

Klima- und Erdsystemforschung – heutige und zukünftige Herausforderungen

Jochem Marotzke

Wolfgang Müller, Florian Rauser, Reinhard Budich, Björn Stevens
und die Kollegen am MPI-M

MPI für Meteorologie

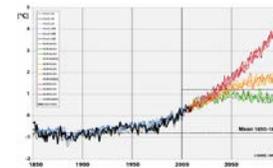


Übersicht

● Die Gegenwart

- Große wissenschaftliche Projekte koordiniert durch MPI-M und ihr HPC-Bedarf

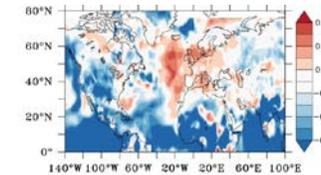
- CMIP5: Langfristiger Klimawandel (2100)



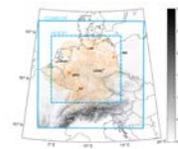
- STORM: Ozean



- MiKlip: Mittelfristige Klimaprognose (2020)



- HD(CP)²: Wolken und Niederschlag



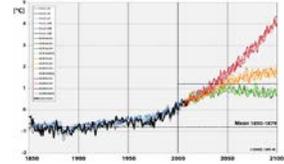
● Die Zukunft

- Wo liegen die Herausforderungen und was tun wir heute, um uns vorzubereiten?



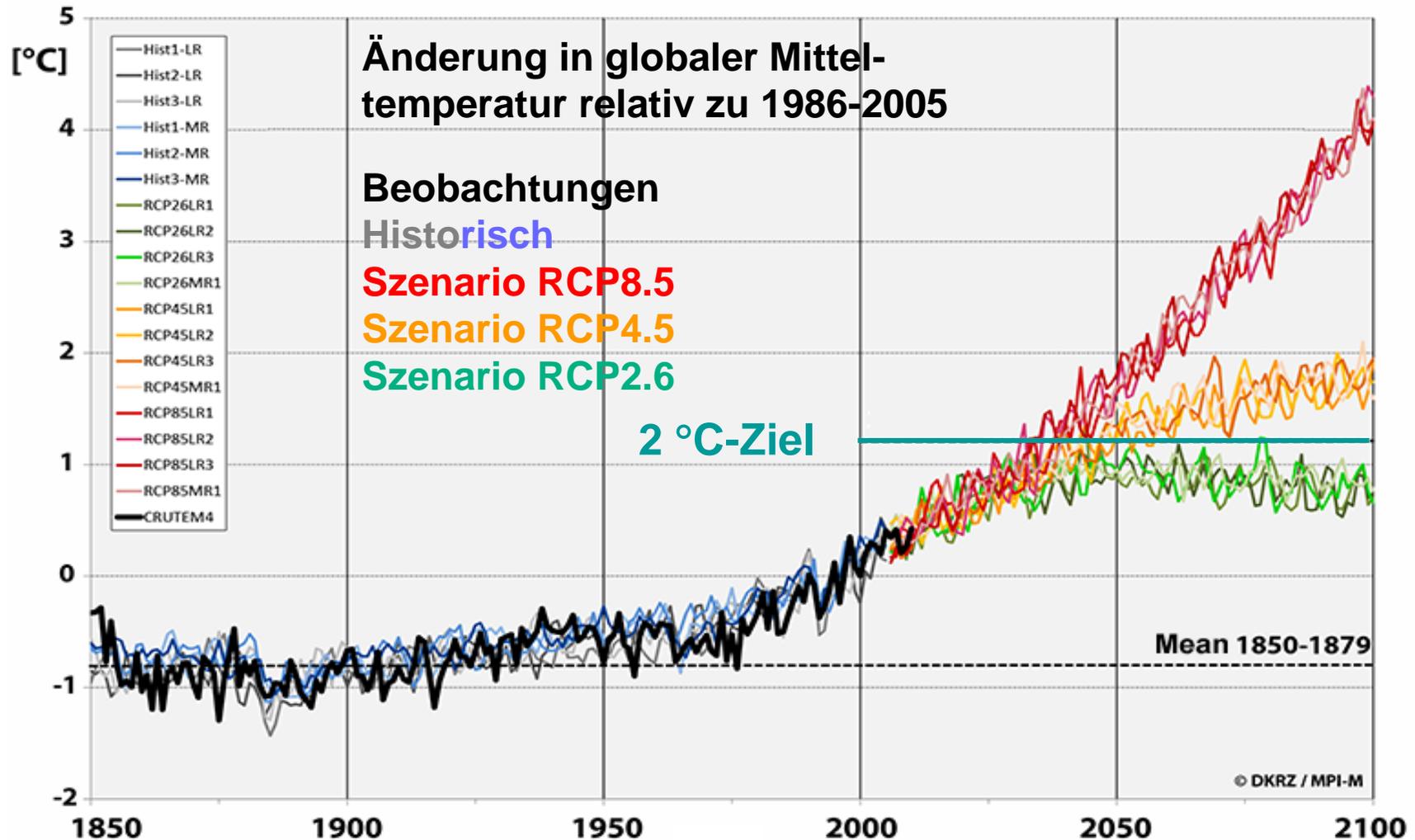
Ein weltweit koordiniertes Projekt für Klimasimulationen: CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project, Phase 5)

- Wie zuverlässig sind Simulationen künftigen Klimas?
 - In welchen Resultaten stimmen verschiedene Modelle überein?
 - Modellstreuung ein Mindestmaß für Unsicherheit der Ergebnisse

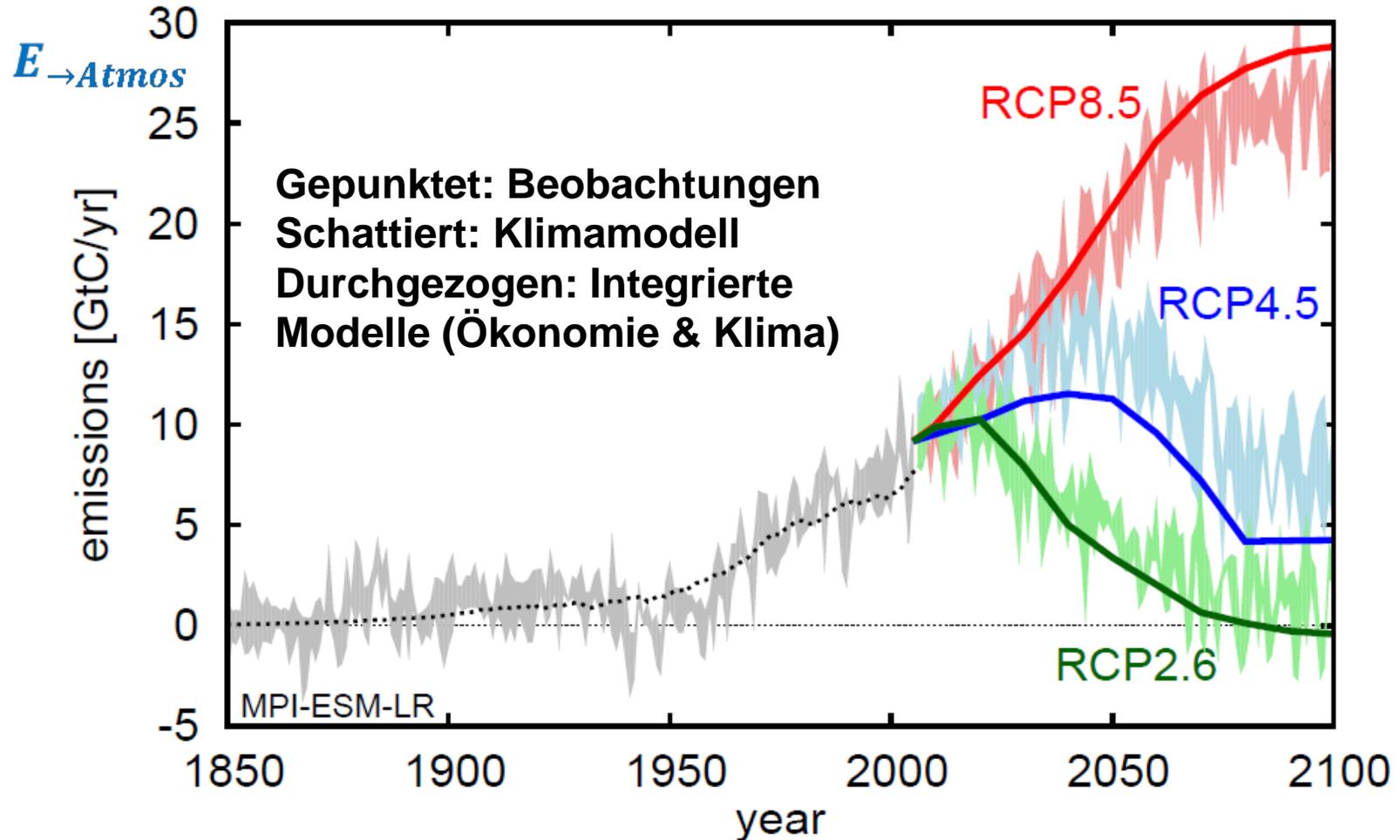


- → Multi-Modell-Experimente
- Koordiniert von WCRP (World Climate Research Programme)
- Zeitplan stark beeinflusst vom IPCC-Prozess – CMIP5-Ergebnisse fließen in den 5. Sachstandsbericht des IPCC ein
- Klimaprojektionen bis 2100
 - Welche CO₂-Emissionen sind kompatibel mit bestimmten Klimazielen?

MPI-ESM: Das 2 °C-Ziel kann erreicht werden, wenn wir dem Szenario RCP2.6 folgen ...

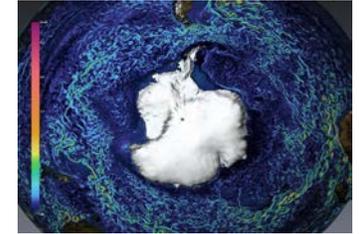


...aber anthropogene CO₂-Emissionen müssen ab 2020 abnehmen,
bis 2100 auf 10% der Emissionen des Jahres 2000



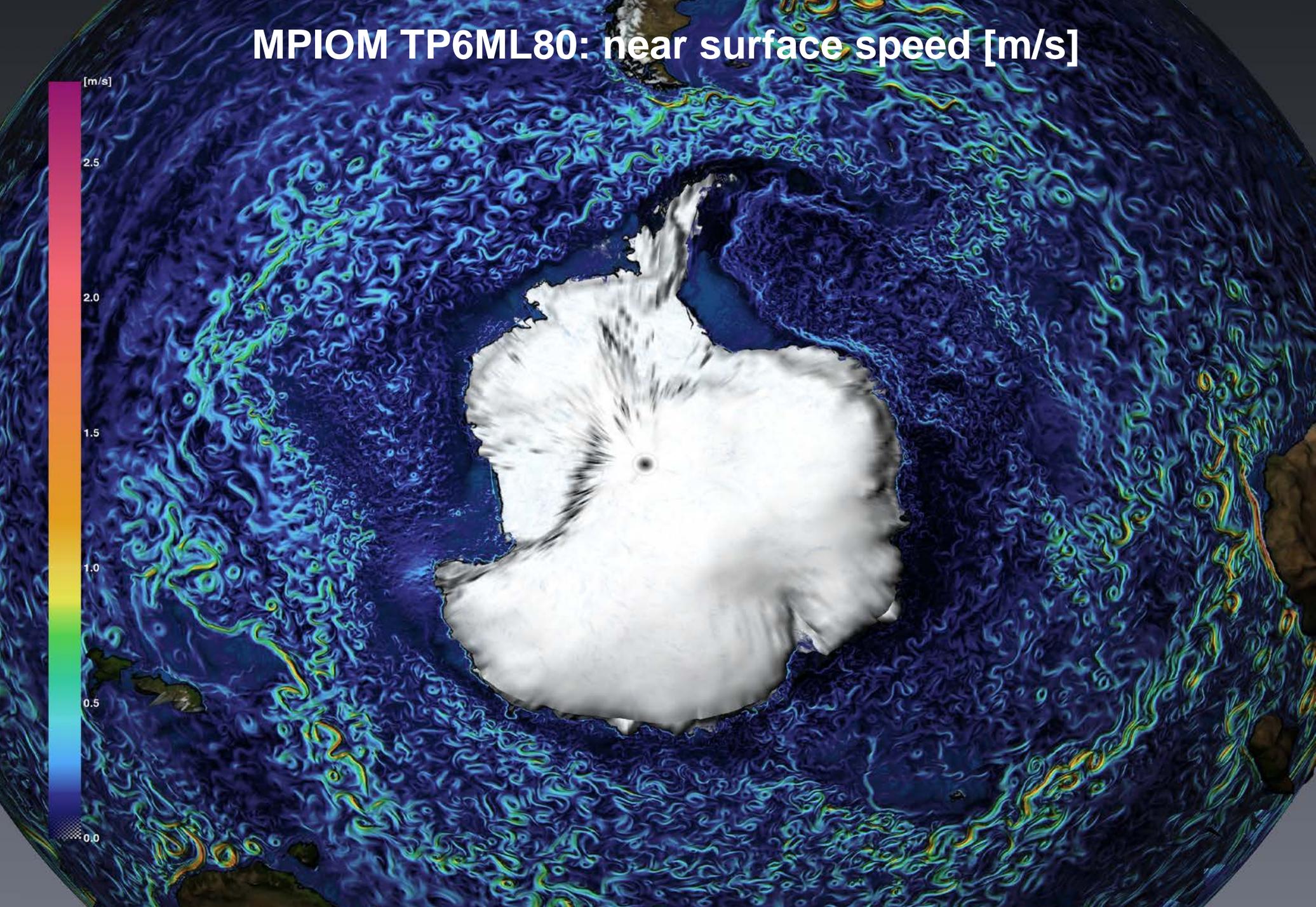
Erhebliche Modellunsicherheit: in mehreren Modellen wird das 2 °C-Ziel auch im Szenario RCP2.6 verfehlt; oft muss der Atmosphäre netto CO₂ entzogen werden

Die STORM-Simulationen



- Klimawandelsimulationen in höchstmöglicher Auflösung in Atmosphäre (40 km) und Ozean (10 km)
 - Hier nur Ozean, Simulationen über das 20. Jahrhundert
- Konsortium der meisten deutschen Einrichtungen im Bereich Ozean-Klima (MPI-M, Exzellenzcluster CliSAP, HZG, AWI; Leitung: **Jin-Song von Storch**, MPI-M; **Detlef Stammer**, Universität Hamburg)
- Das Konsortium finanzierte Personal am DKRZ (**Irina Fast**) für Optimierung

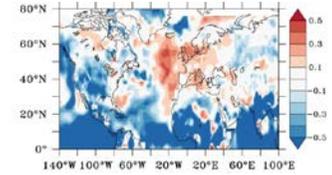
MPIOM TP6ML80: near surface speed [m/s]



STORM: zwei herausragende Ergebnisse

- Erstmalige quantitative Darstellung des mechanischen Energiezyklus im globalen Ozean (also: wie wird mechanische Arbeit am Ozean „geleistet“ und wie wird sie im Ozean verteilt)
 - Atmosphäre: Wärmekraftmaschine (Wärme → Bewegung, bekannt)
 - Ozean: Windmühle (Arbeit → Reibung) und Kühlschränk (Arbeit → Temperaturunterschiede)
- Entdeckung eines neuen Prozesses, der zur Vermischung im Ozean beiträgt, und der nicht von Vorgängen an den Rändern abhängt
 - „Spontane Imbalance“, Erzeugung von Schwerewellen durch Wirbel

MiKlip (Mittelfristige Klimaprognosen)

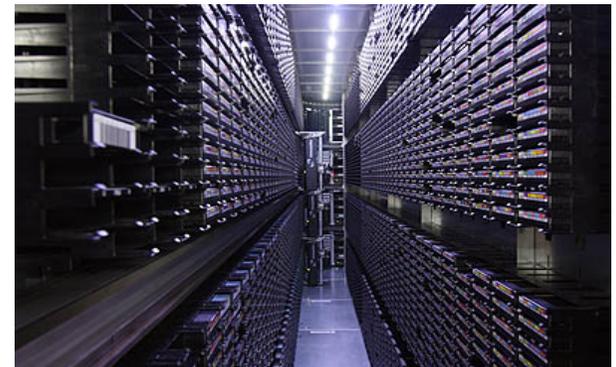


- BMBF-gefördertes Projekt, 2011-2015
- Vorhersage von menschengemachtem Klimawandel zusammen mit natürlichen Klimaschwankungen
- 35 Projekte plus MiKlip-Datenserver, Budget etwa 20 Mio. Euro
- Ziel: Erstellung eines prä-operationellen Vorhersagesystems zusammen mit Forschung zur Verbesserung des Systems
- Koordination und MiKlip-Office am MPI-M

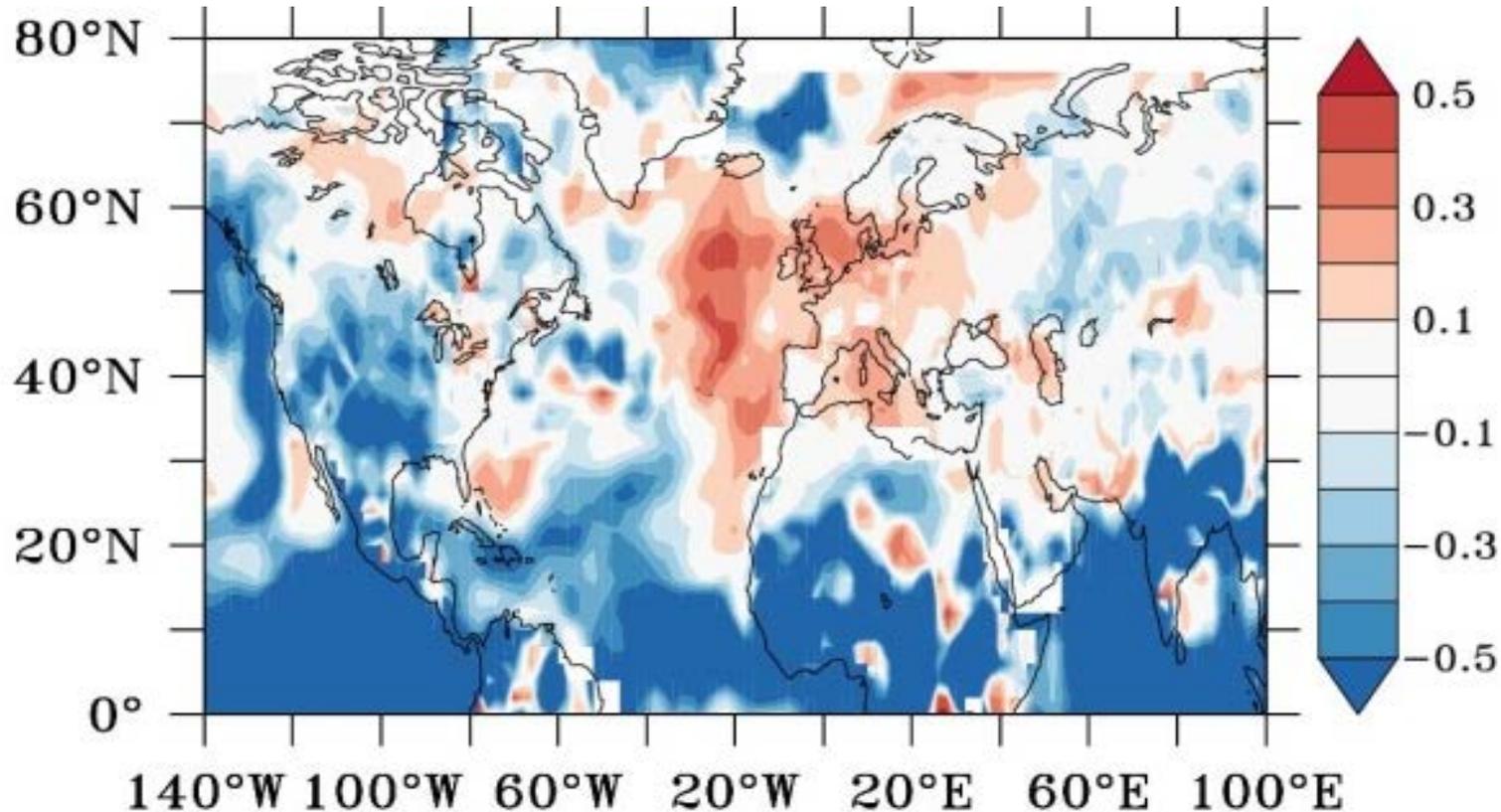
- Charakteristika:
 - Große Ensembles von Simulationen (Ziel: 30-50 Realisierungen pro Experiment), zur Erstellung von probabilistischen Vorhersagen
 - Verfügungstellen der Ergebnisse für Gesamtprojekt, zur systematischen Evaluation und zur Erstellung regionalisierter Vorhersagen

Der MiKlip-Datenserver am DKRZ

- Finanziert durch BMBF/MiKlip, betrieben vom DKRZ (ca. 1 Mio Euro)
- 1 PB Plattenkapazität plus 6 PB Bänder
- Zugang für alle MiKlip-Projektparter
- Verfügbar:
 - Alle globalen MiKlip-Vorhersagen
 - Viele regionale Vorhersagen
 - Beobachtungen
 - Analysesoftware



Erstmaliger Nachweis von Vorhersagegüte für mehrjähriges Sommermittel der Oberflächentemperatur über Zentraleuropa



Verringerung des mittleren quadratischen Fehlers für das Sommermittel, gemittelt über Vorhersagejahre 2-5

High Definition Clouds and Precipitation for advancing Climate Prediction

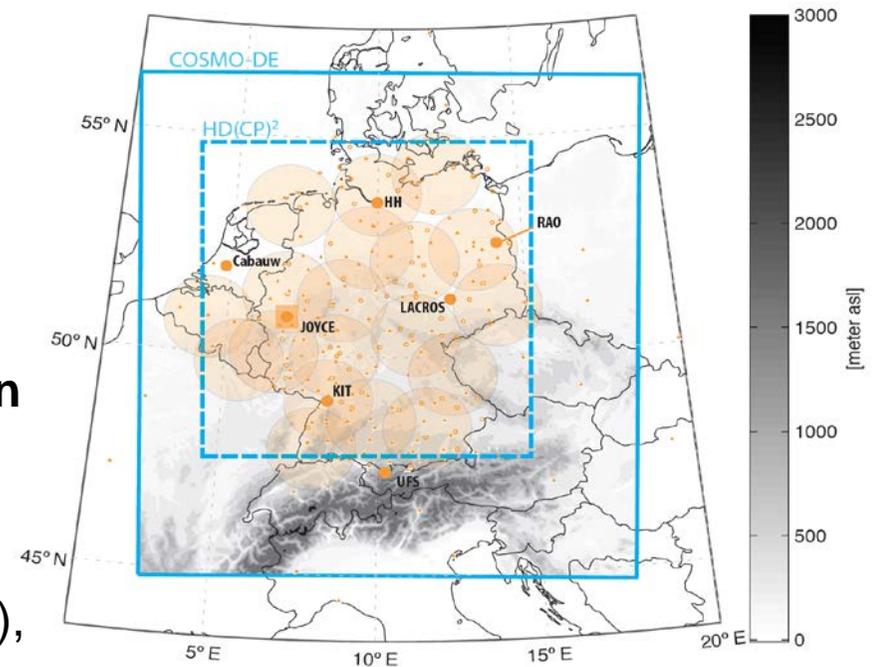
HD(CP)² ist ein BMBF-Projekt mit dem Ziel, **Wolken und Niederschlag im Klimasystem** besser zu verstehen.

HD(CP)² will

- **Klimavorhersagen verbessern,**
- **Unsicherheit** in Klimavorhersagen **quantifizieren**

Zu diesem Zweck wird

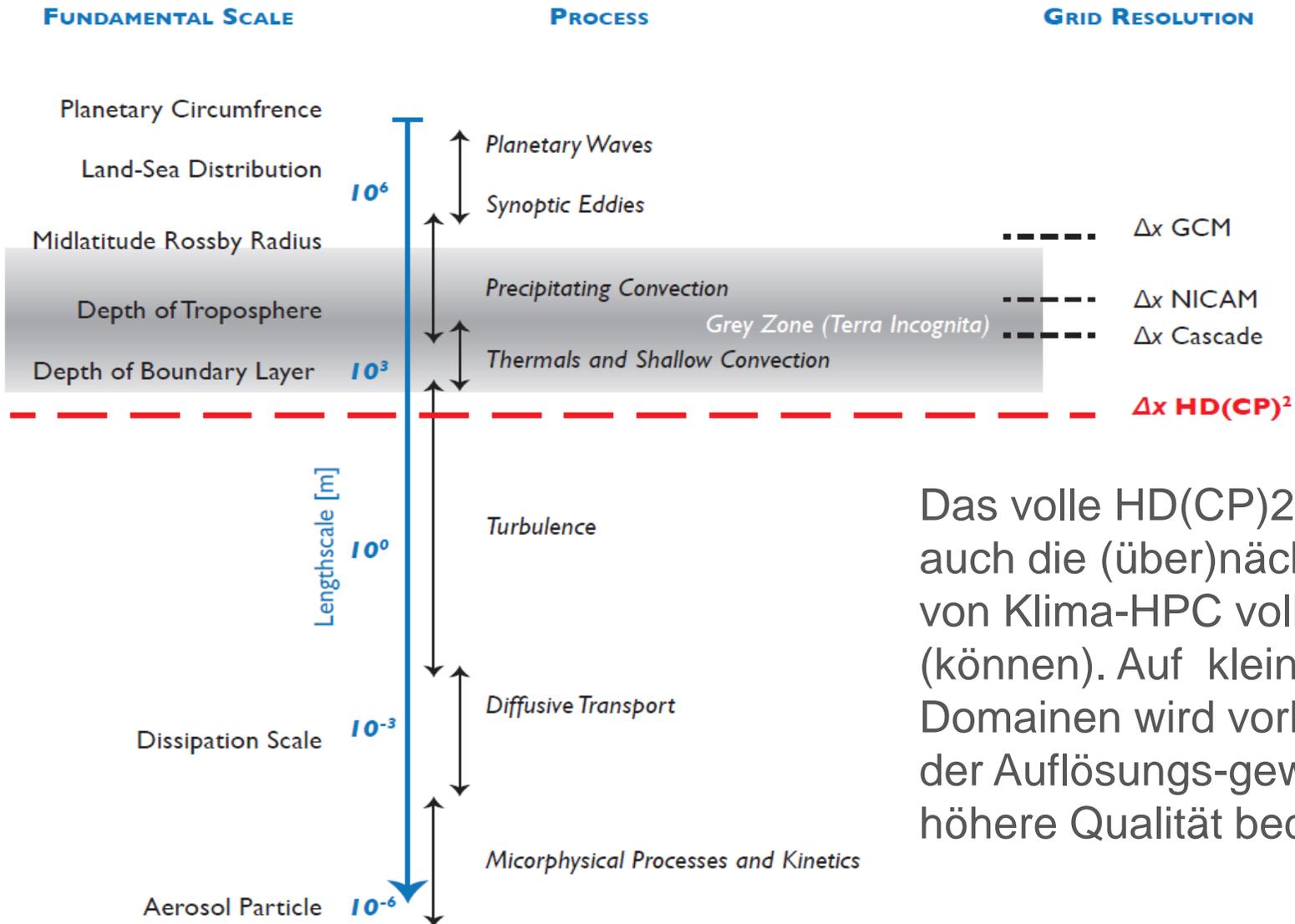
- Ein **neues regionales Modell** entwickelt (ICON+),
- **Beobachtungen** in Deutschland gesammelt und homogenisiert,
- Neue Methoden zur **Evaluierung** und **Unsicherheitsquantifizierung** geschaffen,
- Neue **Parametrisierungen** entwickelt.



Stevens, et al., 2011, HD(CP)² proposal

Mögliches HD(CP)² Modellgebiet und Beobachtungsstationen

Die räumliche Auflösung soll so hoch sein, dass Wolken explizit dargestellt werden



Das volle HD(CP)² Modell wird auch die (über)nächste Generation von Klima-HPC voll auslasten (können). Auf kleineren Prototyp-Domains wird vorher getestet, ob der Auflösungs-gewinn auch höhere Qualität bedeutet.

Sehr hoher Aufwand an Modellentwicklung und -optimierung



Stevens, et al., 2011, HD(CP)2 proposal

Das DKRZ (Joachim Biercamp) leitet das Kernmodul M1 (10 Stellen, 4 am DKRZ). Dieses beinhaltet die Modellentwicklung, Optimierung und den Modell-workflow.

Große Projekte koordiniert durch MPI-M, HPC-Anforderungen

(DKRZ-System: 64 Mio. CPU-Stunden pro Jahr, MPI-M-Anteil: 12 Mio. Stunden)

Projekt	CPU-Stunden		Daten	
	Verbraucht (bis 2012)	Geplant (2013)	Belegt (wrk + Arch)	Geplant (Quota 2013)
CMIP5 Klimawandel	29 Mio.	1 Mio.	2,2 PB	240 TB
STORM Ozean	20 Mio.	12 Mio.	2 PB	1,2 PB
MiKlip Mittelfrist- prognose	3 Mio.	5 Mio.	400 TB	1 PB
HD(CP) ² Wolken & Niederschlag		2,5 Mio.		550 TB

Fortschritte in der Klimamodellierung benötigen ständige Weiterentwicklung der Modelle

Wissenschaftlich und technisch:

- Mehr Details der Darstellung von mehr Prozessen
 - Z.B. globaler Kohlenstoffkreislauf (CMIP5)
- Ensembles (Monte-Carlo-Methoden)
 - Abschätzung der Simulationsqualität und der Vorhersagegüte (MiKlip)
- Höhere räumliche Auflösung
 - Z.B. zur Darstellung der hochenergetischen Prozesse im Ozean (STORM) und der Wolken in der Atmosphäre (HD(CP)²)
 - Lineare Verdoppelung der Auflösung (Halbierung des Gitterabstands) erfordert eine Größenordnung mehr an Rechenzeit!

“Treiber” erhöhter HPC-Anforderungen

Better physical process representation

3x more

Much higher resolution

200km to 20km

3x

2000x

Climate modelling

3x

5x

Large ensembles

5x more

More biogeochemical processes modelled explicitly

3x more

10x

Much longer runs, e.g. Glacial cycle

10x more

Aggregate cost

= 10^6

Das Kardinalproblem in der Klimamodellierung: Wie nutzen wir die stets letzte Rechnergeneration möglichst effizient?

- Wir werden noch auf Jahrzehnte hinaus die jeweils leistungsfähigsten Rechner der Welt ausnutzen müssen
 - Jede neue Rechnergeneration bringt uns einen Faktor von 10-20 in der Leistungsfähigkeit, wir brauchen aber einen Faktor von 1.000.000!
- Aber: die Rechner veralten in 5-7 Jahre, unsere Software (die Klimamodelle) hat eine Lebensdauer von typischerweise 25 Jahren
 - Ein umfassendes Klimamodell benötigt ca. 500 Personenjahre zum Erstellen und Weiterentwickeln; die Entwicklungsgruppen umfassen vielleicht 20 Personen: $500 \text{ Personenjahre} : 20 \text{ Personen} = 25 \text{ Jahre}$
- Wir werden **immer** unsere Modelle an mehrere neue Rechnergenerationen anpassen müssen

Die Zukunft: Wo liegen die Herausforderungen, und was tun wir heute, um uns vorzubereiten?

- Essentielle Rolle des DKRZ
- Einzigartig in Europa als nationale Serviceeinrichtung durch die Kombination von
 - Rechnerleistung (HPC)
 - Daten-Services (die meisten Analysen erfolgen im Nachgang zu den Simulationen und erfordern Abspeichern der Simulationsergebnisse)
 - Fachspezifische Nutzerberatung
- Nur durch seine Einbettung in das Hamburger Exzellenzzentrum der Klimaforschung kann das DKRZ die Nutzerberatung weiterentwickeln und dadurch seinen nationalen Service auf dem internationalen Stand der Forschung halten



Warum es schwer ist, den neuesten Rechner effizient auszunutzen: Skalierung, Stromverbrauch, heterogene Architekturen

- Leistungssteigerung in modernen Höchstleistungsrechnern erfolgt **nicht mehr durch schnellere** Prozessoren, sondern durch Bündelung von **immer mehr** Prozessoren
- Diese immer größere Anzahl von Prozessoren auszunutzen erfordert immer neue Anpassungsarbeit
 - Nicht jedes Problem „skaliert“ (läuft schneller auf mehr Prozessoren)
 - Notwendig: detaillierte Kenntnis des Modells **und** des Rechners
 - Zusammenarbeit Klimamodellierer & Rechenzentren (**DKRZ@HH!**)
- Die Aufgabe wird schwerer, nicht leichter:
 - Stromverbrauch wird immer mehr zum limitierenden Faktor
 - Rechnerleistung & Stromverbrauch: Industrie setzt zunehmend auf spezielle Zusatzprozessoren (z.B. Graphik-Chips, GPUs)

Heterogene Architekturen

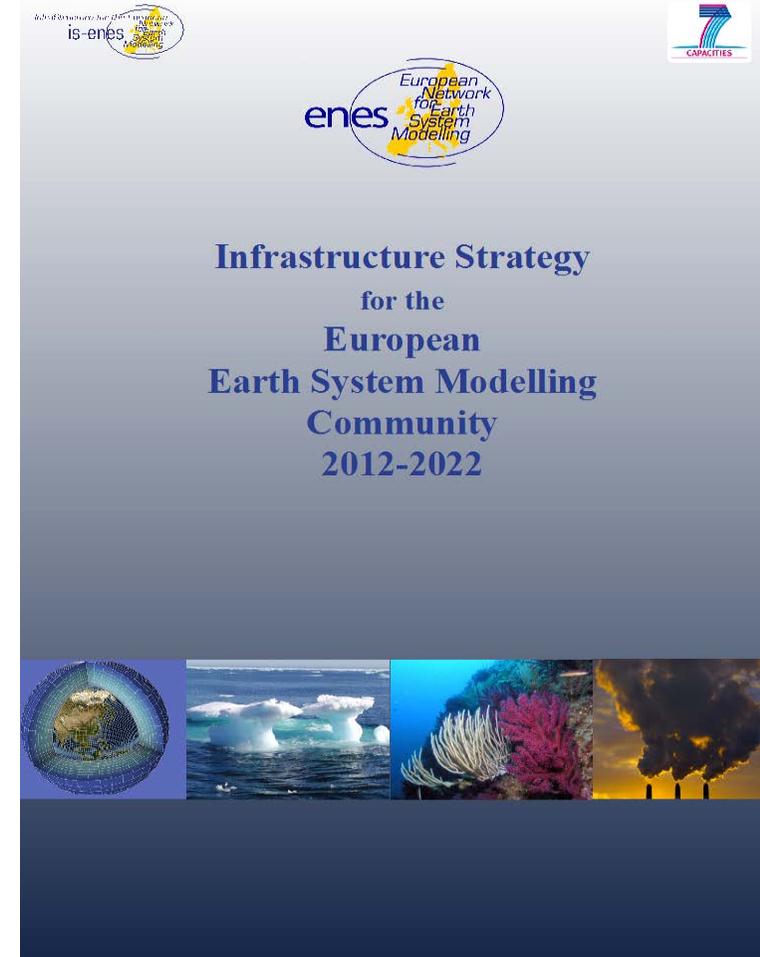
- Prozessoren haben (wieder) Beschleuniger
 - Deutlich schwieriger zu programmieren
 - Unsere Programme enthalten viele unterschiedliche Elemente, von denen nur einige wenige sich für solche Prozessoren eignen
- In Zukunft: Bandbreiten pro Rechenoperation gehen zurück
 - Speicherzugriffe und Kommunikation zwischen Prozessoren werden (noch) schwieriger
- Trend der TOP500 für die Community ungünstig!
- Wohin genau die Entwicklung geht, ist kaum vorhersagbar.
Notwendig also: wissenschaftlich-organisatorische Vorbereitung

Vorbereitung am MPI-M und in Hamburg

- Investition in Personen (wissenschaftliche Programmierer) seit 2003
 - Weitsicht des früheren MPI-M-Direktors Guy Brasseur und des früheren MPG-Vizepräsidenten Kurt Mehlhorn: von 3 wissenschaftlichen Programmierern am MPI-M im Jahr 2003 → 15 wissenschaftliche Programmierer heute (plus mehrere projektgeförderte)
 - Kein anderes Klimaforschungsinstitut in Deutschland hat einen solchen Stab
- Ausnutzen der Nähe von MPI-M und DKRZ
 - Gemeinsame technologische Innovation, z.B. durch HD(CP)²
 - Setzt sich dann in „Standardanwendungen“ fort

Internationale Kooperation

- Beteiligung an verschiedenen Initiativen und Projekten, vor allem mit dem neuen Modell ICON:
 - G8-Call: Icomex (Code-Beschleunigung, Leonidas Linardakis, MPI-M)
 - Vorbereitung Exascale, European Exascale Initiative: PRACE Second Implementation Phase, erste Code-Teile von ICON auf GPUs
- European Network for Earth System Modelling:
 - ENES, 2001 gegründet von Guy Brasseur
 - Foresight-Dokument (5 Hauptautoren, u.a. Reinhard Budich und Jochem Marotzke)
 - Beibehalten der wissenschaftlichen Modellvielfalt, gemeinsame Nutzung von Softwareinfrastruktur und Darstellung „unstrittiger“ Prozesse (z.B. Strahlungstransport)



Zusammenfassung

- Durch die Zusammenarbeit mit dem DKRZ haben wir wegweisende wissenschaftliche Erfolge erzielen können
- Die effiziente Ausnutzung künftiger Hochleistungsrechner wird immer mehr technisch-personellen Aufwand erfordern
 - Wir sind vorbereitet!
- Die enge Einbindung des DKRZ in das Hamburger Exzellenzzentrum für die Klimamodellierung wird auch in Zukunft unverzichtbar bleiben

Ich danke für Ihre Aufmerksamkeit!