

HESSEN



Hessisches Landesamt  
für Umwelt und Geologie



# Klimaprojektionen und die notwendige Kombination von Vermeidungs- und Anpassungsmaßnahmen

Dr. H. Hübener



„Avoid the unmanageable and  
manage the unavoidable“

(Prof. Schellnhuber)

# Fachzentrum Klimawandel Hessen



- Seit 1.10.2008
- Teil des Hessischen Landesamtes für Umwelt und Geologie
- Leitung: Prof. Dr. K. Hanewald
- Mitarbeiter/innen: Dr. H. Wolf, Dr. H. Hübener, C. Schneider, S. Schroth
- Vermittlung zwischen Wissenschaft und Anwendung
- Schwerpunkt: Anpassung an den Klimawandel

## Gliederung



- Einführung: Was ist Klima?
- Zeitskalen im Klimasystem
- Wie funktioniert ein Klimamodell?
- Validierung von Klimamodellen
- Klimaprognosen: global  
regional
- Anpassungsmaßnahmen
- Zusammenfassung

# Definition des Klimas



- **Wetter:** augenblicklicher Zustand der Atmosphäre
- **Witterung:** Wetter im Mittel über einige Tage bis Wochen (z. B. Witterung im Dezember 2002)
- **Klima:** “klassische Definition”: Klima ist “mittleres Wetter”

oder “Gesamtheit der meteorologischen Erscheinungen, die den mittleren Zustand der Atmosphäre an irgendeiner Stelle der Erdoberfläche kennzeichnen” (Hann, 1908)

## Der Begriff **Klima** umfasst:



### **Mittelwerte über einen geeigneten Zeitraum von z.B.:**

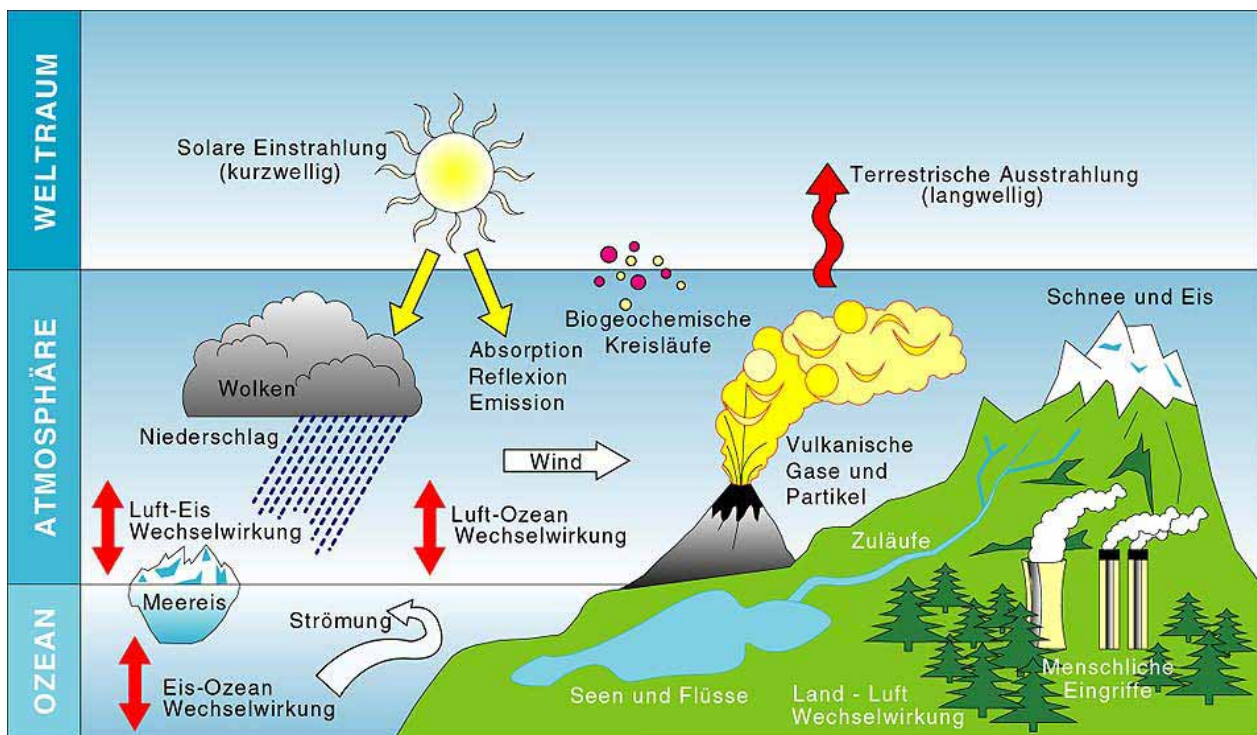
- Temperatur
- Niederschlag
- Sonnenscheindauer
- ...

### **Schwankungsbreite dieser Größen (Variabilität)**

### **Statistik von Extremwerten wie z.B.:**

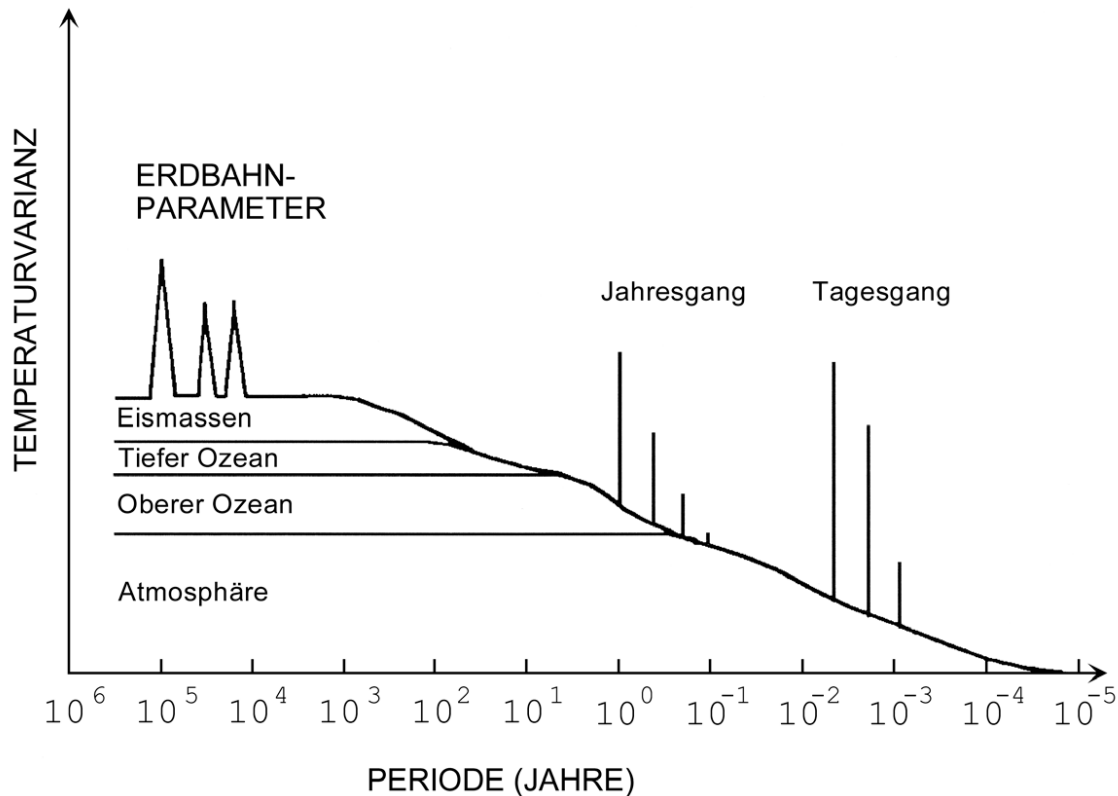
- Anzahl der Frosttage (Minimumtemperatur  $< 0^{\circ}\text{C}$ )
- Anzahl der “Tropentage” (Temperatur  $> 30^{\circ}\text{C}$ ) im Juli
- Häufigkeit von Hurrikanen
- Maximale Ausdehnung des Packeises
- ...

# Das Klimasystem



## Zeitskalen im Klimasystem

- Atmosphäre: Tage, Jahre, Dekaden
- Hydrosphäre: oberer Ozean: Wochen, Monate  
tiefer Ozean: 100 – 1000 Jahre
- Kryosphäre: Meereis: 1 – 10 Jahre  
Inlandeis:  $10^4$  –  $10^5$  Jahre
- Pedosphäre: Tage, Jahre
- Biosphäre: Sukzession 30 – 150 Jahre  
Migration: 300 – 1500 Jahre
- Lithosphäre:  $10^6$  –  $10^8$  Jahre



## Definition des Klimasystems über die jeweils relevanten Zeitskalen

- $S = A \cup P \cup B_{\text{Physiol.}} \cup C_{\text{Schnee}}$  Stunden - Wochen
  - $S = A \cup P \cup B_{\text{Physiol.}} \cup C_{\text{Schnee}} \cup H_{\text{Misch}}$  Wochen – Monate
  - $S = A \cup P \cup B_{\text{Phänologie}} \cup C_{\text{See-eis, Schnee}} \cup H_{\text{Misch}}$  Monate – Jahre
  - $S = A \cup P \cup B_{\text{Sukzession, Marin.}} \cup C_{\text{See-eis, Schnee}} \cup H_{\text{tief}}$  1 – 100 Jahre
  - $S = A \cup P \cup B_{\text{Migration}} \cup C \cup H_{\text{tief}} \cup L$  > 100 Jahre...
- *Nur sinnvoll, wenn die zeitliche Entwicklung des Klimasystems nicht von der Entwicklung der langsamen Komponenten des Klimasystems abhängt.*

# Wie funktioniert ein Klimamodell?

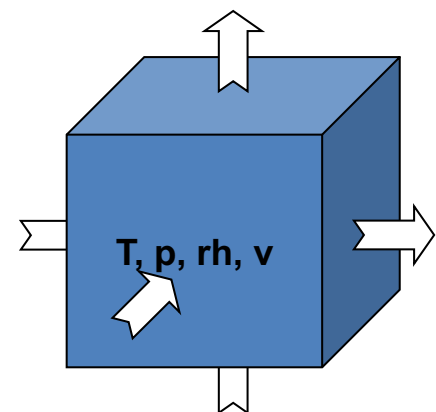
Das Klimasystem ist ein physikalisches System, es gehorcht physikalischen Gesetzen:

## Die Grundgleichungen

- Newton'sche Bewegungsgleichungen (Windfeld)
- Erster Hauptsatz der Thermodynamik (Temperaturfeld)
- Gasgleichung für ein ideales Gas (Avogadros Gesetz = Beziehung zwischen Druck und Temperatur)
- Kontinuitätsgleichung (Gesetz der Massenerhaltung für Transporte z.B. Feuchte)

## Physikalische Gleichungen

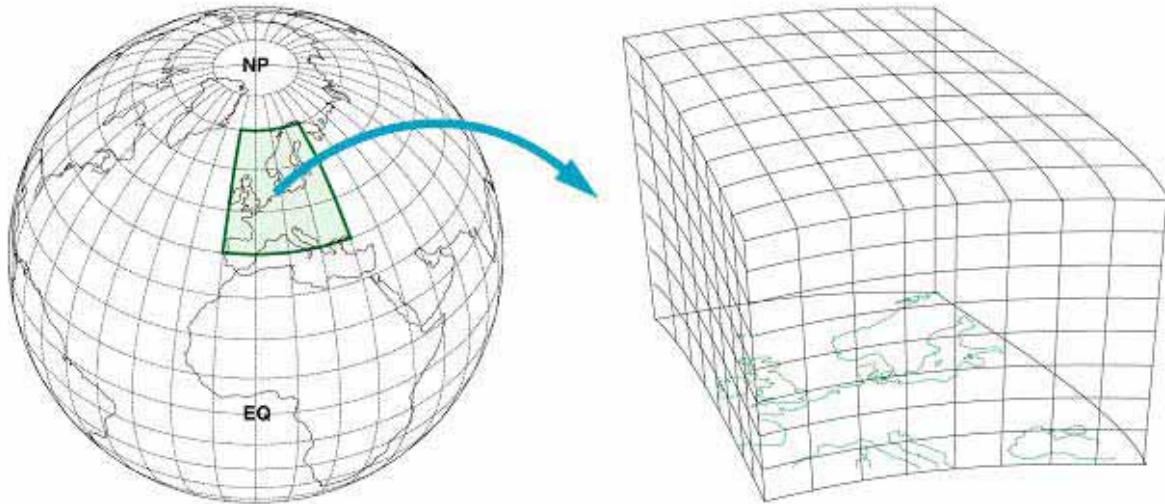
- Gleichungen werden für jede Gitterbox des Modells berechnet
- Ergebnisse jeder Box werden in die benachbarten Boxen (horizontal und vertikal) weitergegeben



- **Zusammenspiel aller Boxen  $\Rightarrow$  simulierter Klimazustand**

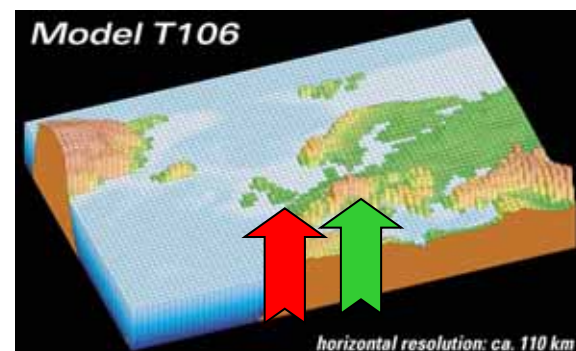
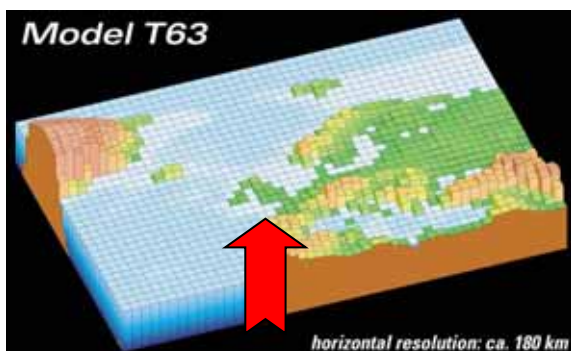
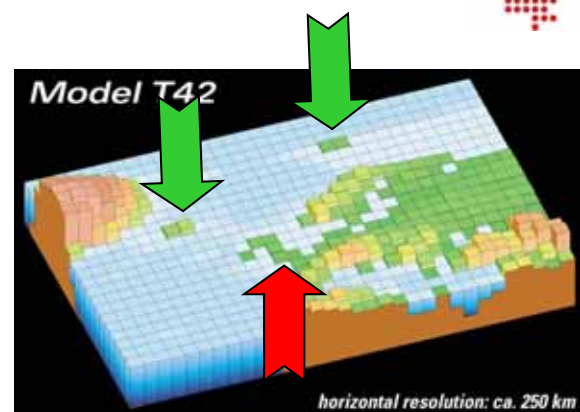
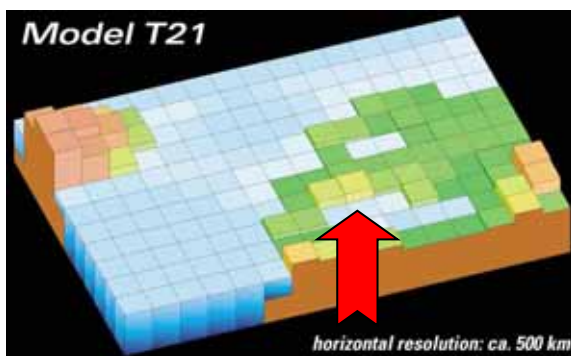


# 3-dimensionale Gitter



Das Gitternetz im Atmosphärenmodell

# Orographie

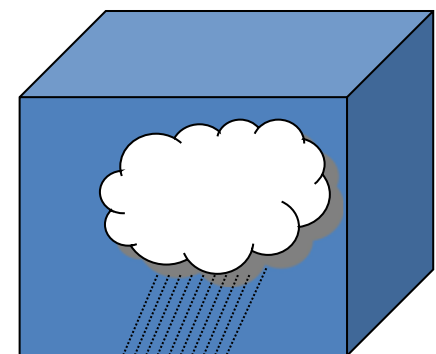




Nicht nur die horizontale und vertikale Auflösung, sondern auch die Komplexität der Klimamodelle und der darin dargestellten Prozesse nimmt stetig zu

## Parameterisierung

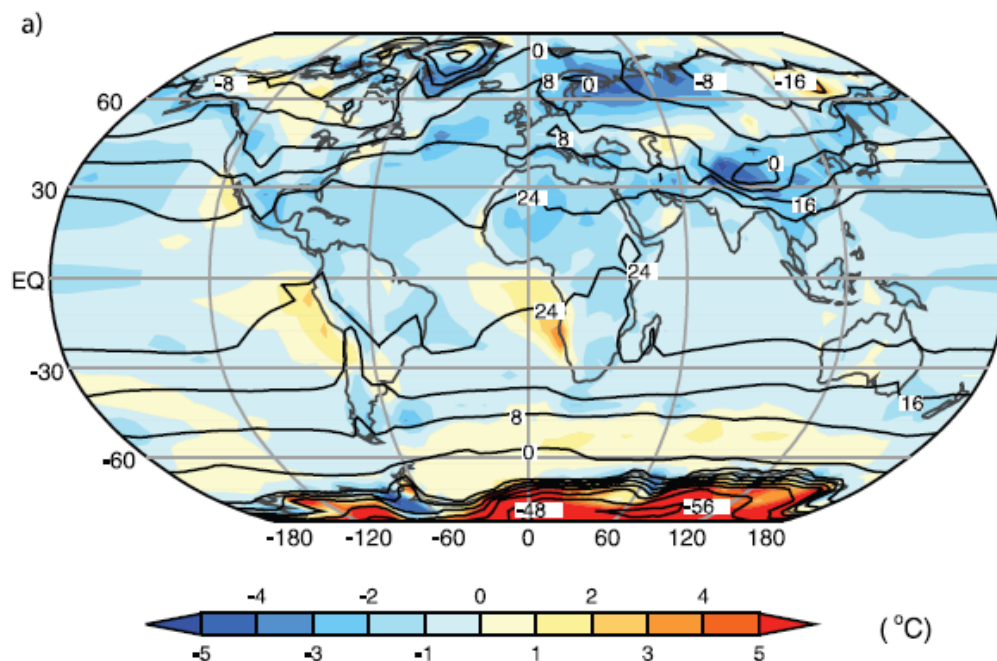
- Beschreibende Gleichungen
- Prozesse auf Skalen, die vom Modell nicht aufgelöst werden können
- Beispiele: Wolken, konvektiver Niederschlag, Turbulenz, ...
- Welche Prozesse parameterisiert werden müssen hängt von der Auflösung des Modells ab!





# Wie gut sind Klimamodelle?

## Validierung: aktuelles Klima

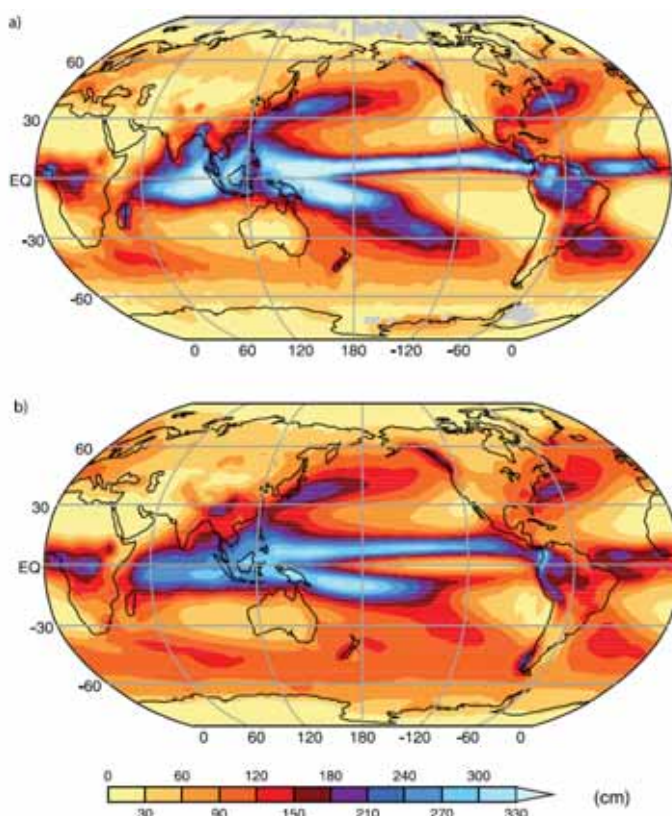


Beobachtete klimatologische Jahresmitteltemperatur (SST und bodennahe Lufttemperatur) (Isolinien) und mittlerer Multi-Modell Fehler (Farben) (simuliert minus beobachtet)

Quelle: IPCC AR4, 2007

# Wie gut sind Klimamodelle?

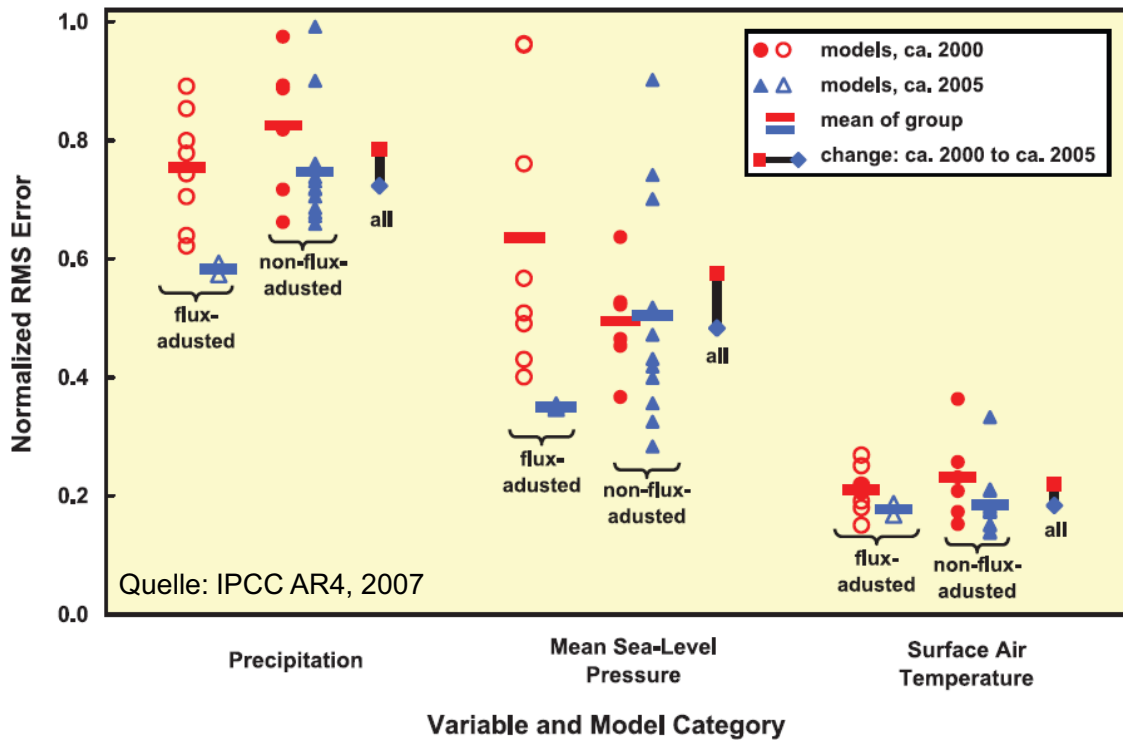
## Validierung: aktuelles Klima



- Mittlerer jährlicher Niederschlag (cm)
- 1980-1999
- a) beobachtet,
- b) multi-model-mean

Quelle: IPCC AR4, 2007

# Validierung: aktuelles Klima



Fehler (RMSE) der Modelle (Jahr 2000 vs. Jahr 2005, mit / ohne Flusskorrektur) vs. Beobachtungen  
Niederschlag und MSLP: 1980-1999, Bodennahe Temperatur: 1961-1990

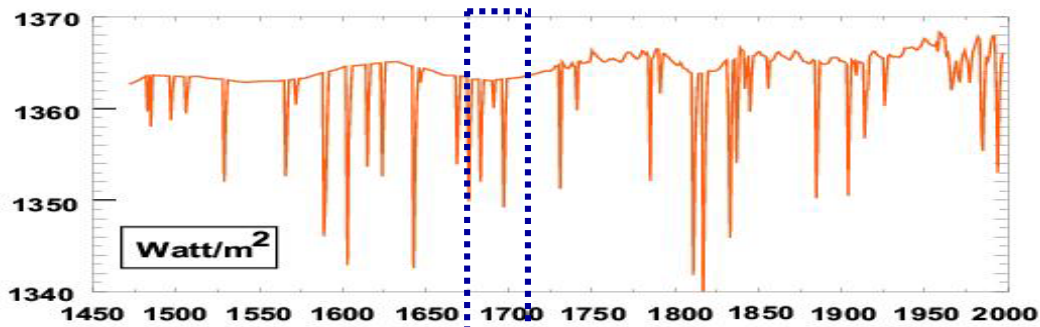
## Validierung:

# Simulation der letzten Jahrhunderte

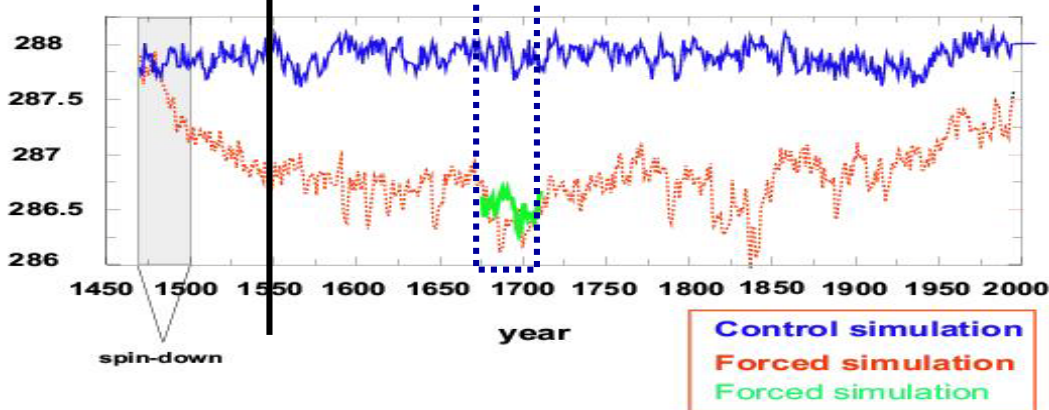
z. B. das späte Maunder Minimum:

kalte Winter und Frühjahre, 1675-1710

Effective incoming solar radiation at the tropopause  
(natural solar variability + volcanic forcing)



Global annual near-surface air temperature (K)



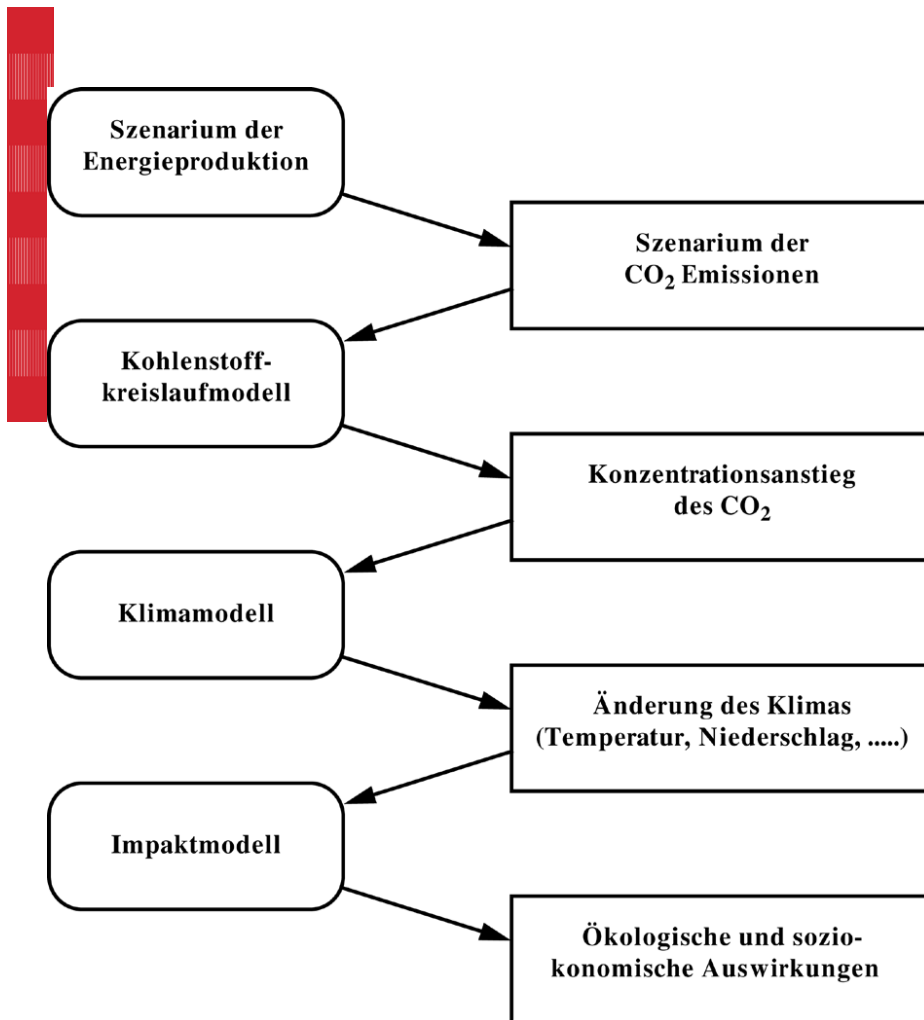
Solarer und vulkanischer Antrieb und Antwort des Modells

## Klimaprognosen

- Die Modelle können das derzeitige Klima und Klimaschwankungen in der Vergangenheit darstellen
- Es kann daher davon ausgegangen werden, dass sie auch das zukünftige Klima darstellen können

⇒ Wie entsteht eine **Klimaprognose**?



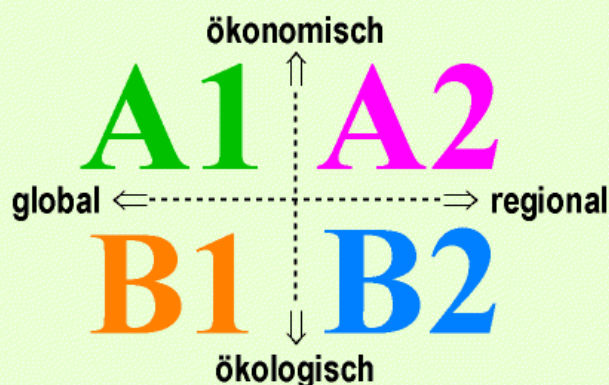


## Informationskette zur Erstellung einer Klimaprognose

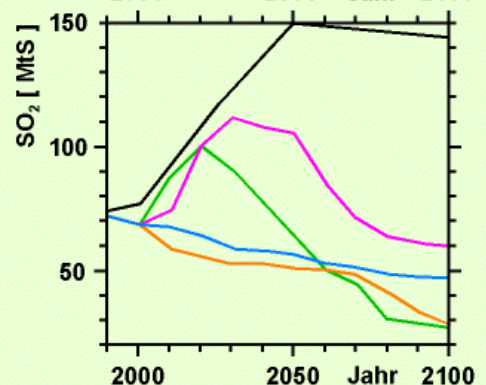
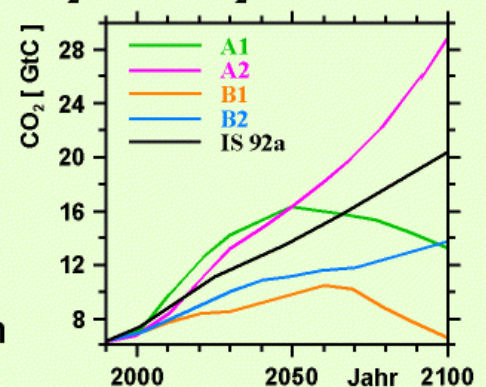
## Ein neuer Satz von IPCC Emissions Szenarien (SRES-Szenarien)

- A1** Eine Welt mit schnellem Wirtschaftswachstum und schneller Einführung neuer und effizienterer Technologien.
- A2** Eine sehr heterogene Welt mit einem Schwerpunkt auf traditionelle Werte (family values and local traditions).
- B1** Eine sich vom Materialismus abkehrende Welt und die Einführung sauberer Technologien.
- B2** Eine Welt mit dem Schwerpunkt auf lokale Lösungen für ökonomische und ökologische Nachhaltigkeit.

**IS 92a** " Wir machen so weiter wie bisher " Szenarium (1992).

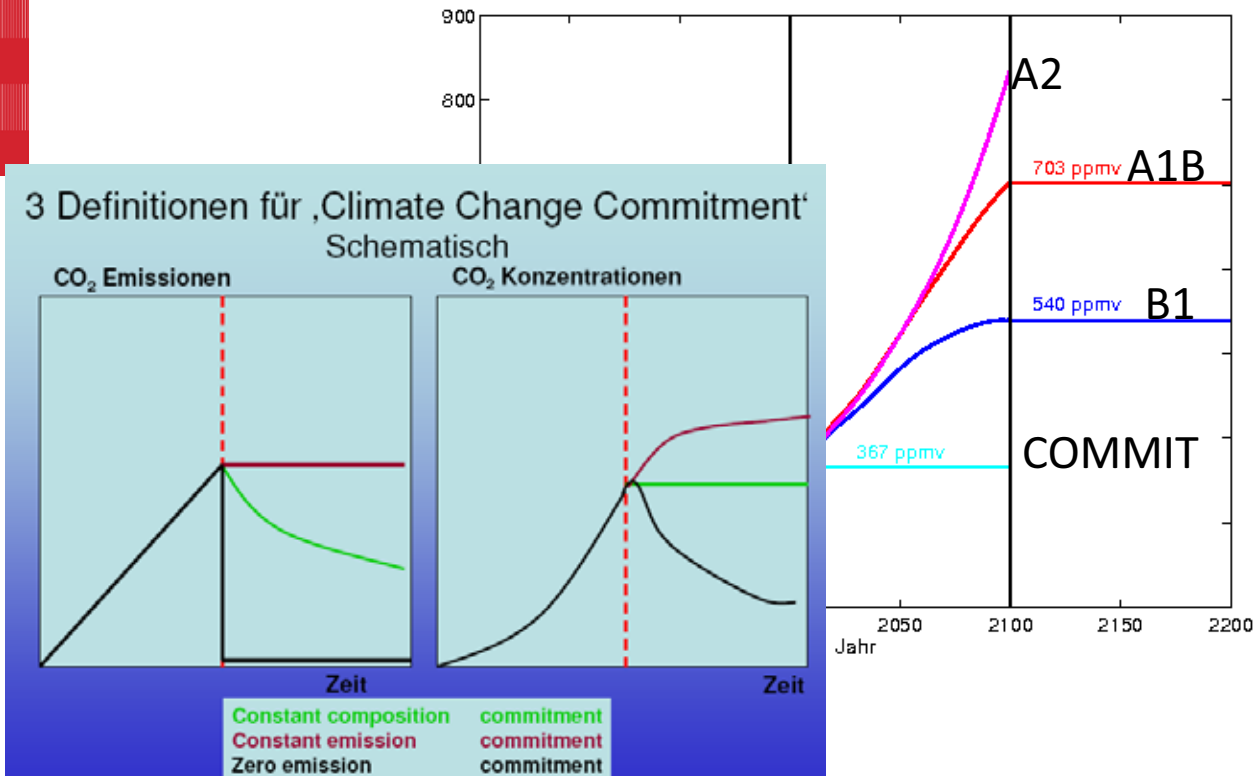


### CO<sub>2</sub> und SO<sub>2</sub> Emissionen

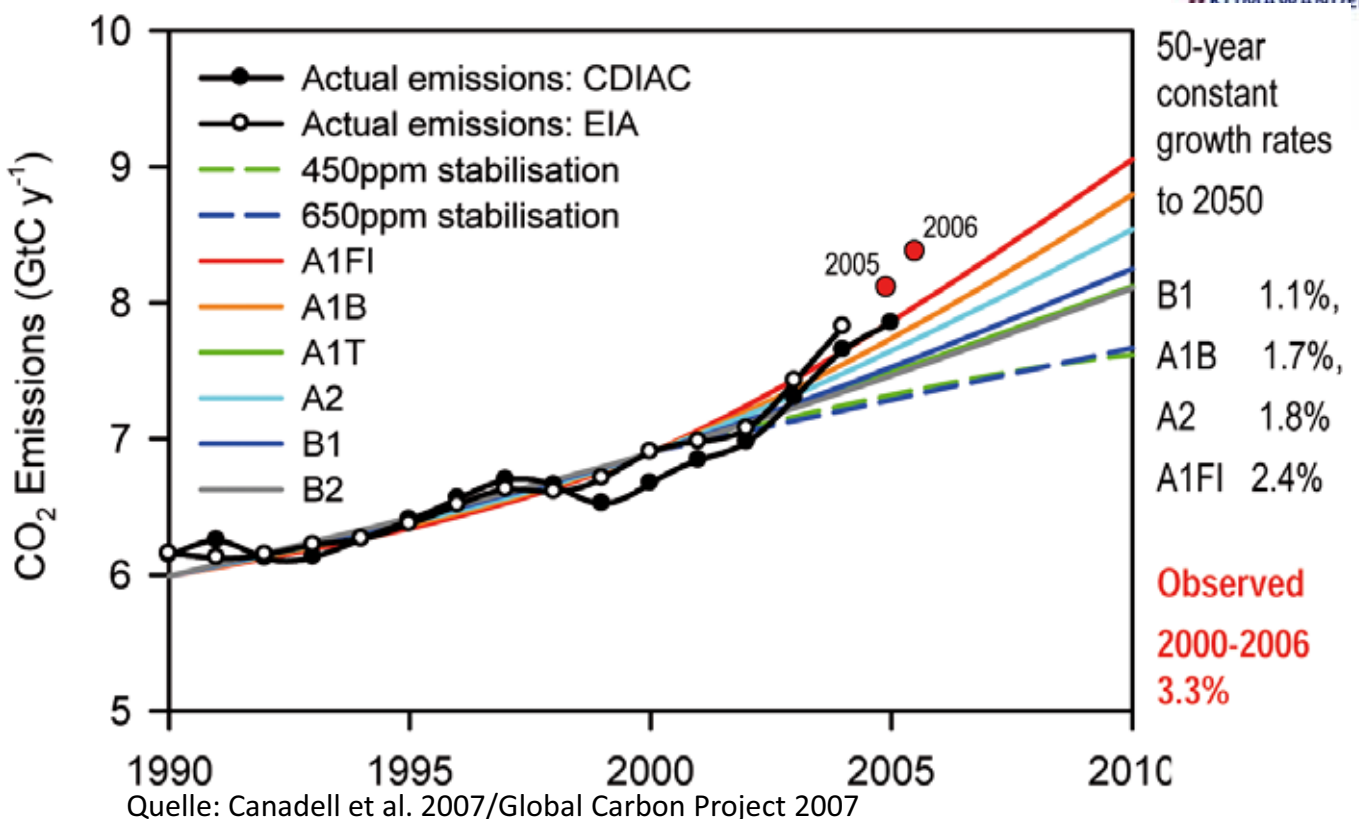


# Was ist schon heute unabwendbar?

## CO<sub>2</sub>-Konzentrationen in Stabilisierungsexperimenten

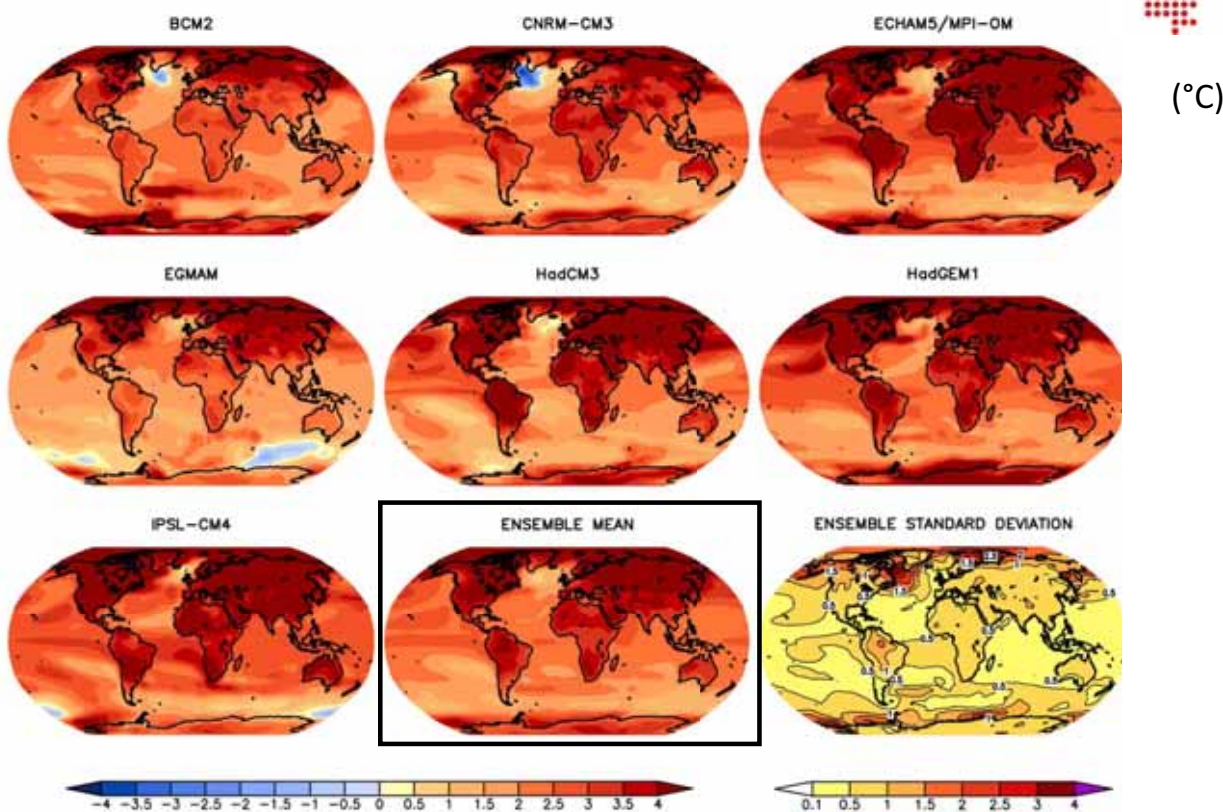


## Die beobachteten CO<sub>2</sub>-Emissionen

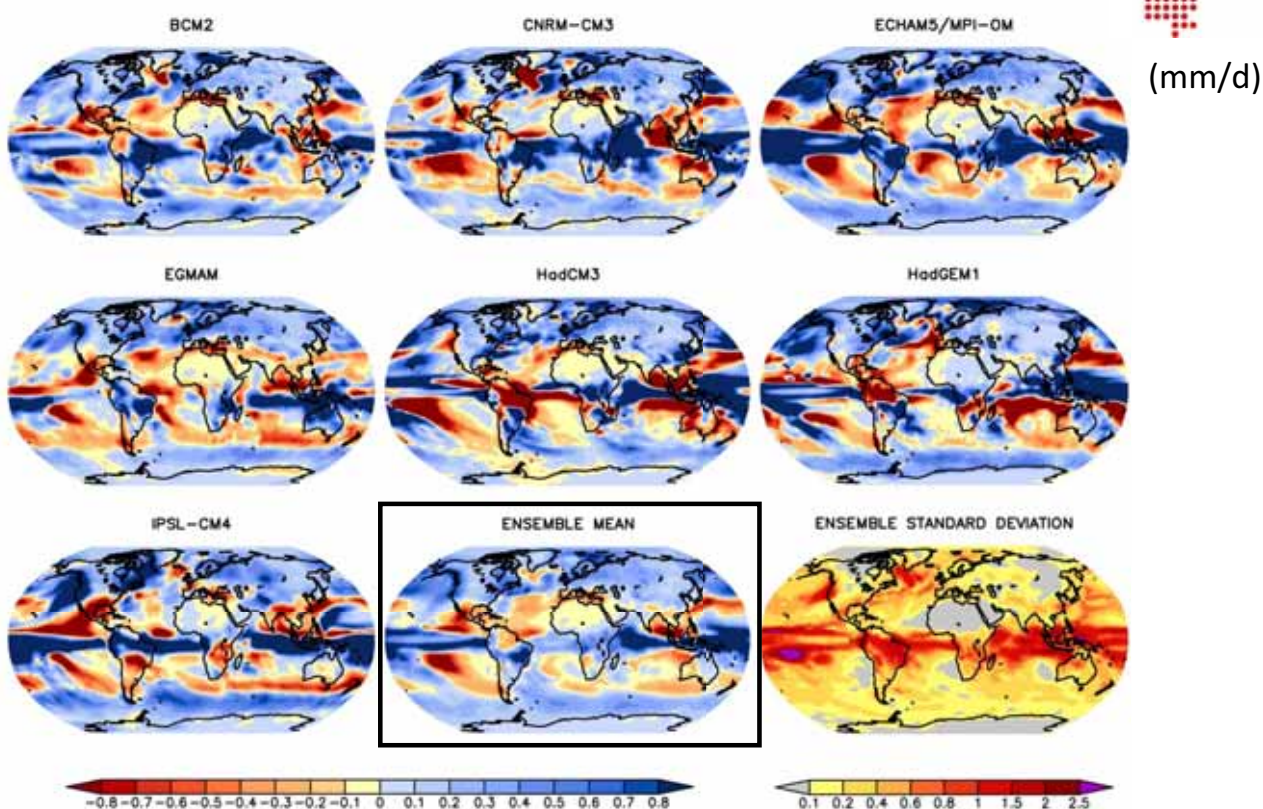




# Änderung Jahresmitteltemperatur 2080-2099 minus 1980-1999, A1B Szenario

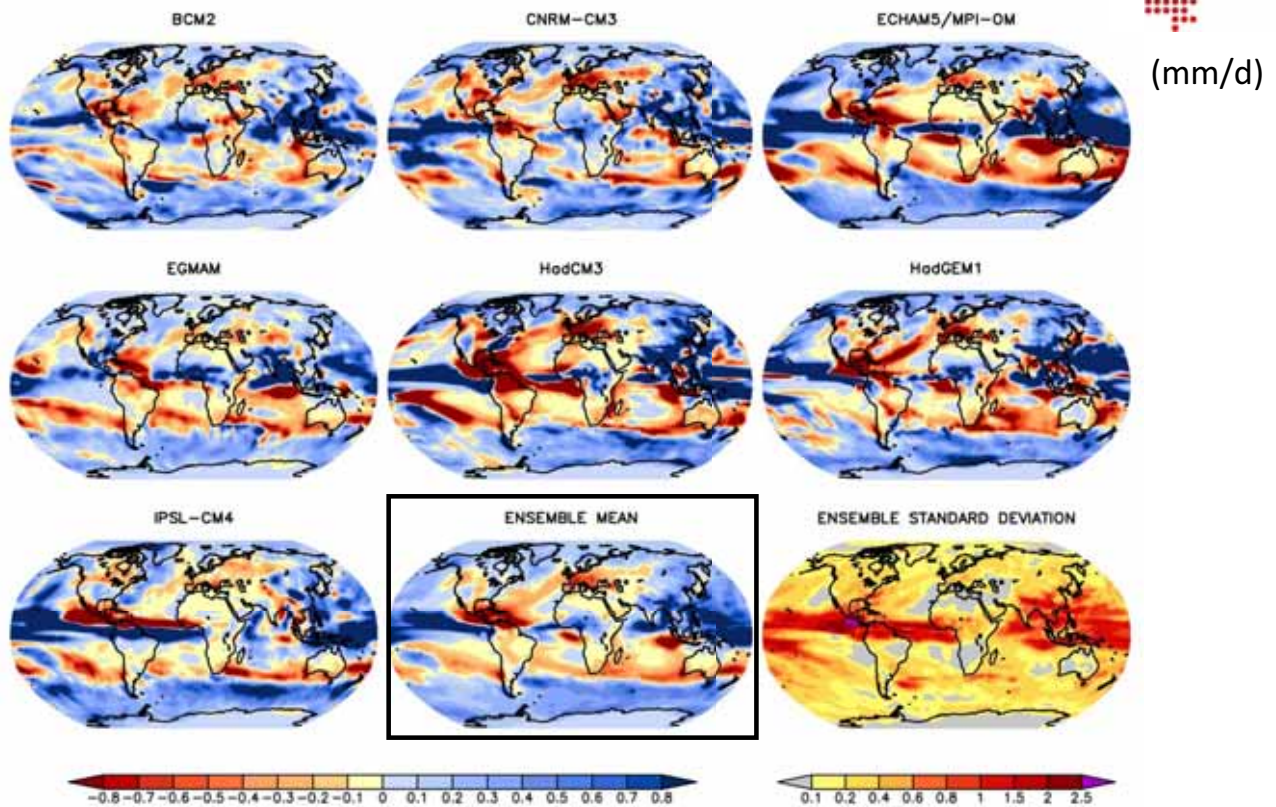


# Niederschlagsänderung DJF 2080-2099 minus 1980-1999, A1B Szenario





# Niederschlagsänderung JJA 2080-2099 minus 1980-1999, A1B Szenario



## Globale Simulationsergebnisse

- Verschiedene globale Klimamodelle zeigen zwar signifikant ähnliche Ergebnisse, diese unterscheiden sich jedoch i.A. in den Details.
- Bisherige Forschungsergebnisse haben gezeigt, dass der Mittelwert über mehrere Modelle i. A. die Realität besser darstellt als jedes einzelne Modell (Annahme: Fehler sind statistisch verteilt)
- Die Projektionen zeigen Niederschlagszunahme in Nordeuropa und Niederschlagsabnahme in Südeuropa. Deutschland liegt im Bereich der Nulllinie.
- Mitteleuropa, speziell Deutschland, liegt in einem Bereich moderater Erwärmung.

# Regionale Simulationsergebnisse

- Änderungen in Regionen fallen in verschiedenen Modellen unterschiedlich (stark) aus
- Regionale Modelle (statistisch oder dynamisch) lösen die Ergebnisse besser auf
- Unterschiedliche regionale Modelle zeigen Unterschiede in der Modulation der globalen Simulationsergebnisse
- Das gleiche regionale Modell zeigt unterschiedliche Ergebnisse je nach globalem Antrieb

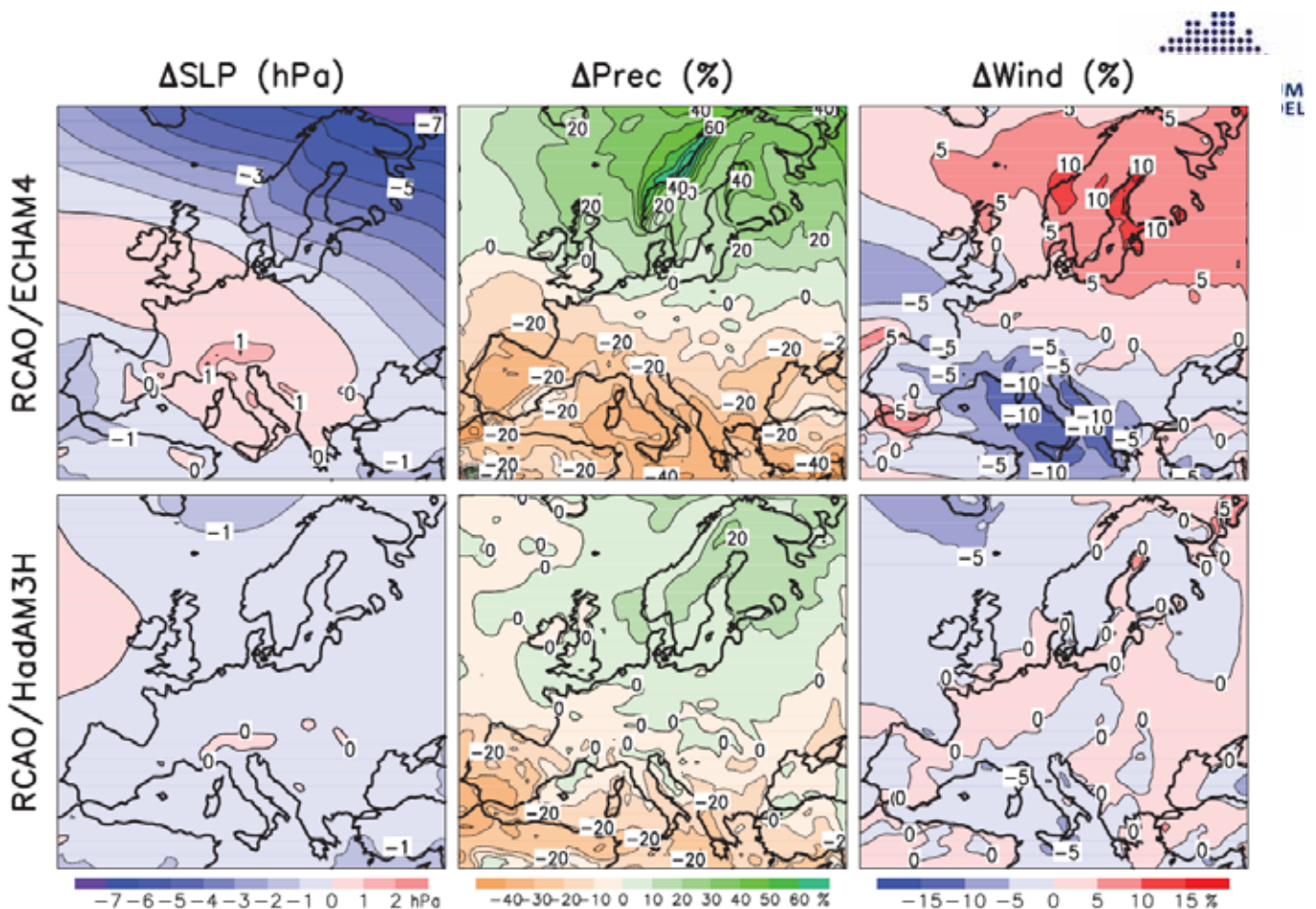


Figure 11.6. Simulated changes in annual mean sea level pressure ( $\Delta$ SLP), precipitation ( $\Delta$ Prec) and mean 10-m level wind speed ( $\Delta$ Wind) from the years 1961 to 1990 to the years 2071 to 2100. The results are based on the SRES A2 scenario and were produced by the same RCM (Rossby Centre regional Atmosphere-Ocean model; RCAO) using boundary data from two global models: ECHAM4/OPYC3 (top) and HadAM3H (bottom) (redrawn from Rummukainen et al., 2004).

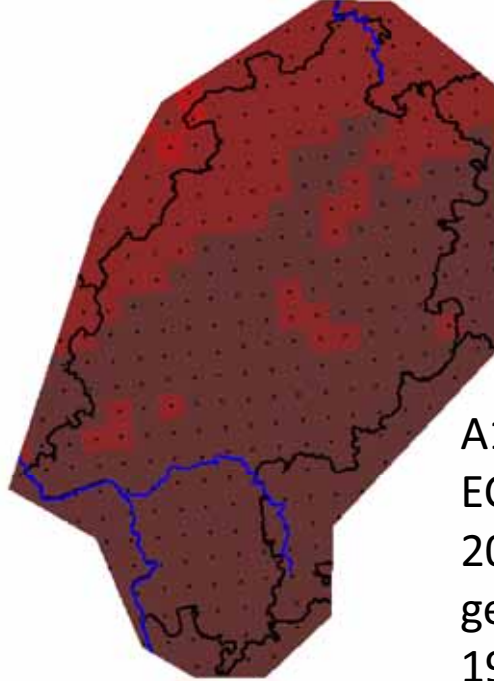
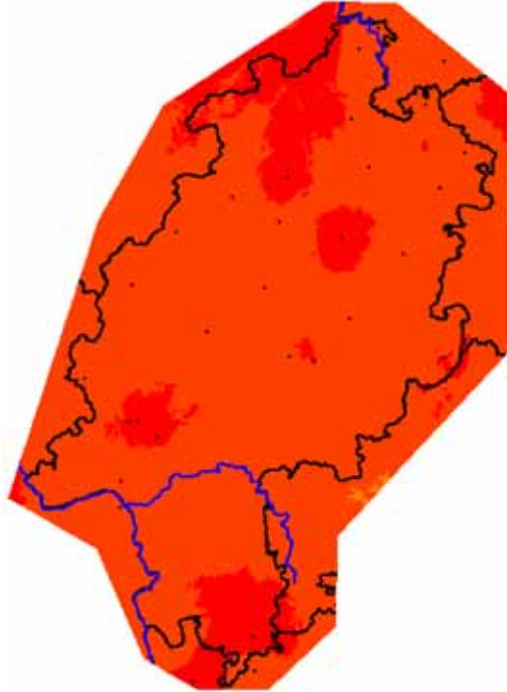


# Temperaturprojektion für Hessen



WETTREG: +2,3°

REMO: +3,1°



A1B-Szenario  
ECHAM5:  
2071-2100  
gegenüber  
1971-2000

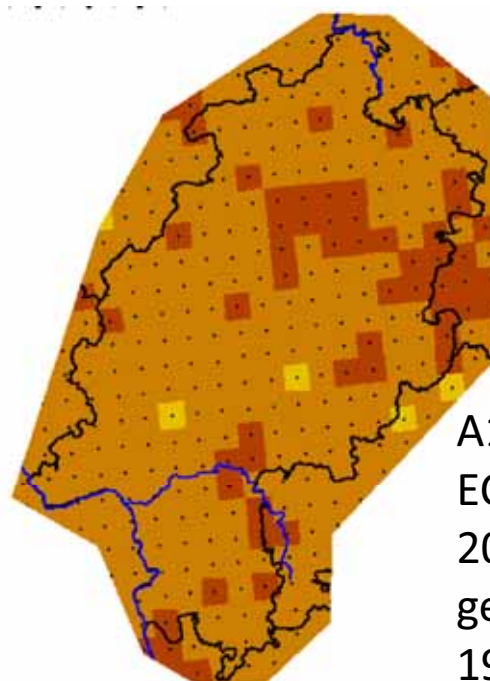
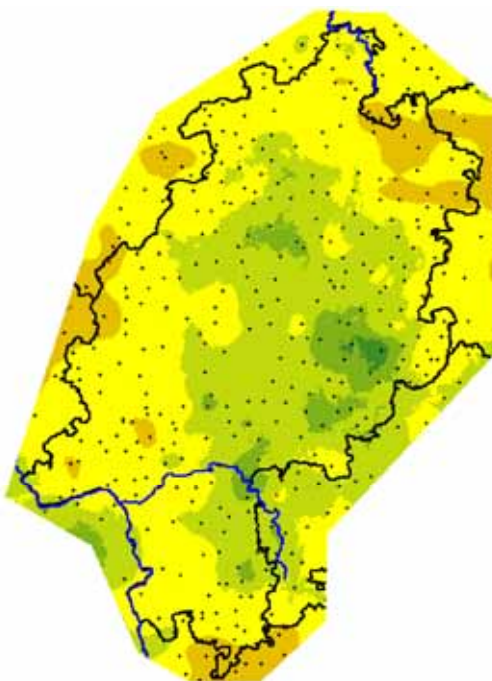


# Niederschlagsprojektion für Hessen



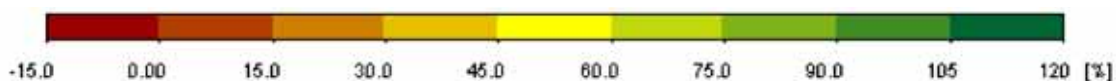
WETTREG: +57,7%

REMO: +19,3%



Winter  
DJF

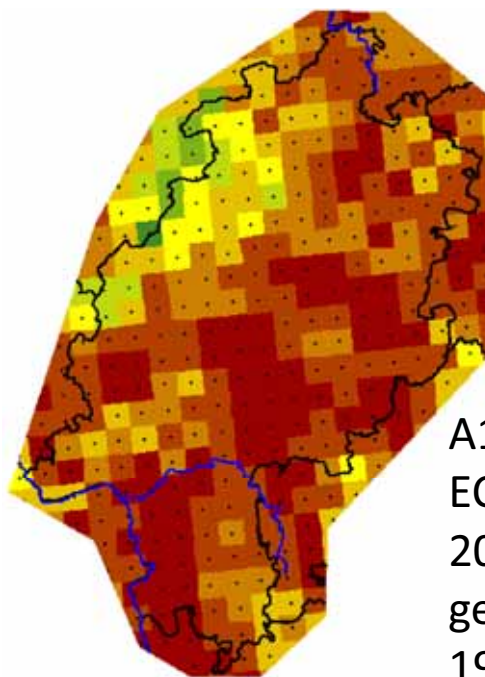
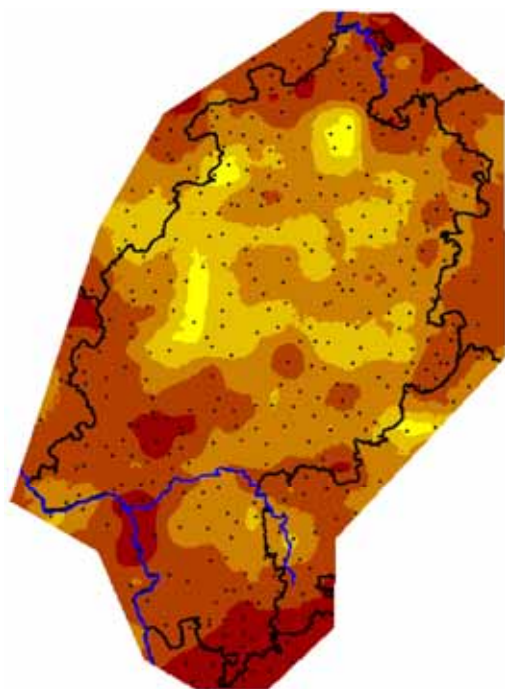
A1B-Szenario  
ECHAM5:  
2071-2100  
gegenüber  
1971-2000



# Niederschlagsprojektion für Hessen

WETTREG: -14,5%

REMO: -15,1%



Sommer  
JJA

A1B-Szenario  
ECHAM5:  
2071-2100  
gegenüber  
1971-2000



## Anpassungsstrategien

- Klimaänderung kann in einigen Punkten qualitativ gut abgeschätzt werden (Temperaturerhöhung, Verschiebung des Jahresganges im Niederschlag zu mehr Regen im Winter und weniger Regen im Sommer)
- Quantitative Daten fehlen
- **Arbeiten mit Wahrscheinlichkeiten**



# Beispiele



- Hochwasserschutz: ↗
- Grundwasserneubildung: ?
- Erosion: ↗
- Landwirtschaftliche Erträge: ?
- Wasserbedarf in der Landwirtschaft: ↑
- Energiebedarf Heizung: ↓
- Energiebedarf Kühlung: ↑

# Fazit



- Das Klima reagiert auf langen Zeitskalen ⇔ einige Folgen des Klimawandels sind bereits heute unabwendbar
- Globale Klimamodelle stellen die Gegenwart und historisches Klima dar, allerdings sind regional deutliche Unterschiede zu finden
- Anpassung an den Klimawandel ist notwendig, Maßnahmen sollten einen langen Zeithorizont haben (>50 Jahre) und Wahrscheinlichkeiten berücksichtigen



**Vermeidung von Emissionen hat  
Priorität!**

**Anpassung ist keine Alternative,  
sondern eine zusätzliche  
Notwendigkeit**