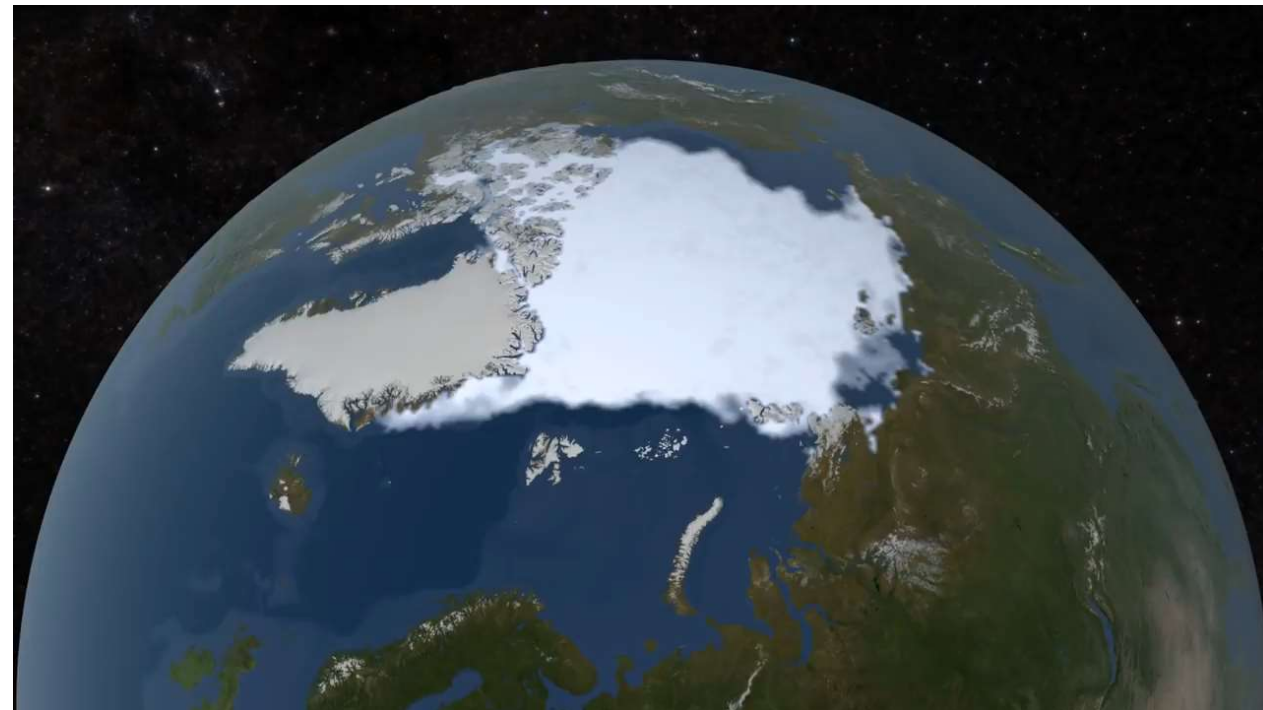
<http://nsidc.org/arcticseaicenews/>



## Globale Indikatoren für die Klimaänderung: Änderung des Meereseises in der Arktis



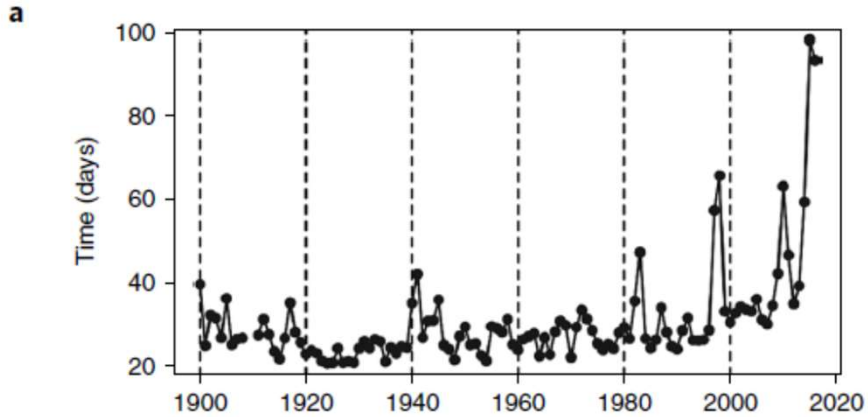
## Minimales jährliches Meereis der Arktis (1978 – 2018 Ende September)



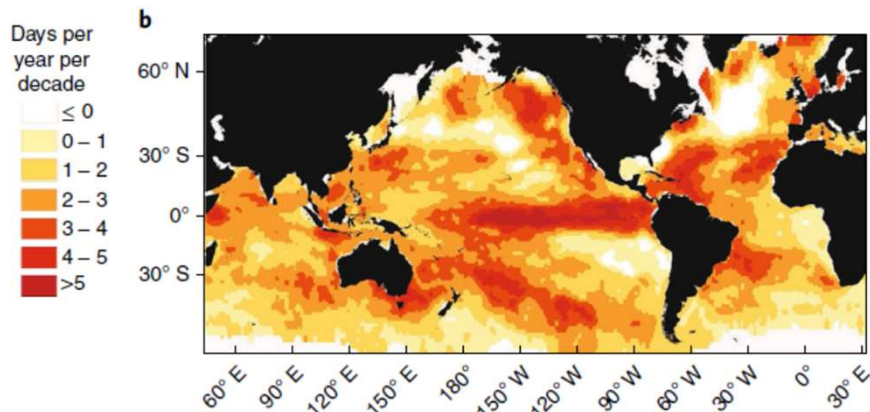
<http://nsidc.org/arcticseaicenews/>

# Globale Indikatoren für die Klimaänderung: Hitzewellen im Ozean und Korallenbleiche

## Zunahme der ozeanischen Hitzewellen (MHW)



## Trend der MHW 1987- 2016 vs 1925–1954



Smale et al., Nature Geoscience, 3. März, 2019



UNIVERSITÄT  
HEIDELBERG  
ZUKUNFT  
SEIT 1386



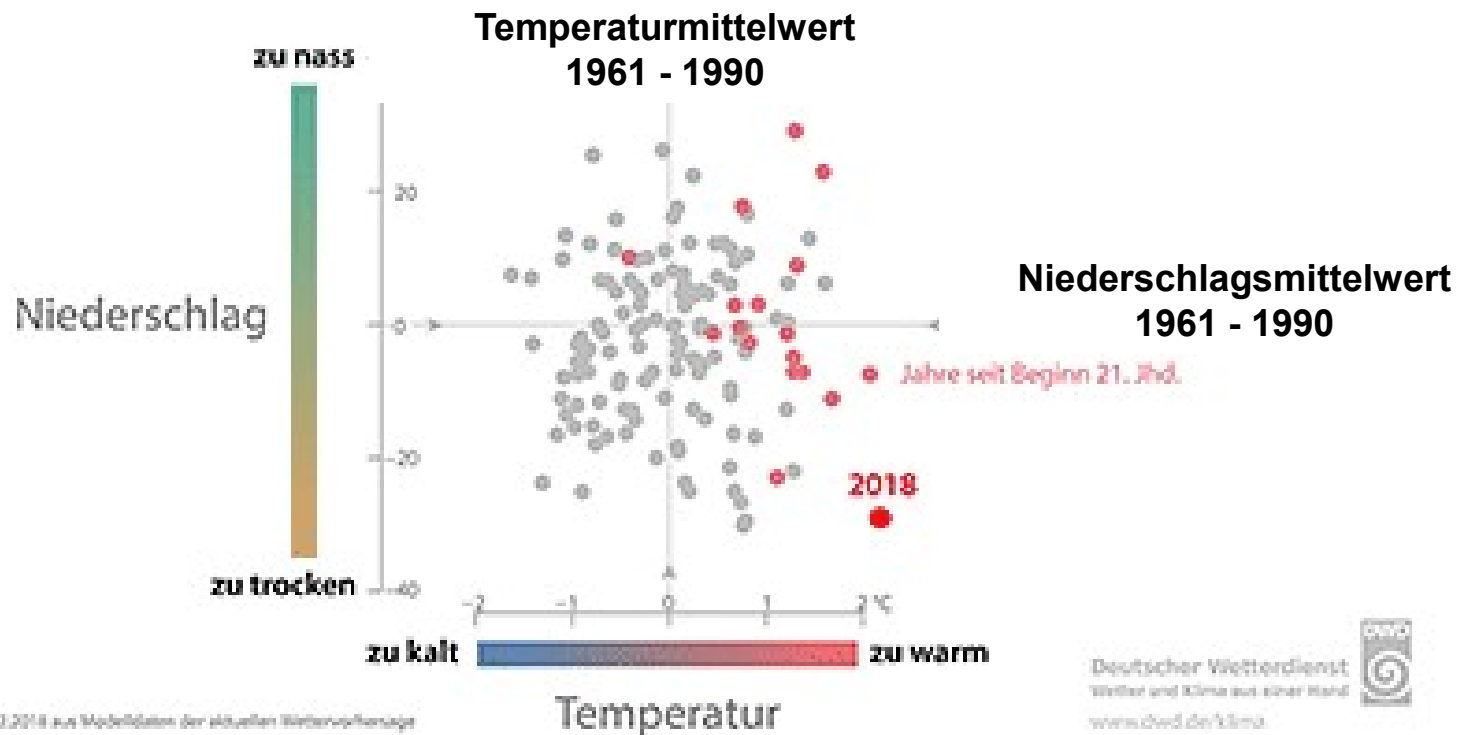
Institut für Umweltphysik  
University of Heidelberg



## Regionale Indikatoren für die Klimaänderung

# Wie außergewöhnlich war 2018 in Deutschland?

Abweichung Temperatur und Niederschläge 1981-2018



28. - 31.10.2018 aus Mittelwerten der aktuellen Wettervorhersage



UNIVERSITÄT  
HEIDELBERG  
ZUKUNFT  
SEIT 1386

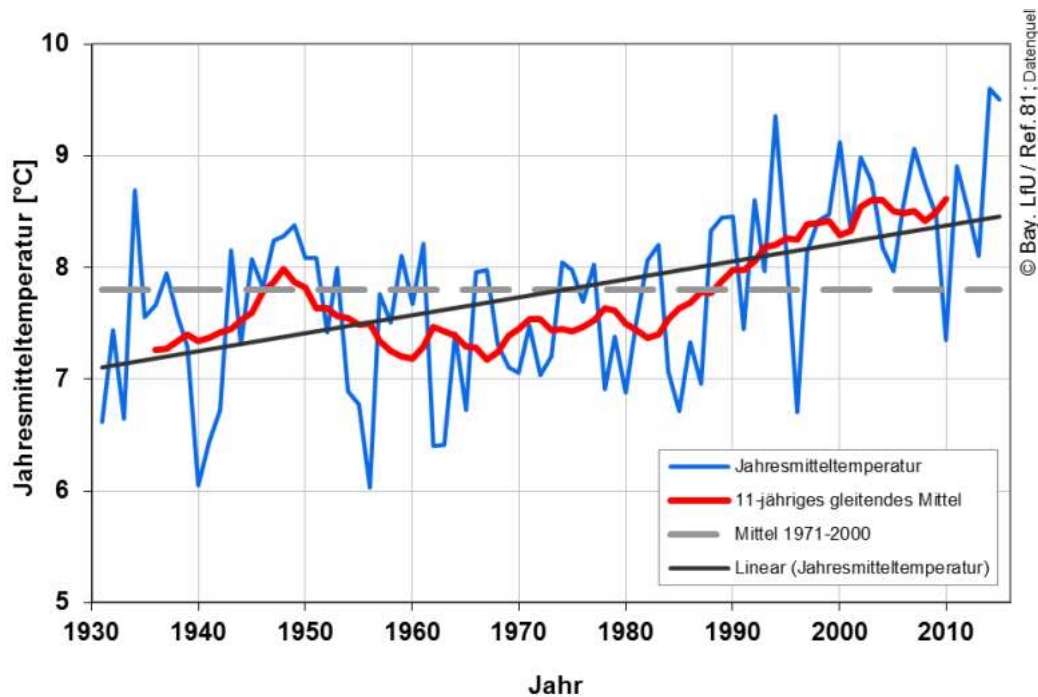


Institut für Umweltphysik  
University of Heidelberg

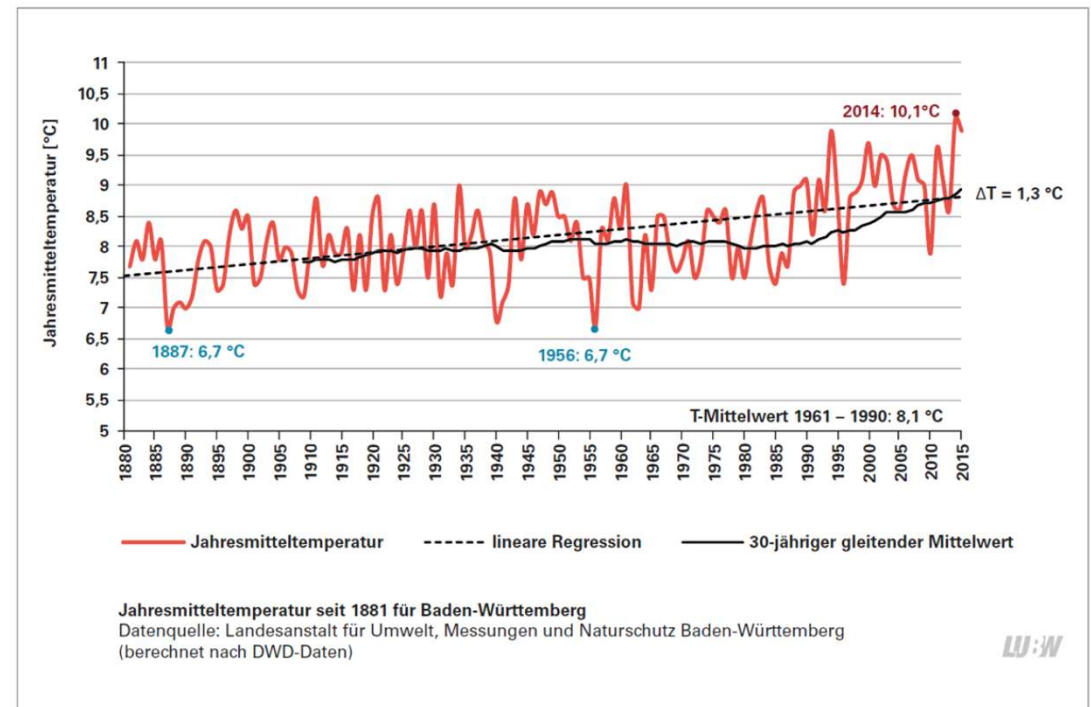


# Regionale Indikatoren für die Klimaänderung: Verlauf der Jahresmitteltemperatur

## Bayern (1931 – 2015)



## Baden-Württemberg (1881 - 2015)



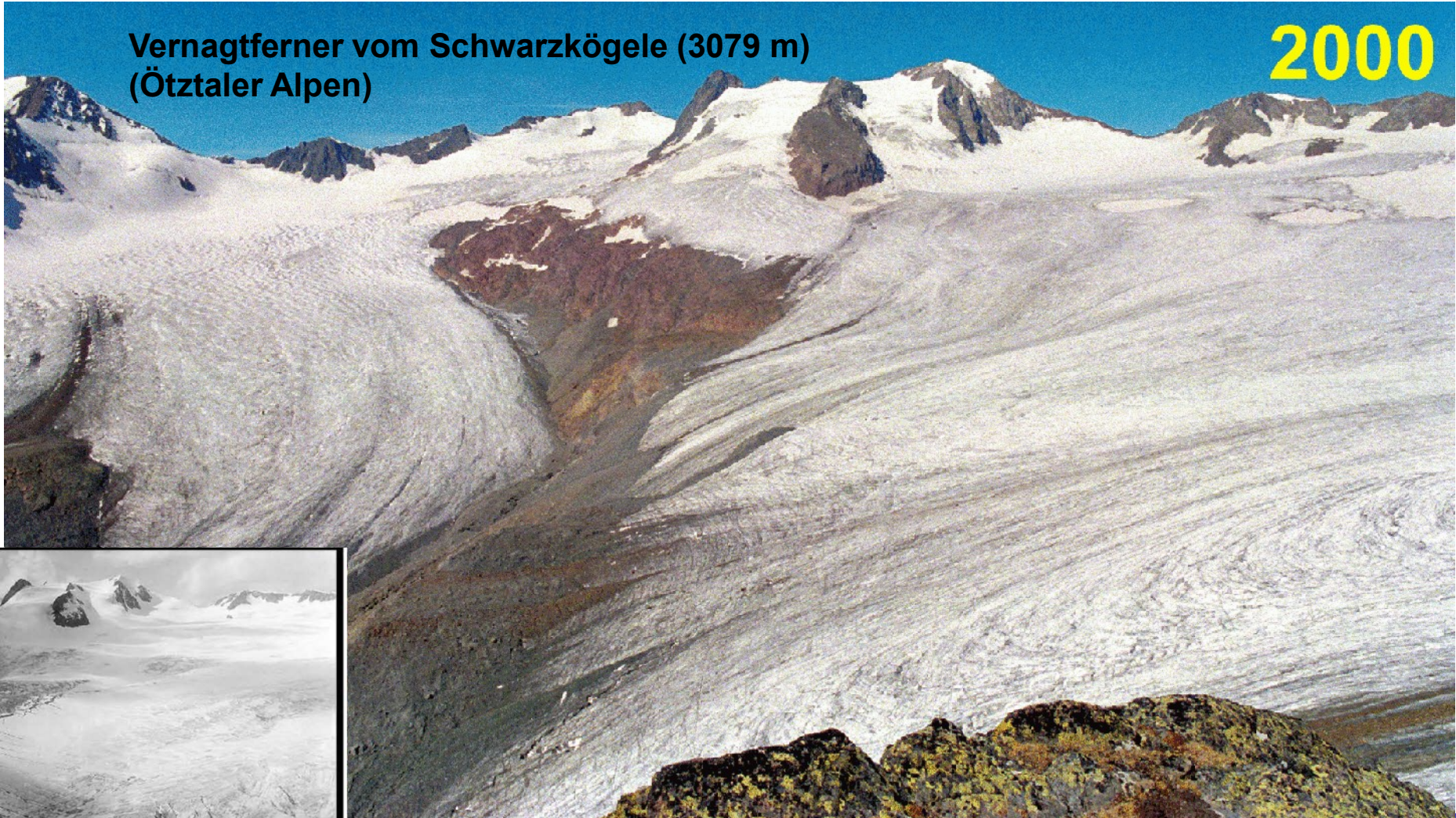
LfU, siehe [http://www.lfu.bayern.de/wasser/klima\\_wandel/klimaveraenderung/lufttemperatur/index.htm](http://www.lfu.bayern.de/wasser/klima_wandel/klimaveraenderung/lufttemperatur/index.htm)



## Regionale Indikatoren für die Klimaänderung: Schwinden der Alpengletscher

Vernagtferner vom Schwarzkögele (3079 m)  
(Öztaler Alpen)

2000



1902



UNIVERSITÄT  
HEIDELBERG  
ZUKUNFT  
SEIT 1386

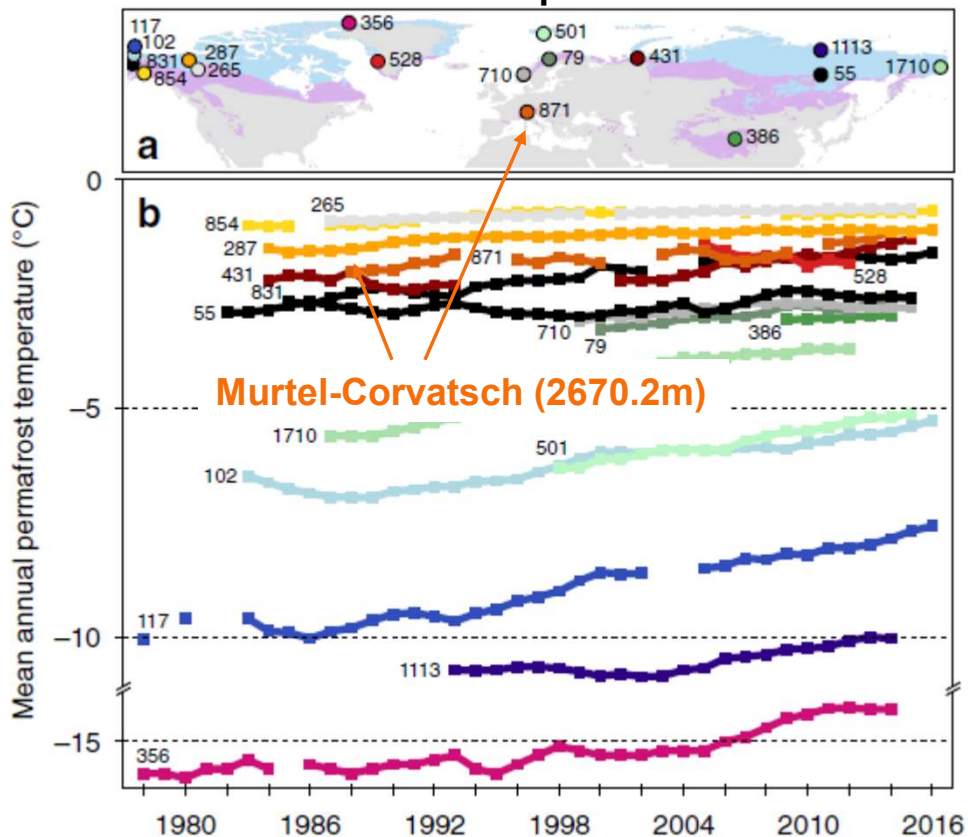


Institut für Umweltphysik  
University of Heidelberg



# Regionale Indikatoren für die Klimaänderung: Permafrost und Stabilität der Hochalpen

Permafrost Temperaturtrend



Biskaborn et al., Nature communication, 2019

Spalt am Hochvogel (2592m) (Allgäuer Alpen)



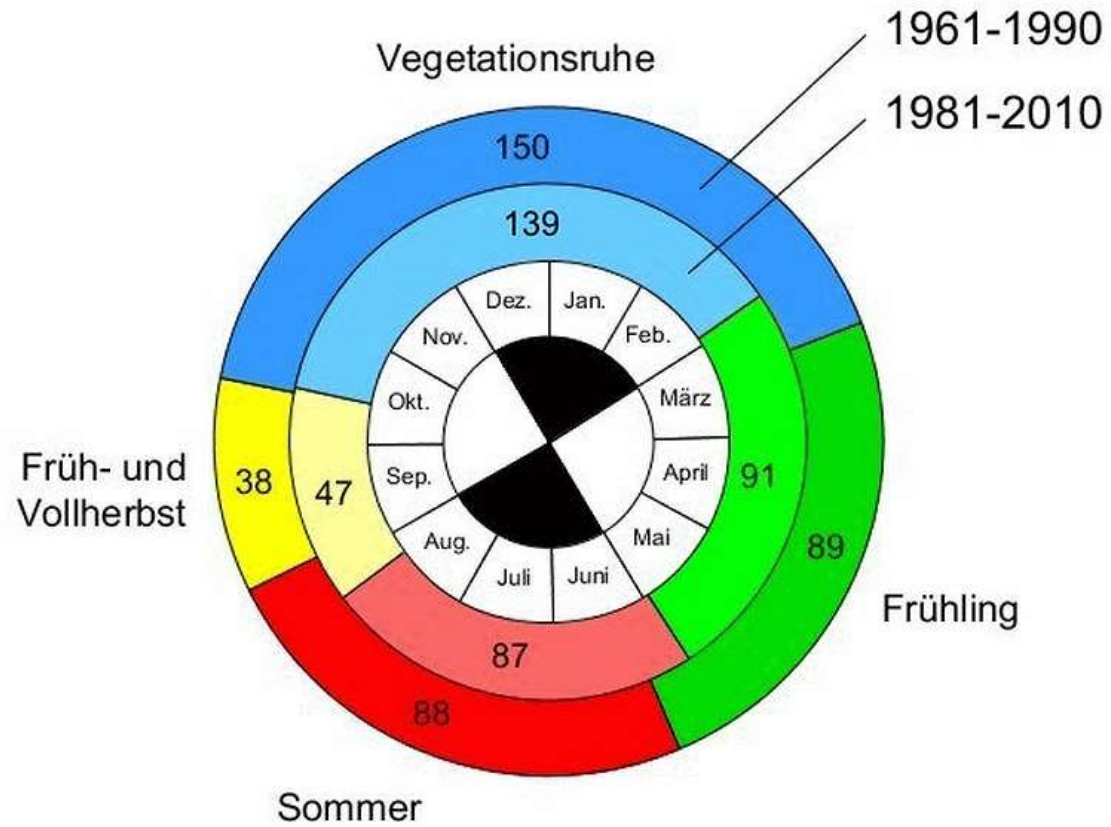
UNIVERSITÄT  
HEIDELBERG  
ZUKUNFT  
SEIT 1386



Institut für Umweltphysik  
University of Heidelberg



## Phänologische Jahreszeiten in Bayern



LfU, Bayern, 2018



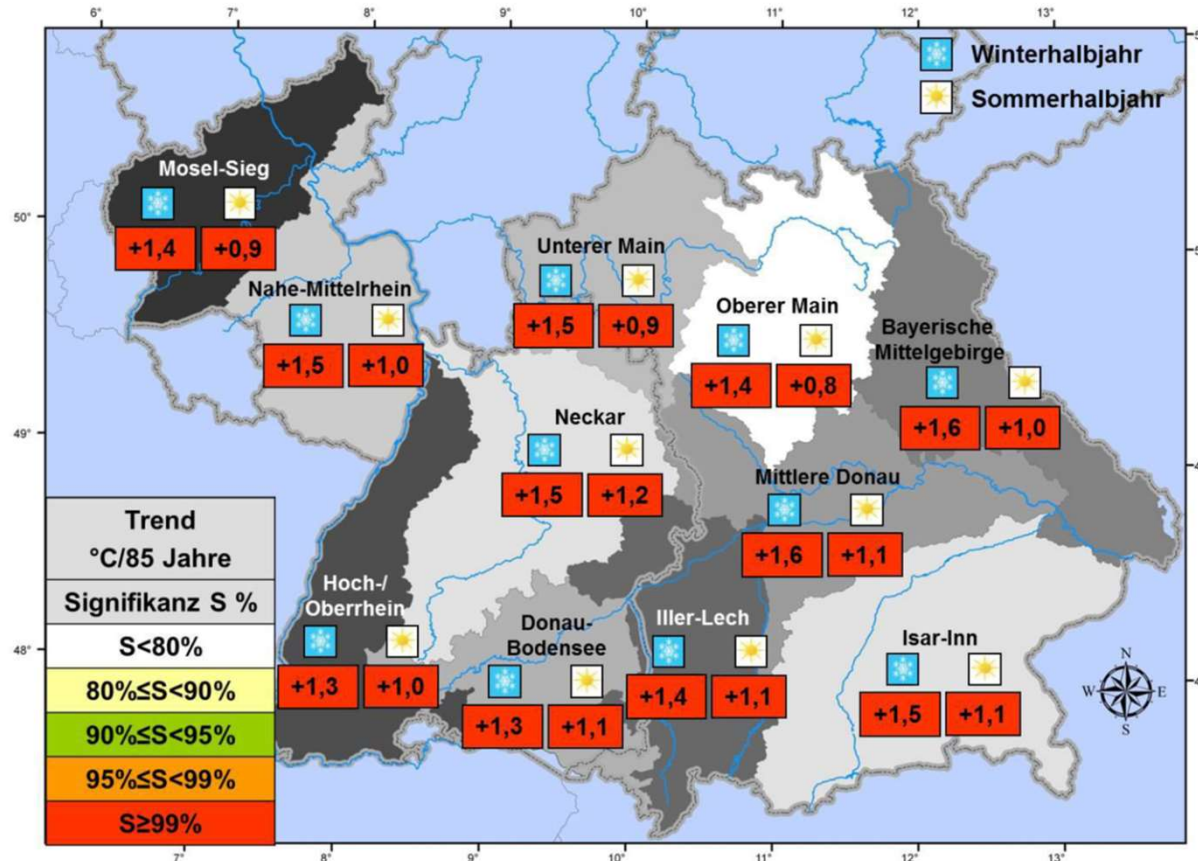
UNIVERSITÄT  
HEIDELBERG  
ZUKUNFT  
SEIT 1386



Institut für Umweltphysik  
University of Heidelberg



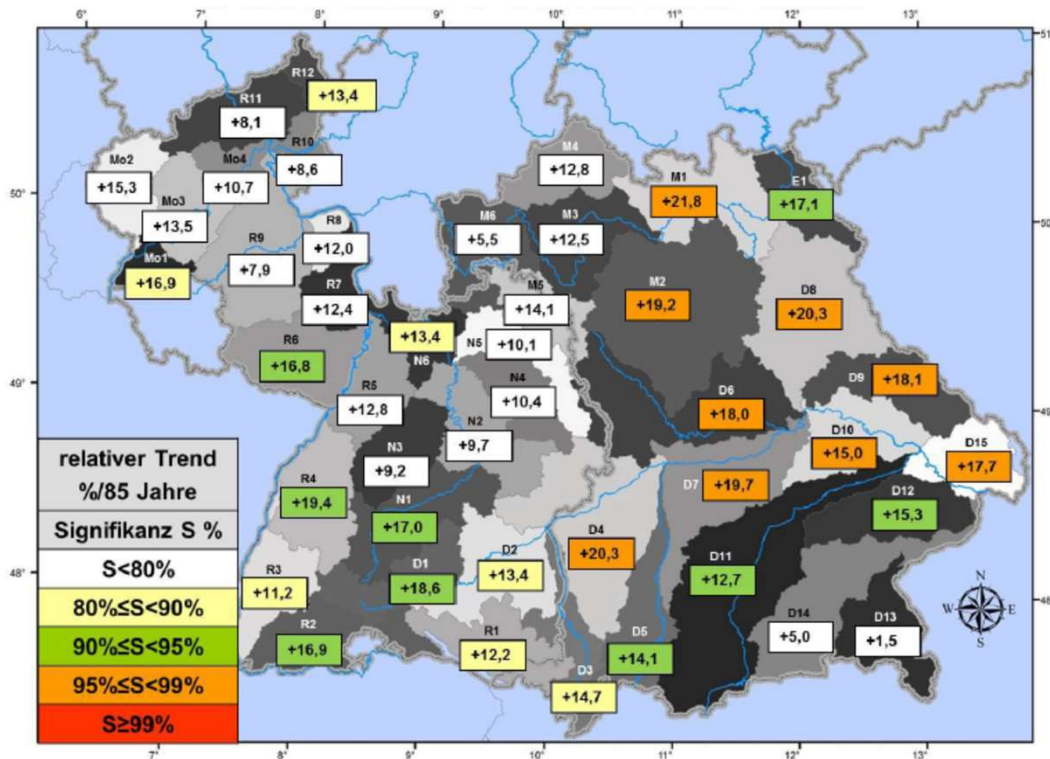
## Regionale Indikatoren für die Klimaänderung: Trend der Gebietstemperatur im Winter und Sommer (1931 – 2015)



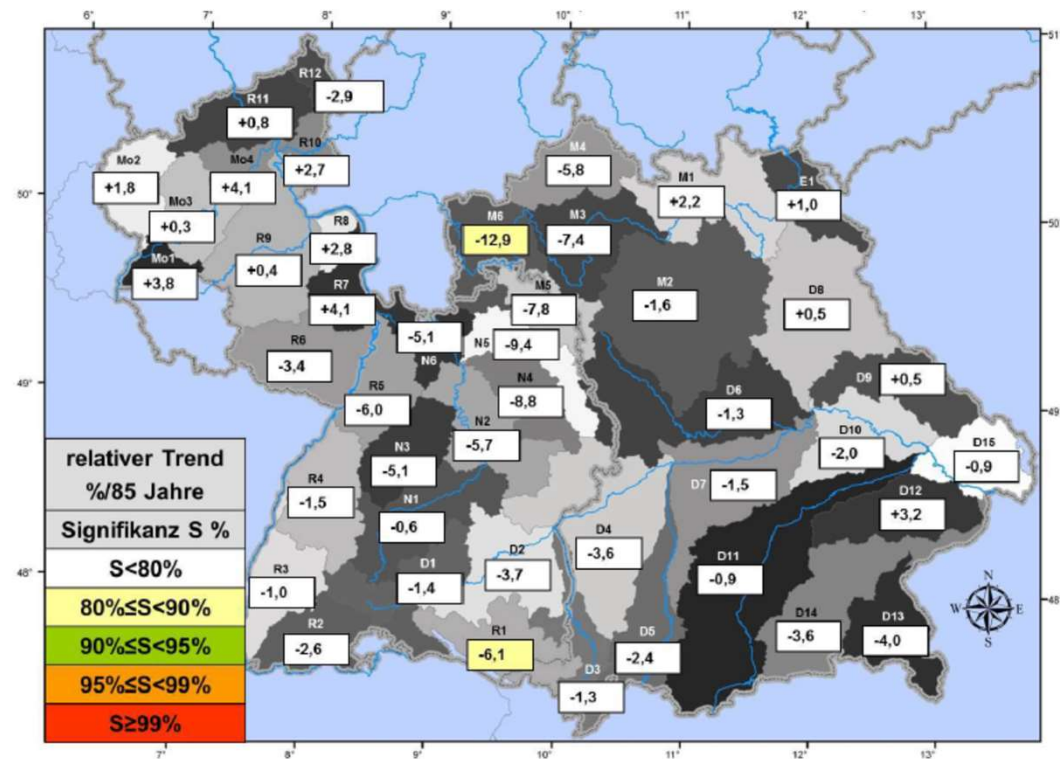
Aus: Klimawandel in Süddeutschland, Klimamonitoring im Rahmen der Kooperation KLIWA, Monitoringbericht, 2016.

# Regionale Klimaindikatoren: Trend (1931 - 2015) der Niederschlagsmengen in RP, Ba-Wü und Bayern

## Winterhalbjahr



## Sommerhalbjahr



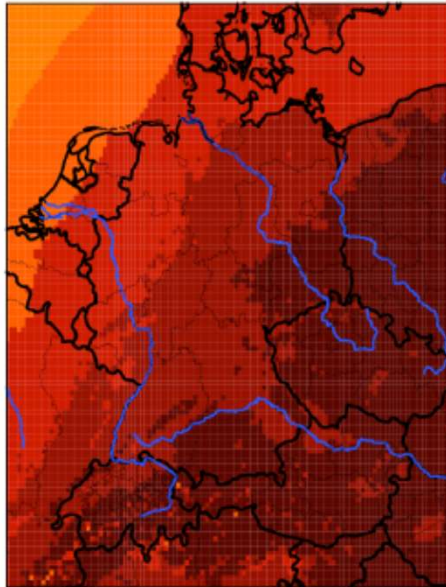
Aus: Klimawandel in Süddeutschland, Klimamonitoring im Rahmen der Kooperation KLIWA, Monitoringbericht, 2016.

## Regionale Klimaprojektionen (2071 - 2100 vs 1971 - 2000) des REMO Modells in 10x10 km<sup>2</sup> Auflösung im A1B1 Szenario

### Lufttemperatur

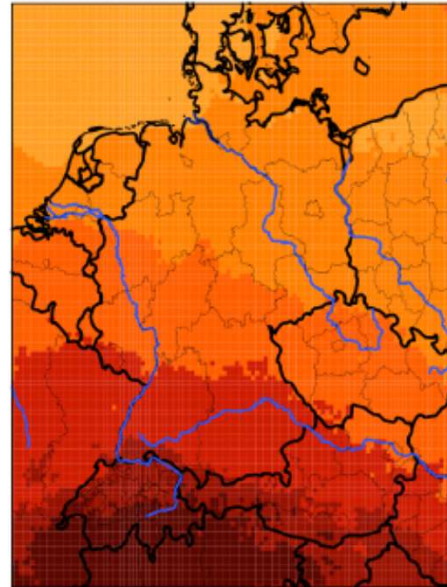
DFJ

Differenz 2m Lufttemperatur DJF [K]  
REMO A1B\_1 2071-2100 / 1971-2000



JJA

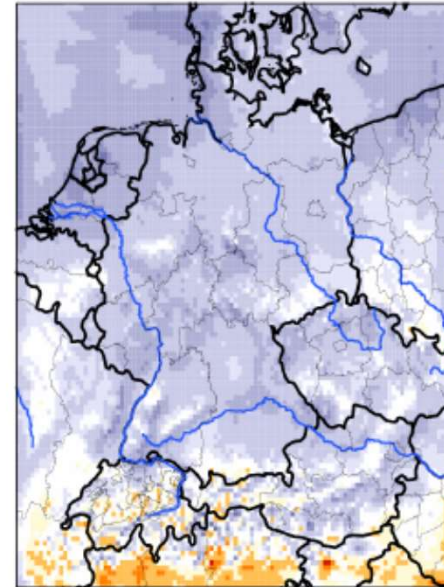
Differenz 2m Lufttemperatur JJA [K]  
REMO A1B\_1 2071-2100 / 1971-2000



### Niederschlag

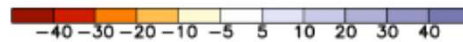
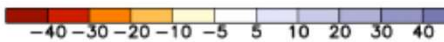
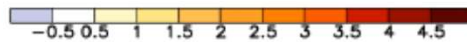
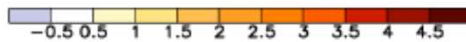
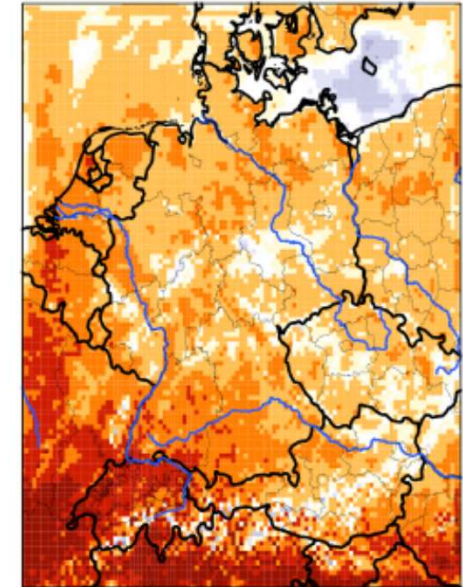
DFJ

Differenz Niederschlag DJF [%]  
REMO A1B\_1 2071-2100 / 1971-2000



JJA

Differenz Niederschlag JJA [%]  
REMO A1B\_1 2071-2100 / 1971-2000



Temperaturänderung (Grad Celsius)

Änderung (%)

[https://www.climate-service-center.de/imperia/md/content/csc/csc\\_report6.pdf](https://www.climate-service-center.de/imperia/md/content/csc/csc_report6.pdf)



UNIVERSITÄT  
HEIDELBERG  
ZUKUNFT  
SEIT 1386



Institut für Umweltphysik  
University of Heidelberg



## 4. Zusammenfassung

1. Die **anthropogen bedingte Klimaänderung** durch die Emission an Treibhausgasen ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ , CFC, HCFC, LLHC ..) steht wissenschaftlich auf soliden Grundlagen (Svante Arrhenius, 1896). Andere natürliche Faktoren (Änderung des solaren Antriebs, Vulkanausbrüche, El Nino/La Nina, PDO, NAO ..) spielen für das langfristige Klimageschehen eine untergeordnete Rolle!
2. Die **derzeitige Klimaänderung** zeigt sich konsistent in vielen globalen, aber auch regionalen Klimaindikatoren!
3. Das **quantitative Verständnis** einer Reihe von Prozessen (Niederschlagsbildung, Rückkopplungen der Lufttemperatur auf die Biosphäre, Folgen der Ozeanversauerung, Gletscherdynamik, dekadische Oszillation, ....) im Klimasystem ist aber noch (und wird wohl noch lange) mangelhaft bleiben, denn die Zusammenhänge entziehen sich tlw. einer **strengen Kausalität**.
4. Die **Prognosen für den weltweiten Temperaturanstieg** bis 2100 schwanken zwischen **+2° bis +8° C** je nach Emissionsszenario, mit starken regionalen Unterschied (stärkerer T Anstieg in der Arktis, als z.B. in den Tropen).

→ Die Folgen des T Anstieg für die regionalen Klima werden teilweise dramatisch sein, aber weltweit am Wichtigsten wird wohl der **Anstieg des Meeresspiegels** und die Auswirkung der ozeanischen Versauerung auf die **marine Flora und Fauna** sein.

## 4. Schlußfolgerung

Die Folgen des anthropogenen Klimawandels lassen sich nur durch ein Bündel an Maßnahmen der

1. Emissionsvermeidung von Treibhausgasen (engl. Mitigation)
2. Verstärkung der CO<sub>2</sub> Senken (z.B. Aufforstung, carbon capture&storage (CCS),...)
3. Adaption an den Klimawandel (engl. Adaption), also doch Schneekanonen auf der Felderhalde  $\lambda$ , Laubbäume statt Fichten pflanzen, Obst- und später Weinbau statt Milchwirtschaft im Allgäu, vielleicht auch einmal Wasserrationierung et cetera.....

sowie möglicherweise des

4. Geoengineering (Verstärkung der Verwitterung, Strahlungsmanagement, ....)

eindämmen.....!