Klimamodellierung

in Bezug auf die Entwicklung der Rechenleistung

A. Logacjov

Universität Hamburg

Juni, 2016

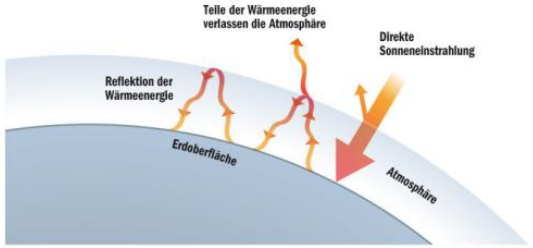
Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung
2. Grundlagen der Klimamodellierug
3. Klimamodellierung und die Entwicklung moderner Computer
4. Zusammenfassung
5. Literatur- und Abbildungsverzeichnis

Einleitung

Einleitung

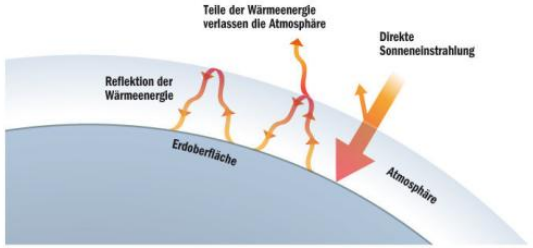
Treibhausgase



[DIE WELT]

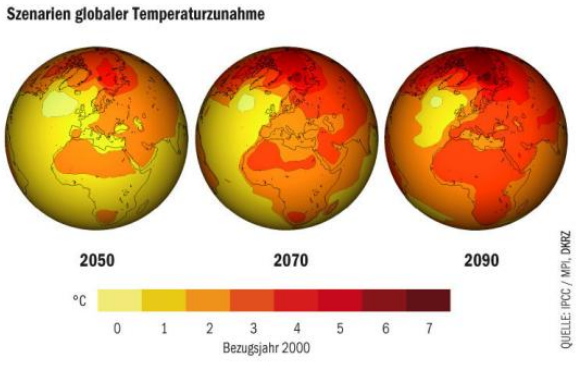
Einleitung

Treibhausgase



[DIE WELT]

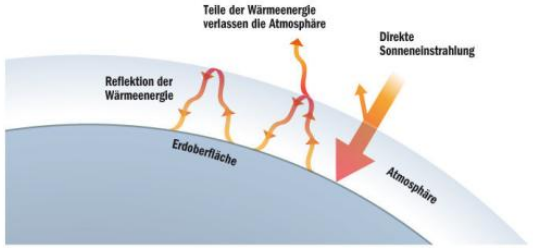
Globale Erwärmung



[IPCC/MPI/DKRZ]

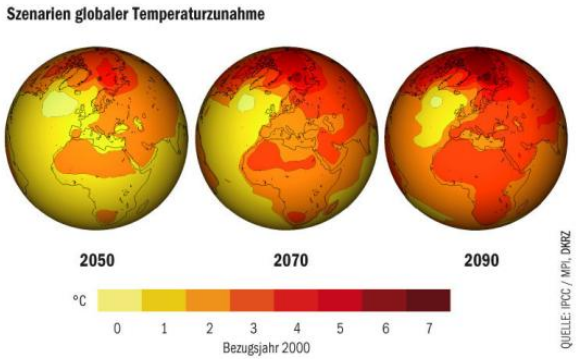
Einleitung

Treibhausgase



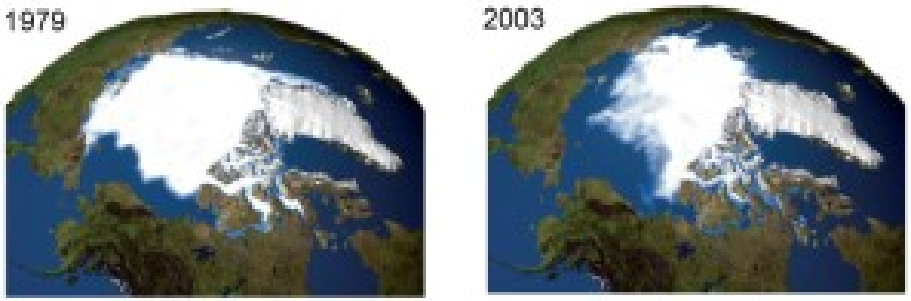
[DIE WELT]

Globale Erwärmung



[IPCC/MPI/DKRZ]

Schmelzen der Polkappen



[xplora

Entwicklung der Polargebiete November 2004]

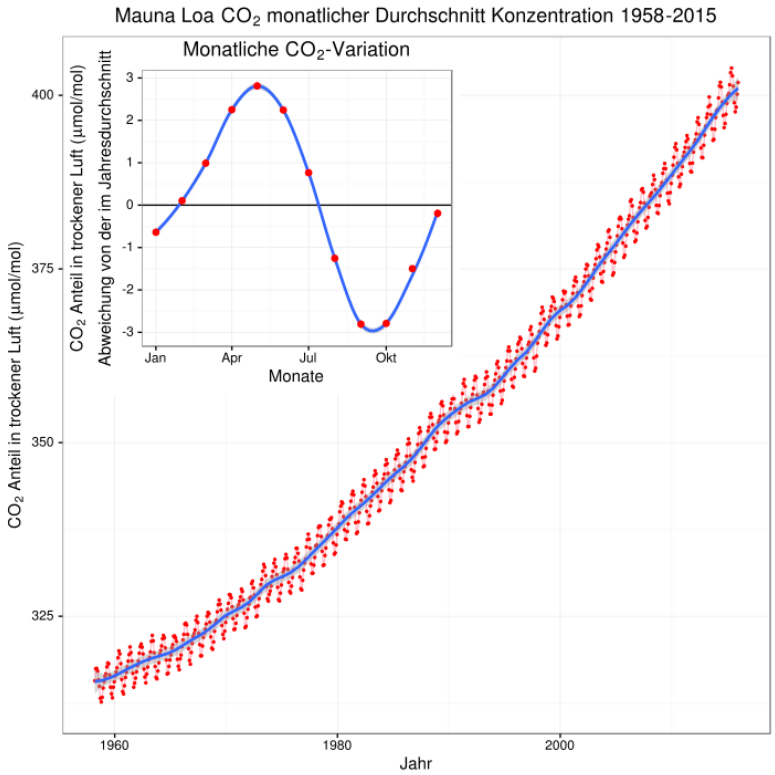
Drastische Änderung des Klimagleichgewichts seit Industrialisierung
Fragen:

- Welche Änderungen sind anthropologischen Ursprungs?
- Welche Änderungen sind natürlichen Ursprungs?

Verstehen des Klimasystems von größtem Interesse
Zukunftsprognosen möglich

Der Klimawandel

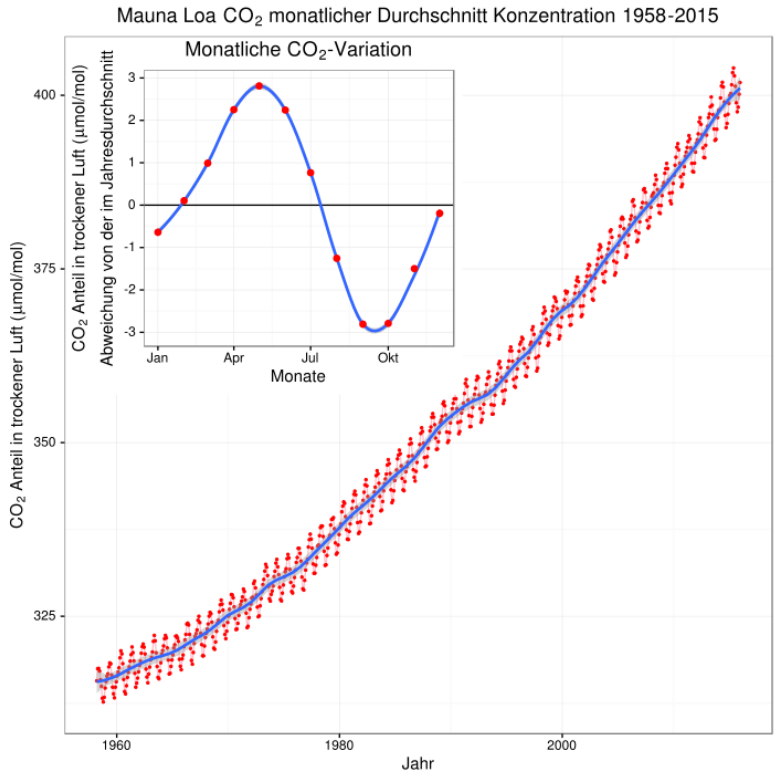
Messstation Mauna Loa liefert seit 58 Jahren CO_2 Gehalt des Vulkan Mauna Loa
wichtig: kaum lokale menschliche oder natürliche Einflüsse am Klima



[wikipedia]

Der Klimawandel

Messstation Mauna Loa liefert seit 58 Jahren CO_2 Gehalt des Vulkan Mauna Loa
wichtig: kaum lokale menschliche oder natürliche Einflüsse am Klima

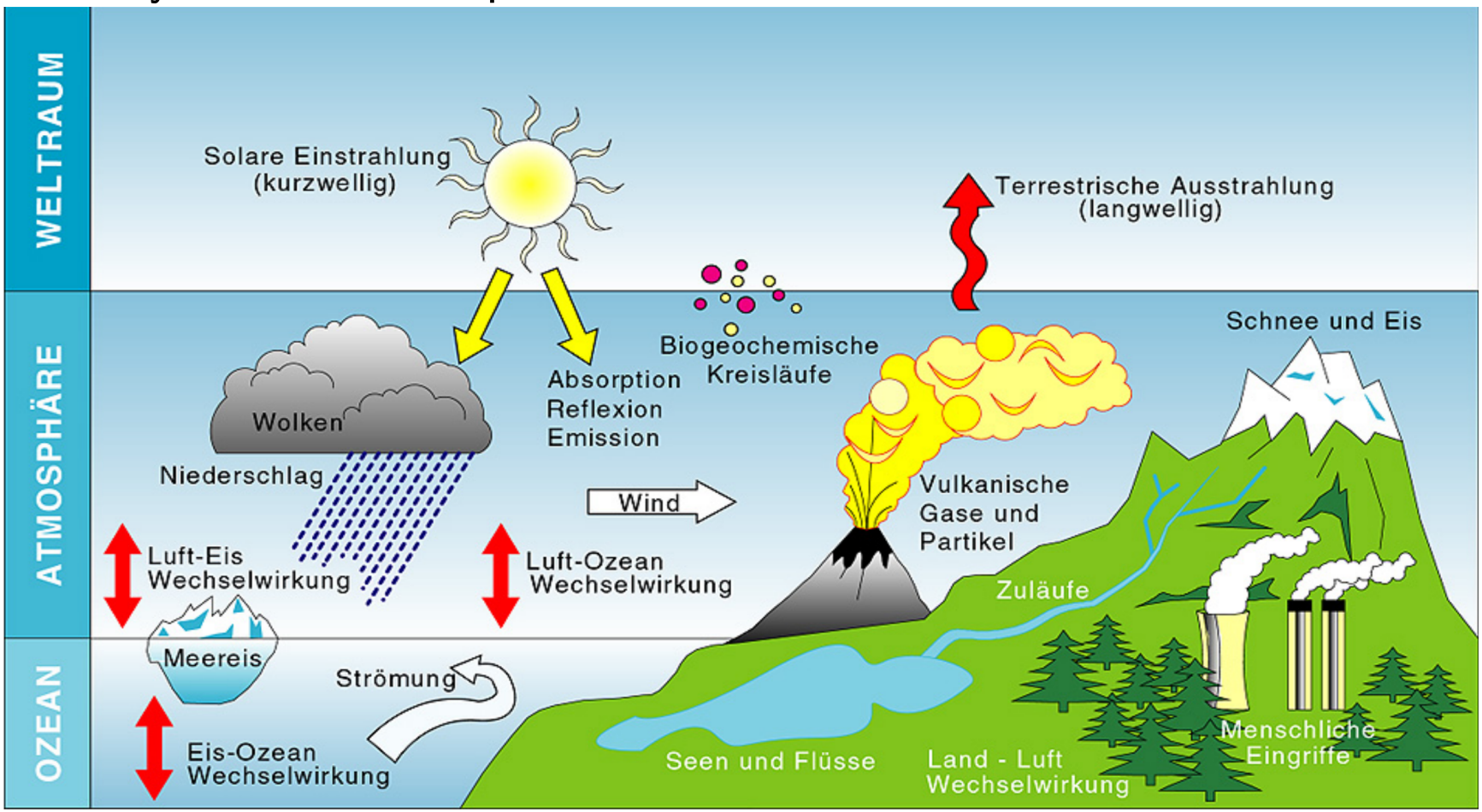


[wikipedia]

Unabhängige Belege für den Klimawandel liefern selbst Berechnungen von Versicherungen.

Klimasystem

Klimasystem sehr komplex:



[Vorlesung Hochleistungsrechnen WiSe 15/16]

Ohne Computer Verstehen nur bedingt möglich

Grundlagen der Klimamodellierug

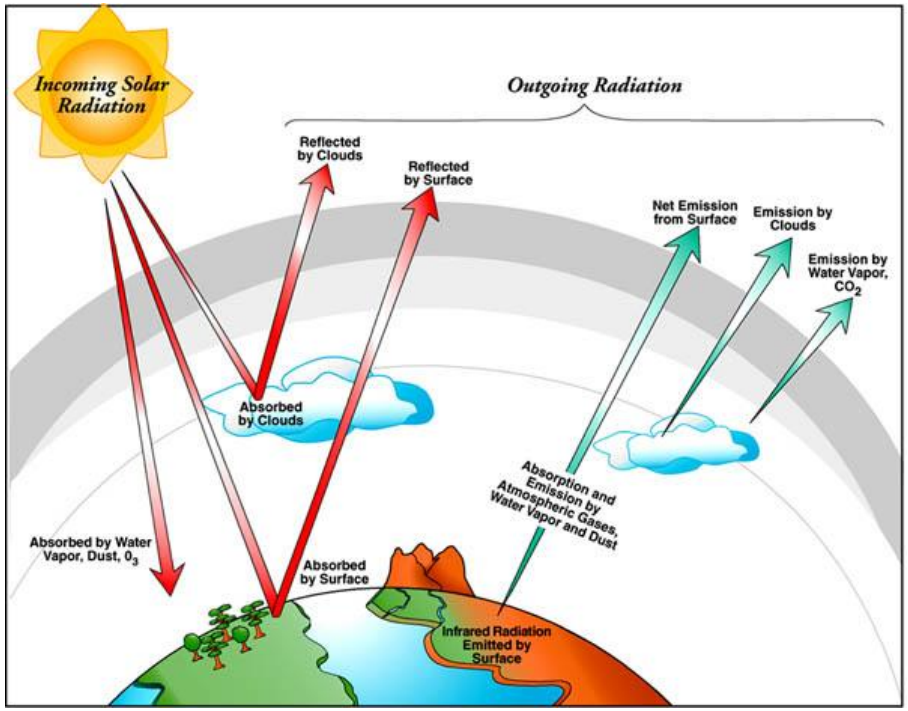
Konzeptionelle Modelle

- Vereinfachung und Universalisierung im Vordergrund
- Grundlagenverständnis schaffen

Konzeptionelle Modelle

- Vereinfachung und Universalisierung im Vordergrund
- Grundlagenverständnis schaffen

Energiebilanzmodell:



[Steve Ackerman and John Knox US Department of Energy(ARM)]

Klimamodelle

Klimasystem so genau wie möglich abbilden
Man benötigt:

- Relevante physikalische Gleichungen
- Umsetzung in numerische Algorithmen
- Implementierung

Klimamodelle

Gleichungen sind gewöhnliche oder partielle Differentialgleichungen

$$\frac{\partial U}{\partial t} - (f+\xi)\cdot V + \dot{\eta}\frac{\partial U}{\partial \eta} + \frac{R_d T_v}{a}\frac{\partial}{\partial \lambda} ln p + \frac{1}{a}\frac{\partial}{\partial \lambda}(\phi + E) = P_U + K_U \tag{2.2.1}$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + (f+\xi)\cdot U + \dot{\eta}\frac{\partial V}{\partial \eta} + \frac{R_d T_v}{a}(1-\mu^2)\frac{\partial}{\partial \mu} ln p + \frac{(1-\mu^2)}{a}\frac{\partial}{\partial \mu}(\phi + E) = P_V + K_V \tag{2.2.2}$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{U}{a(1-\mu^2)}\frac{\partial T}{\partial \lambda} + \frac{V}{a}\frac{\partial T}{\partial \mu} + \dot{\eta}\frac{\partial T}{\partial \eta} - \frac{\kappa T_v \omega}{(1+(\delta-1)\,q_v)p} = P_T + K_T \tag{2.2.3}$$

$$\frac{\partial q_v}{\partial t} + \frac{U}{a(1-\mu^2)}\frac{\partial q_v}{\partial \lambda} + \frac{V}{a}\frac{\partial q_v}{\partial \mu} + \dot{\eta}\frac{\partial q_v}{\partial \eta} = P_{q_v} + K_{q_v} \tag{2.2.4}$$

$$\frac{\partial q_w}{\partial t} + \frac{U}{a(1-\mu^2)}\frac{\partial q_w}{\partial \lambda} + \frac{V}{a}\frac{\partial q_w}{\partial \mu} + \dot{\eta}\frac{\partial q_w}{\partial \eta} = P_{q_w} + K_{q_w} \tag{2.2.5}$$

[Vorlesung Hochleistungsrechnen WiSe 15/16]

nicht direkt lösbar

Numerische Algorithmen zur Approximierung Qualität der Modelle leidet

Möglichkeiten

Moderne Klimamodelle

- Fördern Verständnis

Möglichkeiten

Moderne Klimamodelle

- Fördern Verständnis
- Vergangenes Klima nachbilden
- Heutiges Klima nachbilden
- Ermöglichen Zukunftsprognosen

Möglichkeiten

Moderne Klimamodelle

- Fördern Verständnis
- Vergangenes Klima nachbilden
- Heutiges Klima nachbilden
- Ermöglichen Zukunftsprognosen
  - Hier fließen Annahmen mit ein
  - Eingabedaten bestimmen den Verwendungszweck
  - Höchster Aufwand bei Aufbereitung der Eingabedaten

Möglichkeiten

Moderne Klimamodelle

- Fördern Verständnis
- Vergangenes Klima nachbilden
- Heutiges Klima nachbilden
- Ermöglichen Zukunftsprognosen
  - Hier fließen Annahmen mit ein
  - Eingabedaten bestimmen den Verwendungszweck
  - Höchster Aufwand bei Aufbereitung der Eingabedaten
- Bauen auf Wettervorhersagen auf
- Benötigen ggf. sehr viel Rechenleistug

Möglichkeiten

Moderne Klimamodelle

- Fördern Verständnis
- Vergangenes Klima nachbilden
- Heutiges Klima nachbilden
- Ermöglichen Zukunftsprognosen
  - Hier fließen Annahmen mit ein
  - Eingabedaten bestimmen den Verwendungszweck
  - Höchster Aufwand bei Aufbereitung der Eingabedaten
- Bauen auf Wettervorhersagen auf
- Benötigen ggf. sehr viel Rechenleistug

Große Herausforderung für Computer und Wissenschaftler

Klimamodellierung und die Entwicklung moderner Computer

Numerische Wettervorhersagen (NWP)

Erste Wettersimulation 1950

- Approximation physikalischer Differentialgleichungen durch Finite-Differenzen-Methode

Numerische Wettervorhersagen (NWP)

Erste Wettersimulation 1950

- Approximation physikalischer Differentialgleichungen durch Finite-Differenzen-Methode
- D.h. Raum wird durch endliche Gitterpunkte diskretisiert
- Zeit durch endliche Zeitschritte

Numerische Wettervorhersagen (NWP)

Erste Wettersimulation 1950

- Approximation physikalischer Differentialgleichungen durch Finite-Differenzen-Methode
- D.h. Raum wird durch endliche Gitterpunkte diskretisiert
- Zeit durch endliche Zeitschritte
- Masse- und Energietransfer zwischen Gitterboxen

Numerische Wettervorhersagen (NWP)

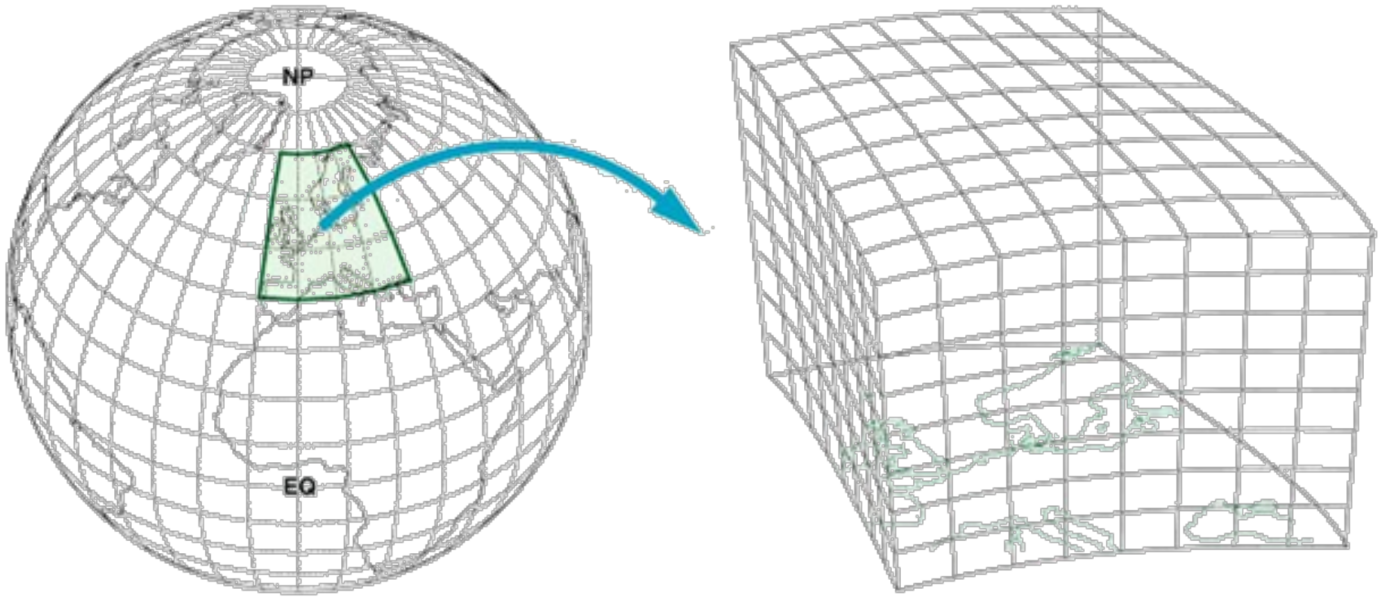
Erste Wettersimulation 1950

- Approximation physikalischer Differentialgleichungen durch Finite-Differenzen-Methode
- D.h. Raum wird durch endliche Gitterpunkte diskretisiert
- Zeit durch endliche Zeitschritte
- Masse- und Energietransfer zwischen Gitterboxen
- Regionale Betrachtung, starke Vereinfachung, nur Atmosphäre

Numerische Wettervorhersagen (NWP)

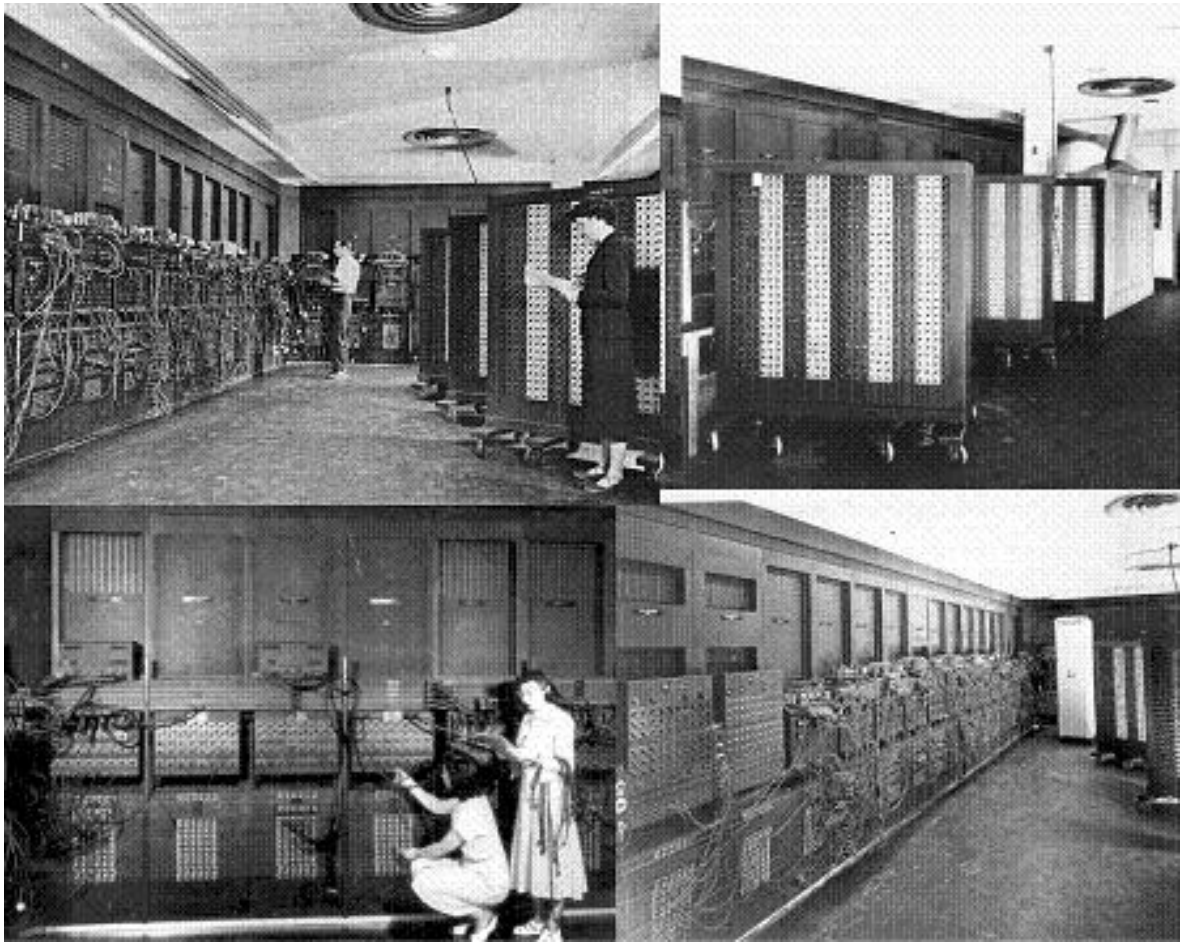
Erste Wettersimulation 1950

- Approximation physikalischer Differentialgleichungen durch Finite-Differenzen-Methode
- D.h. Raum wird durch endliche Gitterpunkte diskretisiert
- Zeit durch endliche Zeitschritte
- Masse- und Energietransfer zwischen Gitterboxen
- Regionale Betrachtung, starke Vereinfachung, nur Atmosphäre



Numerische Wettervorhersagen (NWP)

ENIAC Rechner mit ca. 500 FLOPS 24h Wetterprognose möglich



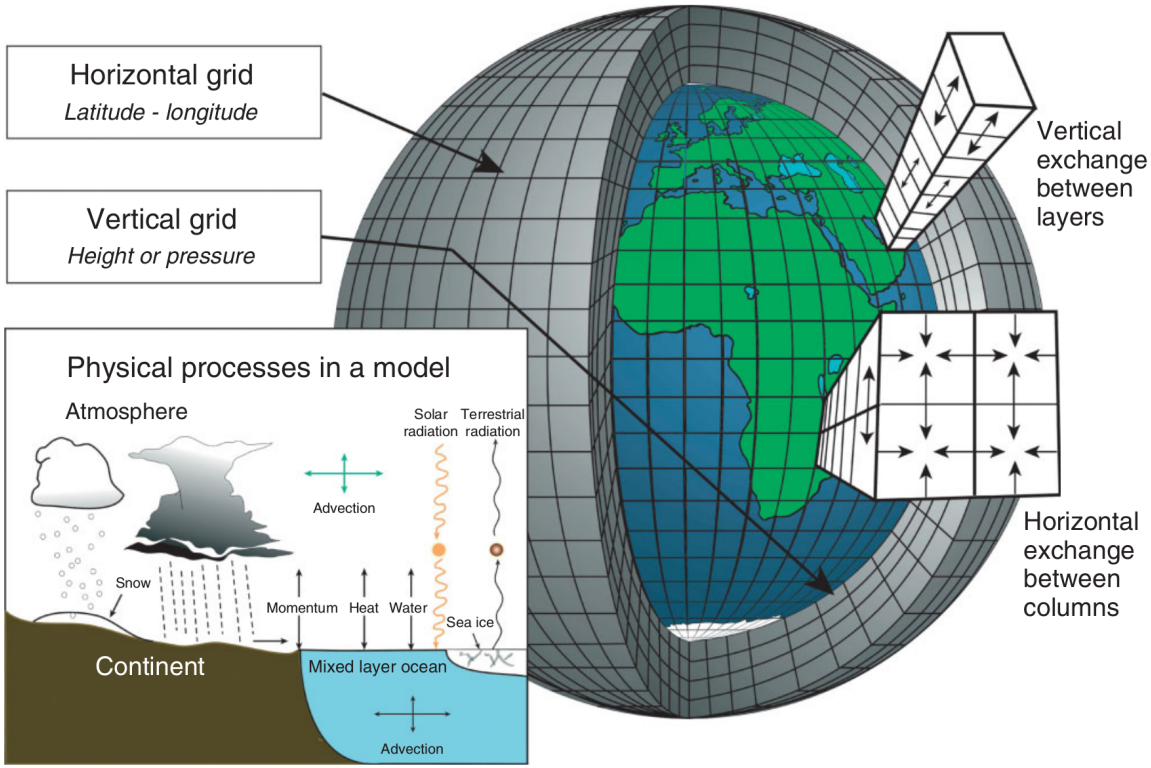
[Energy Dinosaurs by edro 2007]

General Circulation Models (GCM)

- Selbe Technik wie NWP (Raum und Zeit diskretisieren)
- Nur global und größere Zeitabstände
- Physikalische Phänomene zwischen Gitterboxen berechnen

General Circulation Models (GCM)

- Selbe Technik wie NWP (Raum und Zeit diskretisieren)
- Nur global und größere Zeitabstände
- Physikalische Phänomene zwischen Gitterboxen berechnen



[History of climate modeling Paul N. Edwards 2011]

General Circulation Models (GCM)

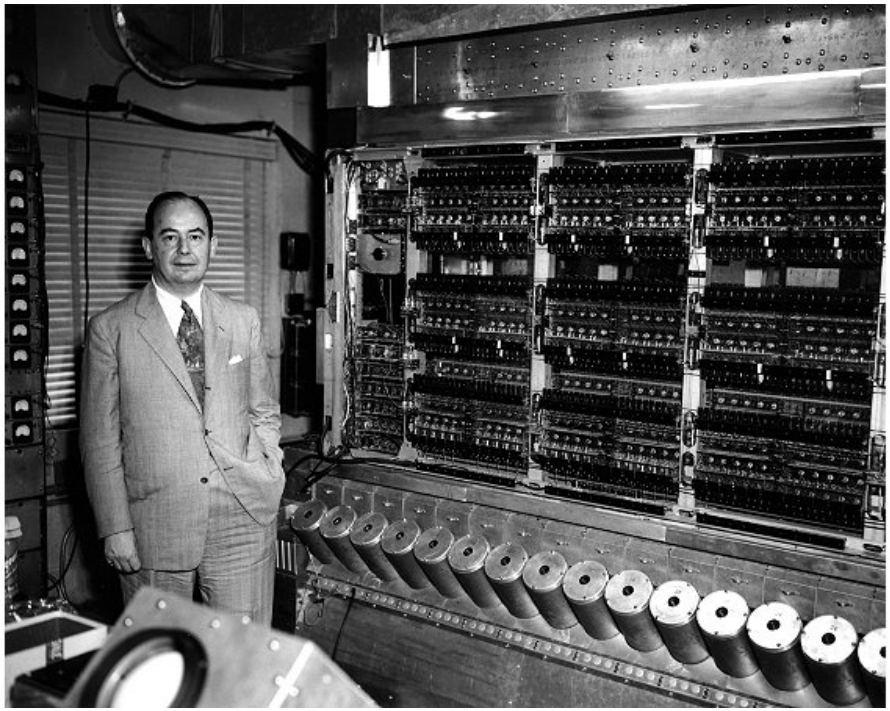
Erster GCM von Phillips (1955)

- 2 Schichten, 17 x 16 Gitterpunkte
- Simulierte Oberfläche: 10.000km x 6000km
- Simulierte Zeit: 130 Tage

General Circulation Models (GCM)

Erster GCM von Phillips (1955)

- 2 Schichten, 17 x 16 Gitterpunkte
- Simulierte Oberfläche: 10.000km x 6000km
- Simulierte Zeit: 130 Tage



[computerhistory.org Birth of the Computer]

Der Rechner

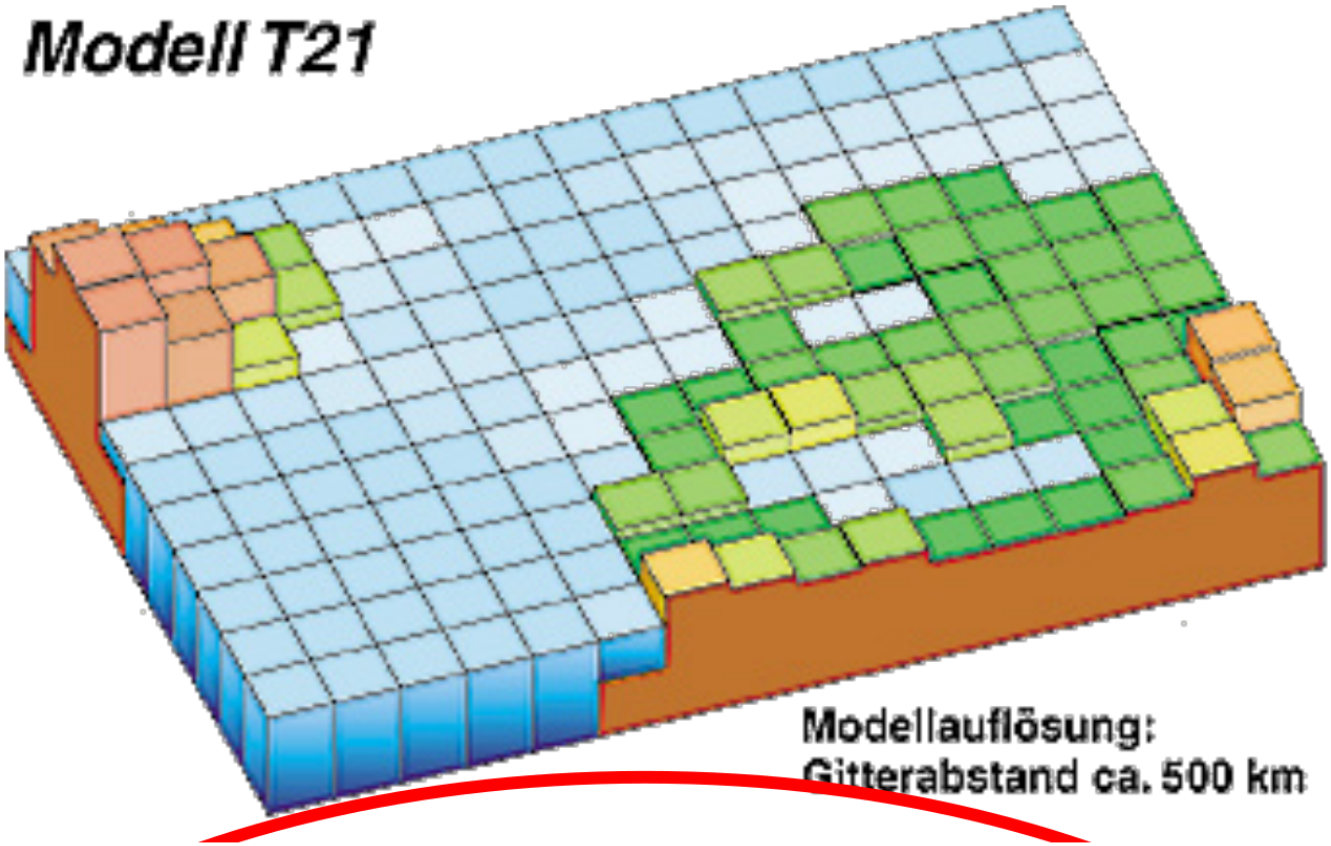
- IAS-Computer
- 1kB Hauptspeicher
- 2kB Magnetspeicher

realistische Prognosen

Genauigkeit vs. Rechenleistung

Auflösung

Gitterboxen sehr groß
Klimaverhalten auf kleineren Räumen nicht berechenbar



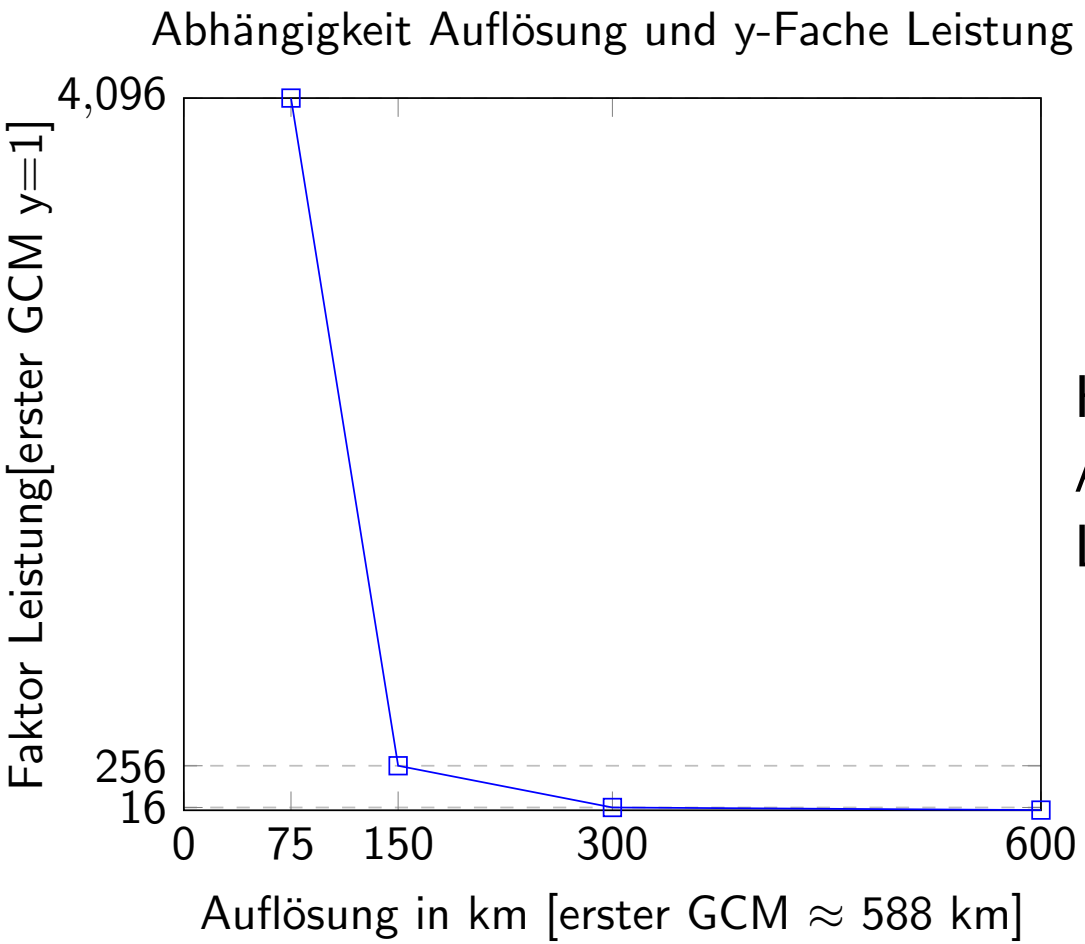
[Vorlesung Hochleistungsrechnen WiSe 15/16]

Genauigkeit vs. Rechenleistung

Auflösung

Jedoch:

Höhere Auflösung höhere Genauigkeit aber mehr Leistung nötig



Halbierung der Auflösung, 16-fache Leistung nötig

Genauigkeit vs. Rechenleistung

Auch Verbesserung der Genauigkeit durch:

- Anzahl zu berechnender physikalischer Prozesse
  - Hängt mit Auflösung zusammen
  - Stattfinden einiger Prozesse auf Subgitterebene nicht berechenbar
  - Lösung: Parametrisierung

Genauigkeit vs. Rechenleistung

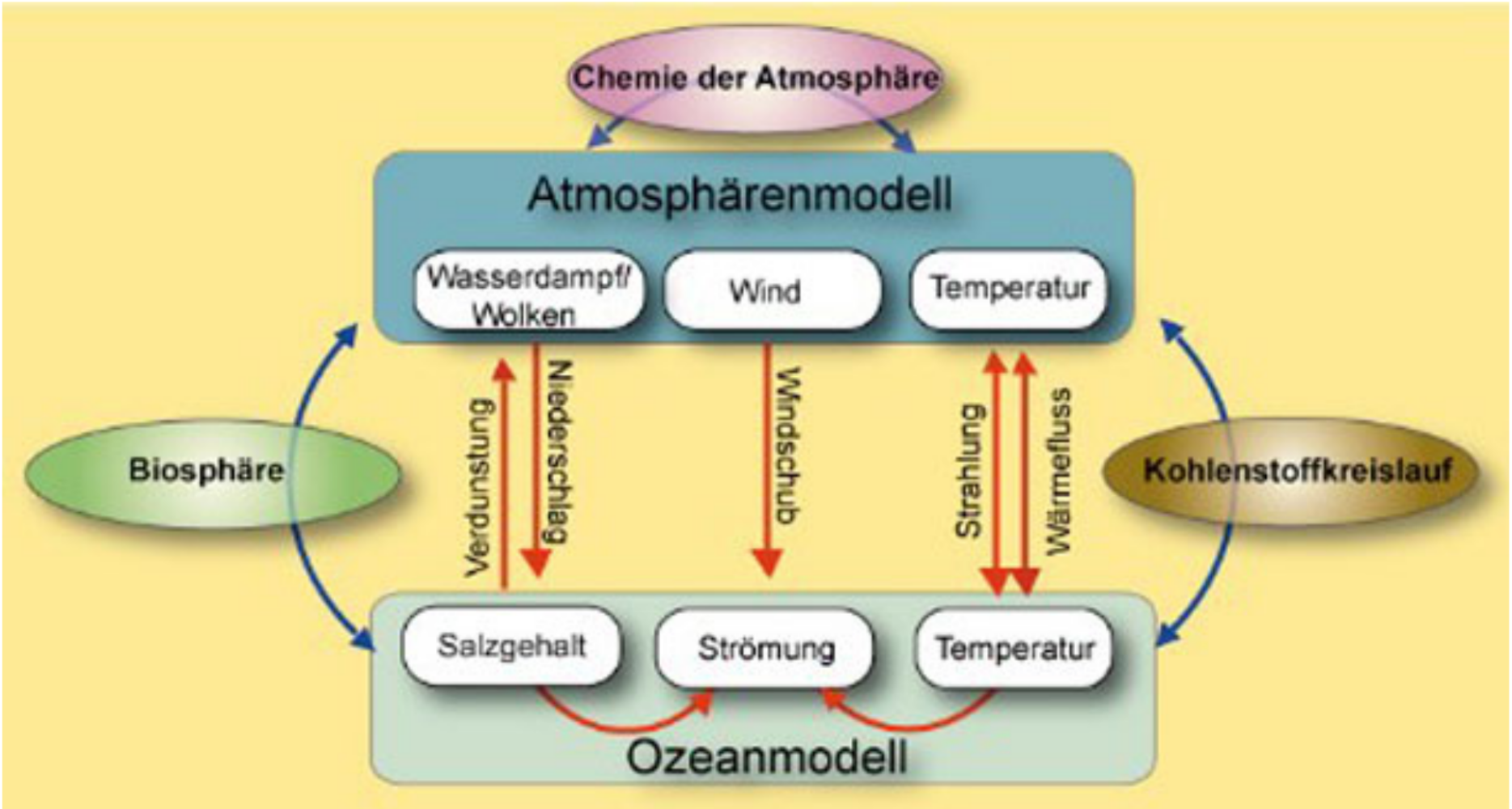
Auch Verbesserung der Genauigkeit durch:

- Anzahl zu berechnender physikalischer Prozesse
  - Hängt mit Auflösung zusammen
  - Stattfinden einiger Prozesse auf Subgitterebene nicht berechenbar
  - Lösung: Parametrisierung
- Anzahl von Subsystemen und Komponenten des Klimas
  - Atmosphäre, Ozean, Biosphäre, Kryosphäre usw.
  - Zusammenspiel dieser sehr wichtig
  - Mehr Komponenten mehr Leistung nötig
  - Mehrere Komponenten zusammen ergeben gekoppelte Modelle

Genauigkeit vs. Rechenleistung

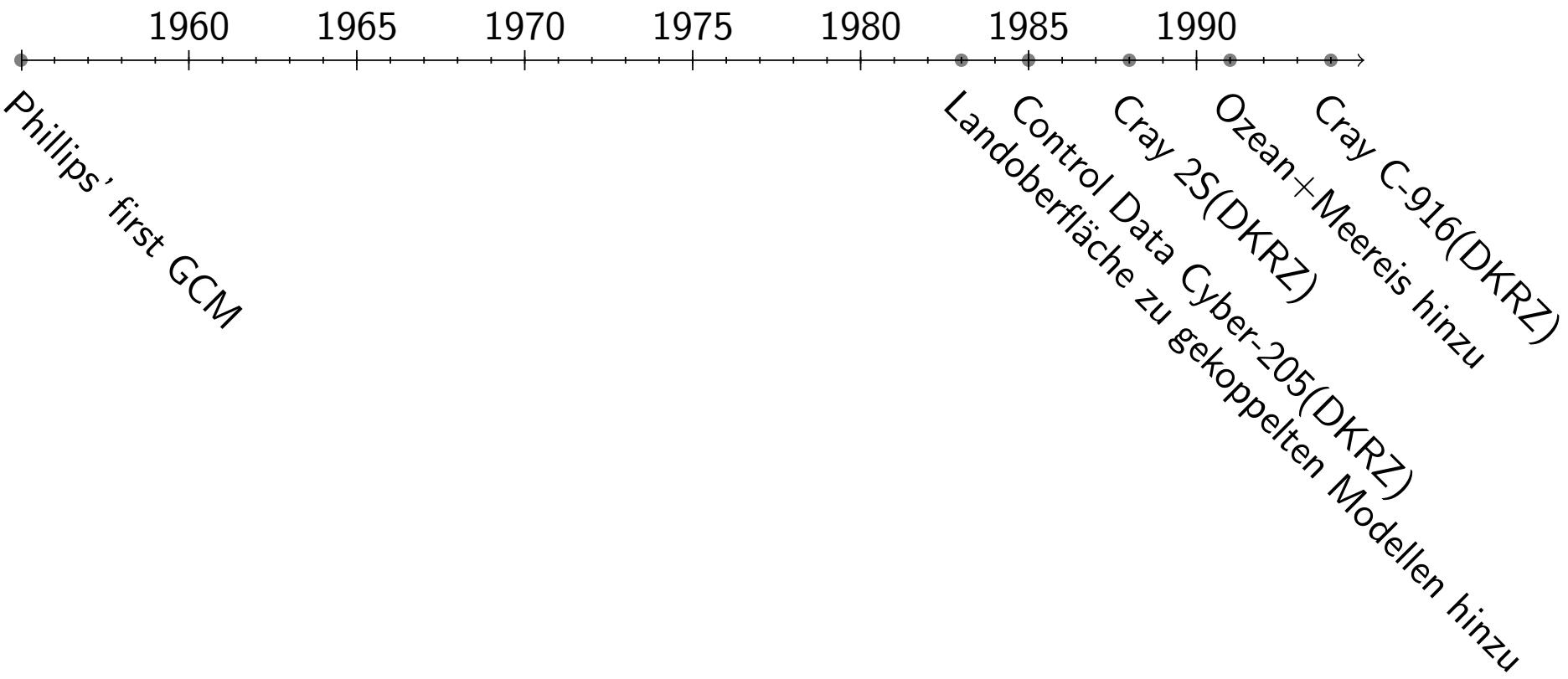
Subsysteme und Komponenten

AOGCM:

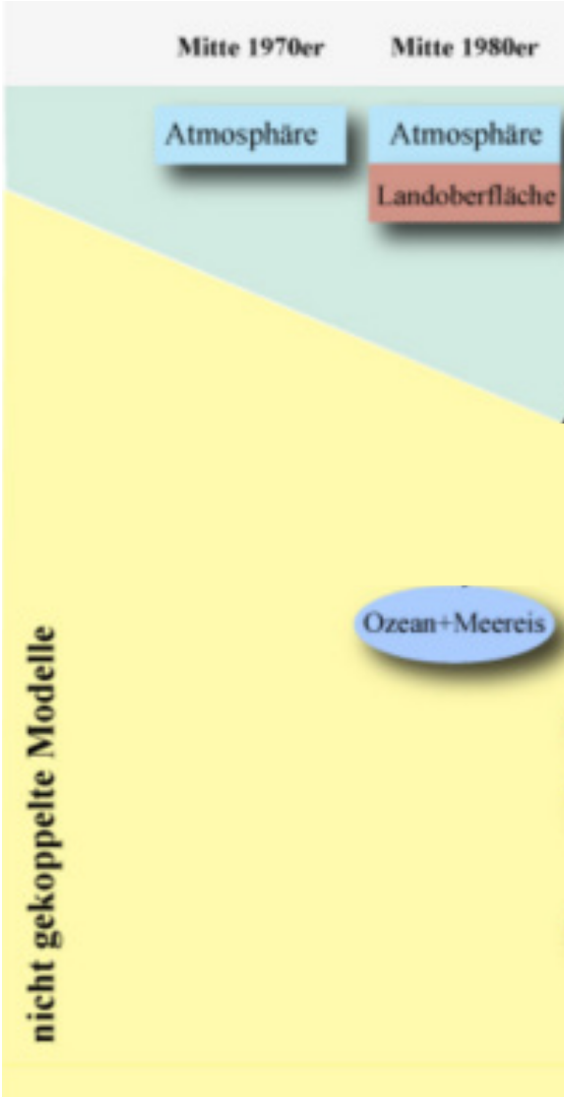


[Komplexe Klimamodelle(GCMs) Dr. Dieter Kasang 08.2014]

Timeline
1955-1995

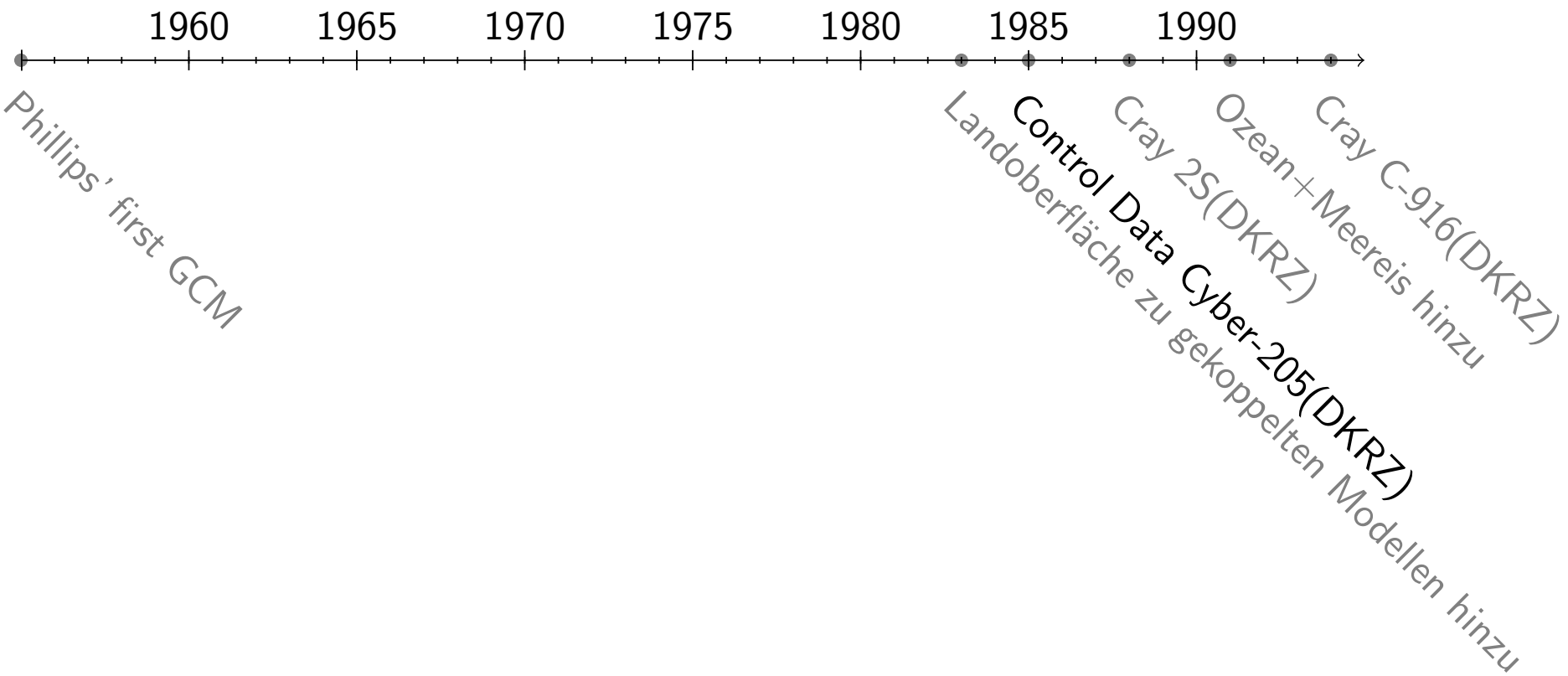


Landoberfläche zu gekoppelten Modellen hinzu



[Komplexe Klimamodelle(GCMs) Dr. Dieter Kasang 08.2014]

Timeline
1955-1995



1985 Control Data Cyber-205(DKRZ)

[Rechnerhistorie am DKRZ]

- 1 Prozessor/Kern
- 0.2 GigaFLOPS
- 0.032 GB Hauptspeicher

1985 Control Data Cyber-205(DKRZ)

[Rechnerhistorie am DKRZ]

- 1 Prozessor/Kern
- 0.2 GigaFLOPS
- 0.032 GB Hauptspeicher

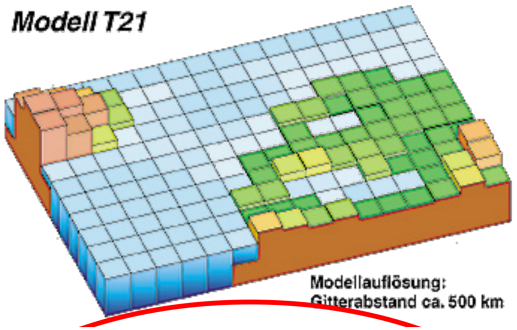
- Simulationen mit 3D-Atmosphären- ODER Ozeanmodellen
- Ergebnisdaten: 4 GB
- Simulierte Zeit: Monate oder Jahre
- Gitterabstand Atmosphäre: 500 km

1985 Control Data Cyber-205(DKRZ)

[Rechnerhistorie am DKRZ]

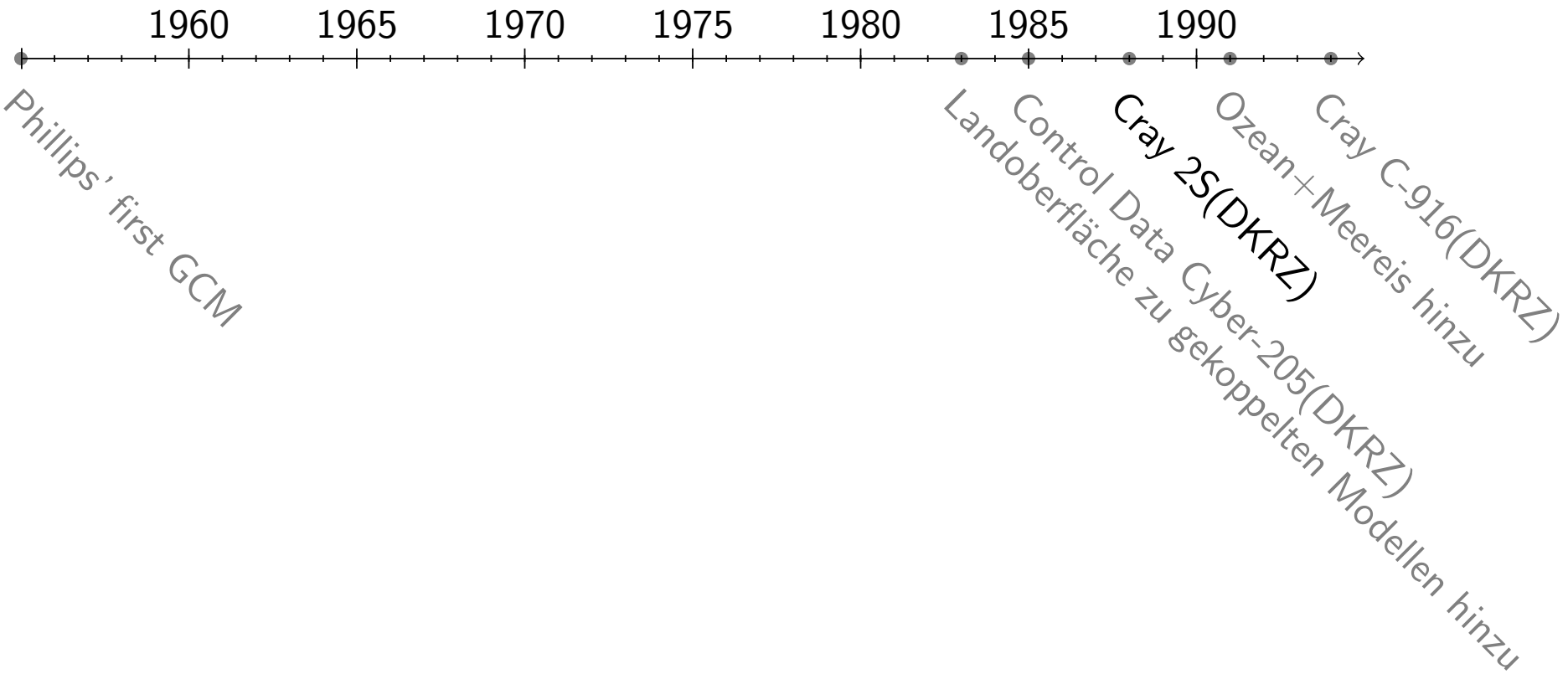
- 1 Prozessor/Kern
- 0.2 GigaFLOPS
- 0.032 GB Hauptspeicher

- Simulationen mit 3D-Atmosphären- ODER Ozeanmodellen
- Ergebnisdaten: 4 GB
- Simulierte Zeit: Monate oder Jahre
- Gitterabstand Atmosphäre: 500 km

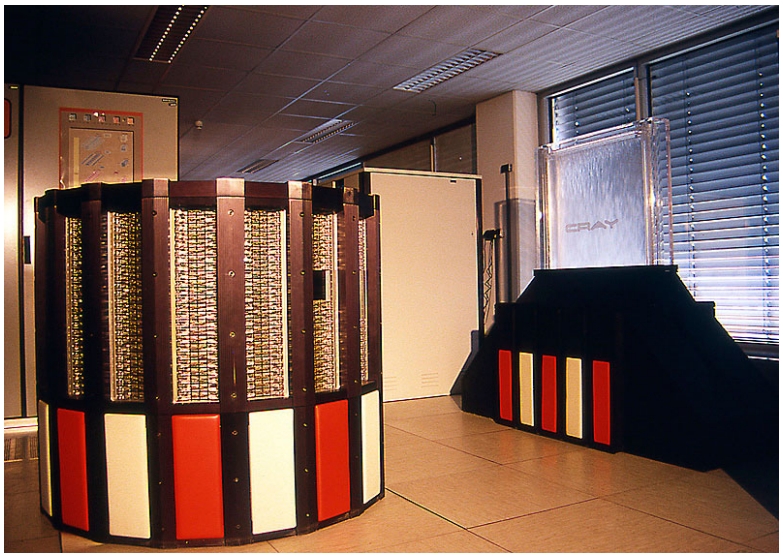


[Vorlesung Hochleistungsrechnen]

Timeline
1955-1995



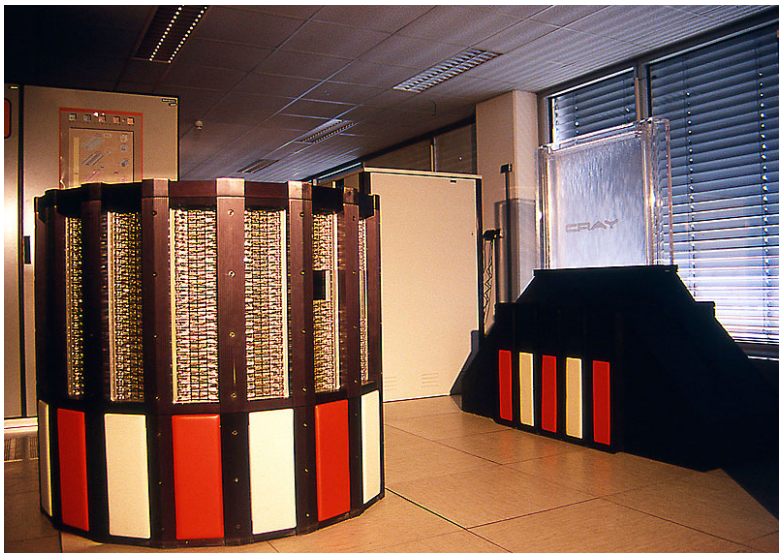
1988 Cray 2S(DKRZ)



[Rechnerhistorie am DKRZ]

- 4 Prozessoren/Kerne
- 2 GigaFLOPS
- 1 GB Hauptspeicher
- 25 GB Festplattensystem
- 1,2 TB Magnetbandarchiv

1988 Cray 2S(DKRZ)

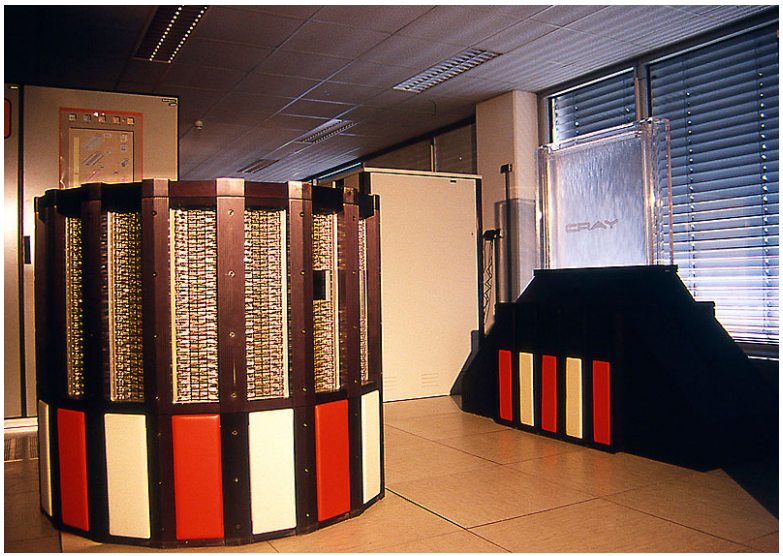


[Rechnerhistorie am DKRZ]

- 4 Prozessoren/Kerne
- 2 GigaFLOPS
- 1 GB Hauptspeicher
- 25 GB Festplattensystem
- 1,2 TB Magnetbandarchiv

Möglichkeiten DKRZ im Jahre 1990

1988 Cray 2S(DKRZ)



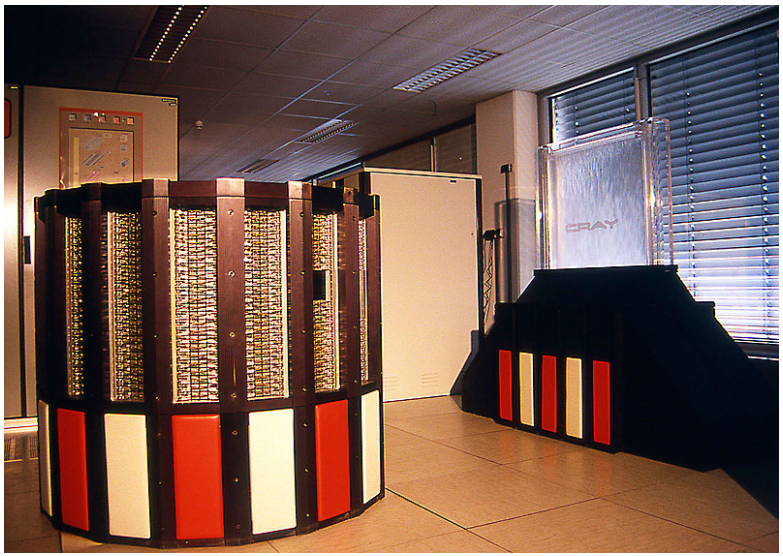
[Rechnerhistorie am DKRZ]

- 4 Prozessoren/Kerne
- 2 GigaFLOPS
- 1 GB Hauptspeicher
- 25 GB Festplattensystem
- 1,2 TB Magnetbandarchiv

Möglichkeiten DKRZ im Jahre 1990

- Simulationen mit gekoppeltem 3D-Atmosphäre-Ozean-Modelle

1988 Cray 2S(DKRZ)



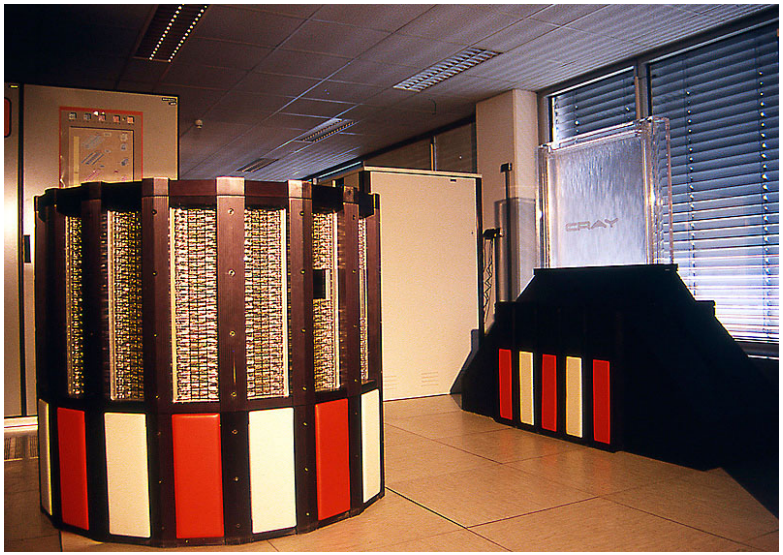
[Rechnerhistorie am DKRZ]

- 4 Prozessoren/Kerne
- 2 GigaFLOPS
- 1 GB Hauptspeicher
- 25 GB Festplattensystem
- 1,2 TB Magnetbandarchiv

Möglichkeiten DKRZ im Jahre 1990

- Simulationen mit gekoppeltem 3D-Atmosphäre-Ozean-Modelle
- Experiment CO_2-Verdopplung
- Erste Simulationen mit kontinuierlichem CO_2-Anstieg

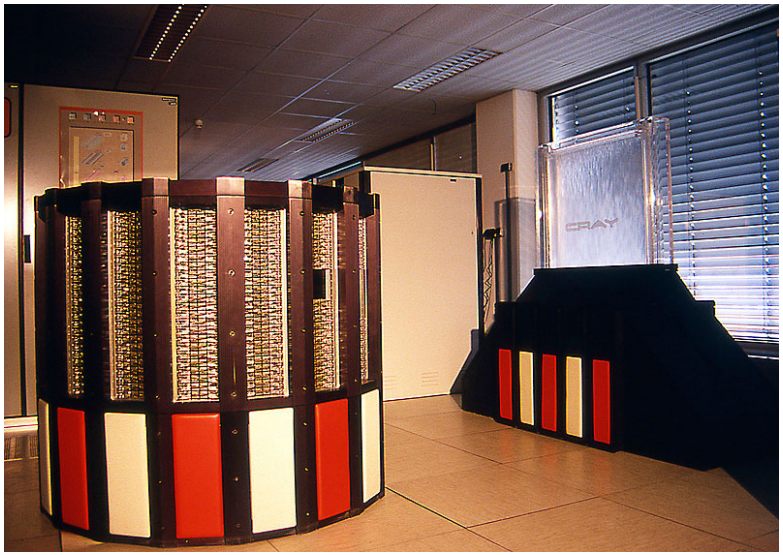
1988 Cray 2S(DKRZ)



[Rechnerhistorie am DKRZ]

- 4 Prozessoren/Kerne
- 2 GigaFLOPS
- 1 GB Hauptspeicher
- 25 GB Festplattensystem
- 1,2 TB Magnetbandarchiv

1988 Cray 2S(DKRZ)



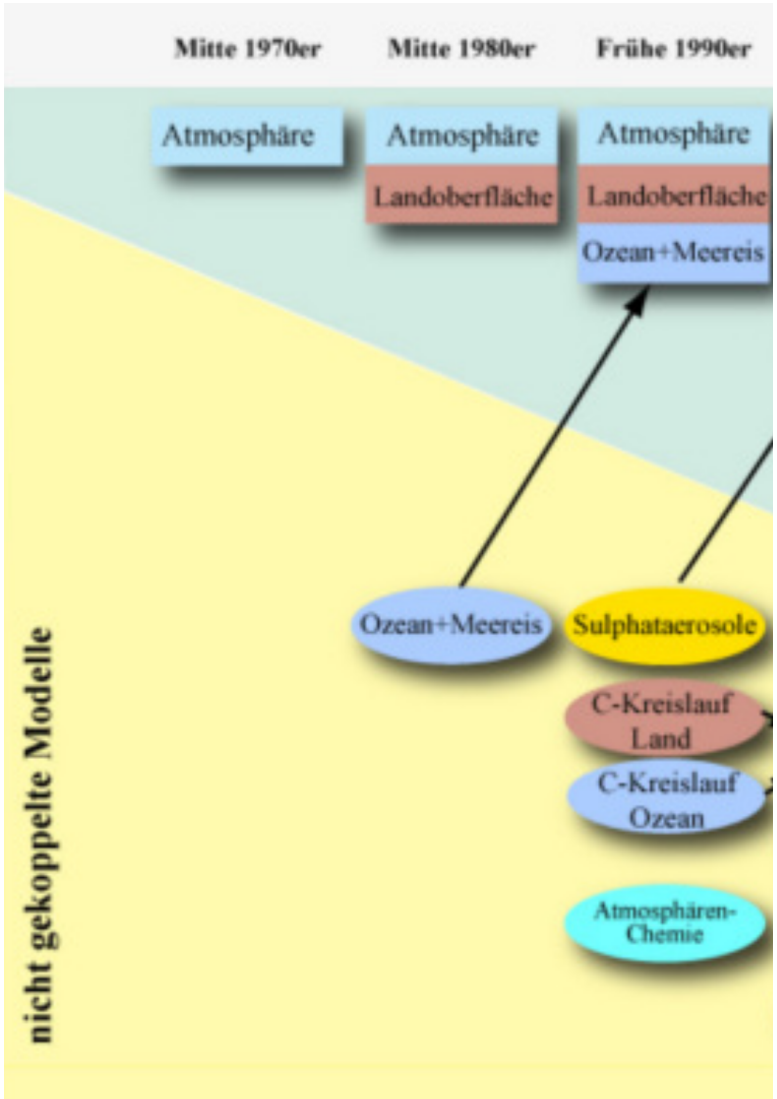
[Rechnerhistorie am DKRZ]

- 4 Prozessoren/Kerne
- 2 GigaFLOPS
- 1 GB Hauptspeicher
- 25 GB Festplattensystem
- 1,2 TB Magnetbandarchiv

Möglichkeiten DKRZ im Jahre 1990

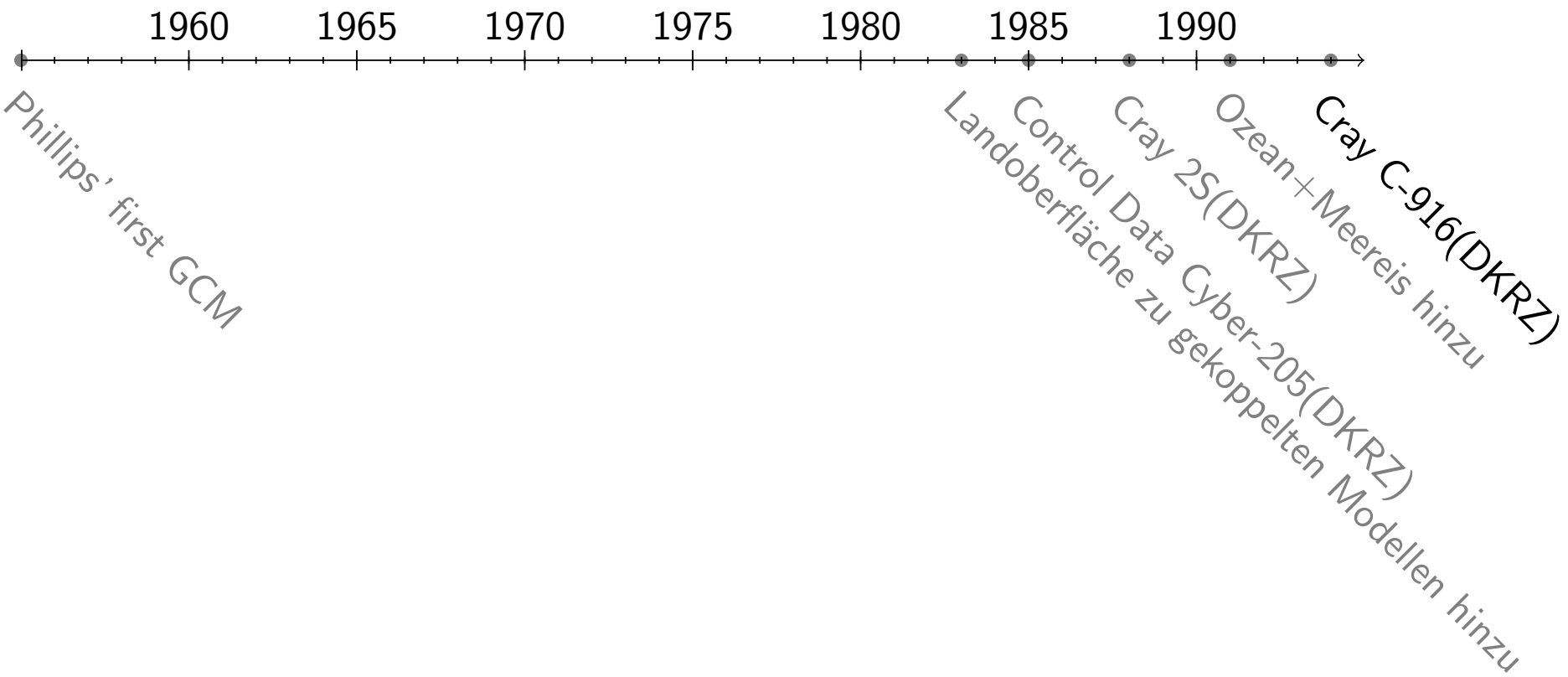
- Ergebnisdaten: 80 GB
- Simulierte Zeit: 200 Jahre
- Gitterabstand Atmosphäre: 500 km
- Zwei der vier Atmosphäre-Ozean-Modelle entstanden in Hamburg

Ozean+Meereis zu gekoppelten Modellen hinzu

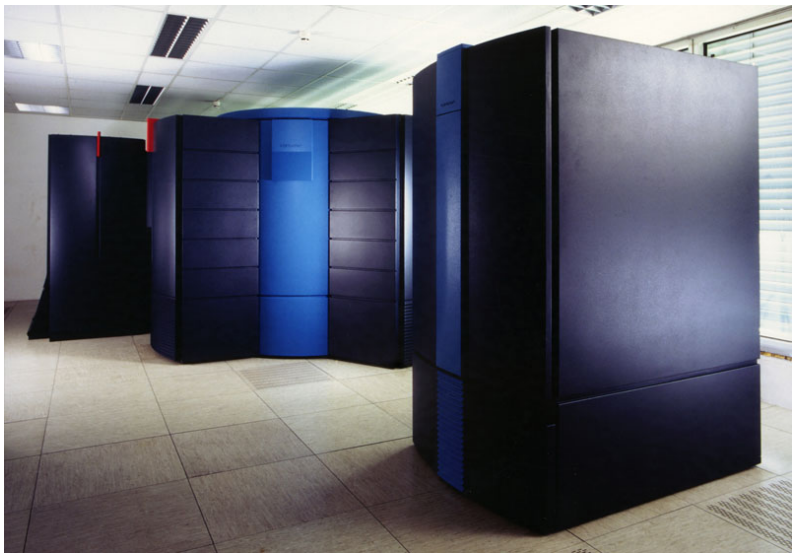


[Komplexe Klimamodelle(GCMs) Dr. Dieter Kasang 08.2014]

Timeline
1955-1995



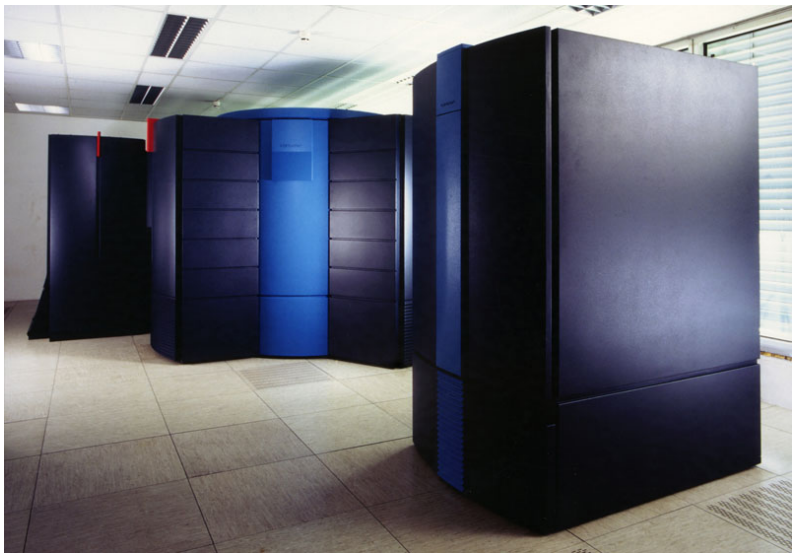
1994 Cray C-916(DKRZ)



[Rechnerhistorie am DKRZ]

- 16 Prozessoren/Kerne
- 16 GigaFLOPS
- 2 GB Hauptspeicher + 4 GB RAM-Disk
- 128 GB Festplattensystem
- 10 TB Magnetbandarchiv

1994 Cray C-916(DKRZ)

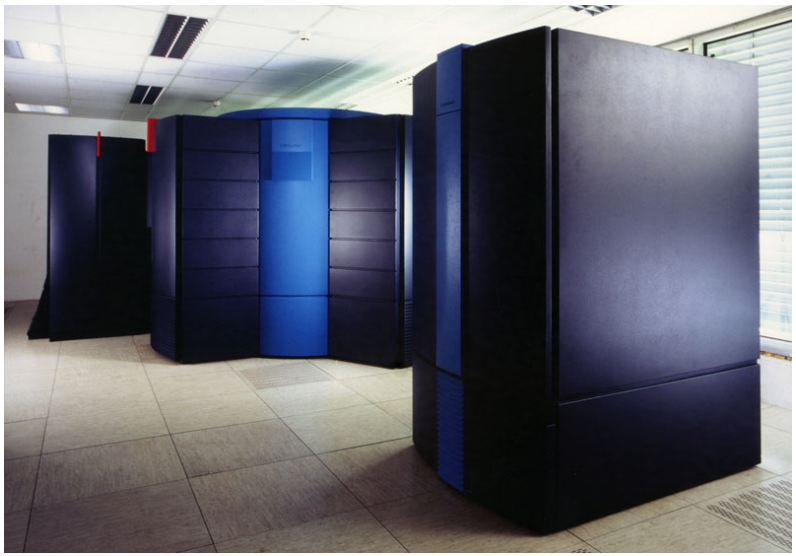


[Rechnerhistorie am DKRZ]

- 16 Prozessoren/Kerne
- 16 GigaFLOPS
- 2 GB Hauptspeicher + 4 GB RAM-Disk
- 128 GB Festplattensystem
- 10 TB Magnetbandarchiv

Möglichkeiten DKRZ im Jahre 1995

1994 Cray C-916(DKRZ)



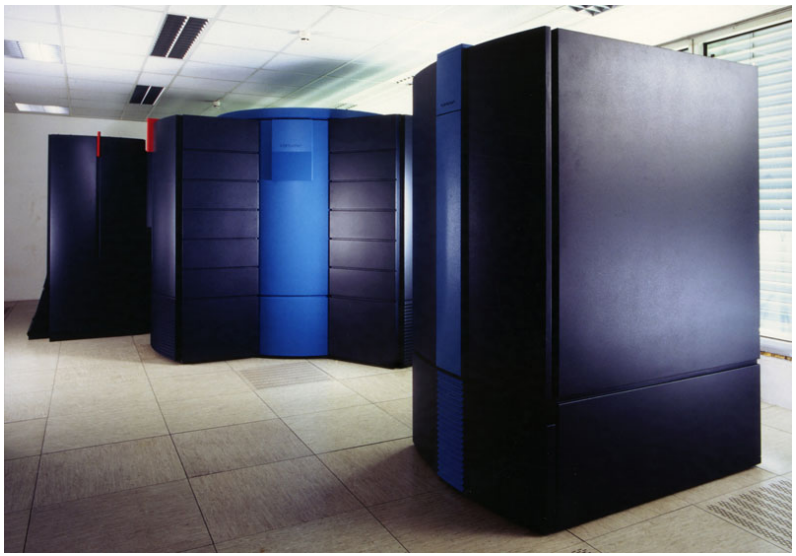
[Rechnerhistorie am DKRZ]

- 16 Prozessoren/Kerne
- 16 GigaFLOPS
- 2 GB Hauptspeicher + 4 GB RAM-Disk
- 128 GB Festplattensystem
- 10 TB Magnetbandarchiv

Möglichkeiten DKRZ im Jahre 1995

- Simulationen mit verschiedenen möglichen Entwicklungen der CO_2-Konzentration in der Atmosphäre

1994 Cray C-916(DKRZ)



[Rechnerhistorie am DKRZ]

- 16 Prozessoren/Kerne
- 16 GigaFLOPS
- 2 GB Hauptspeicher + 4 GB RAM-Disk
- 128 GB Festplattensystem
- 10 TB Magnetbandarchiv

Möglichkeiten DKRZ im Jahre 1995

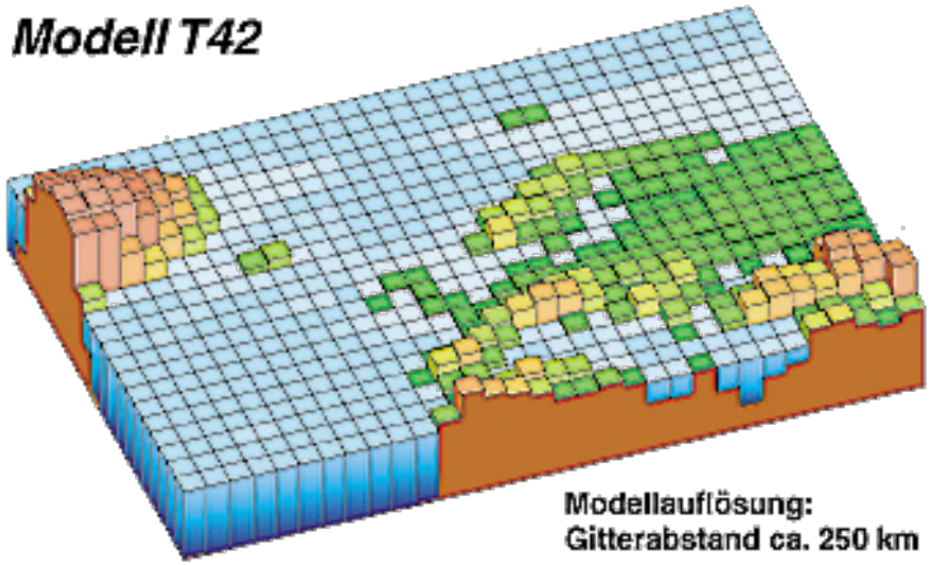
- Simulationen mit verschiedenen möglichen Entwicklungen der CO_2-Konzentration in der Atmosphäre
- Erste Regionalmodelle

1994 Cray C-916(DKRZ)

[Rechnerhistorie am DKRZ]

Möglichkeiten DKRZ im Jahre 1995

- Ergebnisdaten: 1 TB
- Simulierte Zeit: mehrere Jahrhunderte
- Gitterabstand Atmosphäre: 500 - 250 km

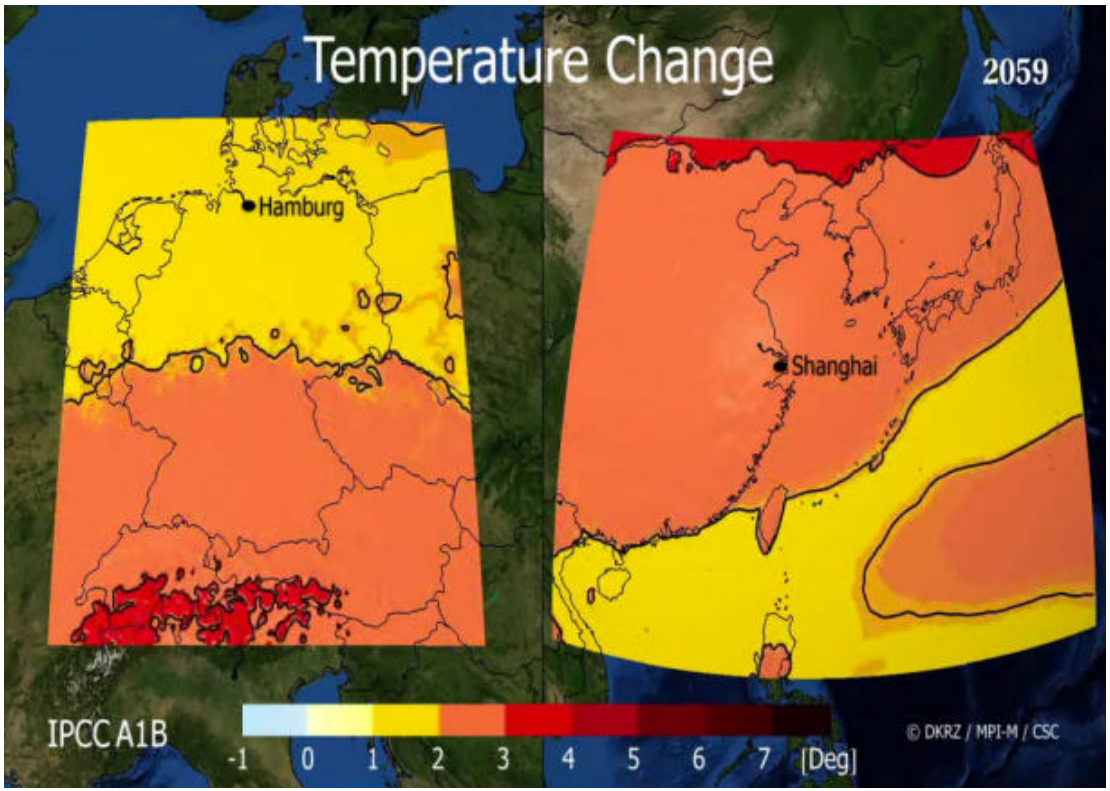


[Vorlesung Hochleistungsrechnen WiSe 15/16]

Einschub
Regionale Klimamodelle

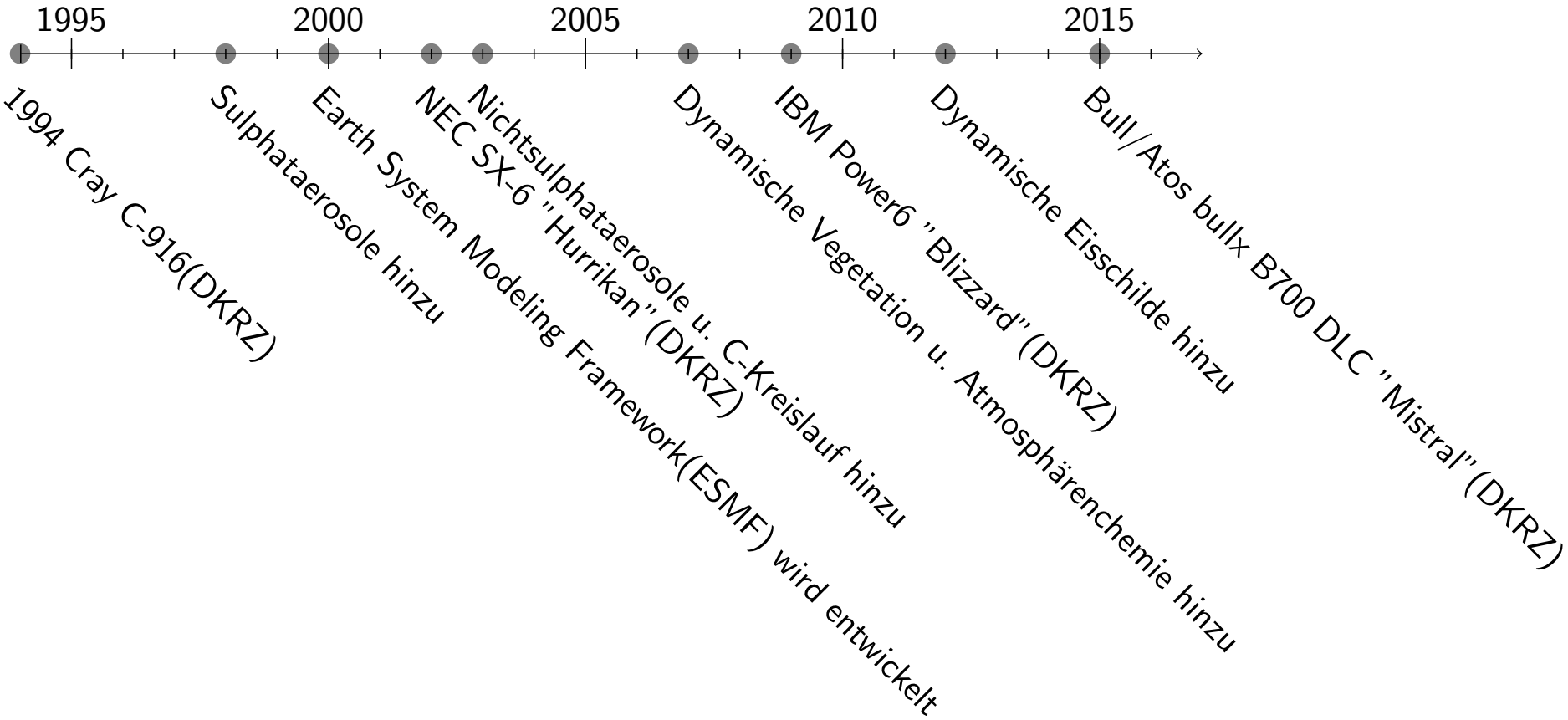
Regionale Betrachtung des Klimasystems (z.B. Deutschland)

- Gitterabstand von 50 bis 2.5 km nötig
- Rand des Modells: global simulierte Werte genommen

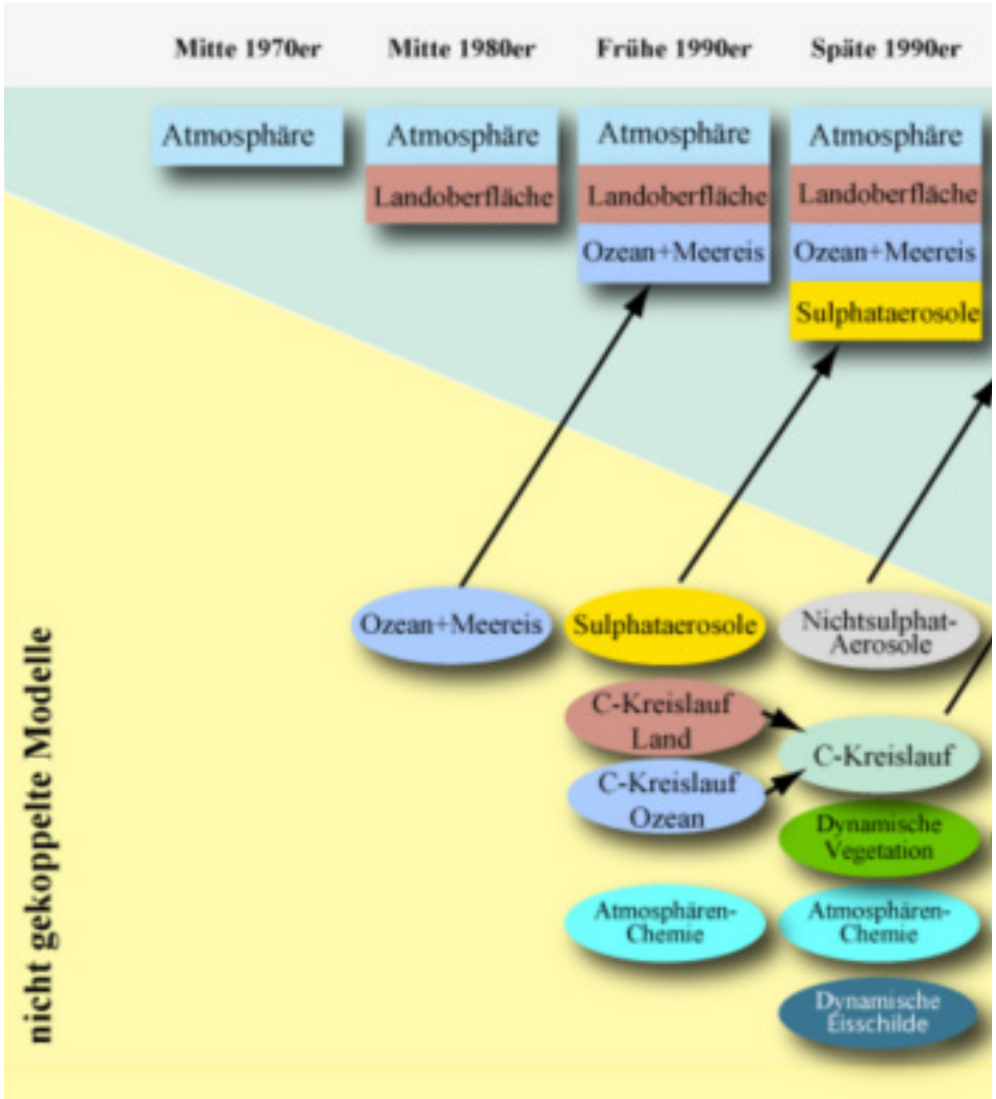


[DKRZ/MPI-M/CSC]

Timeline
1994-2016

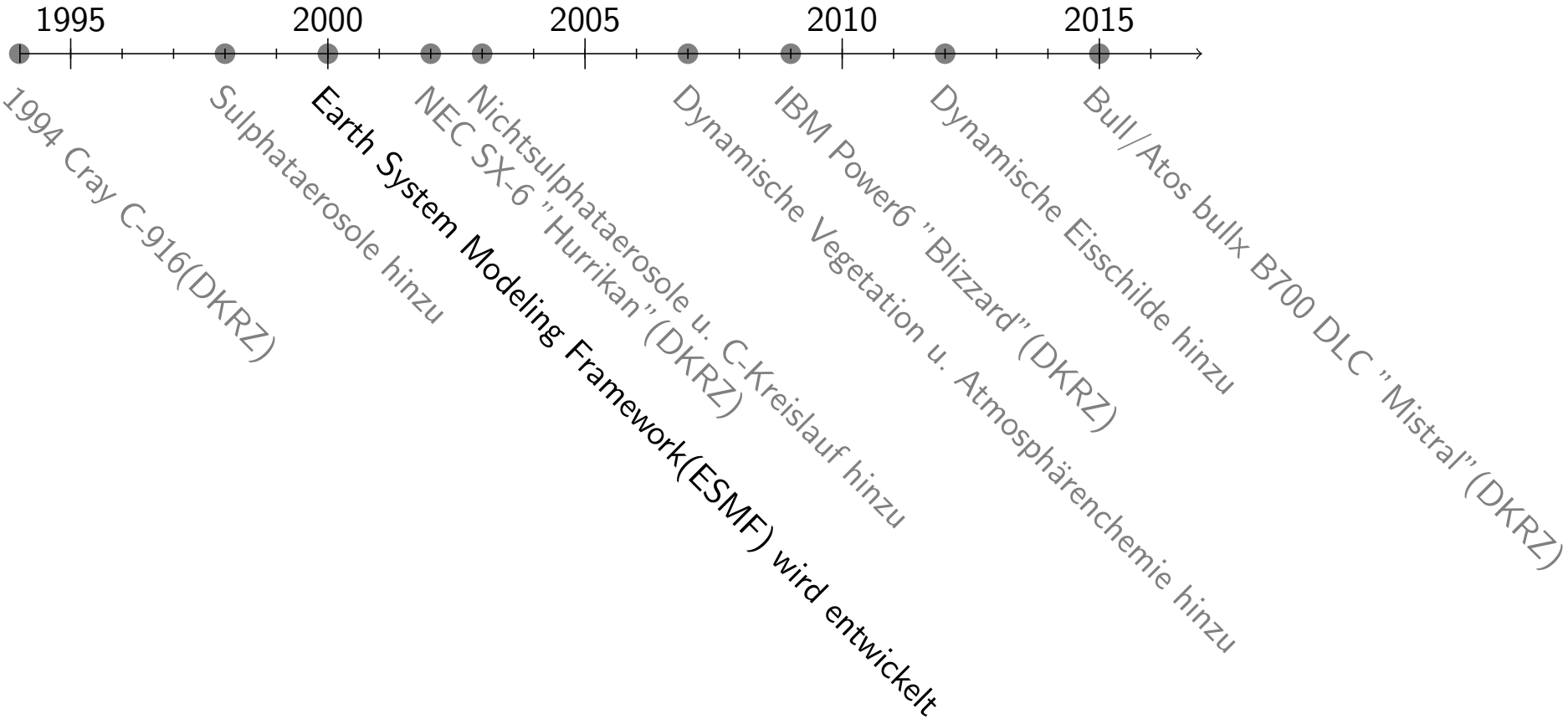


Sulphataerosole zu gekoppelten Modellen hinzu



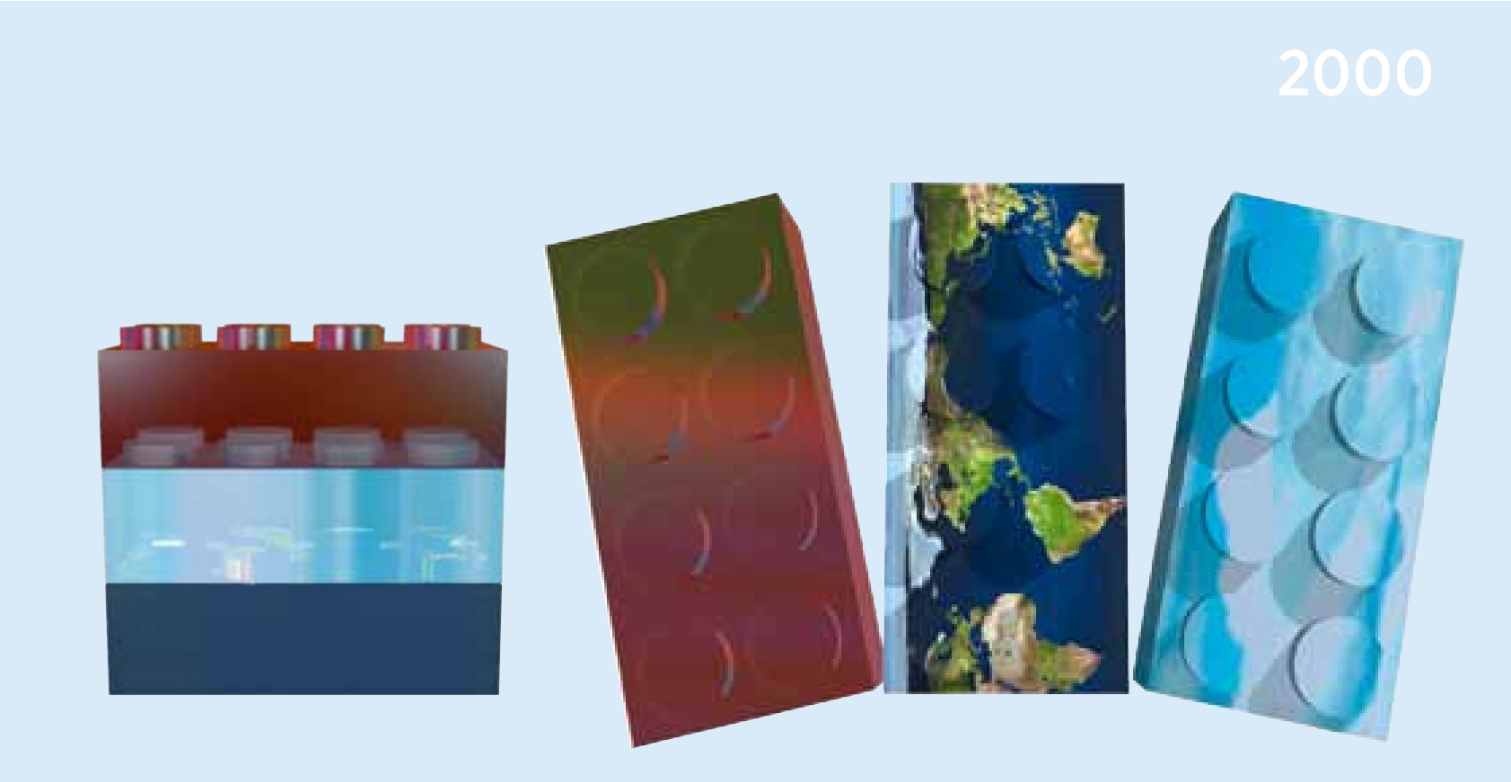
[Komplexe Klimamodelle(GCMs) Dr. Dieter Kasang 08.2014]

Timeline
1994-2016



Earth System Modeling Framework(ESMF)

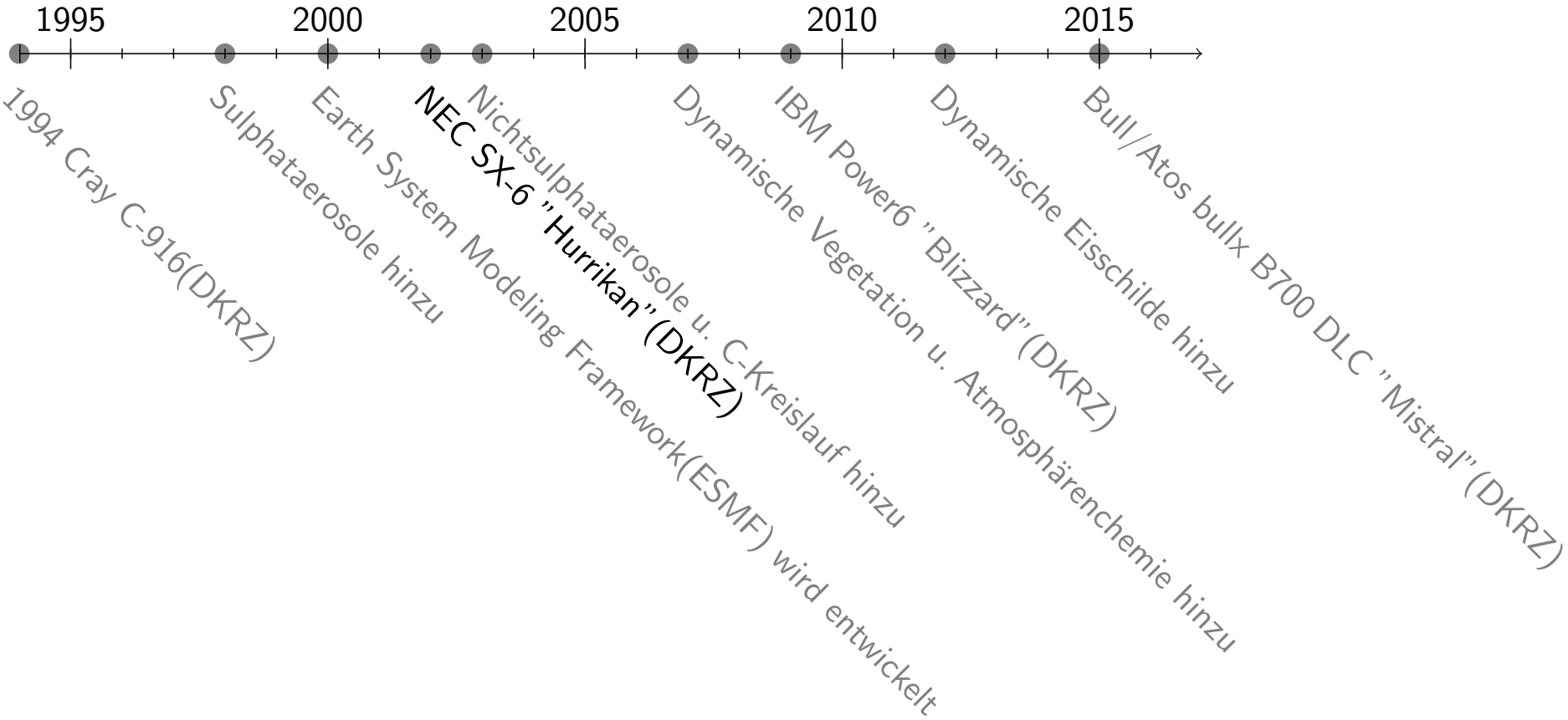
- Zur Entwicklung
- Und vor allem Kopplung von Klimamodellen



[25 Jahre DKRZ]

Wissenschaftler können je nach Bedarf die Modelle zusammenfügen

Timeline
1994-2016



2002 NEC SX-6 "Hurrikan" (DKRZ)

[Rechnerhistorie am DKRZ]

- 192 Prozessoren
- 1,5 TeraFLOPS
- 1,5 TB Hauptspeicher
- 60 TB Festplattensystem
- 3,4 PB Magnetbandarchiv

2002 NEC SX-6 "Hurrikan" (DKRZ)

[Rechnerhistorie am DKRZ]

- 192 Prozessoren
- 1,5 TeraFLOPS
- 1,5 TB Hauptspeicher
- 60 TB Festplattensystem
- 3,4 PB Magnetbandarchiv

Möglichkeiten DKRZ im Jahre 2004

- Berücksichtigung der Aerosole

2002 NEC SX-6 "Hurrikan" (DKRZ)

[Rechnerhistorie am DKRZ]

Möglichkeiten DKRZ im Jahre 2004

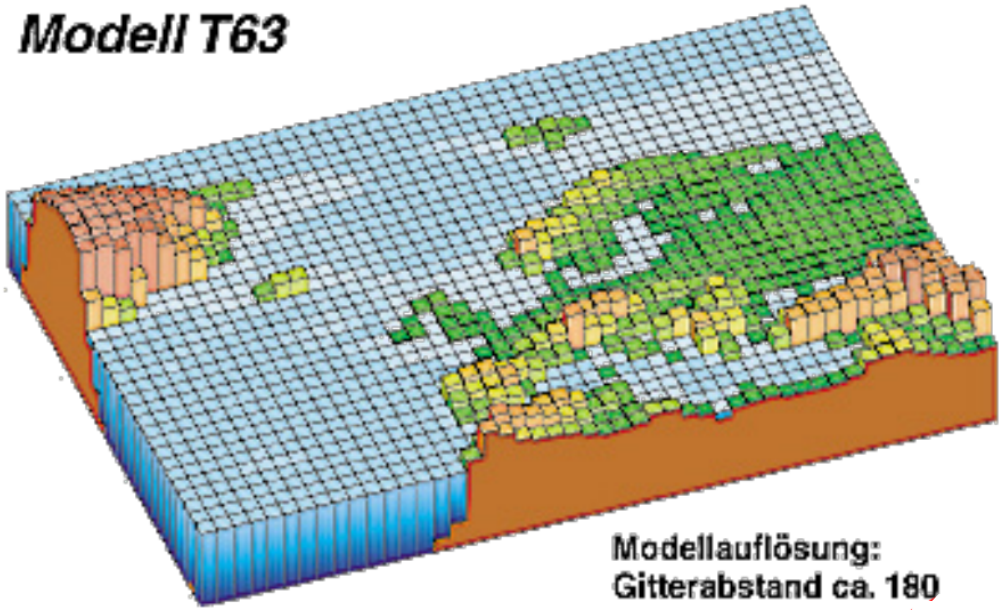
- Ergebnisdaten: 150 TB
- Simulierte Zeit: 5.000 Jahre
- Gitterabstand: 180 km

2002 NEC SX-6 "Hurrikan" (DKRZ)

[Rechnerhistorie am DKRZ]

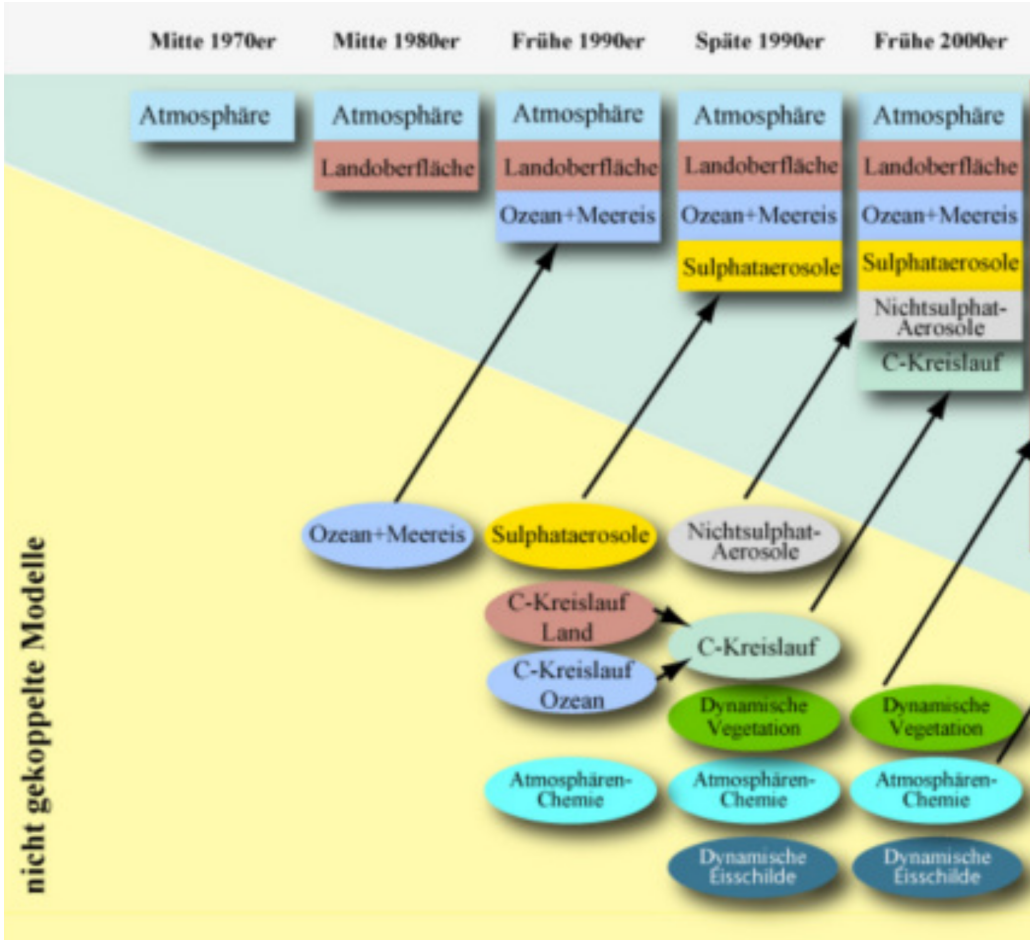
Möglichkeiten DKRZ im Jahre 2004

- Ergebnisdaten: 150 TB
- Simulierte Zeit: 5.000 Jahre
- Gitterabstand: 180 km



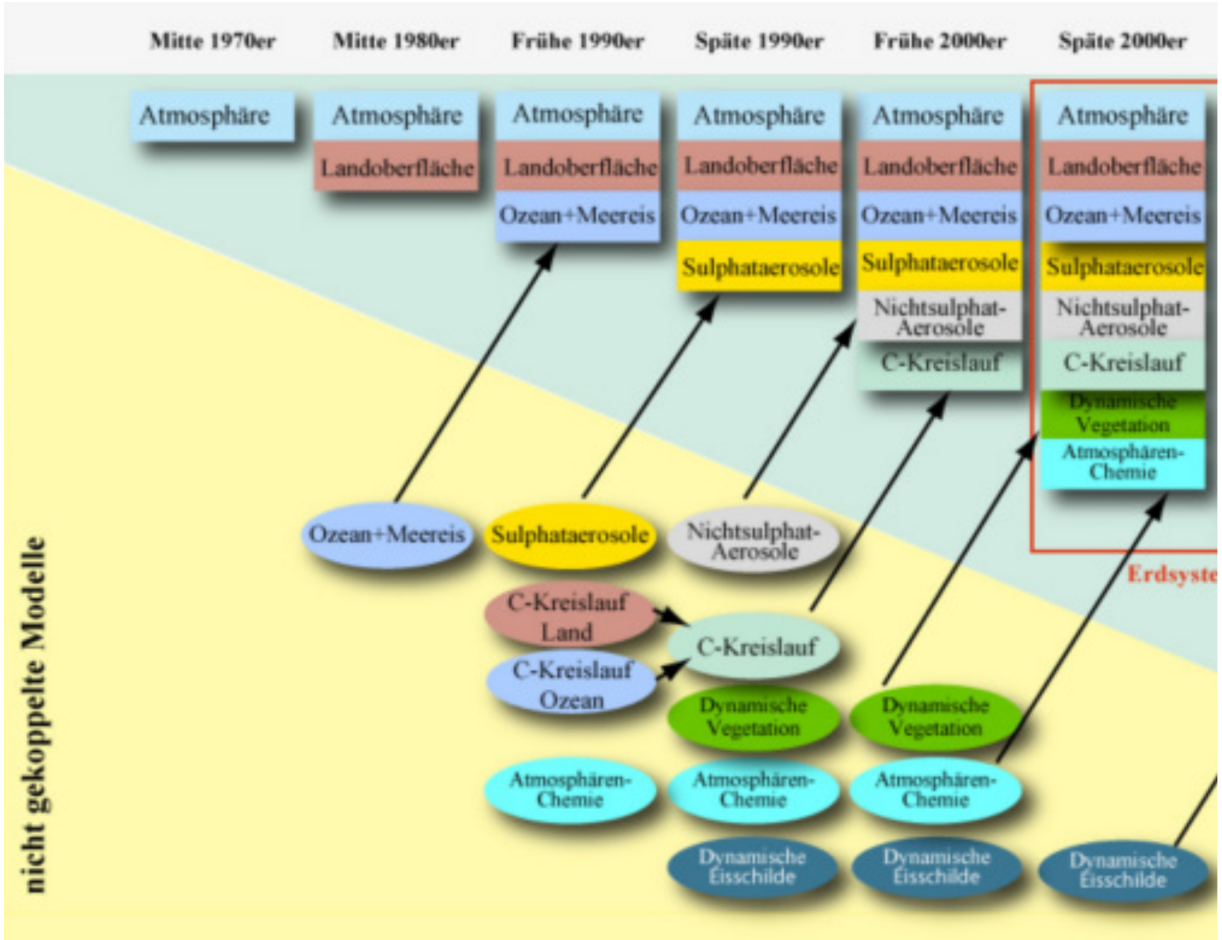
[Vorlesung Hochleistungsrechnen 15/16]

Nichtsulphataerosole u. C-Kreislauf zu gekoppelten Modellen hinzu



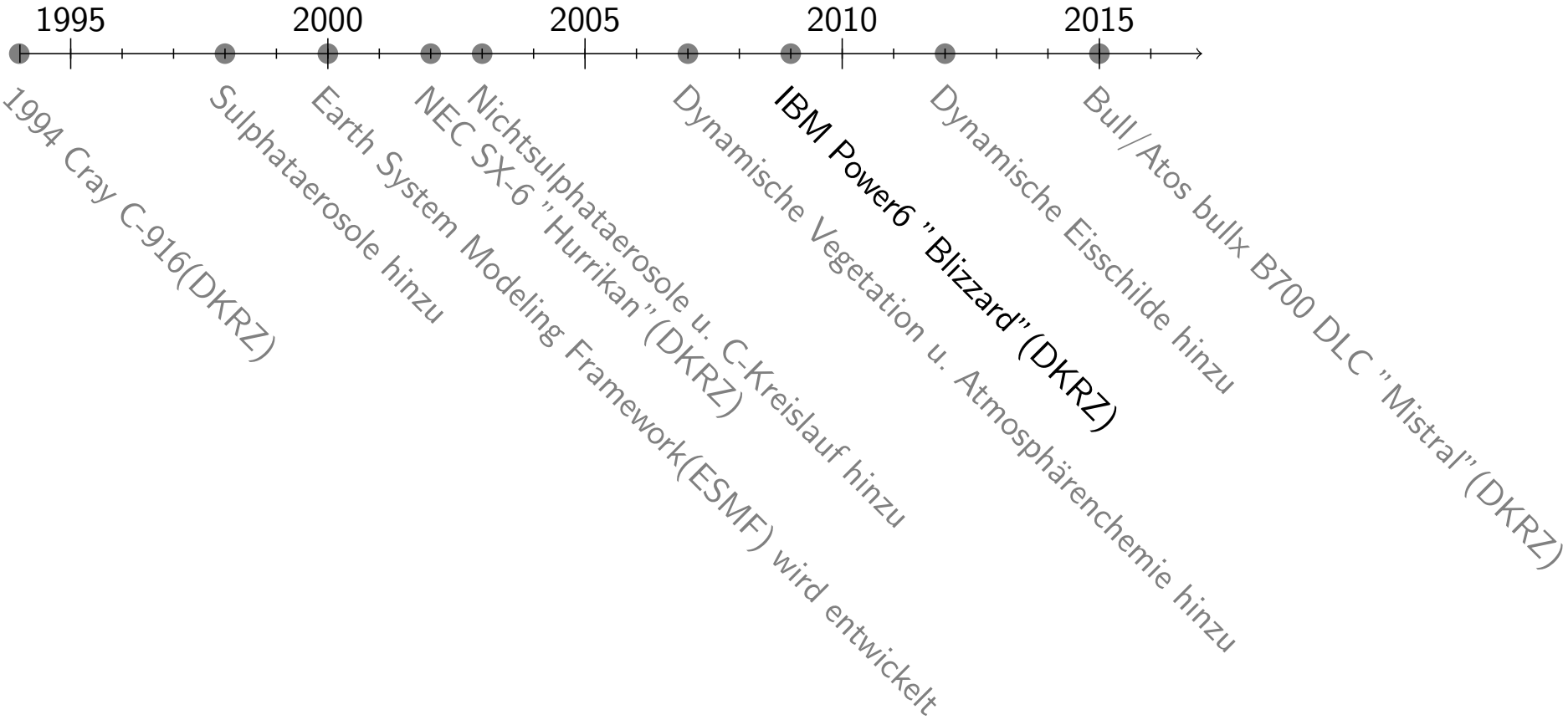
[Komplexe Klimamodelle(GCMs) Dr. Dieter Kasang 08.2014]

Dynamische Vegetation u. Atmosphärenchemie zu gekoppelten Modellen hinzu



[Komplexe Klimamodelle(GCMs) Dr. Dieter Kasang 08.2014]

Timeline
1994-2016



2009 IBM Power6 "Blizzard" (DKRZ)

[Rechnerhistorie am DKRZ]

- 8.448 Prozessoren
- 158 TeraFLOPS
- 20 TB Hauptspeicher
- 6 PB Festplattensystem
- 60 PB Magnetbandarchiv

2009 IBM Power6 "Blizzard" (DKRZ)

[Rechnerhistorie am DKRZ]

- 8.448 Prozessoren
- 158 TeraFLOPS
- 20 TB Hauptspeicher
- 6 PB Festplattensystem
- 60 PB Magnetbandarchiv

Möglichkeiten DKRZ im Jahre 2010

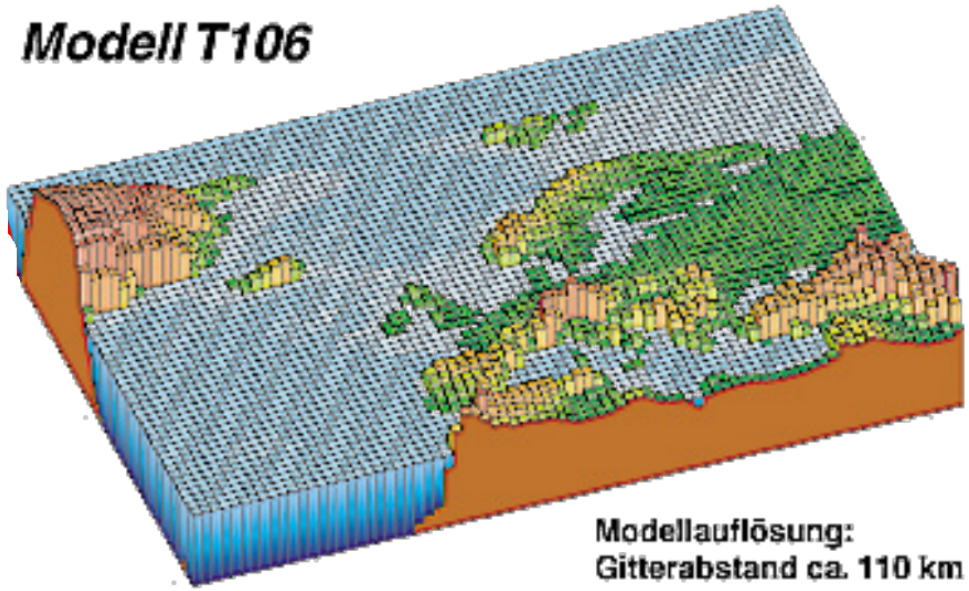
- Darstellung Kohlenstoffkreislaufs inlkusive Biosphäre
- Ensemble-Simulationen

2009 IBM Power6 "Blizzard" (DKRZ)

[Rechnerhistorie am DKRZ]

Möglichkeiten DKRZ im Jahre 2010

- Ergebnisdaten: 1 PB
- Simulierte Zeit: 10.000 Jahre
- Gitterabstand: 180-50 km

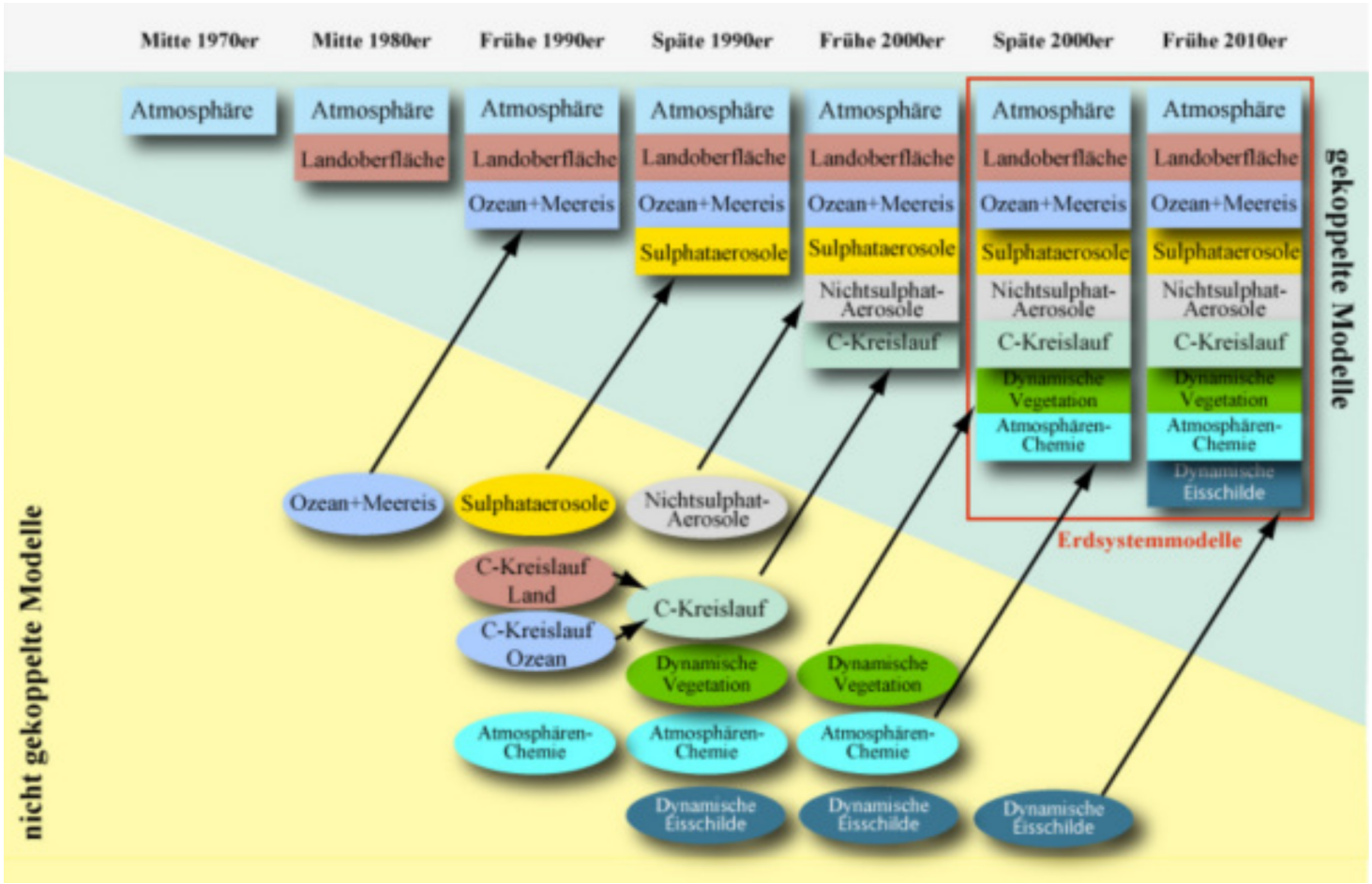


[Vorlesung Hochleistungsrechnen WiSe 15/16]

Einschub
Ensemble-Simulationen

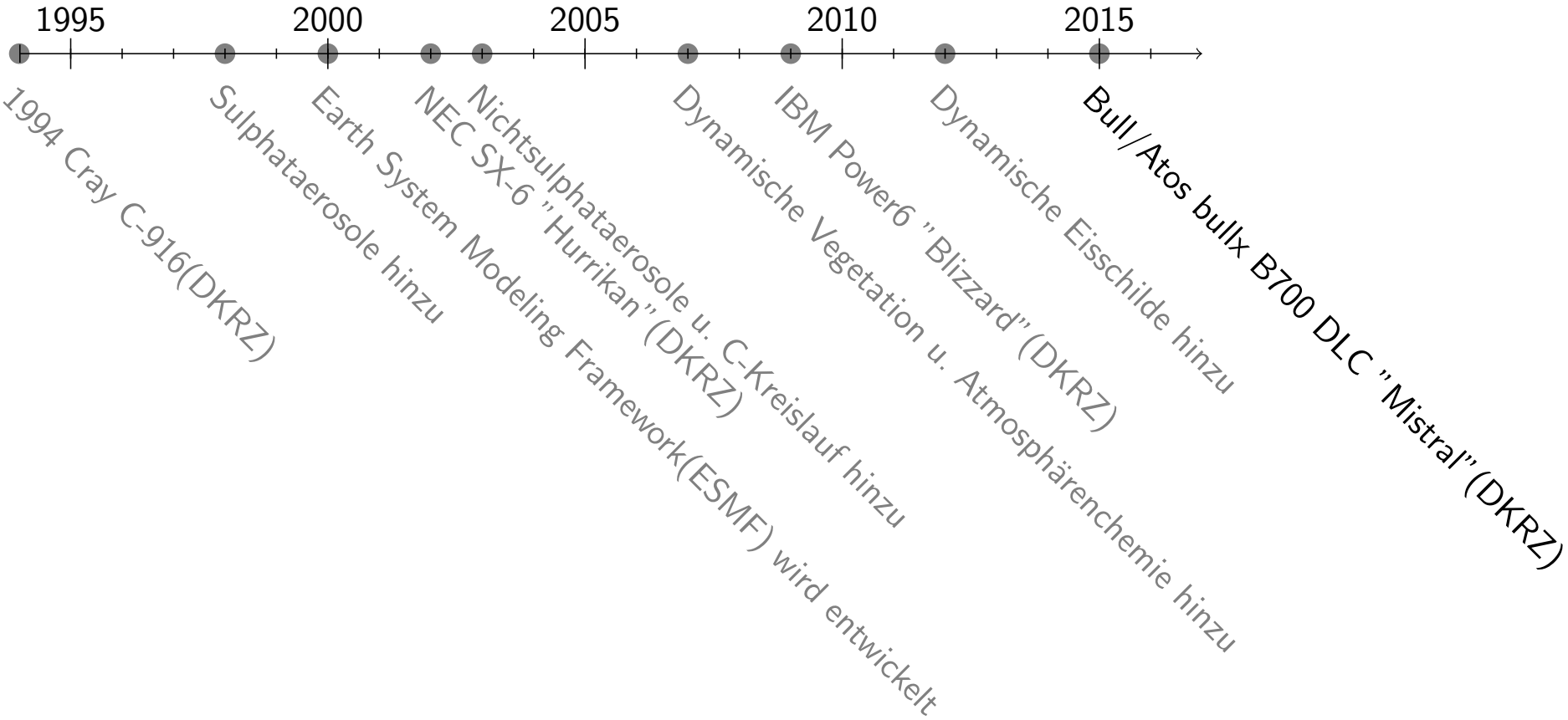
- Resultate eines Modells unterscheiden sich bei geringer Anfangsbelegung
- Das Resultat ist also nur EINE Realisierung des berechneten Klimas
- Mehrmaliges Ausführen mit verschiedenen Anfangsbelegungen
- Mittel der Ergebnisse = Ensemble
- Mittel unterschiedlicher Modelle = Multi-Modell-Ensemble

Dynamische Eisschilde zu gekoppelten Modellen hinzu



[Komplexe Klimamodelle(GCMs) Dr. Dieter Kasang 08.2014]

Timeline
1994-2016



2015 Bull/Atos bullx B700 DLC "Mistral" (DKRZ)

[Rechnerhistorie am DKRZ]

- 36.000/68.000 Prozessoren
- 1.4/3 PetaFLOPS
- 120/240 TB Hauptspeicher
- 20/50 PB Festplattensystem
- 500 PB Magnetbandarchiv

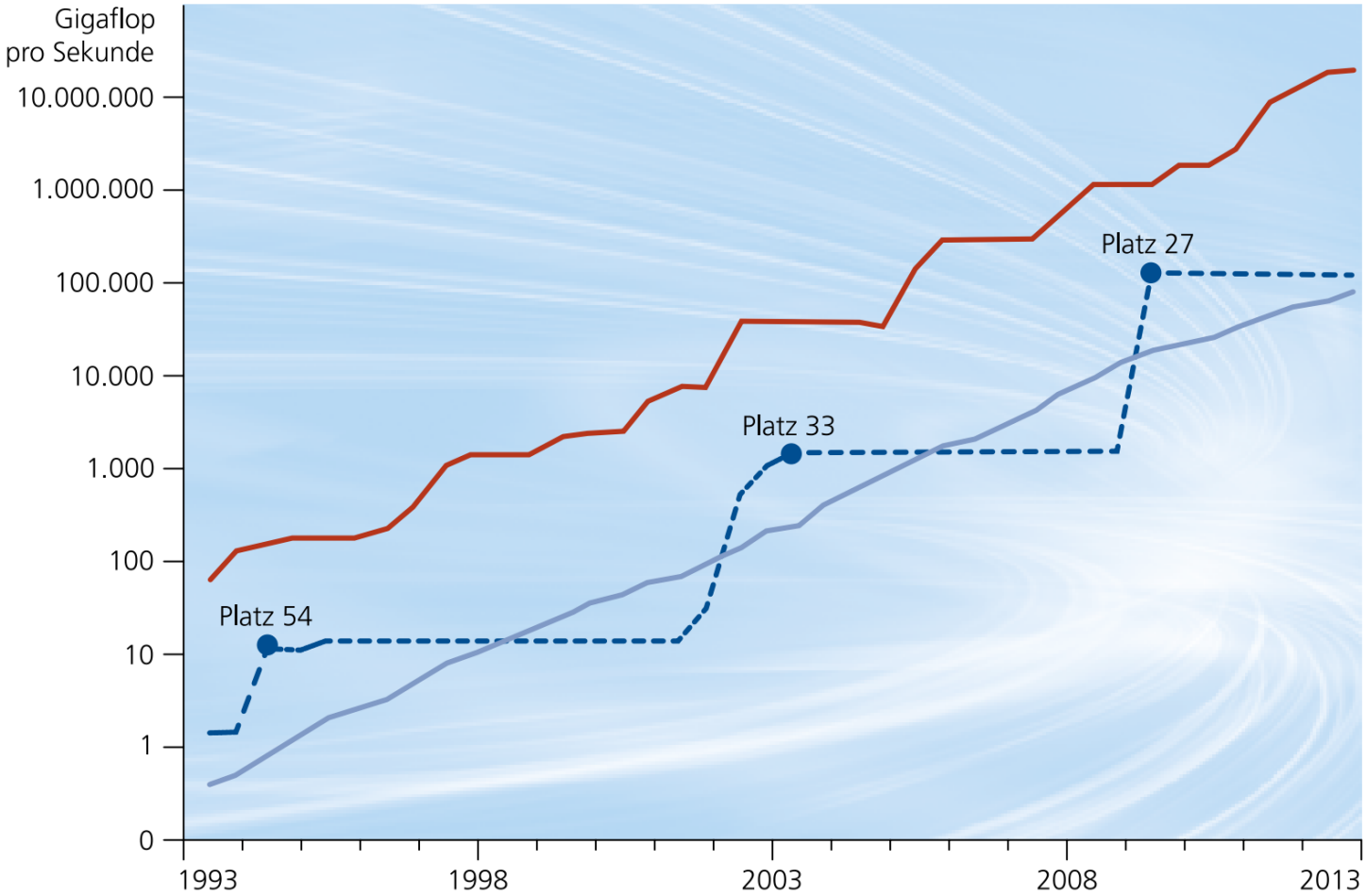
2015 Bull/Atos bullx B700 DLC "Mistral" (DKRZ)

[Rechnerhistorie am DKRZ]

- Wolkenauflösendes Regionalmodell für Deutschland mit 25 Milliarden Gitterzellen
- Ergebnisdaten: 1-20 PB
- Simulierte Zeit: Monate bis 100.000 Jahre
- Gitterabstand Globalmodelle:
  - 40 km Atmosphäre
  - 10 km Ozean

Zusammenfassung

Die besten Computer



Rasant aufwärts
Seit 1993 ist die Rechenleistung der Top500 der Welt und am DKRZ um das 10.000- bis 100.000-Fache gestiegen.

[25 Jahre DKRZ]

Folgen

- Starke Entwicklung bringt bessere Modelle

Folgen

- Starke Entwicklung bringt bessere Modelle
- Bessere Modelle liefern bessere Ergebnisse

Folgen

- Starke Entwicklung bringt bessere Modelle
- Bessere Modelle liefern bessere Ergebnisse

- Doch:
  - Rechenleistung kommt an die Grenzen
  - Bessere Modelle liefern extrem viele Daten

Folgen

- Starke Entwicklung bringt bessere Modelle
- Bessere Modelle liefern bessere Ergebnisse

- Doch:
  - Rechenleistung kommt an die Grenzen
  - Bessere Modelle liefern extrem viele Daten
  - Akt.: 8 PB/Jahr zu speichern

Folgen

- Starke Entwicklung bringt bessere Modelle
- Bessere Modelle liefern bessere Ergebnisse

- Doch:
  - Rechenleistung kommt an die Grenzen
  - Bessere Modelle liefern extrem viele Daten
  - Akt.: 8 PB/Jahr zu speichern
  - Langes und aufwändiges Postprocessing

Schlussworte

- Klimamodelle bleiben mit Einschränkungen und Unsicherheiten verbunden
- Gesamtes Klimasystem momentan nicht abbildbar
- Entstehung von Ungenauigkeiten die zu Fehler führen
- Helfen jedoch beim Verständnis des Klimasystems
- Durch regionale Modelle kann Klima auf unterschiedlichen Skalen simuliert werden
- Ensembles sorgen für bessere Ergebnisse
- Ungewissheit der Entwicklung des menschlichen Einflusses bleibt jedoch immer bestehen

Literatur- und Abbildungsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis

1. http://www.welt.de/debatte/kommentare/article13464937/Die-Atmosphaere-ist-keine-Gratis-Muellhalde.html; Abgerufen am 31.Mai 2016 um 02:30 Uhr
2. http://www.xplora.org/downloads/Knoppix/ESPERE/ESPEREdez05 /ESPEREde /www.atmosphere.mpg.de/media/archive/5981.jpg; Abgerufen am 31.Mai 2016 um 02:30 Uhr
3. https://wr.informatik.uni-hamburg.de/teaching/wintersemester_2015_2016/hochleistungsrechnen; Abgerufen am 31. Mai 2016 um 18:57 Uhr
4. http://serc.carleton.edu/earthlabs/weather_climate/lab_2.html; Abgerufen am 31.Mai 2016 um 21:16 Uhr
5. https://msrb.wordpress.com/2007/12/04/energy-dinosaurs/; Abgerufen am 01. Juni 2016 um 23:36 Uhr

Abbildungsverzeichnis

6. History of climate modeling von Paul N. Edwards, 2011
7. https://wr.informatik.uni-hamburg.de/teaching/wintersemester_2015_2016/hochleistungsrechnen Foliensätze: Visualisierung in der Klimaforschung, Klimaforschung und Hochleistungsrechnen
8. http://www.computerhistory.org/revolution/birth-of-the-computer/4/92/365; Abgerufen am 02. Juni 2016 um 00:10 Uhr
9. http://www.klimanavigator.de/dossier/dossiers/011976/index.php; Abgerufen am 03. Juni 2016 um 13:27 Uhr
10. https://www.dkrz.de/about/aufgaben/dkrz-geschichte/rechnerhistorie-1; Abgerufen am 04. Juni 2016 um 18:09 Uhr

Abbildungsverzeichnis

11. https://www.dkrz.de/pdfs/downloads/25_Jahre_DKRZ.pdf?lang=de; Abgerufen am 05. Juni 2016 um 00:56 Uhr
12. http://www.esrl.noaa.gov/gmd/webdata/ccgg/trends/co2_data_mlo.png Abgerufen am 08.06.2016 um 01:47 Uhr

Literaturverzeichnis

1. https://wr.informatik.uni-hamburg.de/teaching/wintersemester_2015_2016/hochleistungsrechnen; Abgerufen am 31. Mai 2016 um 19:32 Uhr Foliensätze: Klimaforschung und Hochleistungsrechnen
2. Herbert Stachowiak: Allgemeine Modelltheorie, 1973, S. 131–133
3. Das Klimasystem und seine Modellierung: Eine Einführung von Hans von Storch,Stefan Güss,Martin Heimann, 1999, S. 6-7
4. History of climate modeling von Paul N. Edwards, 2011
5. http://www.klimanavigator.de/dossier/dossiers/011976/index.php; Abgerufen am 03. Juni 2016 um 13:27 Uhr

Literaturverzeichnis

6. https://www.dkrz.de/about/aufgaben/dkrz-geschichte/rechnerhistorie-1; Abgerufen am 04. Juni 2016 um 18:09 Uhr
7. https://www.dkrz.de/pdfs/downloads/25_Jahre_DKRZ.pdf?lang=de; Abgerufen am 05. Juni 2016 um 00:56 Uhr
8. http://www.esrl.noaa.gov/gmd/obop/mlo/; Abgerufen am 08.06.2016 um 01:47 Uhr
9. http://www.spektrum.de/lexikon/geowissenschaften/eisschild/3902; Abgerufen am 13. Juni 2016 um 13:12 Uhr