

Universität Hamburg
Fachbereich Informatik

Seminararbeit

**Klimamodellierung und die Entwicklung
moderner Computer**

von: Aleksej Logacjov

Betreuer: Herr Dr. Hermann Lenhart

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	5
2	Grundlagen der Klimamodellierung	5
3	Klimamodellierung und die Entwicklung moderner Computer	7
3.1	Numerische Wettervorhersage	7
3.2	General Circulation Models (GCM's)	7
3.3	Auflösung und Parametrisierung	8
3.4	Kopplung von Subsystemen	9
3.5	Entwicklung am DKRZ	10
4	Zusammenfassung	14
5	Literatur- und Quellenverzeichnis	16

Abbildungsverzeichnis

1	Das Energiebilanzmodell	6
2	Gitterboxen der Finite-Differenzen-Methode	8
3	Gitterauflösung Europa 500km	9
4	Genauigkeit vs. Auflösung	10
5	Timeline 1955-1995	10
6	Gekoppelte Modelle bis 1995	12
7	Timeline 1998-2016	13
8	Gekoppelte Modelle in den frühen 2010er	15
9	Die besten Computer	16

1 Einleitung

Globale Erwärmung, Treibhausgase und das Schmelzen der Polkappen. Solche und ähnliche Begriffe sind kaum mehr aus den Medien wegzudenken. Fakt ist, dass seit der Industrialisierung die Durchschnittstemperatur der Erde in den letzten 100 Jahren um 0.8°C zugenommen[1] hat. Die Messstation auf Mauna Loa auf Hawaii misst seit 58 Jahren den CO_2 Gehalt der Atmosphäre. Die Messergebnisse zeigen einen stetigen Anstieg der CO_2 Konzentration seit Beginn der Aufzeichnungen[2]. Ein Abwärtstrend ist hier nicht zu erkennen. Anzeichen für den Klimawandel liefern selbst Versicherungen. Zum Beispiel waren die Kosten für Schäden durch Umweltkatastrophen im Jahr 2011 größer als in den drei Jahren davor[3]. Dies macht 2011 zu einem außergewöhnlichen Jahr welches Andeutungen an einen Klimawandel macht.

Die Fragen die wir uns nun stellen, sind: In wie weit haben wir dies zu verantworten, d.h. in wie weit sind diese Änderungen anthropogen beeinflusst, oder in wie weit liegen die beobachteten Änderungen innerhalb der natürlichen Schwankungsbreite?

Um diese Fragen beantworten zu können, benötigt man ein besseres Verständnis des Klimasystems und den Vorgängen im System. Dieses Verständnis liefern uns heutige Klimamodelle. Dabei hängt die Qualität stark mit der Leistung des Rechners zusammen auf dem das Modell läuft.

In dieser Arbeit werde ich die Entwicklung von Klimamodellen auf der Basis der Rechenleistung des DKRZ darstellen. Zunächst werde ich jedoch ein Grundlagenverständnis schaffen, um Klimamodelle besser zu verstehen.

2 Grundlagen der Klimamodellierung

Konzeptionelle Modelle

Eine mögliche Art von klimabeschreibenden Modellen, sind konzeptionelle Modelle. Sie dienen dazu grundlegende Prozesse des Klimas so einfach wie möglich darzustellen um diese verständlich zu machen[4]. Ein Beispiel hierfür ist das Energiebilanzmodell (Abbildung 1). Das Modell beschreibt die Oberflächentemperatur[5], indem es die Bilanz zwischen ankommender Strahlung und ausgehender Strahlung berechnet. Dabei beachtet das Modell Werte wie solare Strahlung, Albedo (Rückstrahlvermögen der Erde) oder Absorption der Strahlung durch die Atmosphäre, dem Wasser und weitere Quellen und Senken von Energie.[4].

Klimamodelle

Wir betrachten in dieser Arbeit jedoch eine Art von Klimamodellen die andere Eigenschaften aufweisen. Die Klimamodelle die wir betrachten, bestehen

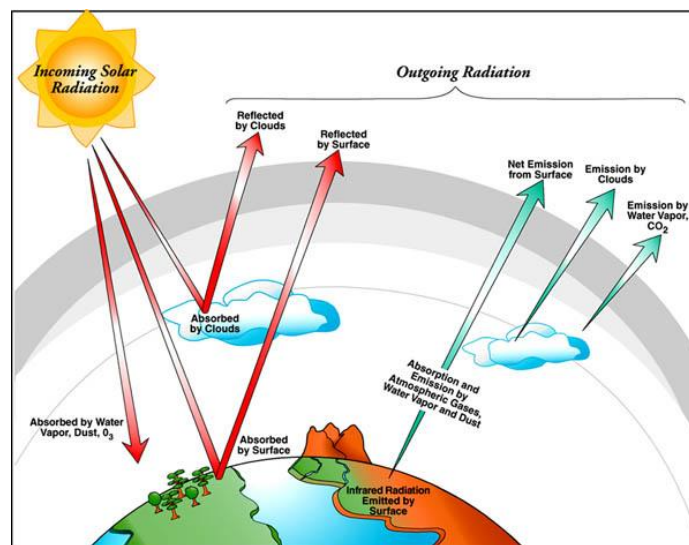


Abbildung 1: Das Energiebilanzmodell (Quelle: Steve Ackerman and John Knox US Department of Energy(ARM))

aus den relevanten physikalischen Gleichungen, die für die Beschreibung des Klimas notwendig sind, aus den numerischen Algorithmen, die diese Gleichungen approximieren, sowie der Implementierung dieser Algorithmen. Die Gleichungen mit denen wir es zu tun haben, sind meist gewöhnliche oder partielle Differentialgleichungen[5]. D.h. diese sind nicht direkt lösbar und müssen durch numerische Algorithmen approximiert werden. Dies mindert einerseits die Qualität der Ergebnisse, andererseits kann man diese Approximationen implementieren um damit Computer für die Berechnung nutzen zu können.

Möglichkeiten solcher Modelle

Die Möglichkeiten moderner Klimamodelle sind dabei vielfältig. Sie können vergangenes oder heutiges Klima nachbilden, aber auch Zukunftsszenarien liefern. Bei letzterem fließen auch Annahmen für die Zukunft mit ein wie 'Der Mensch ändert seinen CO₂-Ausstoß nicht' oder 'Die politischen Vorgaben werden erfolgreich durchgesetzt'. Vor allem aber fördern sie das Verständnis über unser Klimasystem.

Um dies alles zu ermöglichen, benötigen die Modelle viel Rechenleistung aber auch viel Aufwand beim Auswählen der Inputdaten für die Modelle. Wissenschaftler müssen genau überprüfen welche Daten sie dem Modell als Input geben um gute Ergebnisse zu erzielen. Beides zusammen ist eine große Herausforderung sowohl für den Computer als auch für den Menschen.

Im Folgenden werde ich die erste numerische Wettervorhersage zeigen um zu den modernen Klimamodellen übergehen zu können, da diese auf den Wettervorhersagen aufbauen. Zu Allem werde ich die jeweils genutzte Rechenleistung mit angeben. In diesem Zusammenhang werde ich die Begriffe Parametrisierung und Auflösung einführen, die eine wichtige Rolle im weiteren Verlauf spielen werden.

3 Klimamodellierung und die Entwicklung moderner Computer

3.1 Numerische Wettervorhersage

1950 fand die erste simulierte Wettervorhersage statt. Die 24h Wetterprognose wurde von Jule Charney, Ragnar Fjørtoft sowie John von Neumann, an einem ENIAC Rechner mit ca. 500 FLOPS[7]¹, durchgeführt[6]. Wie oben beschrieben wurden relevante physikalische Gleichungen approximiert. Hierbei unter Verwendung der Finite-Differenzen-Methode[4]. Bei dieser Methode geht es um die Diskretisierung von Raum und Zeit. Dabei wurden für die Wettersimulationen nur regionale Räume betrachtet und nicht wie in (Abbildung 2) die gesamte Erde.

Aus solchen numerischen Wetterprognosen entstanden dann die modernen Klimamodelle, die General Circulation Models (GCM's). Diese stelle ich im nächsten Abschnitt vor.

3.2 General Circulation Models (GCM's)

Die modernen Klimamodelle werden General Circulation Models genannt und basieren auf der selben Technik wie die numerischen Wettervorhersagen. Es wird also auch der Raum und die Zeit diskretisiert und die physikalischen Prozesse auf Gitterboxen berechnet (Abbildung 2). GCM's betrachten jedoch die gesamte Erde oder zumindest größere Regionen als die numerischen Wettervorhersagen[4].

Der erste GCM der auf einem Computer lief, stammt von Norman Phillips aus dem Jahre 1955. Dieser GCM bestand aus 2 vertikalen Schichten von Gitterboxen, für zwei unterschiedliche Druckzonen, sowie aus 17 x 16 horizontalen Gitterpunkten auf einer Oberfläche von 10000 km x 6000 km. Dieser GCM konnte 130 Tage simulieren mit einem IAS-Computer mit 1kB Hauptspeicher und 2 kB Magnetbandspeicher[4][6].

¹FLOPS = Floating Point Operations Per Second

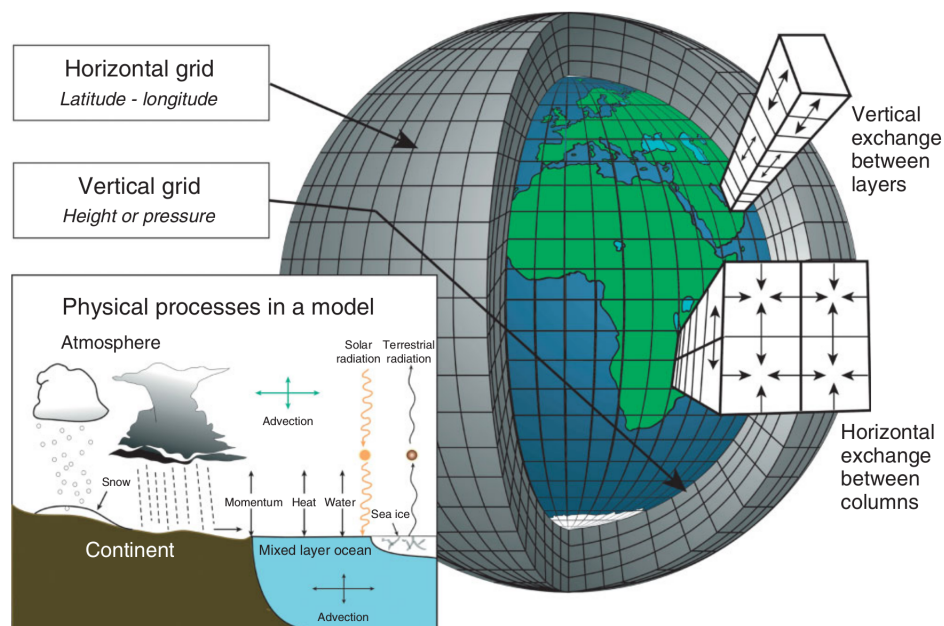


Abbildung 2: Gitterboxen der Finite-Differenzen-Methode (Quelle: Vorlesung Hochleistungsrechnen WiSe 15/16)

Wie man hier schon erkennen kann, ist ein Gitter von 17×16 für eine Oberfläche von $10000 \text{ km} \times 6000 \text{ km}$ sehr großskalig. Physikalische Prozesse die innerhalb dieser Gitterboxen stattfinden, können gar nicht berechnet werden. Also versucht man die Gitterboxen zu verkleinern. Hier kommen die Begriffe Auflösung und Parametrisierung ins Spiel.

3.3 Auflösung und Parametrisierung

Das Gitter des ersten GCM's hatte einen Gitterabstand von ca. 600 km. Dieser Abstand wird Auflösung genannt. Ein Modell mit einer Auflösung von ca. 500 km ist in Abbildung 3 zu erkennen. Die Abbildung zeigt Europa modelliert mit einer Auflösung von 500 km. Die Umrisse sind undeutlich und Klimasimulationen für beispielsweise Großbritannien sind damit schwer möglich bzw. liefern wenig hilfreiche Informationen. Denn wie oben bereits erwähnt, können physikalische Prozesse die innerhalb dieser Gitterboxen stattfinden nicht berechnet werden[4]. Verbessert man also die Auflösung so verfeinert man die Ergebnisse der physikalischen Gleichungen. Das heißt man strebt einen möglichst kleinen Gitterabstand an. Wenn dies nicht möglich ist, müssen die Prozesse die nicht berechnet werden können mit einzelnen Werten oder Parametern dargestellt werden. Sie werden also nicht direkt

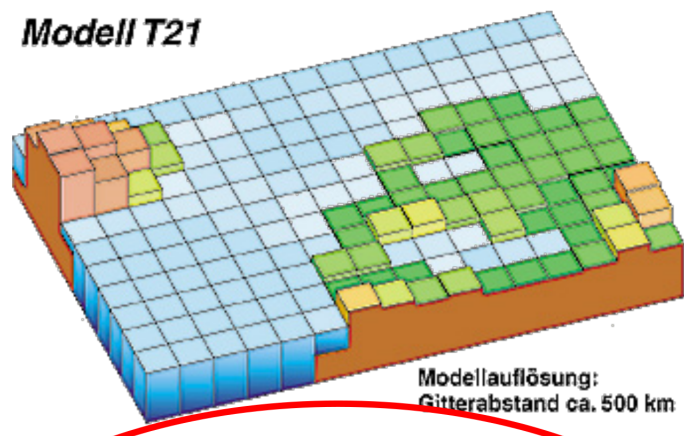


Abbildung 3: Auflösung Europa 500km (Quelle: Vorlesung Hochleistungsrechnen WiSe 15/16)

modelliert. Dies ist u.a. die schwierigste Aufgabe der Klimamodellierung, denn die Wahl solcher Parameter muss genau überlegt sein[4].

Das große Problem dabei ist, dass je kleiner die Auflösung gemacht wird desto größer ist der nötige Rechenaufwand. Für eine Halbierung der Auflösung ist das sechzehnfache der Rechenleistung nötig[6](Abbildung 4). Bei einem Gitterabstand von 75 km benötigt man das 4096-Fache der Rechenleistung des ersten GCM's. Dabei ist mit Genauigkeit die Nähe zum realen Klimasystem gemeint.

Es gibt auch eine weitere Möglichkeit die Genauigkeit eines Klimamodells zu verbessern. Diese stelle ich im nächsten Kapitel vor.

3.4 Kopplung von Subsystemen

Das Klimasystem besteht bekanntlich nicht nur aus der Atmosphäre. Weitere Subsysteme des Klimasystems sind zum Beispiel Ozean, Biosphäre, Kryosphäre(von Eis bedekte Gebiete) und so weiter. Diese haben noch jeweils einzelne Komponenten. Betrachtet man nun GCM's die neben der Atmosphäre noch weitere Komponenten des Klimasystems beinhalten so bezeichnet man diese als gekoppelte Modelle. Es ist klar, dass mehr Rechenleistung für gekoppelte Modelle nötig ist. Eine weitere Schwierigkeit ist es zwei Modelle zu einem gekoppelten Modell zu kombinieren, erst recht wenn diese aus verschiedenen Forschungsinstituten kommen.

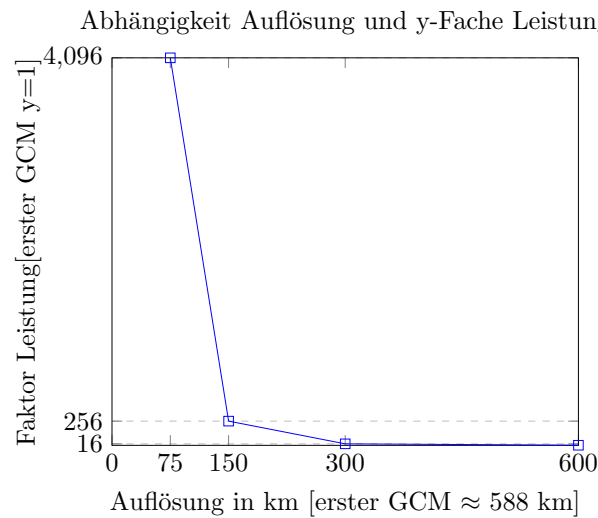


Abbildung 4: Genauigkeit vs. Auflösung

3.5 Entwicklung am DKRZ

Nun werde ich wichtige Computer des DKRZ aufzeigen die sich im Laufe der Zeit enorm verbessert haben. Dabei werde ich immer mit angeben welche Fortschritte in der Klimamodellierung, zur Zeit der gezeigten Computer, ermöglicht wurden. Dabei werde ich zunächst die Zeit von 1955 bis 1995 betrachten um dann vom 20. ins 21. Jhd. überzugehen. Ich betrachte dabei vor allem die Zeit ab 1988, aufgrund der Tatsache, dass das DKRZ 1987 gegründet und 1988 in Betrieb genommen wurde[9].

Mit den gekoppelten Modellen in Abbildung 6 und Abbildung 8 zeige ich auf welche Möglichkeiten der Klimamodellierung, auch durch die Rechner am DKRZ ermöglicht wurden.

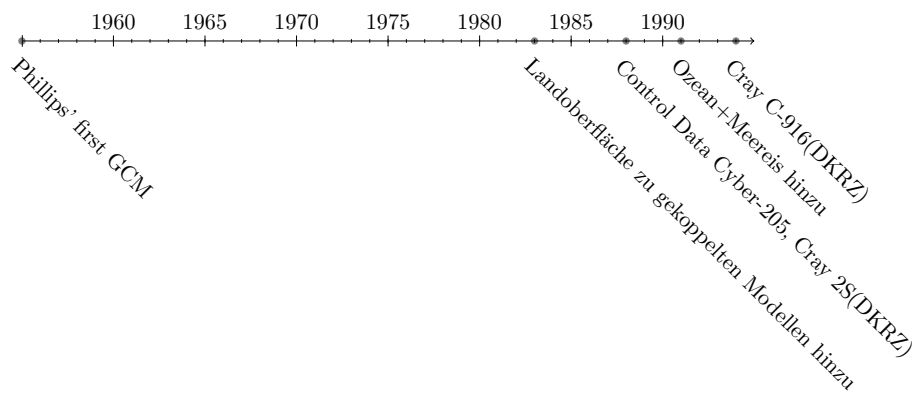


Abbildung 5: Timeline der Rechner- und Klimamodellentwicklung von 1955-1995 am DKRZ

Die Timeline (Abbildung 5) beginnt mit dem bereits erwähnten ersten GCM von Phillips.

Mitte der 1980er wurde es dann möglich zum ersten mal die Landoberfläche als Subsystem des Klimas zu den gekoppelten Modellen hinzuzufügen[5] (Abbildung 6). Wodurch das gekoppelte Modell Atmosphäre Landoberfläche entstand. 1988 wurde dann das DKRZ in Betrieb genommen.

Januar 1988 Control Data Cyber-205

Januar 1988 stand am DKRZ der Control Data Cyber-205. Dieser war mit einer, aus heutiger Sicht sehr schwachen, Leistung von 0.2 GigaFLOPS ausgestattet. Diese liefen auf genau einem Prozessor bzw. Prozessorkern. Dazu hatte dieser noch $0.032 \text{ GB} = 32 \text{ MB}$ an Hauptspeicher[8].

Die Ergebnisdaten des Cyber-205 waren 4 GB groß und Monate bis Jahre konnten damit simuliert werden. Der Gitterabstand der Modelle der Atmosphäre betrug zu der Zeit ca. 500 km.(Abbildung 3)

Eine Möglichkeit bei Klimamodellen, die zu dieser Zeit und auch durch diesen Rechner entstanden ist, war unter anderem die Simulation von Atmosphären oder Ozeanmodellen. Diese jedoch noch nicht als gekoppelte Modelle betrachtet[8].

November 1988 Cray 2S

Der Cray 2S fand dann 1988 seinen Platz am DKRZ. Mit einer Ausstattung von 4 Prozessorkernen, einem Gigabyte an Hauptspeicher und vor allem einer Leistung von 2 GigaFLOPS, brachte er deutlich mehr Rechenleistung als sein Vorgänger.

Die Ergebnisdaten waren 80 GB groß und damit 20 mal so groß wie die des Vorgängers. Diese konnten auf 25 GB Festplattensystem sowie 1,2 TB Magnetbandarchiv gespeichert werden.

Es konnte eine Zeit von 200 Jahren simuliert werden. Der Gitterabstand betrug weiterhin 500 km[8]. Es konnten nun Simulationen mit einem gekoppelte 3D-Atmosphäre-Ozean-Modell gemacht werden. Das bedeutet, dass zu dieser Zeit, also den späteren 1980er Jahren, das Ozeanmodell zu den gekoppelten System hinzugefügt werden konnte(Abbildung 6).

1994 Cray C-916

Mitte der neunziger Jahre hat der Cray 2S Platz gemacht für den Cray C-916. Dieser war mit 4 mal so vielen Prozessorkernen (16 Kerne) und 16 GigaFLOPS an Rechenleistung ausgestattet. Dazu noch 2 GB Hauptspeicher und 4 GB RAM-Disk. Es gab ein 128 GB Festplattensystem und 10 TB an Magnetbandarchiv. Die Ergebnisdaten waren 1 TB groß und die Anzahl der Jahre die simuliert werden konnten, stiegen auf mehrere Hundert Jahre an. Zu dieser Zeit verringerte sich auch der Gitterabstand und es waren bis

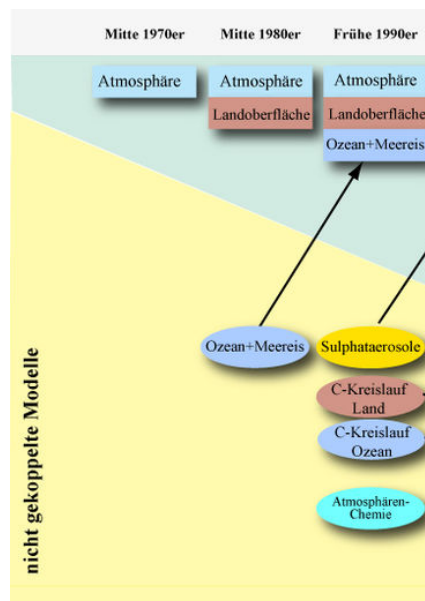


Abbildung 6: Im blauen Bereich sind die Modelle aufgezeigt die ein gekoppeltes Modell ergeben. (Quelle: Komplexe Klimamodelle(GCMs) Dr. Dieter Kasang 08.2014)

zu 250 km Gitterabstand möglich. Nun konnten auch erste regionale² Klimamodelle betrachtet werden. Außerdem waren nun Simulationen möglich die es erlaubten die CO₂ Konzentration der Atmosphäre zu verändern und die Auswirkungen auf die Erde zu betrachten[8].

Nun fahre ich mit dem zweiten Teil der Timeline (Abbildung 7) fort. Sie beginnt im Jahre 1998 und endet 2016. Wir fangen damit an, dass ein weiteres Modell dem gekoppelten Klimasystem hinzugefügt wurde.

²Klimamodelle die sich auf kleinere Räume mit deutlich geringerem Gitterabstand konzentrieren[5]

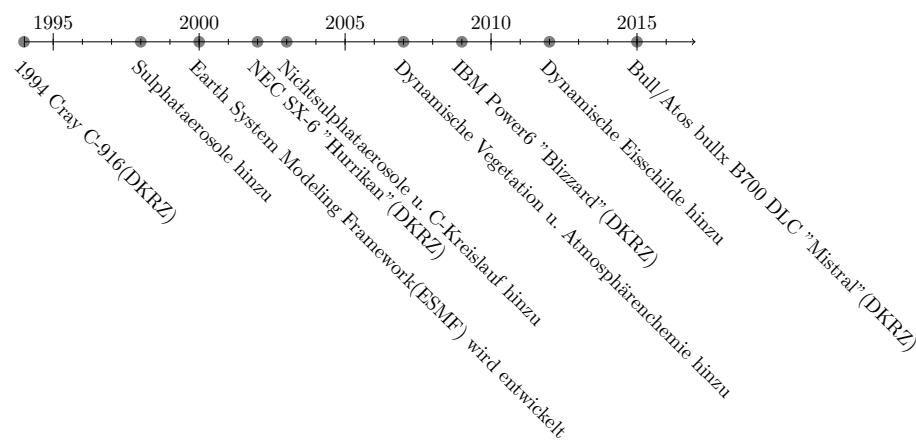


Abbildung 7: Timeline der Rechner- und Klimamodellentwicklung von 1998-2016 am DKRZ (Selbst erstellt)

Wie man aus Abbildung 7 entnehmen kann wurden die Sulphataerosole¹ dem gekoppelten Modell hinzugefügt (Abbildung 8).

Im Jahre 2000 wurde das Earth System Modeling Framework (ESMF) eingeführt mit dem es nicht nur möglich ist Klimamodelle zu entwickeln sondern auch zu gekoppelten Modellen zu verbinden. Damit konnte man nun Modelle leicht koppeln und entkoppeln je nach dem welches Modell man benötigt[8]. Kommen wir nun zum nächsten Rechner am DKRZ.

2002 NEC SX-6 "Hurrikan"

Hurrikan lieferte 192 Prozessorkerne, somit zwölf mal mehr als der Cray C-916. Dazu gab es 1,5 TB Hauptspeicher und ein 60 TB Festplattensystem sowie 3,4 PB Magnetbandarchiv. Hurrikan brachte es auf 1,5 TeraFLOPS also ca. 90 mal mehr Leistung als noch der C-916.

Die Ergebnisdaten waren bis zu 150 TB groß und es konnte nun eine Zeit von bis zu 5000 Jahren simuliert werden. Der Gitterabstand konnte nun auf 180 km gesenkt werden.

Außerdem konnten nun Nichtsulphataerosole und der Kohlenstoffkreislauf zu den gekoppelten Modellen hinzugenommen werden. In den späten 2000er wurden dann auch die dynamische Vegetation und die Atmosphärenchemie hinzugefügt (Abbildung 8). Man spricht das erste mal von einem Erdsystemmodell.

2009 IBM Power6 "Blizzard"

2009 wurde dann der IBM Power6 eingesetzt. Dieser besaß 8448 Prozessorkerne, die eine Leistung von 158 TeraFLOPS erbrachten, also eine verhun-

¹Aerosole auf Schwefelbasis

dertfachung des Vorgängers. Es gab 20 TB an Hauptspeicher und ein 6 PB großes Festplattensystem sowie ein 60 PB Magnetbandarchiv.

Die Ergebnisdaten lagen in der Größenordnung von 1 PB und die simulierte Zeit betrug bis zu 10000 Jahre. Der Gitterabstand hat sich auf bis zu 50 km verkleinert[8].

Nun waren auch erste Ensemble-Simulationen² möglich. Die es ermöglicht haben noch genauere Ergebnisse zu erhalten.

In den frühen 2010er wurden dann die dynamischen Eisschilde zu den gekoppelten Modellen hinzugefügt (Abbildung 8) und somit das Erdsystemmodell erweitert.

Bull/Atos bullx B700 DLC "Mistral"

Nun komme ich zu dem heutigen Computer am DKRZ, dem Bull/Atos bullx B700 DLC. Dieser besitzt heute 68000 Prozessorkerne und dadurch eine Leistung von 3 PetaFLOPS. Und im Vergleich zum ersten Rechner am DKRZ dem Control Data Cyber-205, hat Mistral 15.000.000 mal mehr Leistung. Der Hauptspeicher liegt bei 240 TB, das Festplattensystem hat eine Größe von 50 PB. Außerdem gibt es ein 500 PB Magnetbandarchiv.

Die Ergebnisdaten liegen bei 1 bis 20 PB. Es können nun Monate bis zu 100.000 Jahre simuliert werden. Der Gitterabstand der Atmosphäre ist auf 40km abgesunken. Der Gitterabstand des Ozeans sogar auf 10 km[8].

Damit wären wir beim heutigen Stand der Dinge angekommen und haben gesehen wie stark sich sowohl Computer als auch Klimamodelle in den letzten 30 Jahren entwickelt haben. Es folgt eine Zusammenfassung der wichtigsten Punkte dieser Arbeit.

4 Zusammenfassung

Der rasante Aufwärtstrend der Rechenleistung (Abbildung 9) hat natürlich Folgen. Sowohl positive als auch negative Folgen. Zum einen gibt es umfangreichere Klimamodelle die auch bessere Ergebnisse liefern. Zum anderen stößt die Rechenleistung mittlerweile an ihre Grenzen. Die Modelle liefern extrem viele Daten aktuell ca. 8 PB im Jahr[8], die verarbeitet werden müssen (Postprocessing). Da es so viele Daten sind, ist das Postprocessing sehr aufwändig. Es entstehen also Probleme in anderen Bereichen die angegangen werden müssen.

²Mehrmaliges Ausführen eines Modells mit verschiedenen Werten oder auch Verwendung mehrerer Modelle. In beiden Fällen wird das Mittel der Ergebnisse betrachtet (Ensemble)[5]

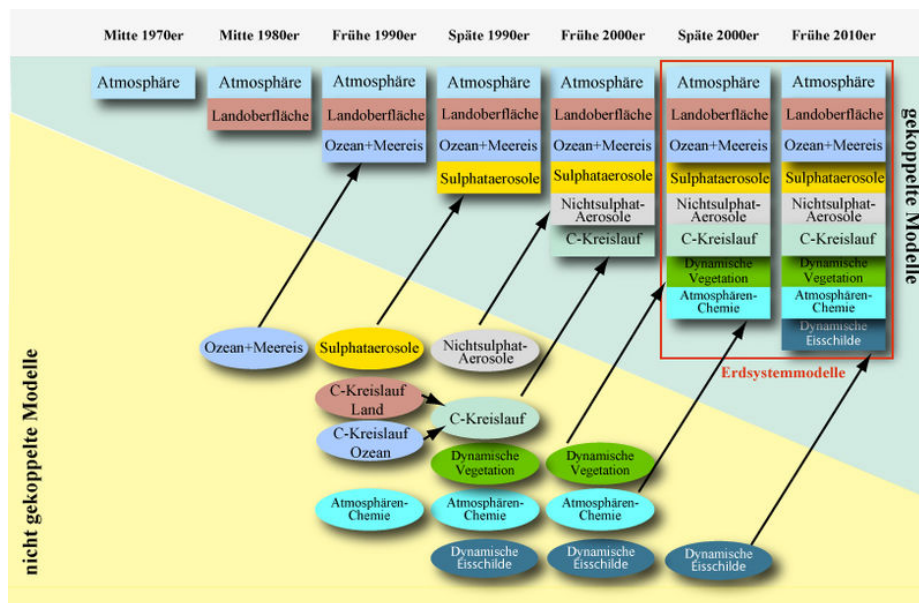


Abbildung 8: Da viele Komponenten des Klimasystems nun in die gekoppelten Modelle aufgenommen wurden, spricht man von einem Erdsystemmodell. (Quelle: Komplexe Klimamodelle(GCMs) Dr. Dieter Kasang 08.2014)

Schlussworte

Klimamodelle sind mit vielen Einschränkungen und Unsicherheiten verbunden. Diese werden sich höchstwahrscheinlich auch nie gänzlich vermeiden lassen. Das gesamte Klimasystem abzubilden ist ebenfalls nicht möglich, da es einfach zu komplex und chaotisch ist. Diese Ungenauigkeiten führen zu Fehlern. Trotzdem helfen Modelle uns beim Verständnis des Klimasystems und Ensembles sorgen dafür, dass die Fehler minimiert werden und die Ergebnisse dadurch besser werden. Die Ungewissheit über die Entwicklung des menschlichen Einflusses auf das Klima bleibt jedoch immer bestehen.

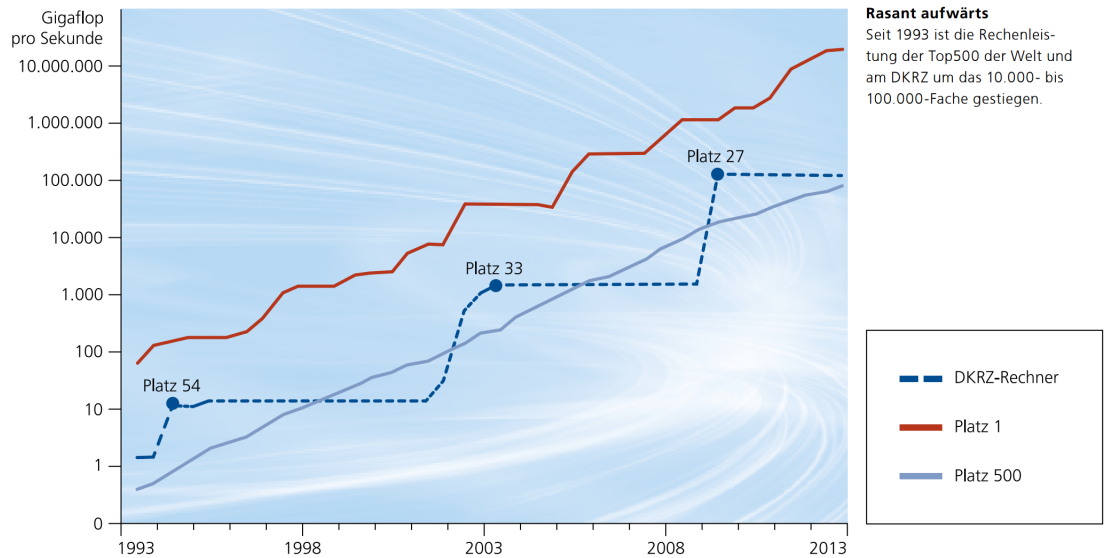


Abbildung 9: Diagramm mit den Top 500 Computern der Welt, wobei die y-Achse die Leistung der Computer darstellt. Diese ist nicht linear. Platz 27 im Jahre 2013 ist der IBM Power6 "Blizzard". (Quelle: 25 Jahre DKRZ)

5 Literatur- und Quellenverzeichnis

Literatur

- [1] http://www.oekosystem-erde.de/html/hansen_2006.html, Zugriff 30.06.2016
- [2] <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/obop/mlo/>, Zugriff 30.06.2016
- [3] <http://www.handelsblatt.com/unternehmen/banken-versicherungen/studie-der-munich-re-versicherer-warnen-vor-klimawandel/7043678-2.html>, Zugriff 30.06.2016
- [4] History of climate modeling von Paul N. Edwards, 2011
- [5] <http://www.klimanavigator.de/dossier/dossiers/011976/index.php>, Zugriff 30.06.2016
- [6] https://wr.informatik.uni-hamburg.de/teaching/wintersemester_2015_2016/hochleistungsrechnen, Zugriff 31.05.2016
- [7] The Exponential Promise of High Performance Computing von Prof. Dr. Thomas Ludwig 2012

- [8] <https://www.dkrz.de/pdfs/downloads/25JahreDKRZ.pdf?lang=de>, Zugriff 05.06.2016
- [9] <https://www.dkrz.de/about/aufgaben/dkrz-geschichte/rechnerhistorie-1>, Zugriff 18.09.2016