

# Regionale Klimamodellierung

Jan Volkholz



Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung

Leipzig, 31.5.2017

# Inhalt

Vorbemerkungen

Klima und Klimawandel

Emissionsszenarien

Erdsystemmodelle

Regionale Klimamodellierung

Zusammenfassung

# Outline

Vorbemerkungen

Klima und Klimawandel

Emissionsszenarien

Erdsystemmodelle

Regionale Klimamodellierung

Zusammenfassung

# Klimafolgen

Potsdam Institut für Klimafolgenforschung

*Klimafolgen/Klimawirkungen: Konsequenzen des Klimawandels*, wie z.B.

- Veränderungen in Ernteerträgen (höher oder geringer)
- Auswirkungen auf die Gesundheit
- Überflutungen und Dürren (mehr oder weniger)
- Küstenschutz aufgrund des Meeresspiegelanstieges
- Absterben von Korallenriffen aufgrund der Versauerung der Ozeane

usw.

# Regionale Klimamodellierung

- eines der wichtigsten Werkzeuge für die Klimafolgenforschung: **Klimamodelle**
- **Skala der Klimafolgenforschung** eher klein (**einige Kilometer und weniger**), das ist die Größe von Städten, Feldern, Einzugsgebieten, Waldbeständen usw.
- kann (noch) nicht global modelliert werden da die Rechenleistung dafür nicht ausreicht → **regionales Klimamodell**, das nur einen Teil der Erde modelliert
- **wichtigste Variablen** in der Klimafolgenforschung: **Temperatur** und **Niederschlag** (im folgenden im Fokus)

# Regionale Klimamodellierung

1. Annahme einer zukünftigen Entwicklung /  
Emissionsszenario
2. Simulation der globalen Atmosphäre mit einem globalen  
Modell
3. Simulation der Fokusregion mit höher aufgelöstem  
Regionalmodell („*Downscaling*“)

# Outline

Vorbemerkungen

**Klima und Klimawandel**

Emissionsszenarien

Erdsystemmodelle

Regionale Klimamodellierung

Zusammenfassung

# Was ist Klima?

„*Klima*“ bezieht sich auf **statistische Eigenschaften** einer oder mehrerer meteorologischen Variablen **über einen längeren Zeitraum** (WMO: 30 Jahre)

- Median
- Varianz
- Extremereignisse (Fluten, Dürren, Hitzewellen)

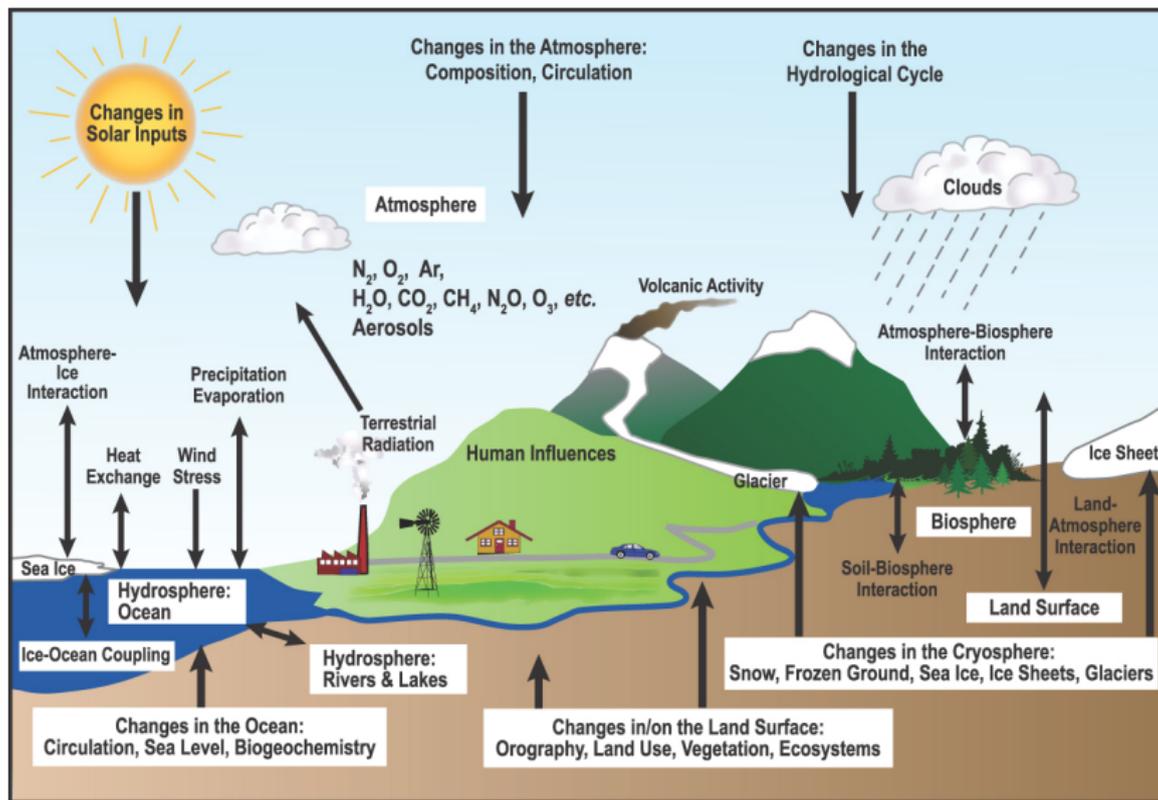
wenn eine Klimasimulation gemacht wird, lautet die Frage nicht

~~„Wie hoch ist die Temperatur in Augsburg am 4.2.2086?“~~

sondern

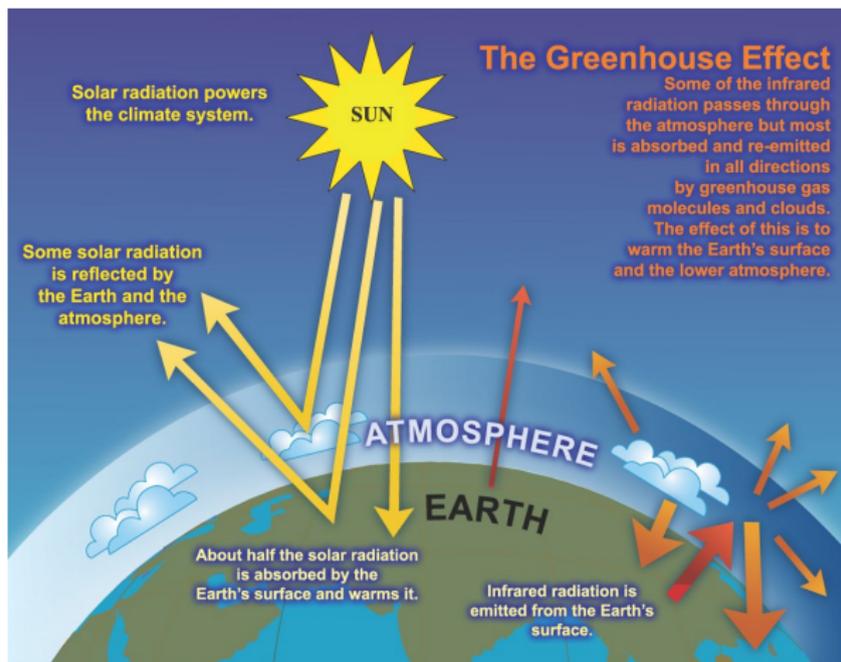
*„Was sind die statistischen Eigenschaften der Temperatur in Augsburg in der Zeitspanne 2071 ... 2100 unter einem bestimmten Emissionsszenario?“*

# Das Klimasystem



Quelle: IPCC SB4 2007

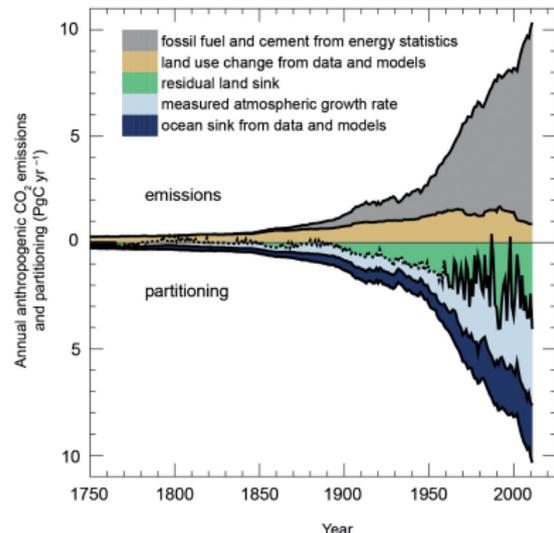
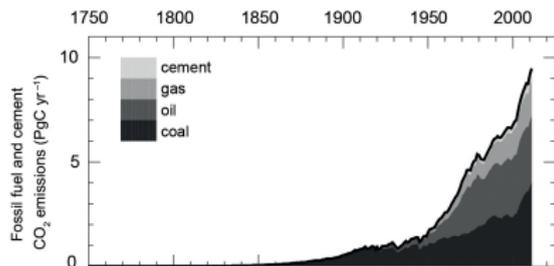
# Treibhauseffekt



Quelle: IPCC AR4 2007

Durchschnittstemperatur ohne Atmosphäre (gleiches Albedo):  $-18^{\circ}\text{C}$ ,  
mit Atmosphäre  $14^{\circ}\text{C}$

# CO<sub>2</sub> Emissionen in die Atmosphäre



Quelle: IPCC AR5 (2013)

- erhöhte anthropogene CO<sub>2</sub> Emissionen begannen in der 2. Hälfte des 19. Jhd (Industriezeitalter)
- **beschleunigt sich** noch

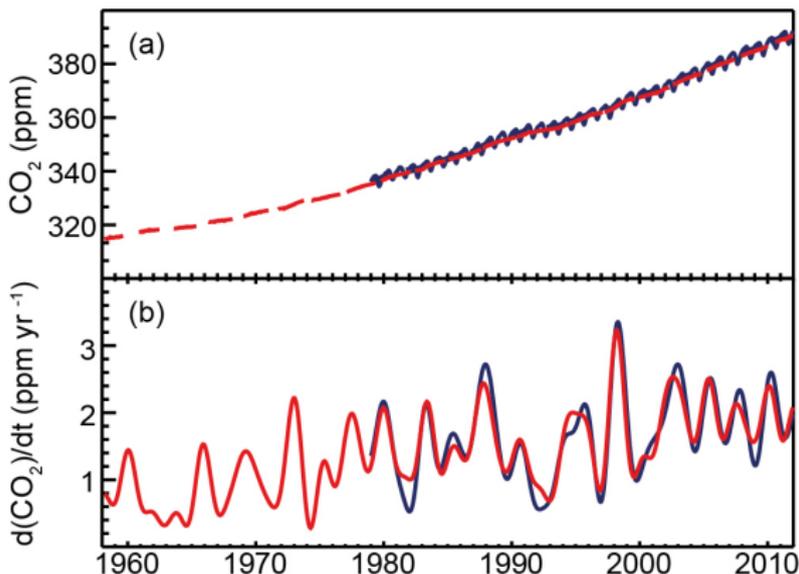
2002–2011	+3.2 % / Jahr
1990er	+1 % / Jahr

- Hauptursprung sind **fossile Brennstoffe** (Kohle, Öl, Erdgas) und **Zementproduktion**
- emittiertes CO<sub>2</sub> wird von der **Atmosphäre**, **Biosphäre** und den **Ozeanen** absorbiert

# CO<sub>2</sub> Konzentration in der Atmosphäre

gemessen auf Mauna Loa, Hawaii

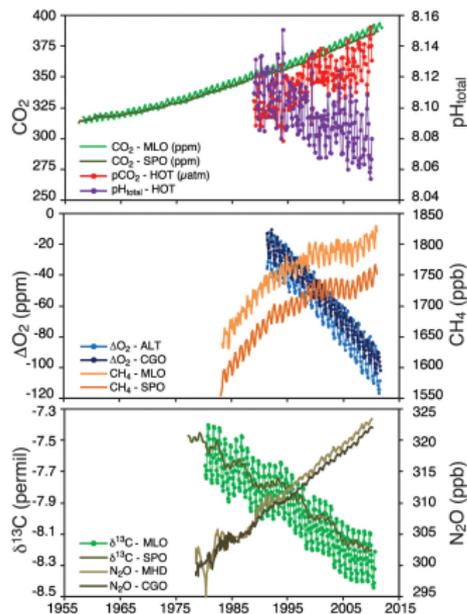
auch als „*Keeling-Kurve*“ bekannt (nach Charles David Keeling)



Jahreszyklen durch Vegetationszyklen verursacht

Quelle: IPCC AR5

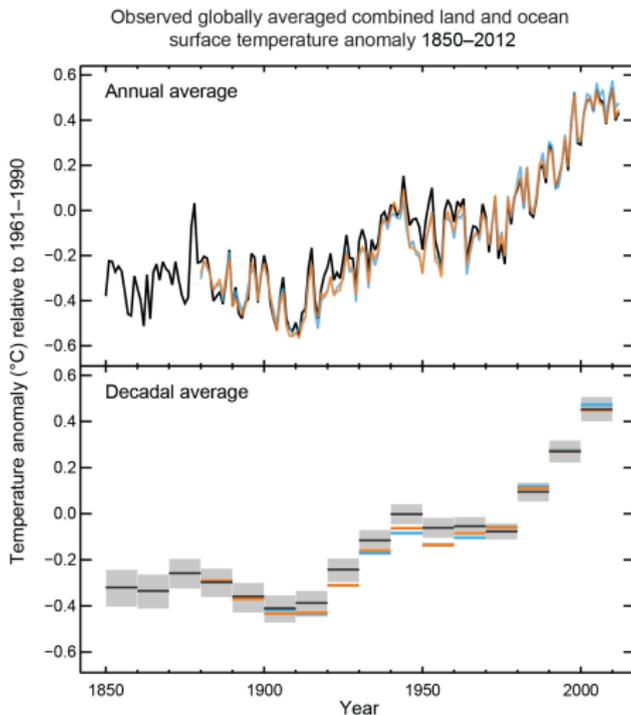
# CO<sub>2</sub>, Methan, Stickoxide



Quelle: IPCC AR5 (2013)

- CO<sub>2</sub> nicht das einzige wichtige Treibhausgas
- Methan und Stickoxide auch wichtig
  - Methan hat sich im Vergleich zum vorindustriellen Zeitalter um einen Faktor 2.5 erhöht, hauptsächlich wegen mehr **Wiederkäuern**, **fossilen Brennstoffen** und der Ausdehnung von **Reisfeldern**
  - Stickoxide haben sich um einen Faktor von 1.2 (verglichen mit vorindustriell) erhöht, hauptsächlich wegen **Änderungen im Stickstoffkreislauf**

# Klimawandel – Globale Oberflächentemperaturen

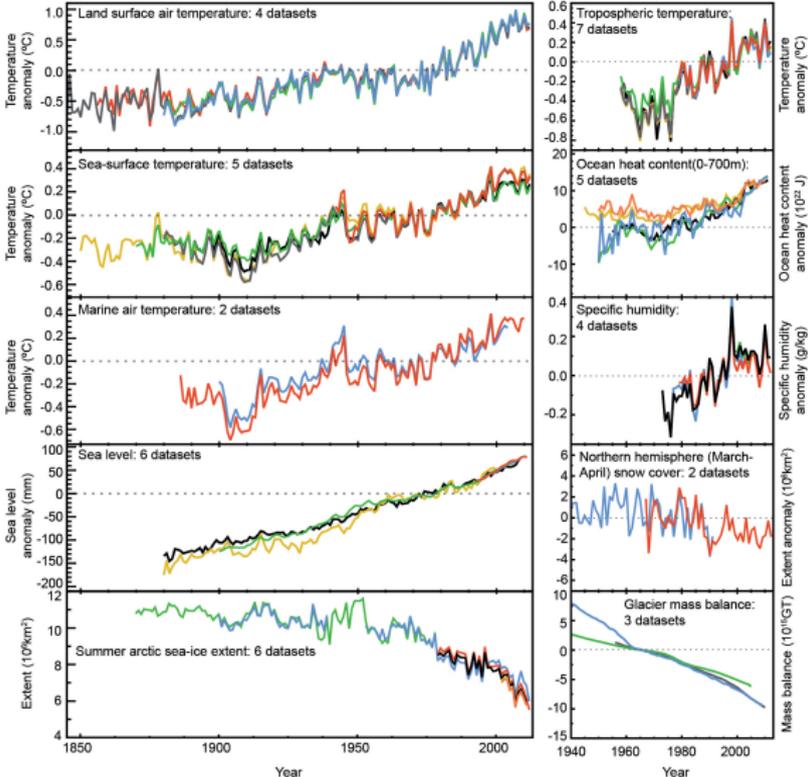


Quelle: IPCC AR5 (2013)

*oben:* jährliche durchschnittliche globale Oberflächentemperatur-Anomalien (drei Datensätze)

*unten:* dekadische (1850–1859, ... , 2000–2009) globale Schnitte mit Unsicherheiten für den schwarzen Datensatz

# Klimawandel – weitere Beobachtungen



Quelle: IPCC AR5 (2013)

# Outline

Vorbemerkungen

Klima und Klimawandel

**Emissionsszenarien**

Erdsystemmodelle

Regionale Klimamodellierung

Zusammenfassung

# Emissionsszenarien

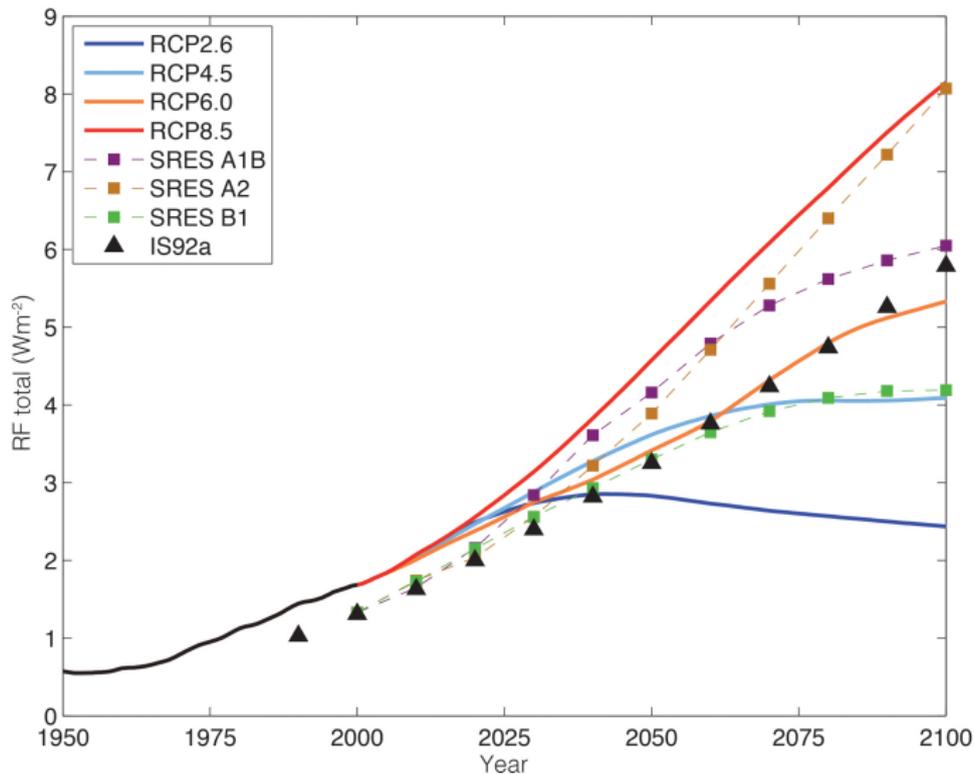
## *Regionale Klimamodellierung*

1. Annahme einer zukünftigen Entwicklung/  
**Emissionszenario**
2. Simulation der globalen Atmosphäre mit einem globalen Modell
3. Simulation der Fokusregion mit einem höher aufgelösten Regionalmodell („*downscaling*“)

# Representative Concentration Pathways (RCP)

- RCP-Szenarien sollen “die volle Bandbreite der Stabilisierungs-, Vermeidungs- und Referenzemissionsszenarien der aktuellen wissenschaftlichen Literatur” abbilden
- deutlich verschieden, gerade Anzahl (sonst wird immer die Mitte gewählt)
- „repräsentativ“ – jedes RCP stellt nur eines vieler möglicher Szenarien bereit, die zu einem bestimmten Strahlungsantrieb führen
- Zahl im Szenarionamen: Änderung im Strahlungsantrieb zwischen 2100 und vorindustriellem Zeitalter

# Strahlungsantrieb



Quelle: IPCC AR5

# Outline

Vorbemerkungen

Klima und Klimawandel

Emissionsszenarien

**Erdsystemmodelle**

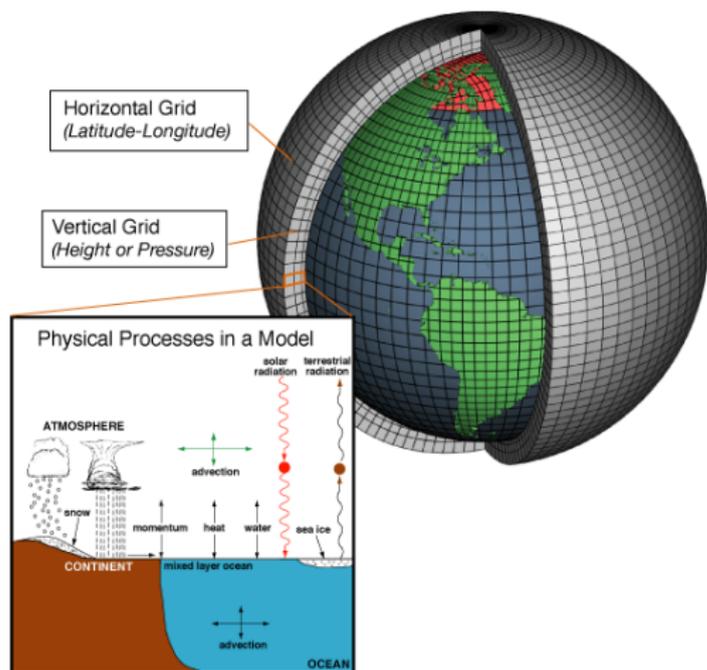
Regionale Klimamodellierung

Zusammenfassung

## *Regionale Klimamodellierung*

1. Annahme einer zukünftigen Entwicklung/  
Emissionsszenario
2. Simulation der globalen Atmosphäre mit einem **globalen Modell**
3. Simulation der Fokusregion mit einem höher aufgelöstem Regionalmodell („*Downscaling*“)

# Allgemeine Zirkulationsmodelle



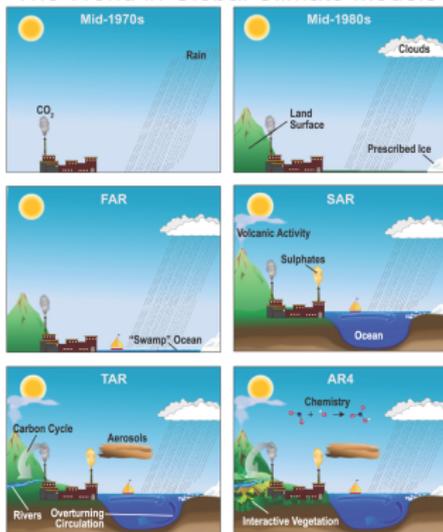
Quelle: [http://en.wikipedia.org/wiki/General\\_Circulation\\_Model](http://en.wikipedia.org/wiki/General_Circulation_Model)

- „Allgemeine Zirkulationsmodelle“ modellieren die Atmosphäre
- für Langzeitsimulationen wird ein Ozeanmodell gekoppelt
- dann wird das Modell mit dem gewählten Emissionsszenario laufen gelassen

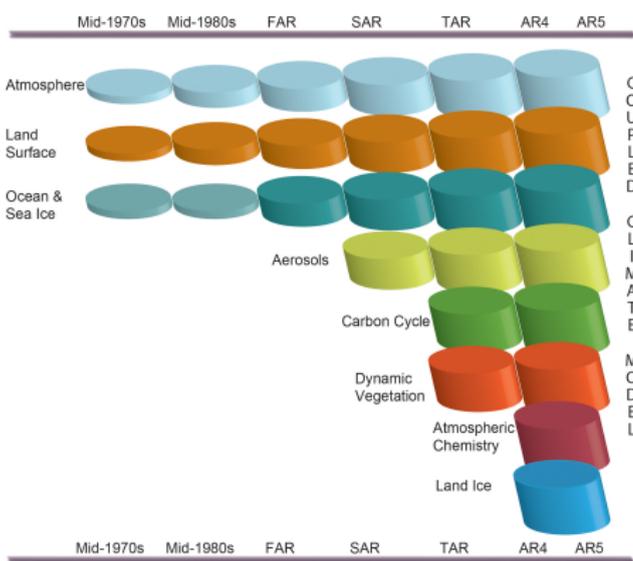
# Erdsystemmodelle

Da immer mehr Untersysteme eingebaut werden, spricht man heutzutage von **Erdsystemmodellen**.

The World in Global Climate Models

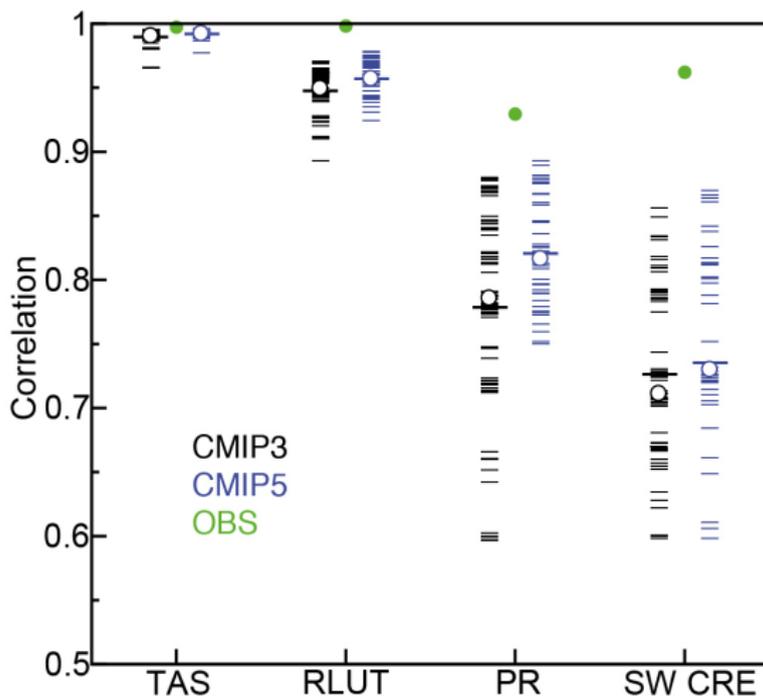


Quelle: AR4 (2007)



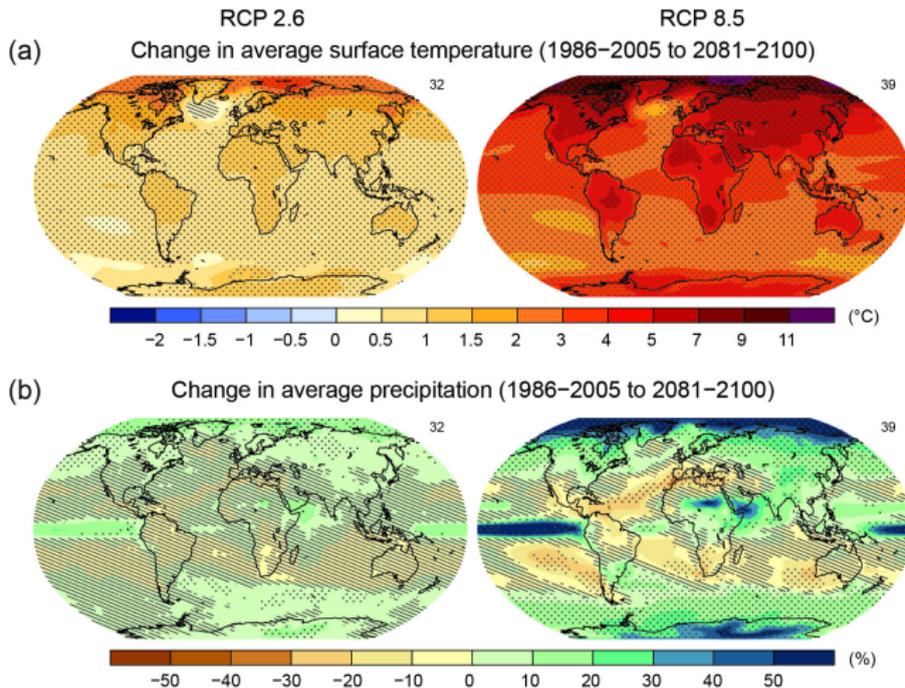
Quelle: AR5 (2013)

# Validierung von Erdsystemmodellen: Korrelation Beobachtung – Simulation



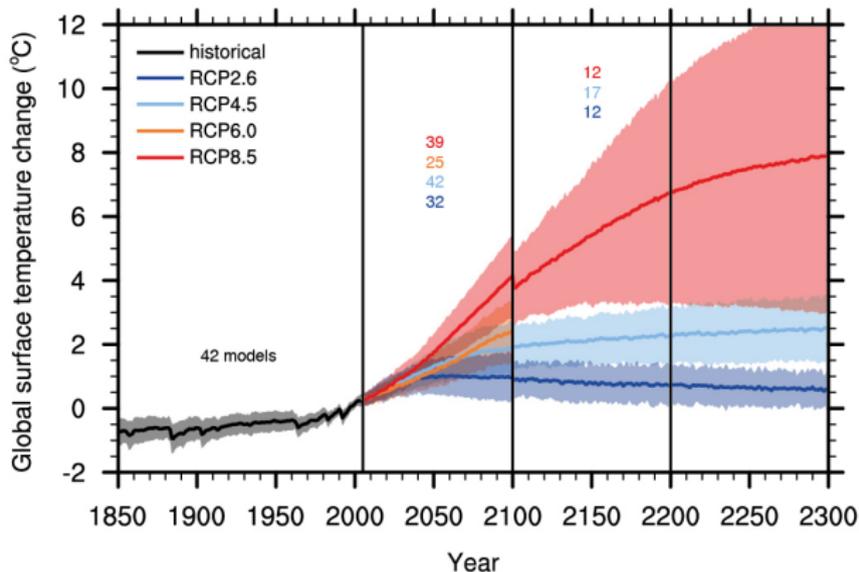
time frame: 1980–1999; TAS: surface air temperature, RLUT: TOA outgoing longwave radiation, PR: precipitation, SW CRE: TOA shortwave cloud radiative effect; OBS: correlations between default and alternate observations  
Quelle: IPCC AR5 (2013)

# Langfristprojektion Oberflächentemperatur und Niederschlag



CMIP5 multi model mean; stippling: significant change ( $\Delta x > 2\sigma$ ) and 90% of models agree on sign; hatching: small  $\Delta x$  compared to internal variability ( $\Delta x < \sigma$ ); upper right number:  $n$  models Quelle: IPCC AR5 (2013)

# Langfristprojektion Oberflächentemperatur



anomaly vs 1986–2005; 5th to 95th percentile; solid line: model mean; colored numbers:  $n$  models

Quelle: IPCC AR5 (2013)

# Outline

Vorbemerkungen

Klima und Klimawandel

Emissionsszenarien

Erdsystemmodelle

**Regionale Klimamodellierung**

Zusammenfassung

# Regionale Klimamodellierung

1. Annahme einer zukünftigen Entwicklung / Emissionsszenario
2. Simulation der globalen Atmosphäre mit einem globalen Modell
3. Simulation der Fokusregion mit höher aufgelöstem Regionalmodell („*Downscaling*“)

# Skalen und atmosphärische Prozesse (Orlanski 1975)

> 10 000 km	allgemeine Zirkulation in der Atmosphäre (Wochen bis Monate)	Makroskala $\alpha$
10 000 – 2000 km	barokline Wellen (Wochen bis Monate)	Makroskala $\beta$
2000 – 200 km	Wetterfront und Zyklone (Tage)	Mesoskala $\alpha$
200 – 20 km	orographische Effekte, Land-See-Wind, urbane Effekte (days)	Mesoskala $\beta$
20 – 2 km	Gewitter, urbane Effekte (Stunden)	Mesoskala $\gamma$
2 km – 200 m	Konvektion, Tornados (Minuten bis Stunden)	Mikroskala $\alpha$
200 – 20 m	Thermik	Mikroskala $\beta$
< 20 m	klein-skalige Turbulenzen (< Sekunden bis Minuten)	Mikroskala $\gamma$

meteorologische Phänomene treten auf charakteristischen räumlichen und zeitlichen Skalen auf

kleine / schnelle Phänomene werden bei groben Auflösungen / großen Zeitschritten nicht aufgelöst

# Ziele der Regionalen Klimamodellierung

- Erfassen von regionalen und lokalen Strukturen
- Beschreibung von Phänomenen unter 100 km und Zeitskalen von einem Tag oder weniger
- Übersetzung von Ergebnissen globaler Modelle auf die hochaufgelöste regionale Skala („Downscaling“)
- überbrückt die Lücke zwischen Skala der globalen Modelle und der Klimafolgenforschung (z.B. Felder, Einzugsgebiete, Waldbestände)
- Verringerung des Rechenaufwandes verglichen mit globalen Simulationen gleicher Auflösung

# Verfahren

- es gibt hauptsächlich **zwei Typen** regionaler Klimamodelle

I dynamische Modelle (CCLM)

II statistische Modelle

- dynamische regionale Klimamodelle sind Physik basiert
- statistische regionale Klimamodelle sampeln vorhandene Beobachtungen

# Dynamische regionale Klimamodellierung

- **Idee: Lösen physikalischer Gleichungen**, ähnlich den globalen Modellen, auf einer Fokusregion

- **benötigt**

- **Anfangsbedingungen**,
- zeitabhängige meteorologische **Randbedingungen** (Temperatur, Wind, Feuchte usw.)

bereitgestellt durch **globale Modelle** oder **Beobachtungen/Reanalysen**

- **Modelle** stammen typischerweise aus der **numerischen Wettervorhersage**

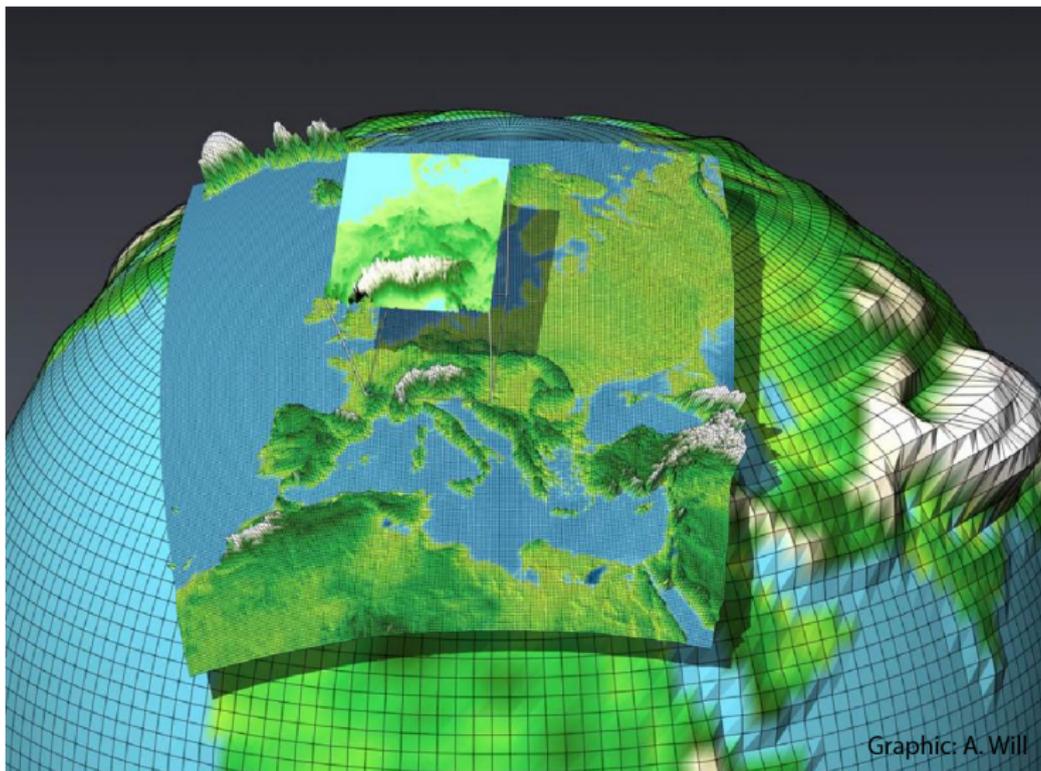
# Dynamische regionale Modellierung

- **hochaufgelöst** (< 1 km ... 50 km)
- Simulationen **über Jahrzehnte bis Jahrhunderte** sind möglich
- Atmosphärenmodelle können **mit anderen Modellen gekoppelt** werden (**regionales Klimamodell** → **regionalem Erdsystemmodell**), z.B.
  - Stadtmodelle
  - Hydrologiemodelle
  - Ozeanmodelle
  - Meereseismodelle
  - Chemie- und Aerosolmodelle
  - Biosphärenmodelle
  - Bodenmodelle

# CCLM

- CCLM = COSMO-CLM, COSMO-Model in CLimate Mode
- <http://www.clm-community.eu/>
- COSMO: nicht-hydrostatisches numerisches Wettervorhersagemodell ursprünglich vom Deutschen Wetterdienst (DWD)
- erste Version von CCLM wurde vom PIK, HZG und BTU Cottbus auf Basis des "Lokalmodell" (Vorgänger von COSMO, vom DWD) entwickelt
- seit 2005 Gemeinschaftsmodell der Deutschen Klimaforschung; seit 2007 vereinigte Version für die operationelle Wettervorhersage und Klimamodellierung
- aktuelle Version ist COSMO\_5.0\_clm9
- rund 400 000 ... 500 000 Zeilen Fortran 90 Code

# CCLM Setup



Quelle: [www.clm-community.eu](http://www.clm-community.eu)

# Outline

Vorbemerkungen

Klima und Klimawandel

Emissionsszenarien

Erdsystemmodelle

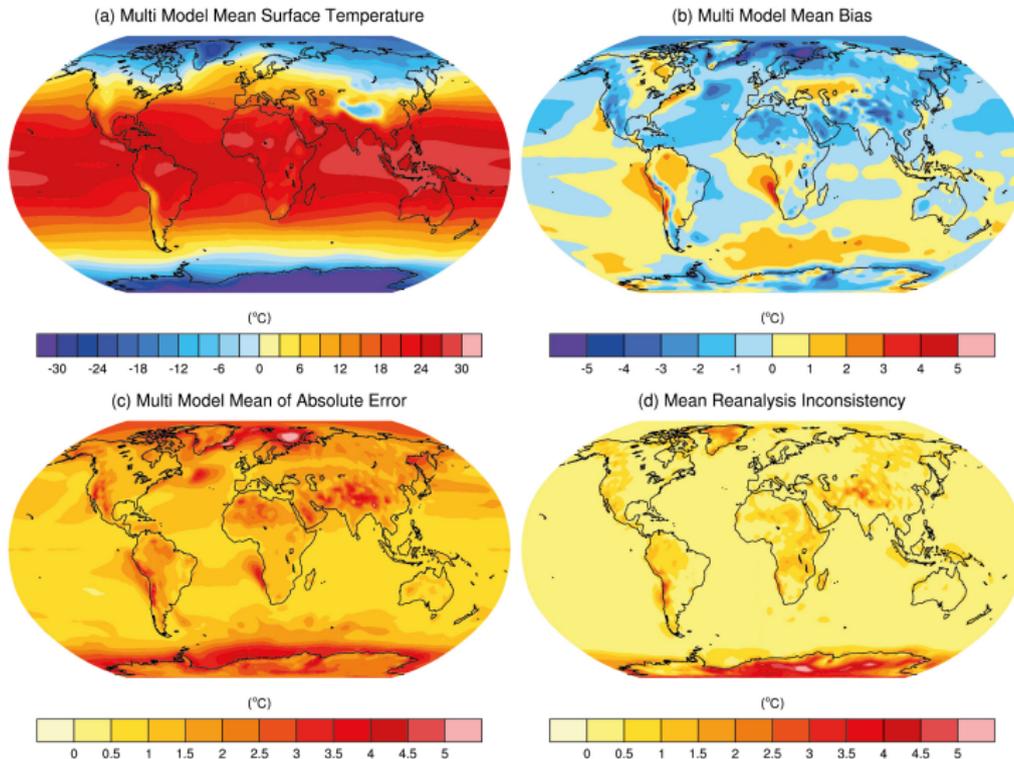
Regionale Klimamodellierung

**Zusammenfassung**

# Zusammenfassung

- **Klima** und **Klimawandel** werden zu einem Großteil durch **Treibhausgase** in der Atmosphäre bestimmt
- der **Klimawandel** hat **starke Auswirkungen** in einigen Regionen und Sektoren
- regionale Klimamodellierung:
  1. ein **Szenario** wird gewählt
  2. das **globale Klima** wird mit einem **Erdsystemmodell** simuliert
  3. „Downscaling“ mit einem regionalen Klimamodell, entweder **dynamisch (CCLM)** oder **statistisch**

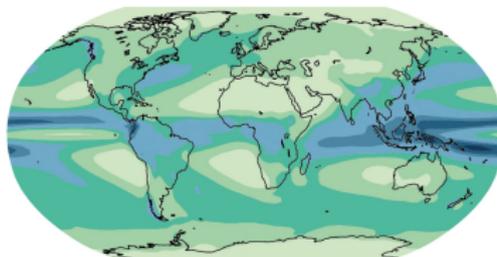
# Validierung von ESM: Jährliche 2 m Temperatur



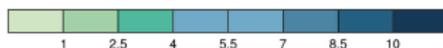
CMIP5 multi-model mean; time frame: 1980–2005; observation in (b) and (c): ERA-interim; (d) mean of absolute pairwise differences between ERA40 and JRA-25 reanalyses  
Quelle: AR5 (2013)

# Validierung von ESM: Jährlicher Niederschlag

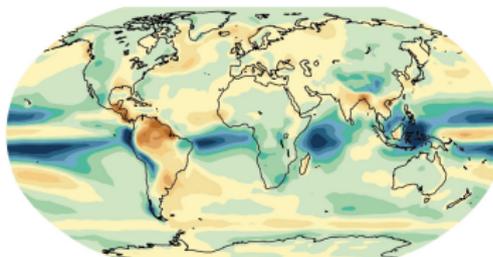
(a) Multi Model Mean Precipitation



(mm day<sup>-1</sup>)



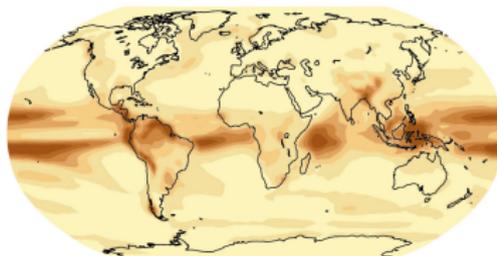
(b) Multi Model Mean Bias



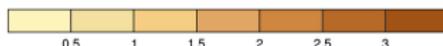
(mm day<sup>-1</sup>)



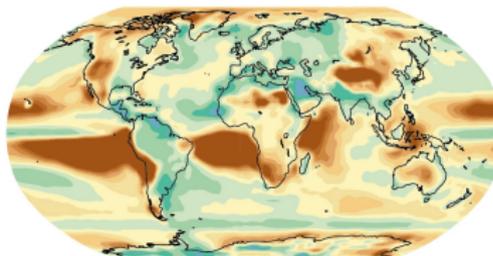
(c) Multi Model Mean of Absolute Error



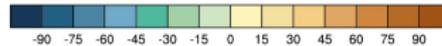
(mm day<sup>-1</sup>)



(d) Multi Model Mean of Relative Error



(%)



CMIP5 multi-model mean; time frame: 1980–2005; observation in (b), (c) and (d): GPCP

Quelle: AR5 (2013)

# CCLM Validierung Südamerika

Simulationsgebiet: Südamerika (CORDEX)

Koordinatensystem: rotierter Nordpol:  $\lambda=56.06^\circ\text{W}$ ,  $\phi=70.6^\circ\text{N}$

horizontale Auflösung:  $0.44^\circ \times 0.44^\circ$  (ungefähr  $50\text{ km} \times 50\text{ km}$ ),  
166  $\times$  187 Gitterpunkte

vertikale Auflösung: 40 Schichten

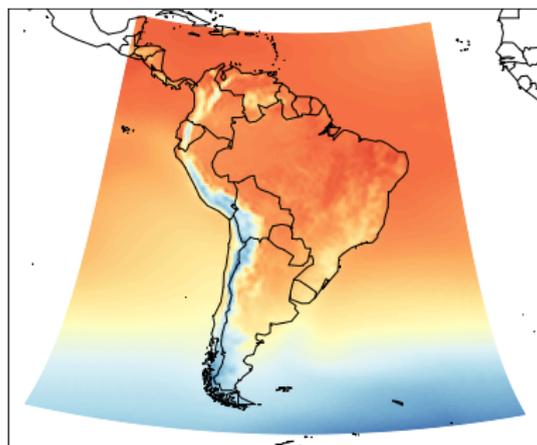
simulierter Zeitraum: 1 / 1 / 1979 – 12 / 31 / 2009

Anfangs- und Randbedingungen: ECMWF Reanalyse  
ERA-Interim, alle 6 Stunden

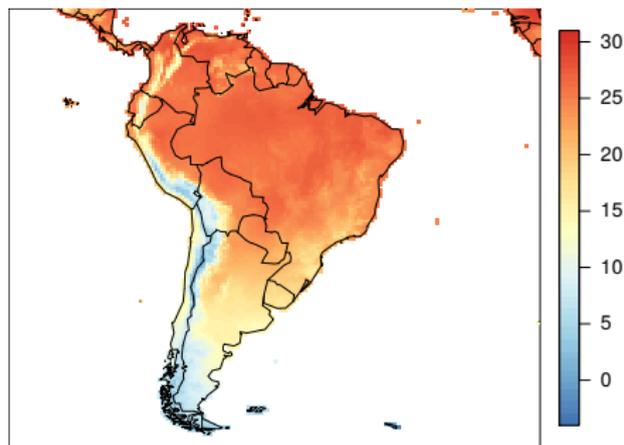
Modellversion: CCLM 4.25\_clm3 (aufgesetzt von S. Lange)

S. Lange et al., "Regional climate model sensitivities to parametrizations of convection and non-precipitating subgrid-scale clouds over South America," *Climate Dynamics* (2014), DOI: 10.1007/s00382-014-2199-0.

# CCLM Validierung: Jahresdurchschnitt der 2 m Temperatur 1985–2009

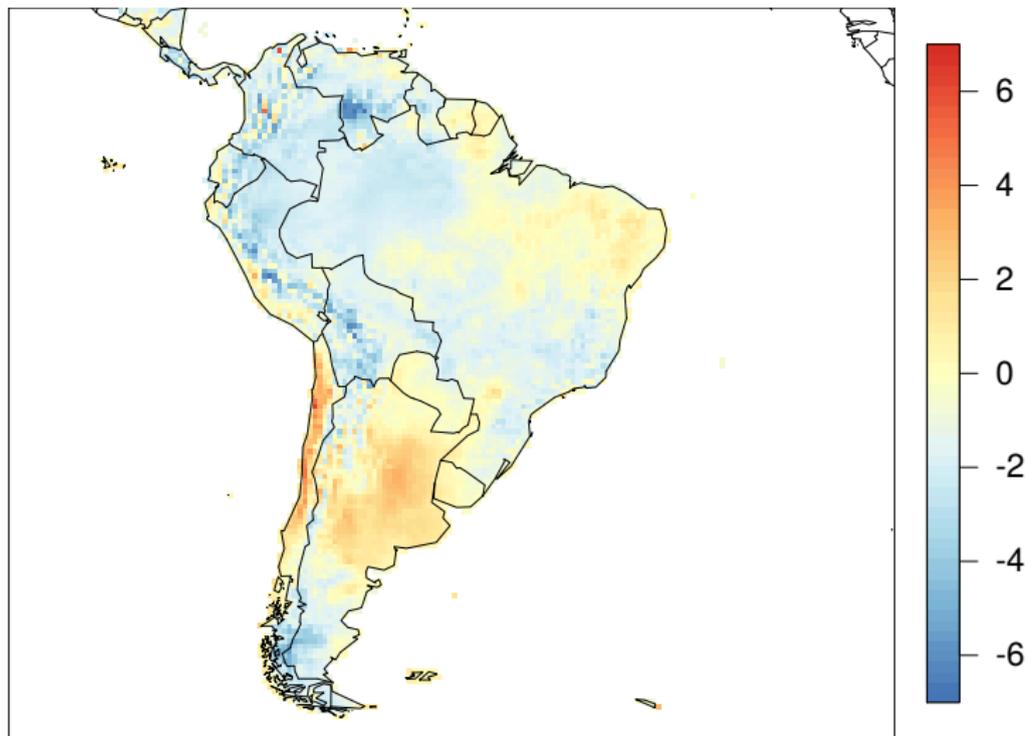


CCLM 4.25\_clm3 (sim) [°C]



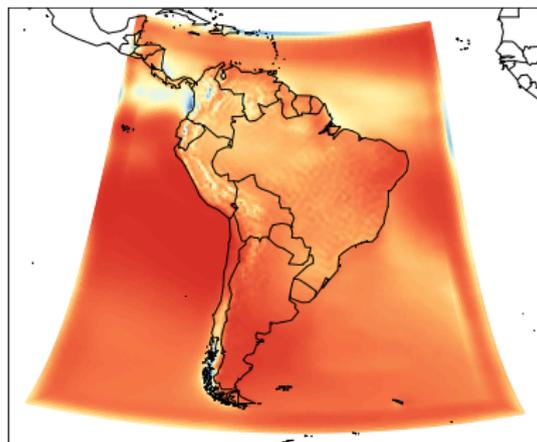
CRU TS 3.21 (beo) [°C]

# CCLM Validierung: Jahresdurchschnitt der 2 m Temperatur 1985–2009

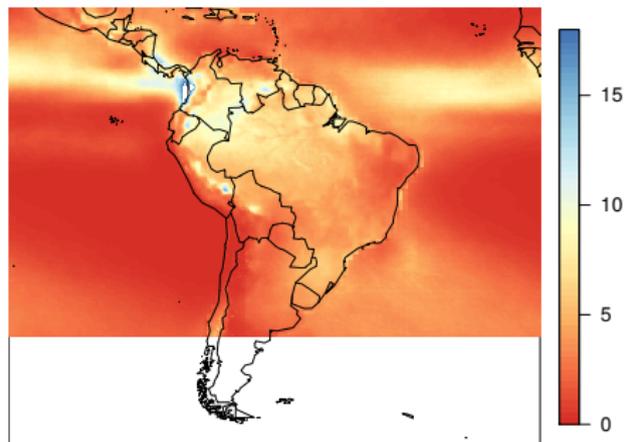


(sim – beo) [°C]

# Validierung: täglicher Niederschlag (Jahresschnitt) 1998–2009

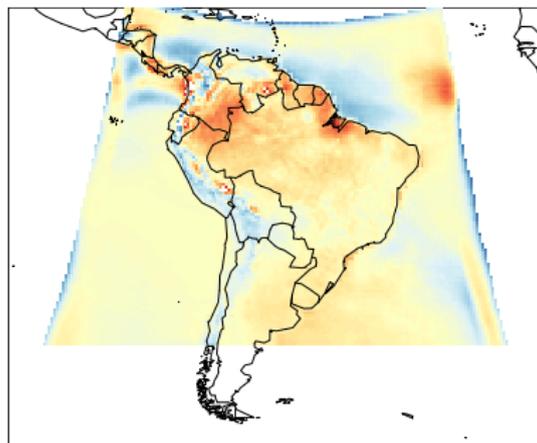


CCLM 4.25\_clm3 (sim) [mm]

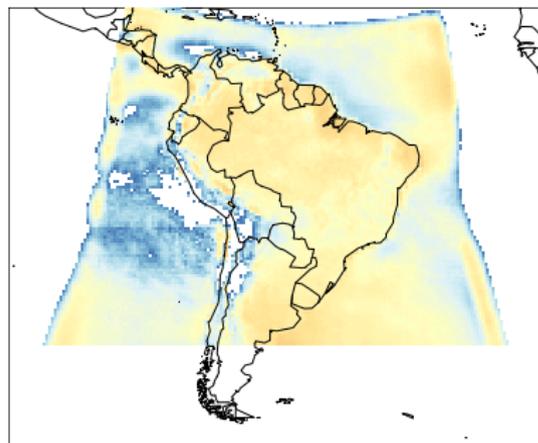


TRMM 3B42v7 (beo) [mm]

# Validierung: täglicher Niederschlag (Jahresschnitt) 1998–2009



(sim-beo) [mm]



(sim-beo)/beo [%]