



DKRZ

DEUTSCHES
KLIMARECHENZENTRUM





25 Jahre Deutsches Klimarechenzentrum

Eine Zeitreise durch 5² Jahre DKRZ



**Gewidmet allen heutigen und ehemaligen
Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern**



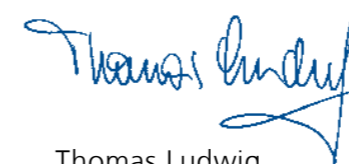
Vorwort

Deutsches Klimarechenzentrum. Gründung am 11. November 1987. Fünf Rechnergenerationen in 25 Jahren. So lauten die Fakten zum Jubiläum am 11. November 2012. Die verfügbare Rechnerleistung und das gespeicherte Datenvolumen wachsen in dieser Zeit um den Faktor eine Million, die Zahl der Mitarbeiter steigt von 22 auf 71. Dieser Dreiklang bildet die Grundlage unseres Leitspruchs: „Höchste Rechenleistung – Ausgereiftes Datenmanagement – Kompetenter Service“.

Als nationale Einrichtung nimmt das Deutsche Klimarechenzentrum (DKRZ) eine Sonderstellung unter den deutschen Rechenzentren ein, indem es ausschließlich die Klima- und Erdsystemforschung unterstützt. Die Konzentration auf diese Anwendungsklasse spiegelt sich auch in der Auswahl der installierten Rechner- und Speichersysteme wider: Klimaforschung braucht enorme Rechnerleistung, im Verhältnis dazu aber noch mehr Speicherkapazität auf Festplatten und Magnetbändern. Unter unseren Mitarbeitern sind viele Geowissenschaftler und Informatiker, die durch ihr Fachwissen unsere Nutzer hervorragend beraten. Neben Experiment und Theorie ist die rechnerbasierte Simulation die dritte Säule des Erkenntnisgewinns in der Wissenschaft.

Fortschritte in der Klimaforschung gelingen wesentlich mithilfe immer leistungsfähigerer Rechnerinfrastrukturen. Das DKRZ setzt es sich zur Aufgabe, den technischen Fortschritt bei den Rechner- und Speichersystemen für die Klimaforschung zu erschließen. Dieses Buch zieht eine Bilanz der ersten 25 Jahre unseres Wirkens. Wir wünschen Ihnen viel Freude bei dieser Zeitreise.

Ihr



Thomas Ludwig

GRUSSWORTE



Dr. Georg Schütte, Staatssekretär im Bundesministerium für Bildung und Forschung

Die Klimakonferenz in Doha hat gezeigt, wie schwer eine gemeinsame Haltung zum Klimawandel zu finden ist. Die politischen Antworten hierzu müssen auf der Grundlage wissenschaftlich fundierter Fakten gefunden werden. Diese trägt das DKRZ seit 25 Jahren zusammen. Seine Arbeiten bilden mit denen weniger Institute weltweit das Rückgrat der Klimamodellierungen, auf denen die Befunde des Weltklimarates IPCC beruhen. Das BMBF unterstützt diese Arbeit nachdrücklich, um wissenschaftlich belastbare Grundlagen für politisches Handeln zu schaffen und einen offenen gesellschaftlichen Diskurs zu fördern.



Prof. Dr. Peter Gruss, Präsident der Max-Planck-Gesellschaft

Ohne Computer geht heute besonders in der Klimaforschung fast nichts mehr. Das DKRZ, an dem die Max-Planck-Gesellschaft als Hauptgesellschafter beteiligt ist, leistet der internationalen Klimaforschung und den Wissenschaftlern des Max-Planck-Instituts für Meteorologie (MPI-M) unschätzbare Dienste. Die Klimasimulationen, mit denen das MPI-M zum fünften Weltklimabericht beiträgt, haben ein Viertel des DKRZ-Supercomputers über zwei Jahre ausgelastet. Dem DKRZ ist es mit zu verdanken, dass die Modellierungen der MPI-Forscher zu den besten der Welt gehören und ihre Forschung einen exzellenten Ruf genießt.



Prof. Dr. Dieter Lenzen, Präsident der Universität Hamburg

Moderne Wissenschaften benötigen wachsende Rechnerleistung. Dies gilt an der Universität Hamburg besonders für die Klimaforschung. Deshalb wurde das DKRZ gegründet. Hervorgegangen aus dem gemeinsamen Rechenzentrum des Max-Planck-Instituts für Meteorologie und des Meteorologischen Instituts der Universität Hamburg ist das DKRZ für die Erdsystemforschung in Hamburg im Rahmen des Exzellenzclusters CliSAP bedeutsam. Unsere Spitzenstellung in der Klimaforschung ist auch dem Beitrag des DKRZ zuzuschreiben. Wir danken für die erfolgreiche gemeinsame Arbeit und wünschen weiterhin alles Gute!



Prof. Dr. Wolfgang Kayser, wissenschaftlich-technischer Geschäftsführer des Helmholtz-Zentrums Geesthacht

Das DKRZ liefert Rechnerleistung auf international höchstem Niveau. Es ist für unsere Forschung zum Klimawandel und dessen Auswirkungen auf die Küstenregion eine verlässliche und unverzichtbare Basis. Das DKRZ stärkt zudem als zentrales Instrument der deutschen Klimaforschung unsere Einbindung in wissenschaftliche Netzwerke wie den KlimaCampus in Hamburg. Das Helmholtz-Zentrum Geesthacht gratuliert herzlich zum Jubiläum, dankt für die vertrauensvolle und erfolgreiche Zusammenarbeit und ist zuversichtlich, den anstehenden anspruchsvollen Herausforderungen gemeinsam mit den anderen Gesellschaftern begegnen zu können.



Prof. Dr. Karin Lochte, Direktorin des Alfred-Wegener-Instituts für Polar- und Meeresforschung

Als Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung ist das Alfred-Wegener-Institut mit seinen Forschungsarbeiten vor allem in kalten und gemäßigten Regionen der Erde aktiv. Wir wollen die treibenden Kräfte und Mechanismen im Klimasystem verstehen, denn Umweltveränderungen in Arktis, Antarktis und den Ozeanen werden die Zukunft unseres Planeten wesentlich prägen. Höchstleistungsrechner für Klimasimulationen und ein auf die Herausforderungen der Klimamodellierung angepasstes Datenprofil sind für unsere Forschung unverzichtbar. Als langjähriger DKRZ-Gesellschafter freuen wir uns auf die weitere Kooperation.

Inhalt

7	DKRZ – Wie kam es dazu?
8	1987 bis 1991: Ein Vertrag, Computer mit Persönlichkeit und gekoppelte Klimamodelle
15	Mission: „Ohne Spitzenrechner keine Spitzenforschung“
16	1992 bis 1996: Über einen Wettlauf, fliegende Rechner und den „Fingerabdruck“
22	Modelle: Der Fluch der Auflösung
24	1997 bis 2001: Vom Anfang eines Datenzentrums bis zum Ende einer Zitterpartie
30	Nutzen: Heute klimabewusst, morgen klimaneutral
32	2002 bis 2006: Über Rechnerriesen, virtuelle Supercomputer und Deutschlands Zukunft
39	Energie: „Wir müssen weiterdenken: Green Science!“
40	2007 bis 2011: Exzellente Forschung, ein Knopfdruck und eine Wiedervereinigung
47	Leistung: „Schnelle Rechenkerne sind gefragt“
48	2012: Blizzard und das Klimaziel
49	Vision
50	Das DKRZ und seine Partner
52	Impressum

DKRZ – Wie kam es dazu?

Der Bevölkerung in Deutschland ist bewusst: Wie wir heute heizen, bauen oder fahren, beeinflusst das Klima von morgen. Dieses Verständnis spiegelt sich auch in der Umweltpolitik von drei Kanzlern: Helmut Kohl erlässt 1991 das Einspeisegesetz, Strom aus Solaranlagen gelangt ins öffentliche Netz. Gerhard Schröder fördert im Jahr 2000 mit dem Erneuerbare-Energien-Gesetz Strom und Antriebskraft aus regenerativen Quellen. Und Angela Merkel ruft 2011 die Energiewende aus – nicht zuletzt auf Basis der Erkenntnisse, die auf den am Deutschen Klimarechenzentrum (DKRZ) berechneten Ergebnissen beruhen. Als heutiger Dreh- und Angelpunkt deutscher Klimamodellierung ermöglicht diese Service-Einrichtung der Forschung, wichtiges Klimawissen zu erlangen.

Schon seit Anfang der 1980er-Jahre arbeiten das Hamburger Max-Planck-Institut für Meteorologie und das Meteorologische Institut der Universität Hamburg eng zusammen. Ein erster gemeinsamer, kleiner Rechenservice entsteht. Doch für die großen Fragen der Klimaforschung braucht es ein hochauflösendes, dreidimensionales, globales Modell, das Atmosphäre und Ozean koppelt – und enorme Rechnerleistung.

Die Idee eines Superrechners ist geboren und auch ihr öffnet ein Politiker die Tür. Als einer der Ersten nimmt Franz Josef Strauß das Klimathema auf. Er fordert die Bundesregierung 1987 zur Gründung eines wissenschaftlichen Klimabeirats auf. Zugleich gibt das Forschungsministerium 18 Millionen Mark. Ein Fenster der Möglichkeit: für die richtige Idee und die richtige Wissenschaft zur richtigen Zeit – für den Start des DKRZ, womit nun zum ersten Mal in Europa die Infrastruktur und die Expertise besteht, große Klimadatensätze und Zukunftsszenarien zu modellieren.





Als Systemadministrator überwacht Dr. Otto Böhringer die ersten Rechnergenerationen des DKRZ.



DKRZler schwärmen noch heute von dem Gerät mit Persönlichkeit.

Die Gründung

Die Geschichte des Klimarechenzentrums beginnt auf dem Papier: Am 11. November 1987 unterzeichnen die Max-Planck-Gesellschaft, die Hansestadt Hamburg vertreten durch die Universität Hamburg und das GKSS-Forschungszentrum Geesthacht den Gesellschaftsvertrag. An der Spitze steht ein bewährtes Team: Der Gründungsdirektor des Max-Planck-Instituts für Meteorologie, Professor Klaus Hasselmann, ist Wissenschaftlicher Geschäftsführer. Sein langjähriger Mitarbeiter Wolfgang Sell übernimmt die technisch-administrative Leitung.

Das junge Rechenzentrum startet mit 22 Mitarbeitern und dem Hochleistungsrechner „Control Data Cyber-205“. Seit 1985 simulieren darauf Hamburger Wissenschaftler mit 3D-Atmosphären- oder Ozeanmodellen das Klimageschehen. Das Bundesministerium für Forschung und Technologie besiegelt nun die Finanzierung eines neuen Rechners. Für dessen Betrieb werden die Gesellschafter aufkommen.

Mitarbeiter beziehen Büros im 12. Stock des Geomatikums

Erster Rechner arbeitet mit nur einem Prozessor

Auflösung in Atmosphärenmodellen etwa 500 Kilometer

Ein richtiges Designerstück

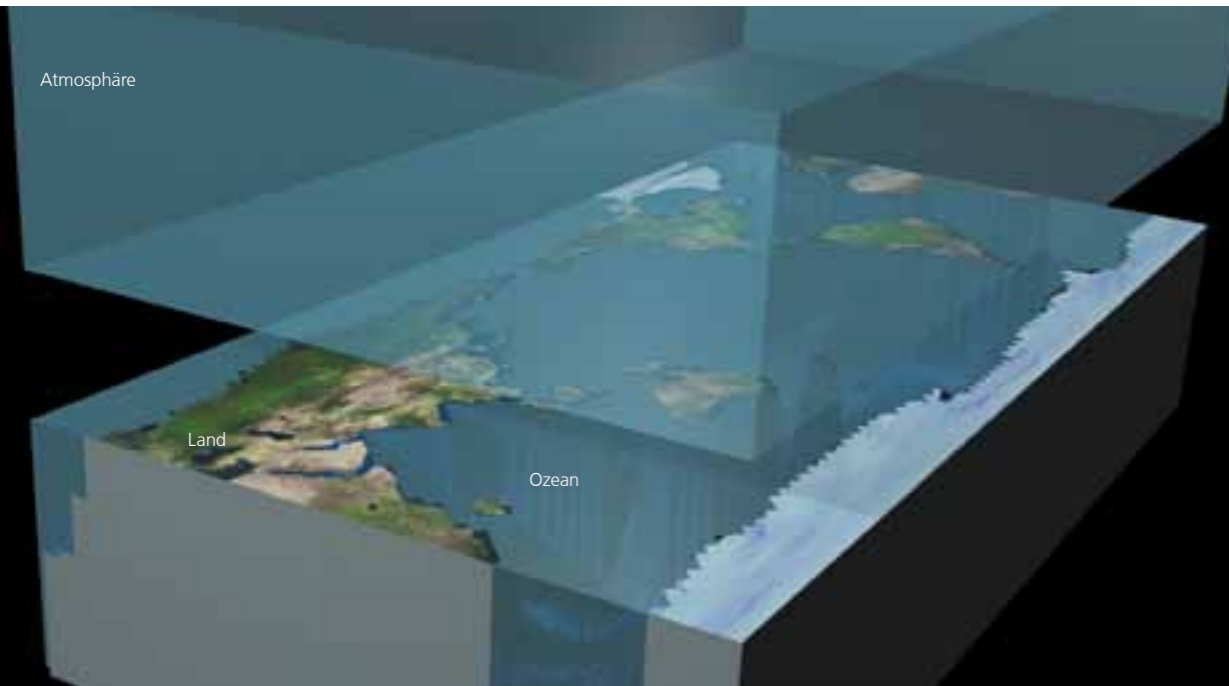
Als neues Herzstück eines nationalen Rechenzentrums will der Nachfolger für „Cyber-205“ sorgfältig ausgewählt sein. Klaus Hasselmann und Wolfgang Sell reisen deshalb in die USA. Sie besuchen mehrere Computerfirmen und sind beeindruckt vom innovativen Geist in der dortigen IT-Branche. „Wir sind auf brillante Ideen gestoßen“, erinnert sich Hasselmann. Den Zuschlag bekommt schließlich die Firma Cray Research Cooperation.

Am 31. Oktober 1988 installieren Techniker den neuen Supercomputer. Er heißt „Cray 2S“ und kann sich in jeder Hinsicht sehen lassen. In schickes Design verpackt glänzt der Rechner auch mit Leistung: Mit vier Prozessoren rechnet er zehnmals schneller als sein Vorgänger. Die neue Rechengeschwindigkeit und der wesentlich größere Hauptspeicher von 1 Gigabyte ermöglichen jetzt eine bessere Auflösung in den Klimamodellen. Das ist die Geburtsstunde gekoppelter 3D-Atmosphäre-Ozean-Modelle in Deutschland.

DKRZ-Nutzerinformation „GIGAFLOPS“ erscheint

Weltklimarat wird gegründet (Intergovernmental Panel on Climate Change, kurz IPCC)

Bau eines neuen Gebäudes beginnt, des sogenannten Pavillons



Gekoppelte Klimamodelle simulieren die Wechselwirkungen zwischen Atmosphäre und Ozean, wie etwa den Wasserkreislauf: Wasser aus den Meeren steigt als Wasserdampf in die Atmosphäre auf, sammelt sich in Wolken und regnet woanders wieder auf die Erde herab.



Ganz vorn dabei

Ozeanografen vertiefen sich in Meeresmodelle, Atmosphärenforscher feilen an Atmosphärenmodellen – die Zeit solcher strikt getrennten Wege ist seit einigen Monaten vorbei. Mit gekoppelten globalen Klimamodellen gelingt den deutschen Wissenschaftlern ein Durchbruch und sie steigen in die erste Liga der internationalen Klimaforschung auf. Zwei der weltweit vier Atmosphäre-Ozean-Modelle kommen aus Hamburg. Erste realistische Berechnungen zeigen, dass Klimaänderung durch CO₂-Emissionen nicht nur in der Atmosphäre stattfindet, sondern auch im Ozean. Denn die Weltmeere sind ein globaler Wärmepuffer.

„Dieser Fortschritt war nur möglich, weil wir den entsprechenden Rechner hatten“, sagt Ulrich Cubasch, der 1991 die Leitung der Modellbetreuungsgruppe am DKRZ übernimmt und heute Professor in Berlin ist. „Mit dem Vorgänger konnten wir bestenfalls zwei Jahre simulieren, mit „Cray 2S“ aber bis 100 Jahre in die Zukunft gehen.“ Allerdings dauern solche Rechnungen etwa ein halbes Jahr.

Erstes robotergesteuertes Silo speichert auf 6.000 Magnetbandkassetten bis zu 1 Terabyte Daten

E-Mail-Dienst wird eingeführt

DKRZ zählt bereits 34 Mitarbeiter

Erster Bericht übers Weltklima

Lässt sich der Treibhauseffekt schon nachweisen? Was bedeutet eine Klimaänderung für Wälder, Küsten oder Gletscher? Welche Folgen entstehen für die Landwirtschaft, Industrie und auch unsere Gesundheit? Wie können wir mit diesen Folgen umgehen – und sie vermeiden? In seinem rund 1.000 Seiten dicken Weltklimabericht fasst der Weltklimarat (IPCC) 1990 erstmals die Ergebnisse der internationalen Klimaforschung zusammen. Den deutschen Beitrag liefert unter anderem das Max-Planck-Institut für Meteorologie. Als einer der Leitautoren präsentiert Professor Ulrich Cubasch die Ergebnisse von Modellrechnungen am DKRZ.

Mit dem ersten Weltklimabericht beginnt eine neue Ära in der Klimaforschung. Wissenschaftler weltweit werfen ihre Daten in einen Topf, um ein Gesamtbild vom globalen Klimawandel und seinen Folgen zu bekommen. Das allerdings ist eine Herkulesaufgabe: Die Daten zu sammeln, auszuwerten und verständlich darzustellen, fordert große Datenarchive und enorme Rechenleistungen. Bei den Folgeberichten spielt das DKRZ aufgrund seiner technischen Voraussetzungen, Expertise und riesigen Datenspeicher daher eine zunehmend größere Rolle. Der IPCC-Bericht erscheint mittlerweile etwa alle sechs Jahre. Der Weltklimarat erhält 2007 den Friedensnobelpreis.

Rechner „Cray 2S“ bekommt mit „Cray YMP“ Unterstützung

Erste Simulationen eines kontinuierlichen Treibhausgasanstiegs mit gekoppeltem 3D-Atmosphäre-Ozean-Modell

Rund 60 deutsche Wissenschaftsorganisationen per Internet erreichbar

1991



Zum heutigen High Performance Storage System gehören sieben Bibliotheken mit insgesamt 65.000 Magnetbandkassetten.

Organisation Speicherbaum

Atmosphäre, Ozean oder Eis: Klimamodelle liefern Trilliarden Einzelwerte. Wie lassen sich solche Datenmassen organisieren? Gespeichert wird auf Magnetbändern – bisher allerdings muss sich jeder Nutzer merken, wie viele „seiner“ Bits in welchem Abschnitt auf welchem Band liegen. Das neue, hierarchisch aufgebaute Archivierungssystem UniTree, dessen Entwicklung das DKRZ mitgeprägt hat, schafft eine kleine Revolution: Um Daten dauerhaft zu archivieren, legen die Nutzer baumartig angeordnete Verzeichnisse und Unterverzeichnisse an, ähnlich Ordnern auf einem PC. Das Programm speichert sie dann auf Magnetbandkassetten. Roboterarme sortieren diese in einer Bibliothek ein und laden sie bei Bedarf zurück, alles automatisch und rund um die Uhr. Diese Archivorganisation erweist sich als zuverlässig und effektiv. Erst 2009 wird UniTree durch das modernere High Performance Storage System (HPSS) ersetzt, das fast so schnell speichert, wie die Daten entstehen: Das heutige System schafft bis zu 5 Gigabyte in der Sekunde.

Bundesforschungsminister
Dr. Heinz Riesenhuber
besucht das DKRZ

Alfred-Wegener-Institut
für Polar- und Meeres-
forschung wird vierter
DKRZ-Gesellschafter

Gründung der Abteilung
„Modellbetreuung“

Warum braucht die Klimaforschung ein eigenes Rechenzentrum?

„Ohne Spitzenrechner keine Spitzenforschung“

Kaum ein Forschungsbereich fordert die IT derart heraus wie die Klimaforschung. Warum ein fachspezifisches Rechenzentrum sinnvoll ist und welche Früchte es trägt – Fragen an Professor Klaus Hasselmann, den ersten Wissenschaftlichen Geschäftsführer des DKRZ.

Ein Rechenzentrum nur für die Klimaforschung – purer Luxus oder notwendig?

Damit wir die Detailfragen des Klimasystems lösen können, brauchen wir ganz spezielle Hard- und Software. Und wir brauchen hochspezialisierte Fachleute: Sie müssen sowohl die Technik beherrschen als auch die besonderen Anforderungen der Klimaforschung an Rechenleistung, Datenspeicherung und -verarbeitung umsetzen können.

Kann das nicht jedes Institut selbst leisten?

Nein, das funktioniert nicht. Zum einen muss Wissen zusammenfließen, damit wir komplexe Klimamodelle entwickeln können. Zum anderen erfordern diese wiederum enorme Rechnerleistungen. Je höher die Auflösung in den Modellen – also je genauer wir Prozesse abbilden wollen –, desto mehr Leistung muss ein Rechner haben. Einzelne Institute verfügen in der Regel nicht über die finanziellen Mittel für solche Hochleistungsrechner. Es ist also wissenschaftlich und wirtschaftlich sinnvoll, Expertise und Technik in einer zentralen Einrichtung zu bündeln, die dann alle Klimawissenschaftler nutzen können.

Um welche Summen geht es dabei?

Ein Großrechner kostet heute etwa 40 Millionen Euro. Das ist eine Menge Geld. Aber was kostet

es, wenn sich die Erde global betrachtet um 1 Grad Celsius erwärmt? Da erreichen wir deutlich höhere Größenordnungen.

Hat das DKRZ die hiesige Klimaforschung international konkurrenzfähig gemacht?

Gute Forschung gab es in Deutschland schon immer. Aber: ohne Spitzenrechner keine Spitzenforschung. Das DKRZ als fachspezifisches Rechenzentrum hat es ermöglicht, einige Meilensteine zu setzen – etwa erstmals nachzuweisen, dass die globale Erwärmung mit 95-prozentiger Wahrscheinlichkeit vor allem eine Folge zunehmender Treibhausgasemissionen ist. Heute mischt Deutschland in der Klimaforschung ganz vorn mit.

Und dadurch auch in der internationalen Klimapolitik?

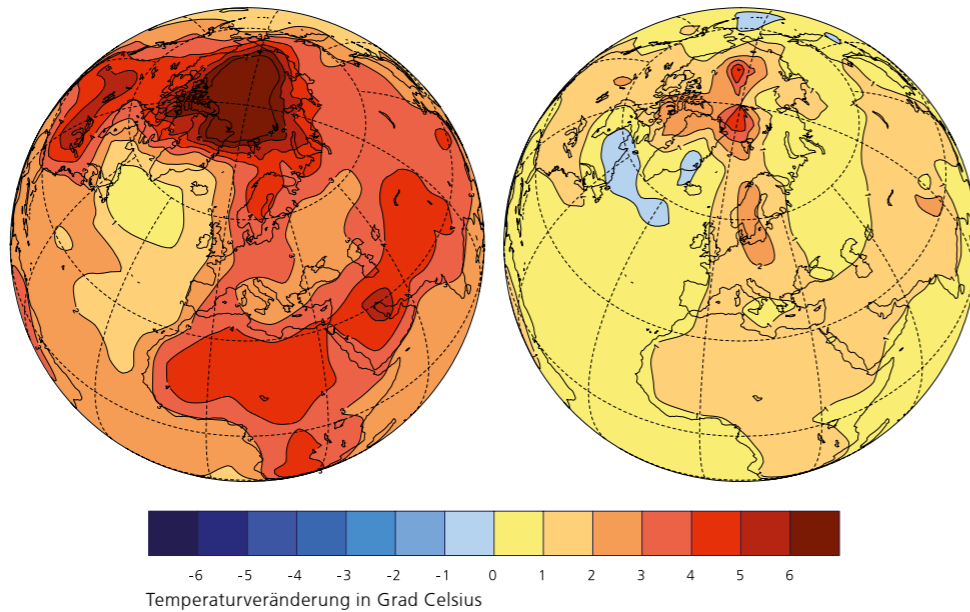
Unsere Forschung spielt dabei sicher eine Rolle. Deutschland ist verhältnismäßig aufgeklärt. Und wir können unser grünes Bewusstsein und die Forderung nach einer Energiewende eben auch mit Ergebnissen aus der eigenen Forschung untermauern. Das erhöht unsere Glaubwürdigkeit.



Professor Klaus Hasselmann, Wissenschaftlicher Geschäftsführer des DKRZ von 1987 bis 2000, Direktor des Max-Planck-Instituts für Meteorologie von 1975 bis 1999

Verschenkte Zeit

Für den Erdgipfel in Rio hat das DKRZ die Daten aus den Hamburger Szenarienrechnungen visualisiert. Schon 1992 ist klar: Weitere massive Treibhausgasemissionen erwärmen bis 2080 den ganzen Globus (linke Erdkugel). Mit deutlich weniger CO₂ in der Atmosphäre ließe sich die Erderwärmung aber teilweise aufhalten oder zumindest verlangsamen (rechte Erdkugel). Doch Taten folgen erst heute – und zaghaf.



Temperaturveränderung in Grad Celsius

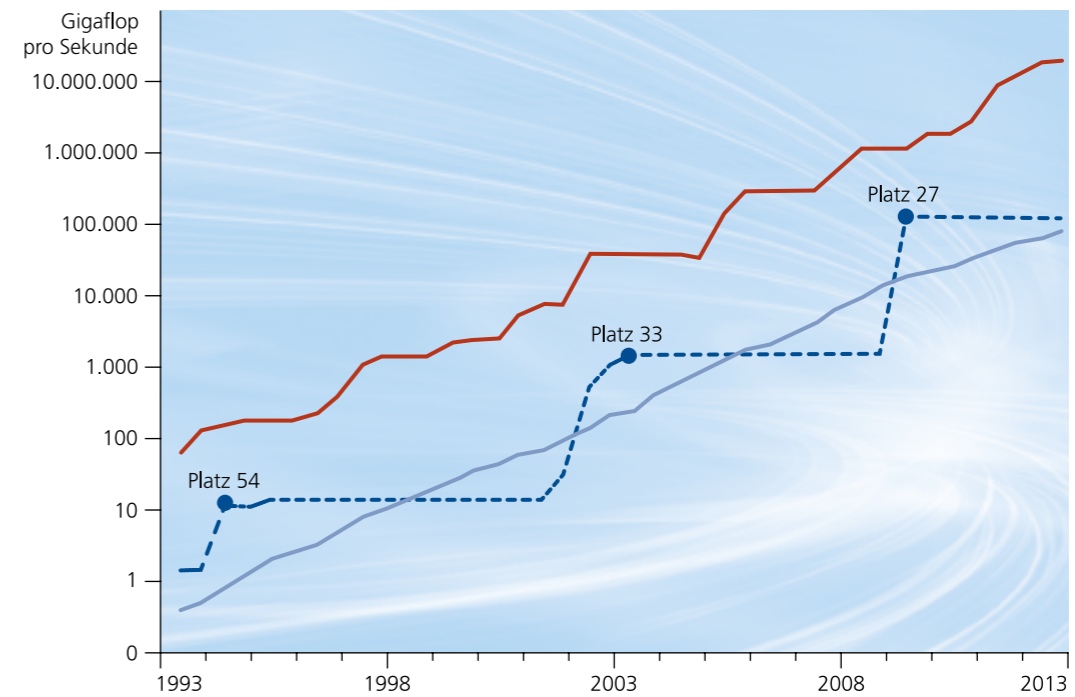
Geballte Datenwucht

Mit dem ersten Weltklimabericht von 1990 hat der Weltklimarat nicht sein ganzes Pulver verschossen. In seinem Auftrag analysieren die beteiligten und weitere Forschungsgruppen mehr Daten und rechnen mit verschiedenen Modellen nochmals verschiedene Szenarien. Wie wirken sich künftige Wirtschaftsentwicklungen auf das Klima aus? Wie schnell würden die CO₂-Emissionen unter welchen Bedingungen steigen? Auch das Max-Planck-Institut für Meteorologie führt am DKRZ neue Klimasimulationen mit einem kontinuierlichen Anstieg der CO₂-Emissionen durch. Mehr eine technische, als eine wissenschaftliche Aufgabe, die aber ziemlich wichtig ist: für den Erdgipfel 1992 in Rio. Der Weltklimarat erhärtet mit den dort in seinen Zusatzberichten vorgestellten Ergebnissen die These vom menschengemachten Klimawandel – auch wenn dieser Zusammenhang erst drei Jahre später nachgewiesen wird. Das wirkt: Die Politik formuliert in Rio erstmals die Absicht, das Klima zu schützen, und verabschiedet die Klimarahmenkonvention.

Max-Planck-Institut für Meteorologie und DKRZ produzieren Videofilm „Das Klima der nächsten 100 Jahre“

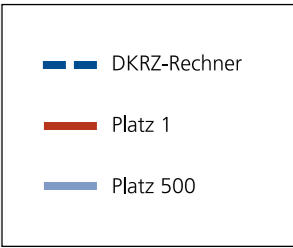
Zweites robotergesteuertes Datensilo verdoppelt die Speicherkapazität

DKRZ-Mannschaft wächst auf 48 Mitarbeiter



Rasant aufwärts

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



Die 500 schnellsten der Welt

Im 100-Meter-Lauf ist es ganz einfach: Wer am schnellsten läuft, gewinnt. Auch die schnellsten Computer der Welt sprinten um die Wette: Wer am schnellsten rechnet, siegt. „Kampfrichter“ ist LINPACK. Das Programm misst, wie viele Rechenschritte ein Rechner pro Sekunde erledigt. Seit 1993 werden damit die weltweit schnellsten Computer ermittelt und in einer Top500-Liste veröffentlicht (www.top500.org). Der fünf Jahre alte DKRZ-Rechner „Cray 2S“ erreicht in der ersten Liste im selben Jahr einen respektablen 187. Platz. Seine Rechengeschwindigkeit von 1,4 Gigaflops – das sind 1,4 Milliarden Einzelberechnungen in einer Sekunde – entspricht der Leistung heutiger Notebooks.

Für das DKRZ eignen sich allerdings Vergleichsmessungen mit Klimamodellen besser, da sie ganz andere Anforderungen an Computer stellen als LINPACK – im Sport kann man sich auch nicht mit einer guten 100-Meter-Zeit für den 10-Kilometer-Lauf qualifizieren.

Hamburger Hochgeschwindigkeits-Rechnernetz verbindet Wissenschaftseinrichtungen in und um Hamburg mit 100 Mbps

Arbeit an einer Klimadatenbank startet mit Workshop

DKRZ-Archiv speichert 1 Terabyte Modellergebnisse



Fliegender Wechsel: Per Kran räumt „Cray 25“ (links) das Feld für seinen Nachfolger „Cray C916“ (rechts).

Über den Dächern von Hamburg

Was ist das? Rechnet praktisch am schnellsten in Deutschland, wiegt 12 Tonnen und schwebt 65 Meter hoch? Am 11. Mai 1994 gibt es bei diesem Fragespiel eine klare Antwort: „Cray C916“. Der neue Supercomputer für das DKRZ ist eine kompakte Einheit: eine mannshohe Säule mit Seitenflügeln. Zwar lassen sich die Flügel abbauen, doch Säule und Flügel allein sind jeweils zu groß und zu schwer für jeden Fahrstuhl – genau wie der Vorgänger „Cray 25“.

Wie kommt der eine in den 15. Stock hoch und der andere hinunter? „Fenster ausbauen, Kran her und im Fußboden dicke Träger verlegen. So wird die Last verteilt, damit das Ding nicht nach unten durchbricht und wieder im Erdgeschoss landet“, fasst Wolfgang Sell, damals Technisch-administrativer Geschäftsführer des DKRZ, zusammen. Der neue Rechner schafft 12 Gigaflops, enorm zu dieser Zeit. Doch der Rechenhunger der Klimawissenschaftler ist riesig – nur drei Wochen später ist das neue System voll ausgelastet. Acht Monate nach Installation wird es um vier Prozessoren auf 16 Gigaflops aufgerüstet und ist nun achtmal so schnell wie sein Vorgänger.

DKRZ geht mit erster Webseite online

Datenbank CERA dokumentiert erste Klimadaten

„Cray T3D“ als erster Parallelrechner installiert – viele Rechenoperationen können auf mehreren Hauptprozessoren gleichzeitig ablaufen

Was zu beweisen war

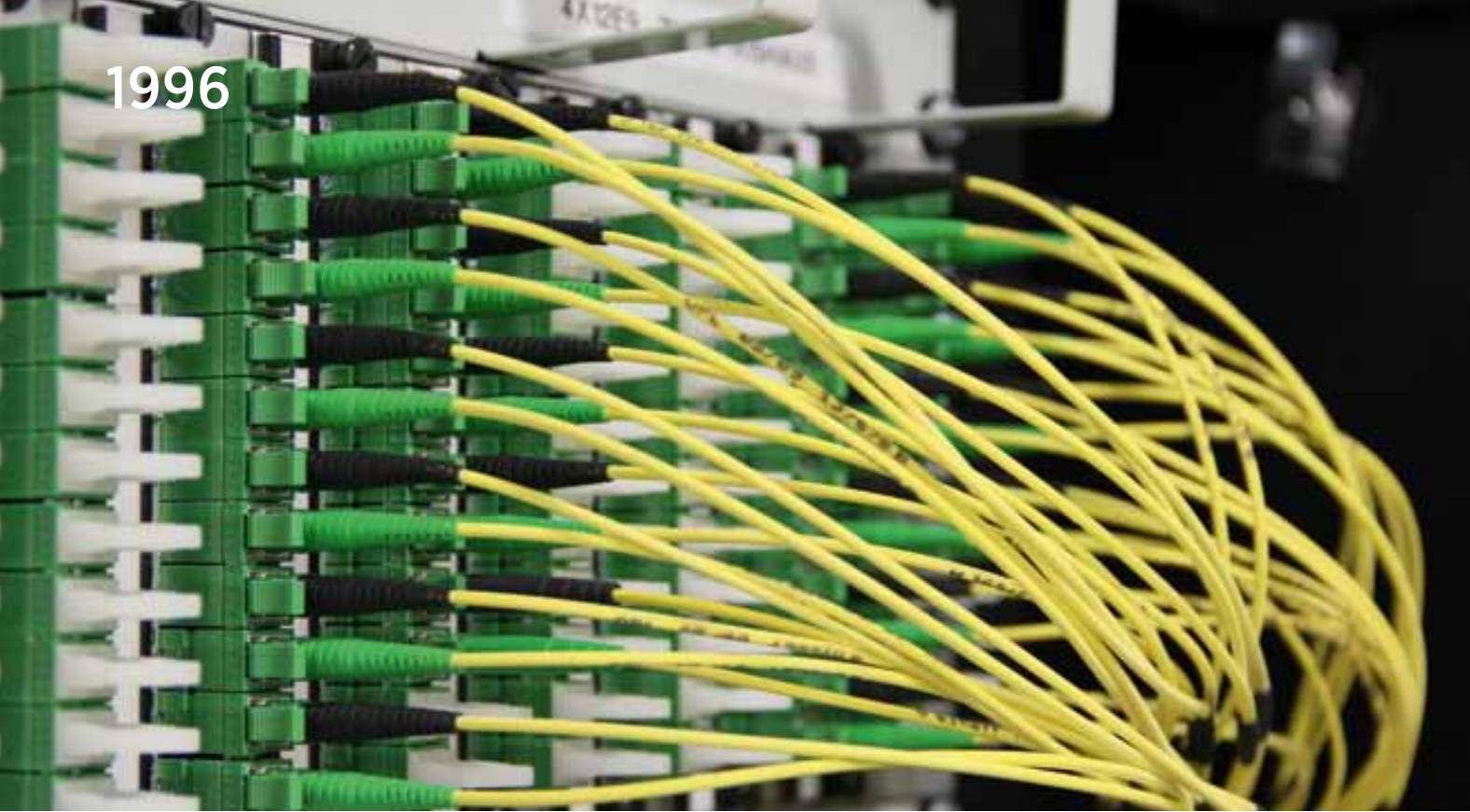
Seit der industriellen Revolution schickt die Menschheit vermehrt Treibhausgase in die Atmosphäre. Die globale mittlere Temperatur ist seither um 0,7 Grad Celsius gestiegen – eine Laune der Natur, sagen Skeptiker. Wie lässt sich nun der Effekt von Treibhausgasemissionen von natürlichen Klimaschwankungen unterscheiden? Dank des stärkeren DKRZ-Rechners starten Wissenschaftler vom Max-Planck-Institut für Meteorologie neue Rechnungen mit höher auflösenden gekoppelten Atmosphäre-Ozean-Modellen. Zudem simulieren sie das globale Klima über mehrere Hundert Jahre und gleichen ihre Modelldaten mit Beobachtungen ab, etwa mit den Klimadaten aus den Jahresringen von Bäumen. Gleich der Identifizierung eines Fingerabdrucks gelingt es ihnen schließlich, das „Klimasignal“ der Treibhausgase aus dem „Rauschen“ natürlicher Schwankungen herauszufiltern. So weisen Hamburger Klimaforscher 1995 erstmals nach, dass die globale Erwärmung sehr wahrscheinlich menschengemacht ist. Ein Paukenschlag in der Klimaforschung.

DKRZ berät seine Nutzer jetzt auch online

Deutscher Wirtschaftsfilmpreis für „Klimasimulationen – Vorhersage des globalen Wandels“

Weltklimarat veröffentlicht zweiten Bericht

1996



Der Draht zur Welt

In den ersten Jahren des Klimarechenzentrums müssen Wissenschaftler vor Ort sein, um die Rechner nutzen zu können: Die Daten werden meistens noch auf Magnetbändern übergeben. Das ist langwierig und umständlich. Doch das DKRZ arbeitet daran, eine breitbandige Verbindung zum sich entwickelnden Internet herzustellen. Der Anschluss an das neue deutsche Breitband-Wissenschaftsnetz im Jahr 1996 ist ein Meilenstein: Die Übertragungsleistung steigt um das Zehnfache auf 20 Megabit pro Sekunde – vergleichbar mit einem heutigen DSL-Anschluss in der Wohnung.

Inzwischen ist die Bandbreite auf mehrere Tausend Megabit pro Sekunde gestiegen. Auch Forscher am anderen Ende des Landes können einfach von ihren Büros aus Klimasimulationen durchführen sowie die Ergebnisse analysieren und visualisieren. Für die Übertragung der gesamten berechneten Daten reicht es allerdings nicht, da sie schneller produziert als übertragen werden.

„SGI Onyx 2 IR“ für interaktive 3D-Visualisierung installiert

Weltklimarat empfiehlt Gründung eines Welt Datenzentrums für Klimaergebnisse

DKRZ-Archiv wächst jeden Monat um 500 Gigabyte

Was geschieht, wenn in Grönland das Eis schmilzt?



Der Fluch der Auflösung

Mithilfe von Modellen simulieren Wissenschaftler das Klimageschehen. Wie gut ihnen das gelingt, ist auch eine Frage der Rechnerleistung. Was ist heute machbar – und was noch nicht?

Im Sommer 2012 ist Grönlands Eispanzer so stark geschmolzen wie niemals zuvor beobachtet. Wenn die globale Erwärmung das Tauen weiter verstärkt, steigt der Meeresspiegel – nur nicht überall gleich. Möglicherweise bringt das Schmelzwasser zudem die Strömungen im Nordatlantik durcheinander, vielleicht aber auch nicht oder kaum. Ganz genau weiß das noch niemand, denn das Klimasystem funktioniert nicht nach einer einfachen Wenn-Dann-Formel – es ist sehr komplex.

Klimaforscher arbeiten mit Modellen, die die Erde in Gitterboxen einteilen. Für jede Box wird der Verlauf verschiedener Klimagrößen berechnet. Je kleiner der Gitterabstand, desto höher die Auflösung und desto mehr Details lassen sich untersuchen. Manche Prozesse wie das Abschmelzen von Eisschilden müssen

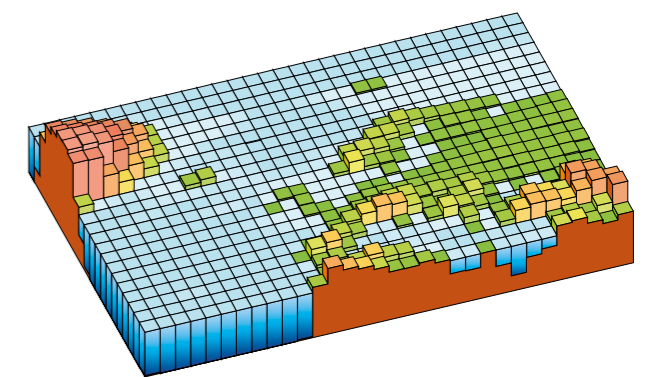
über Jahrtausende simuliert werden, um eine genauere Vorstellung davon zu bekommen. Außerdem wiederholen die Forscher in sogenannten Ensembles die Simulationen mit leicht veränderten Startwerten. „Das Klima ist im mathematischen Sinne chaotisch: Winzige Änderungen können später große Wirkung entfalten“, sagt Professor Jochem Marotzke, Direktor am Max-Planck-Institut für Meteorologie (MPI-M) in Hamburg.

Doch was ein Klimamodell letztlich an Ergebnissen erzielen kann, hängt von der Rechnerleistung ab. Der Weltklimabericht von 2007 basiert auf Simulationen mit globalen Modellen, die einen Gitterabstand von etwa 200 Kilometern haben. Mit den Rechnungen der deutschen Klimaforscher war ein Viertel des DKRZ-Rechners mehr als zwei Jahre beschäftigt.

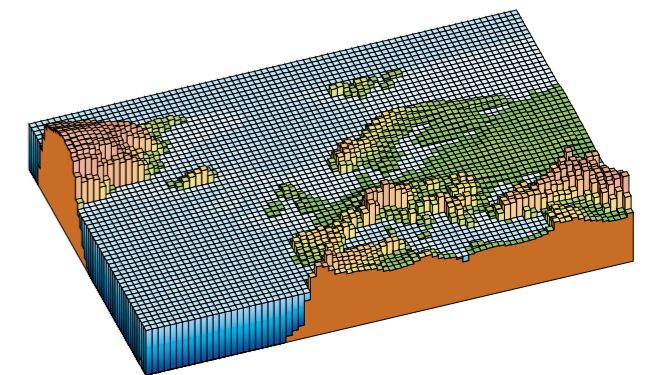
Größere Ensembles, aber besonders höhere Auflösungen fordern sogar ein Vielfaches der Leistung heutiger Supercomputer. „Unser jetziges Klimamodell“, erläutert Marotzke, „hat im Ozean eine Auflösung von 40 Kilometern. Wenn wir diese auf 10 Kilometer erhöhen, also vervierfachen wollen, muss ein Rechner das 64-Fache leisten.“ Das müsste man mindestens erreichen, wenn man wissen will, was das schmelzende Grönlandeis zukünftig anrichten könnte. Im Gegensatz zu großräumigen Prozessen lassen sich kleinräumige Vorgänge wie der Schmelzwassereintrag in den Ostgrönlandstrom, Wirbelstürme oder Wolkenbildung bislang kaum in Modellen des Erdsystems simulieren. Marotzke weiß: „Auch die nächste Rechnergeneration wird uns noch Grenzen setzen.“

Die Klimamodellierer des MPI-M arbeiten eng mit den Experten des DKRZ zusammen. Auch wegen des umfassenden Datenservices und der Fachberatung: „Mit manchen Daten arbeiten wir fünf Jahre, solange müssen wir ständig darauf zugreifen können“, sagt Marotzke. Die DKRZ-Experten unterstützen außerdem die Optimierung der Modelle, damit keine Rechnerleistung verschwendet wird – sie könnte für die Auflösung wichtig sein.

Details im Visier
Je kleiner der Gitterabstand in einem Modell ist, desto höher ist die Auflösung und desto mehr Einzelheiten lassen sich erkennen.



Gitterabstand 250 Kilometer



Gitterabstand 100 Kilometer



DKRZ unterstützt
Gründung des Hamburger
Bildungsservers

Besuch von
Bundesumweltministerin
Dr. Angela Merkel

Ausstellung „Arktis –
Antarktis“ in der Bundes-
kunsthalle in Bonn – DKRZ
mit Visualisierungen dabei

Spezielle Daten für jeden

Hydrologen wollen wissen, wo es häufig zu Überschwemmungen kommt. Geografen interessieren sich für das Klima in bestimmten Regionen und Küstenplaner müssen entscheiden, wie hoch die Deiche werden sollen. Gerade für die Klimafolgenforschung sind die Daten aus den riesigen Modellrechnungen sehr wertvoll – nur nicht alle für jeden. Zudem müssen die Nutzer die Zahlen verstehen und wissen, was man damit machen kann und was nicht.

Der Weltklimarat (IPCC) will die Zusammenarbeit in der Wissenschaft fördern und empfiehlt 1996, ein Datenzentrum aufzubauen. Das ist 1997 beschlossene Sache: Das DKRZ und die britische Climate Research Unit richten das virtuelle Data Distribution Centre (DDC) ein. Sie sammeln und beschreiben die wichtigsten Klimadaten aus den laufenden Modellrechnungen der IPCC-Szenarien und stellen sie bereit. Jeder kann online Daten auswählen und herunterladen. Die Modellbetreuungsgruppe des DKRZ berät die Nutzer bei der Interpretation und Anwendung der Daten, damit sie die richtigen Schlüsse ziehen können. Ab 2003 beteiligt sich das Center for International Earth Science Information Network in den USA am DDC, 2007 übergibt die Climate Research Unit den Stab an das British Atmospheric Data Centre.



Schneller Zugriff: Die wichtigsten Daten liegen auf den Festplatten des Datenmanagement-Servers.

Gesucht – und schon gefunden

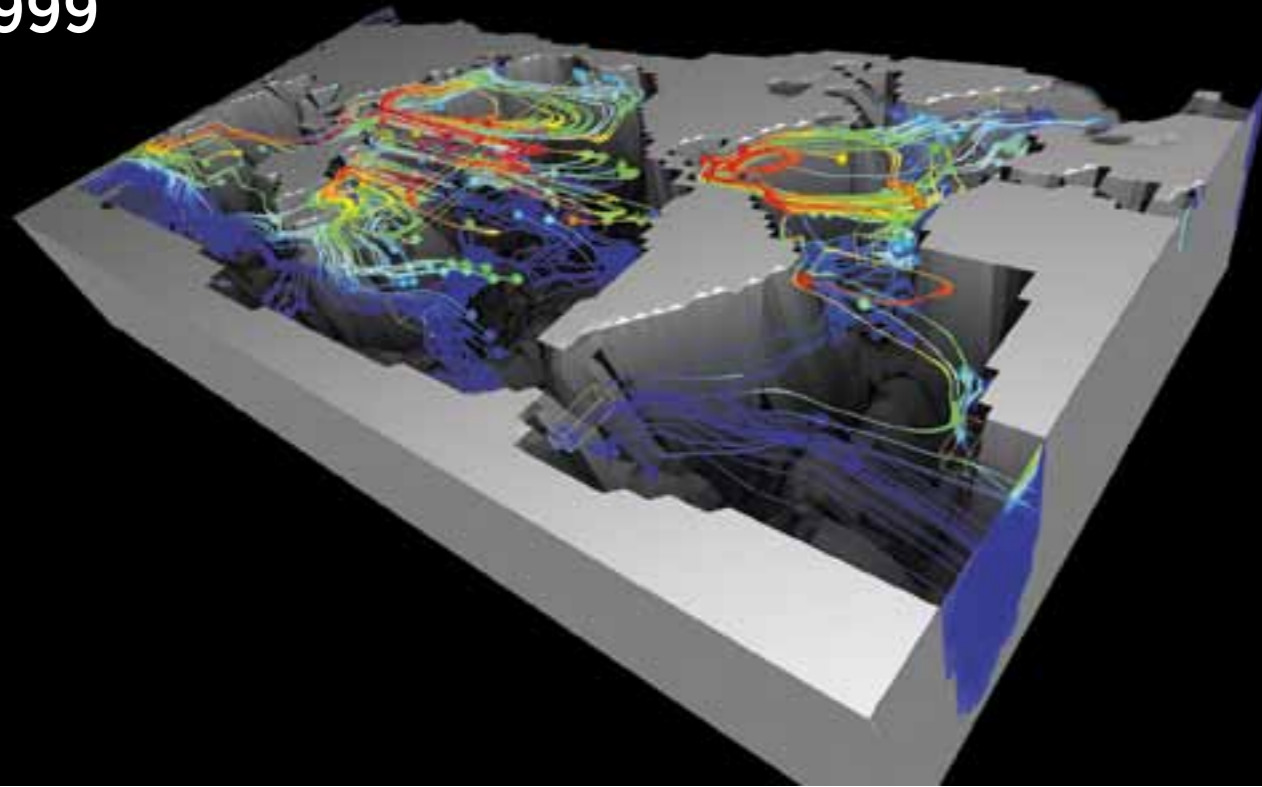
Suche die mittleren monatlichen Niederschläge von 2010 bis 2015 aus allen Rechnungen mit einem bestimmten Klimamodell – dafür braucht man Anfang der 1990er-Jahre einen langen Atem. Schließlich liegen diese Zahlen unter Zigmillionen anderen Zahlen auf Magnetbändern. Es ist klar: Das DKRZ braucht eine Klimadatenbank. Doch die schier unendliche Datenmasse treibt sogar etablierten IT-Unternehmen den Schweiß auf die Stirn. Selbst in Banken und Versicherungen sind ihnen solche Mengen noch nicht begegnet. Zusammen mit der Firma Oracle entwickelt das DKRZ ein neues System. Der erste Datensatz zieht 1994 in die Datenbank CERA ein: eine Simulation mit dem Klimamodell ECHAM mit 2,8 Megabyte. Schon 1998 erreicht CERA eine Größe von 1 Terabyte – mehr als 350.000-mal so viel. Die Datenbank funktioniert wie ein Filter. In eine Suchmaske geben die Wissenschaftler die gesuchten Klimagrößen und Rahmenbedingungen wie Zeitintervalle und Auflösung des Klimamodells ein. Dann können sie sich die passenden Dateien herunterladen. Hinterlegt sind vor allem die Klassiker, also häufig abgefragte Daten wie mittlere Niederschlagsmenge und Temperatur. Die Datenbank beherbergt auch das IPCC Data Distribution Center. Bis Ende 2012 wächst CERA auf 650 Terabyte.

DKRZ mit neuem
Online-Auftritt

Datenserver
„SUN ES 6000“ löst
„Convex C3840“ ab

Erste Pläne für
Umstrukturierung
werden diskutiert

1999



Die unendliche Reise von Wasser im Ozean: Eine Visualisierung basierend auf Daten des Ozeanmodells OPYC zeigt, welche Bahnen das Wasser im großen Becken zieht. Kaltes Tiefenwasser ist blau dargestellt, warmes Oberflächenwasser rot (GEO-Buch „Die unendliche Reise“).

Die unendliche Reise

Ein Bild sagt mehr als Tausend Worte. Dieses Sprichwort gilt auch in der Wissenschaft: etwa wenn es darum geht, Zahlenkolonnen zu analysieren, Trends zu erkennen oder die räumliche Verteilung von Daten zu erfassen. Das menschliche Gehirn kann Visualisierungen, also bildliche Darstellungen von Daten, schneller begreifen als nackte Zahlen.

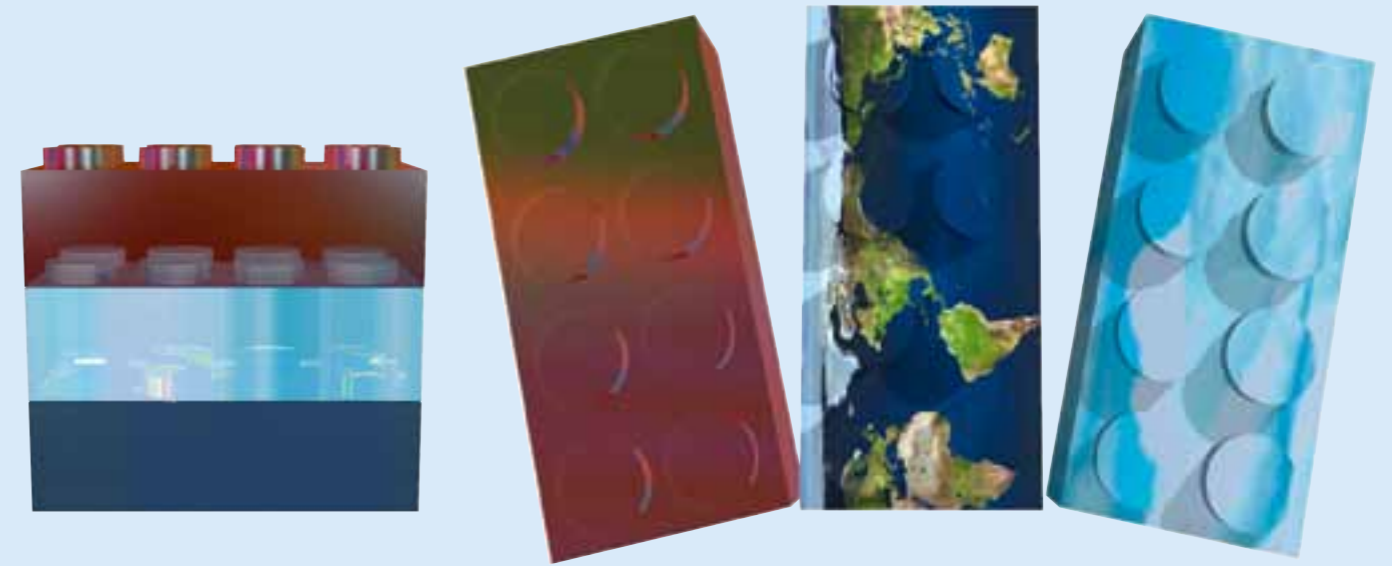
Wissenschaftler visualisieren Forschungsdaten, um Wissen zu erlangen. Auch bei der Kommunikation von Klimawissen in die Öffentlichkeit hinein sind Visualisierungen sehr hilfreich, machen sie doch komplexe Zusammenhänge sichtbar und verständlich. Daher finden Visualisierungen aus dem DKRZ schnell den Weg in die Medien. In Zeitungen, Magazinen, Büchern und im Fernsehen illustrieren sie Berichte über neue Ergebnisse aus der Klimaforschung. Im Jahr 1999 erscheint das GEO-Buch „Die unendliche Reise“. Es präsentiert „die Highlights der Wissenschaftsfotografie aus GEO“, darunter auch Visualisierungen vom DKRZ.

Film „Klimaänderung – Nachhaltige Strategien“ produziert

Professor Klaus Hasselmann wird emeritiert

IT-Welt hält den Atem an – Trifft uns das Jahr-2000-Problem?

2000



Prinzip Baukasten

Mittlerweile unterstützt die Modellbetreuungsgruppe des DKRZ Hunderte von Klimaforschern. Ab 2000 jedoch unter einem anderen Dach: Das Bundesministerium für Bildung und Forschung beteiligt sich nicht mehr an den Betriebskosten des Rechenzentrums, nimmt aber dafür „Modelle & Daten“, wie die Arbeitsgruppe nun heißt, unter seine Fittiche und finanziert deren Arbeit für zehn Jahre. Angesiedelt am Max-Planck-Institut für Meteorologie arbeitet die Gruppe daran, die Anwendung von Klimamodellen zu vereinfachen und den Datenfluss effizienter zu gestalten. Auch europaweit: Im großen EU-Projekt PRISM entwickelt „Modelle & Daten“ gemeinsam mit dem DKRZ Standards für die Durchführung von Simulationen und die Speicherung der dabei entstehenden Daten.

Zudem werden die Bedienung der Modelle und die Schnittstellen zwischen einzelnen Modulen vereinheitlicht. So können sich Klimaforscher in ganz Europa aus Modellkomponenten ein für ihre Fragestellung maßgeschneidertes gekoppeltes Modell bauen. Vereinfacht gesagt: Wie nach einer Lego-Bauanleitung lassen sich etwa Atmosphärenmodul A, Ozeanmodul B und Komponente F für Eis einfach zusammenstecken.

Neuer Wissenschaftlicher Direktor: Professor Guy Brasseur löst Professor Klaus Hasselmann ab

Pro Monat fast 800 Downloads aus CERA-Datenbank

Wissenschaftlicher Lenkungsausschuss gegründet



Professor Guy Brasseur, Professor Hartmut Graßl und Bundesforschungsministerin Edelgard Bulmahn (v. l.) weihen im Juni 2004 das neue Zentrum für Marine und Atmosphärische Wissenschaften in Hamburg ein.

Ende einer Zitterpartie

Es ist ganz einfach: Ein alter Rechner heißt weniger Leistung, weniger Experimente und damit auch weniger Spitzenforschung. Im Jahr 1998 rutscht der vierjährige DKRZ-Rechner aus den Top500 der weltweit schnellsten Supercomputer. Und hat die Konkurrenz den Rechner erst einmal abgehängt, dann dauert es nicht lange, bis auch die deutsche Klimaforschung international hinterherhinkt. Nach fünf Jahren hat ein Rechner eigentlich ausgedient. Doch „Cray C916“ muss auch nach 1999 weiterächzen, denn Geld für einen Nachfolger ist nicht in Sicht. Für das DKRZ und das Max-Planck-Institut für Meteorologie ein Schlag ins Kontor.

Monatelang verhandelt Professor Guy Brasseur – ab 2000 Wissenschaftlicher Geschäftsführer des DKRZ – hartnäckig mit dem Bundesministerium für Bildung und Forschung. Am Ende steht eine Finanzierung für zwei weitere Rechnergenerationen. Ab 2001 ist die Durststrecke endlich überwunden: Seit Oktober rechnet sich ein Übergangcomputer mit immerhin doppelter Leistung wieder näher an die Konkurrenz heran und ab 2002 wird ein neuer Superrechner aufgebaut.

Dritter Weltklimabericht erscheint – Szenarien dafür am DKRZ gerechnet

Datenbank CERA jetzt webbasiert

Aus Büros werden Rechnerräume für Supercomputer „Hurrikan“

Was nutzen die Daten aus der Klimaforschung?

Heute klimabewusst, morgen klimaneutral

Wetterextreme, steigender Meeresspiegel, Verlust von Lebensräumen: Der Klimawandel ist nicht nur Sache der Wissenschaft, er betrifft uns alle weltweit. Welche Bedeutung haben Erkenntnisse aus der Forschung für Gesellschaft, Wirtschaft und Politik und was bewirken sie?

Hamburgs Deich soll erhöht werden: Der Senat der Hansestadt beschließt 2012, den Bemessungswasserstand – den höchsten zu erwartenden Wasserstand bei Sturmflut – um 80 Zentimeter anzuheben. Nur ein Beispiel, mit dem Klimawandel umzugehen. „Wir werden künftig anders leben müssen“, sagt Professor Guy Brasseur, Direktor des Climate Service Centers (CSC) und ehemaliger Wissenschaftlicher Direktor des DKRZ. „Die Gesellschaften von morgen müssen Klimagesellschaften sein.“

Ideen und Erkenntnisse aus der Forschung weisen Wege, wie wir einer sich ändernden

Umwelt technologisch begegnen können. Wirtschaft und Politik müssen dann aushandeln, welche Maßnahmen sich finanziell umsetzen lassen und welche wir als Gesellschaft tragen wollen. Umso wichtiger ist es, breit zu informieren.

Vieles ist schon erreicht. Menschen und Medien reden über das Klima und die möglichen Folgen von dessen Wandel: für die Landwirtschaft, weil sich Wetterextreme häufen könnten; für das Gesundheitswesen, da sich Krankheitserreger in neue Regionen ausbreiten; oder für den Tourismus, weil in Berggebieten Schnee und damit Skipisten wegschmelzen.

Vor allem die kommenden Generationen werden dies spüren. „Wir werden den Blick auf Jahrhunderte ausweiten müssen“, sagt Professor Hartmut Graßl, ehemaliger Direktor am Max-Planck-Institut für Meteorologie und einer der geistigen Väter des DKRZ. „Wir müssen jetzt Entscheidungen treffen und Politik ändern. Doch erst unsere Enkel und Urenkel werden sagen können, wie viel Wirkung es hatte.“

Milliarden auszugeben, obwohl der Erfolg nicht sicher ist – das ist eine Herausforderung für die Industrienationen, die zudem Entwicklungsländern Vorbild sein sollen. „Wir müssen

vermitteln, dass unser Weg des Öls und der Kohle zwar eine rasante Industrialisierung ermöglicht, aber auch große Schwächen hat“, so Brasseur. Zukunft hat nur, was wirtschaftlich tragfähig und umweltbezogen nachhaltig ist.

Wie der Ausbau des Hamburger Deichs. Zwar wurde er in der Vergangenheit mehrfach aufgestockt, doch dieses Mal ist etwas neu: Bisher wurde auf Flutkatastrophen reagiert, nun wird vorgebeugt – allein auf Basis wissenschaftlicher Voraussagen.



Techniker der Firma NEC montieren den neuen Hochleistungsrechner.



Frischer Wind mit „Hurrikan“

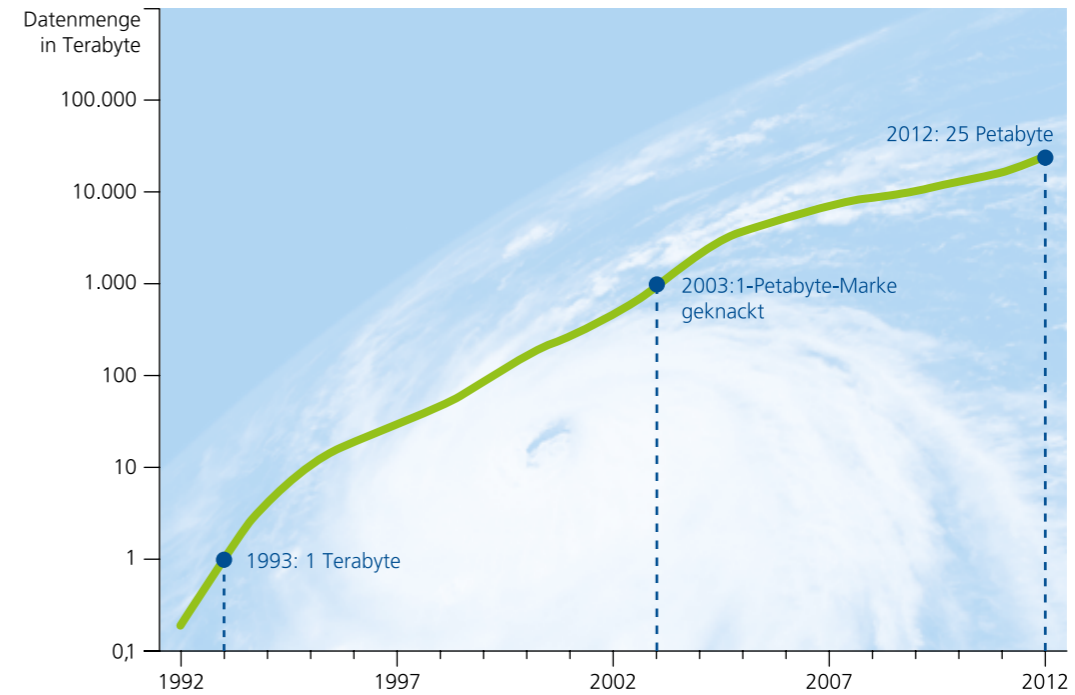
Knapp 35 Millionen Euro investiert das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) in das neue Rechnersystem. Im März 2002 beginnt der Aufbau von „NEC SX-6“, wie der neue Höchstleistungsrechner für Erdsystemforschung technisch heißt. Auf den Namen „Hurrikan“ getauft bringt er frischen Wind mit: Schon die erste Ausbaustufe katapultiert das DKRZ nach vier Jahren wieder unter die Top500 der weltweit führenden Rechenzentren.

Am 10. September 2002 wird Hurrikan feierlich eingeweiht. Das Elbehochwasser zeige die „dringende Notwendigkeit der Erforschung seiner klimatischen Bedingungen“, sagt Staatssekretär Uwe Thomas vom BMBF aus aktuellem Anlass. Hurrikan verbessert deutlich die Auflösung der Klimamodelle. „Bislang konnten wir globale Simulationen mit einer Auflösung von ungefähr 300 Kilometern durchführen, jetzt können wir 100 Kilometer erreichen“, sagt der langjährige DKRZ-Nutzer Mojib Latif vom Max-Planck-Institut für Meteorologie, heute Professor in Kiel. Nur Klimaforscher in Japan haben's besser: Ihr Erdsimulator schafft eine Auflösung von 10 Kilometern.

Newsletter „TerraFLOPS“ von „Modelle & Daten“ und DKRZ erscheint

Nutzerkomitee gegründet – Dr. Bernadette Fritsch vom Alfred-Wegener-Institut ist Sprecherin

Relaunch der DKRZ-Webseite



Aus Tera wird Peta
Von 1993 bis 2012 vergrößert sich die Datenmenge im DKRZ-Archiv nahezu explosionsartig auf das 25.000-Fache: von 1 Terabyte auf 25 Petabyte.

Unter Giganten

So groß wie 24 Telefonzellen, insgesamt 192 Prozessoren, mit einer Spitzenleistung von mehr als 1.500 Milliarden Rechenschritten pro Sekunde – der fertig ausgebaute Rechner „Hurrikan“ kann sich sehen lassen. Seit April 2003 nutzen die Forscher nun einen Supercomputer mit der 100-fachen Leistungsstärke seines Vorgängers „Cray C916“. Hurrikan speichert außerdem 100 Terabyte Daten – etwa 2.000-mal so viel wie ein normaler PC. Aber das reicht nicht: Nach zwei Wochen Klimasimulationen wären die Festplatten voll. Also werden die Daten auf Magnetbandkassetten in die „StorageTek“-Datensilos ausgelagert. Hier ist Platz für 6 Petabyte, also 6.000 Terabyte.

Je größer der Rechner, desto mehr Daten entstehen. Während in den ersten sechs Jahren DKRZ-Betrieb 1 Terabyte Klimadaten berechnet werden, kommen allein 1996 mehr als 10 Terabyte dazu. Ende 2003 ist die 1-Petabyte-Marke geknackt. Zum Vergleich: Das entspricht einer Datenmenge von etwa 120.000 DVDs. Umgerechnet in Spielfilme heißt das: mindestens 40 Jahre pausenlos Filme gucken. Bis 2012 steigt das Volumen auf fast 25 Petabyte.

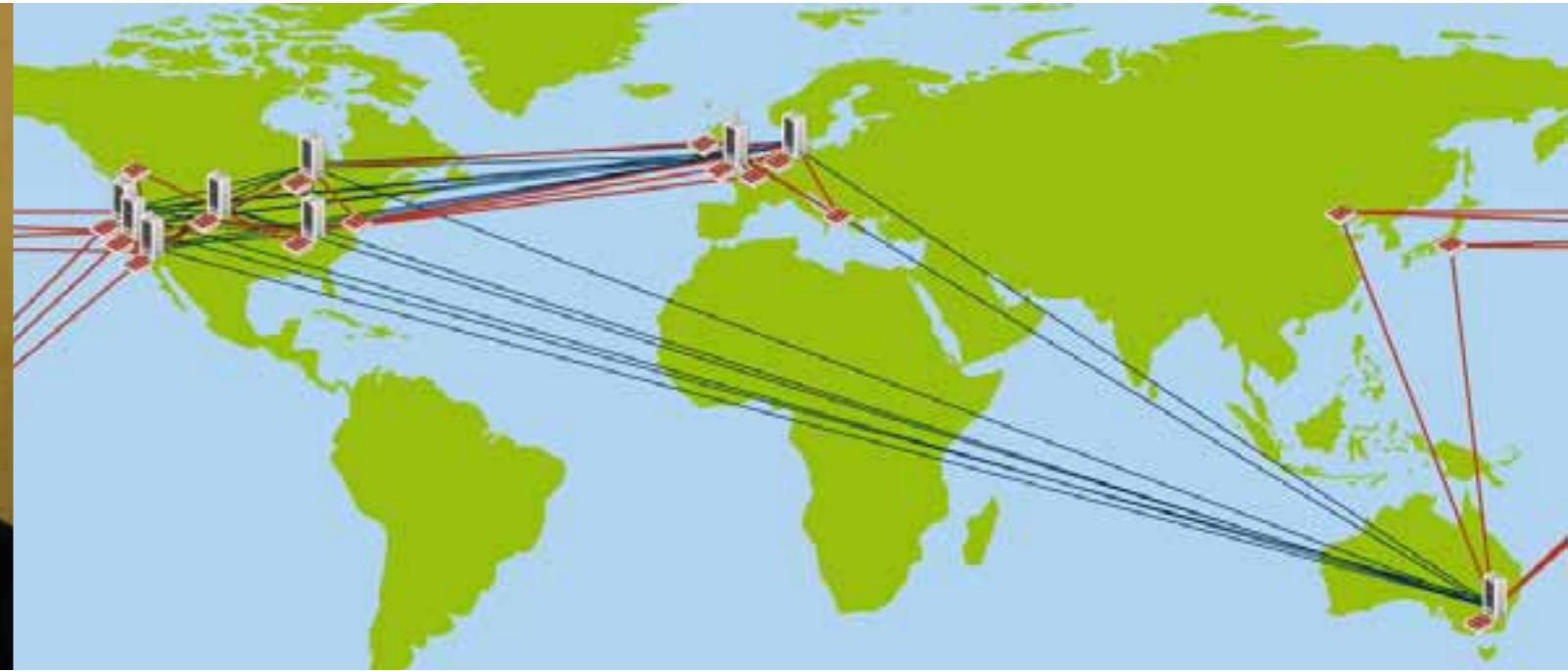
„Modelle & Daten“ ist Mitorganisator der Internationalen Klimakonferenz für Erdsystemmodellierung

Weltdatenzentrum für Klimadaten gegründet

Rechnungen für vierten Weltklimabericht beginnen



Fast zwei Jahrzehnte steht Wolfgang Sell als Technisch-administrativer Geschäftsführer an der Spitze des DKRZ.



Der Mann für den Boxenstopp

„Du wirst nicht ruhen, bis du den größten Rechner Deutschlands hast, meinte einmal ein Studienkollege“, sagt Wolfgang Sell und lacht. Das Interesse des Physikers gilt der numerischen Simulation – und sein Kumpan behält recht. Anfang der 1990er-Jahre ist das DKRZ bundesweit das leistungsfähigste wissenschaftliche Rechenzentrum und Wolfgang Sell dessen erster Technisch-administrativer Geschäftsführer. Von der Rolle des Instituts hat er eine feste Vorstellung. „Das ist wie bei der Formel 1: Es gibt Fahrer, das sind die Wissenschaftler. Und es gibt Techniker, die stehen in der Box und sorgen dafür, dass der Wagen auch wirklich schnell fährt. Das sind wir.“ Sell lenkt diese Geschicke mit der Kunst der Balance: Rechnerpreise etwa verhandelt er so, dass das DKRZ profitiert, aber Lieferfirmen nicht abspringen. Bewusst teilt er Gelder auf zwischen Investitionen in Rechenleistung und in Leistung als Datenarchiv. Nach 17 Jahren verlässt der Boxen-Chef der Klimamodellierung Ende 2004 das DKRZ für den Vorruhestand – das Institut ist jetzt technisch-strukturell gerüstet für die Zukunft. Rennen gelungen.

Datenbank CERA umfasst mittlerweile 100 Terabyte

Klimamodell bekommt Zuwachs – neu ist ein hydrologisches Landmodell

Neuer Visualisierungsrechner „SGI Prism“ bringt mehr Grafikleistung für höher aufgelöste Modelle

Das Netz ist der Computer?

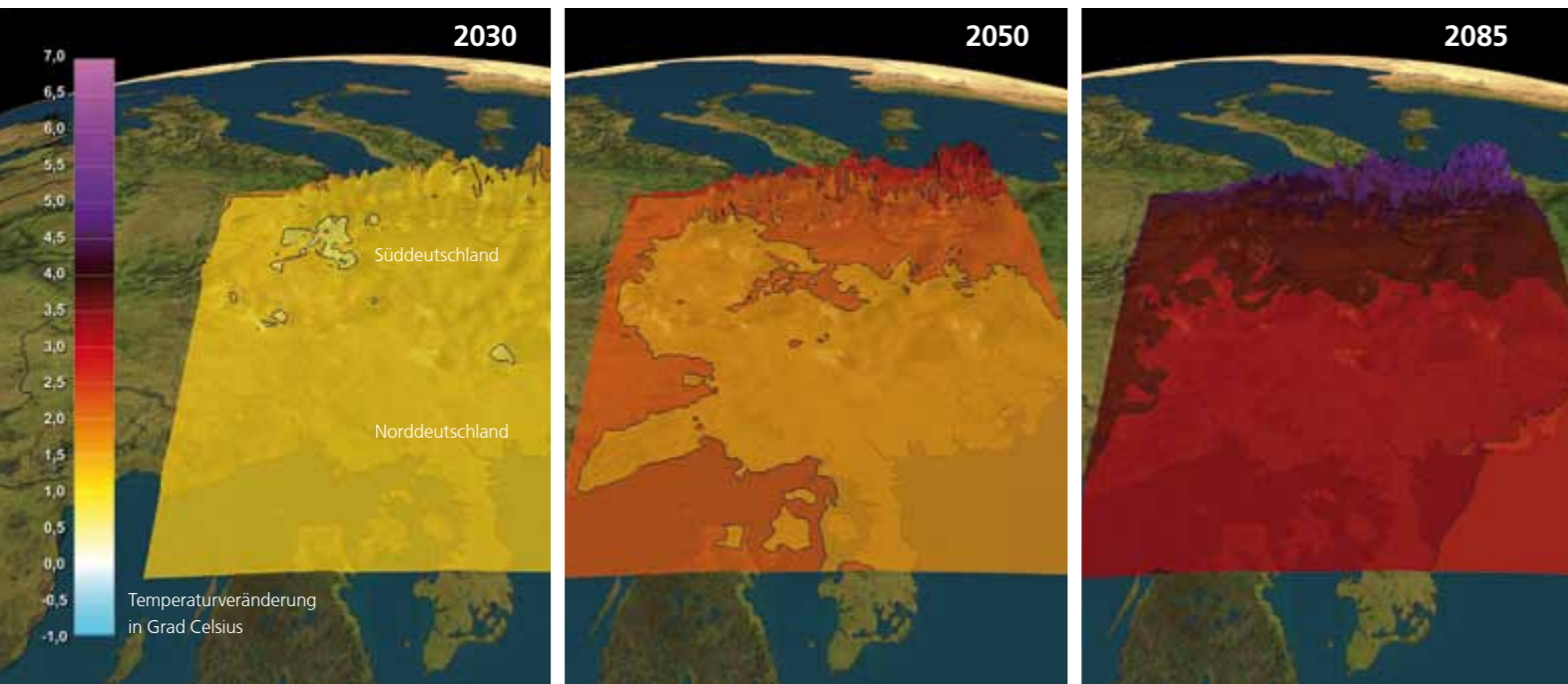
Wenn Forscher vor besonders rechenintensiven Aufgaben stehen, gehen sie einfach ins Netz. Dort nutzen sie geografisch verteilte Rechnersysteme als virtuellen Supercomputer. Das ist das Prinzip von sogenanntem Grid Computing. Voraussetzung dafür ist, dass sich die Rechenaufgabe in einzelne, voneinander unabhängige „Häppchen“ aufteilen lässt.

Bereits 2004 untersucht das DKRZ gemeinsam mit europäischen Partnern, ob dieses Verfahren für Klimasimulationen taugt. Das Ergebnis: Nein, aber die Idee für verteilte Klimadatenarchive mit einem einheitlichen Zugang ist geboren. Deren Umsetzung beginnt 2005 im vom Bundesforschungsministerium geförderten Projekt „C3-Grid“. Es entsteht ein Webportal, über das Wissenschaftler auf mehrere Klimadatenarchive zugreifen können. In weiteren internationalen Projekten wird die Daten-Grid-Technologie verbessert und schließlich sogar zur weltweiten Verteilung der neuen Modellsimulationen für den kommenden Weltklimabericht 2013 eingesetzt – aus Forschung wird Technologie.

Projekt „Klimawandel und seine Folgen“ legt Grundstein für Vernetzung von Schule und Klimaforschung

Rechnungen für fünften Weltklimabericht beanspruchen ein Viertel der DKRZ-Rechnerkapazität

Maximilian Prugger übernimmt Geschäftsführung



Warmes Deutschland: Bei schnellem Wirtschaftswachstum, rascher Einführung neuer und effizienter Technologien sowie ausgewogener Nutzung aller Energiequellen steigt nach der REMO-Simulation bis zum Jahr 2085 die Temperatur in Deutschland – in den Alpen um etwa 5 Grad Celsius, in den küstennahen Regionen um etwa 3 Grad Celsius.

Lupe für Deutschland

Globale Klimamodelle erlauben nur einen unscharfen Blick in die Zukunft. Mit den groben Gittern lassen sich kleinräumige Effekte kaum darstellen. Daher sind genaue Aussagen für einzelne Regionen nicht möglich. Wir möchten aber wissen, was genau eine Änderung des Klimas für uns bedeuten würde – eben dort, wo wir wohnen und arbeiten. Um das herauszufinden, bedienen sich Wissenschaftler eines Tricks: Einer Lupe gleich zoomen hochaufgelöste Regionalmodelle in die vorher berechnete Entwicklung des globalen Klimas hinein. Die genauere Darstellung geografischer Verhältnisse und kleinräumiger Prozesse ergibt ein detailliertes regionales Bild.

Im Auftrag des Umweltbundesamts führt das Max-Planck-Institut für Meteorologie 2006 mit dem Regionalmodell REMO Rechnungen für Deutschland, Österreich und die Schweiz durch. Mit einer Auflösung von 10 Kilometern können die Klimaforscher nun Änderungen von Temperatur und Niederschlag in den verschiedenen Gegenden Deutschlands analysieren.

Nutzer der CERA-Klimadatenbank laden 1 Million Dateien herunter

Manfred Meinecke löst Maximilian Prugger als Geschäftsführer ab

Zusätzliches Rechen-system „Tornado“ installiert

Wie viel Energie darf Klimaforschung kosten?

„Wir müssen weiterdenken: Green Science!“

Eigentlich würde der DKRZ-Rechner mit seinem Stromverbrauch im Jahr so viel Kohlendioxid produzieren wie etwa 7.000 Autos. Warum das nicht so ist und wie sich der Energieverbrauch von Supercomputern minimieren ließe, erläutert Professor Thomas Ludwig.

Im Rechner „Blizzard“ laufen fast 8.500 Prozessoren rund um die Uhr. Was steht auf der Stromrechnung des DKRZ?

Für den Betrieb des Rechners und des ganzen Hauses verbrauchen wir derzeit pro Jahr etwa 16 Millionen Kilowattstunden Strom aus erneuerbaren Energien. Dafür geben wir rund zwei Millionen Euro aus.

Und beim nächsten Rechner noch mehr?

Nicht unbedingt. Wenn wir 2014 einen neuen Supercomputer installieren, wird dieser etwa 20-mal so leistungsfähig sein wie unser heutiger Rechner – diese Steigerung brauchen wir, um die Genauigkeit in den Klimamodellen zu erhöhen. Das heißt aber nicht, dass der Energieverbrauch gleichermaßen steigt. Wahrscheinlich werden wir ihn konstant halten können.

Warum?

Durch Fortschritte in der Halbleitertechnik werden die Transistoren auf den Chips immer kleiner. Ein kleinerer Transistor verbraucht weniger Strom. Allerdings schwindet dieser Vorteil etwas, weil mehr Transistoren auf einen Chip passen. Die entscheidende Frage ist aber: Wie viel Rechenleistung bekomme ich mit wie wenig Energie? Ein Chip mit Milliarden winziger Transistoren „frisst“ zwar genau so viel Strom wie einer mit Millionen größerer, aber er leistet viel mehr.

Also alles nur eine Frage der Technik.

Es gibt zudem einen zweiten Aspekt: Weiter optimierte Programme könnten dasselbe wissenschaftliche Ergebnis in kürzerer Zeit und daher mit weniger Energie berechnen. Wir reden bereits über „Grüne Technik“ und „Grüne IT“. Aber wir müssen weiterdenken: Green Science! Alle Wissenschaftler, die auf Hochleistungsrechnern arbeiten, erlangen ihre Erkenntnisse faktisch erst mithilfe von Strom. Je mehr Rechenleistung – also auch Strom – man einsetzt, desto mehr Ergebnisse lassen sich produzieren. Optimiert man aber das Programm, reduziert man den Energieverbrauch.

Was hindert Sie daran, die Programme zu beschleunigen?

Uns fehlt Fachpersonal. Zum einen ist es nicht einfach, Optimierungsmethoden für sogenannte parallele Programme zu erlernen. Zum anderen dürfen unsere Investitionsmittel ausschließlich in Hardware fließen. Das ist gesetzlich festgeschrieben. Ökonomisch und ökologisch würde man anders vorgehen: einen etwas kleineren Rechner kaufen, das eingesparte Geld in Personal investieren, die Programme optimieren – und Energie und damit tatsächlich Geld sparen.



Thomas Ludwig, Professor für Wissenschaftliches Rechnen und DKRZ-Geschäftsführer

2007



Zentral und lebendig soll der neue Klima-Campus sein. Der Spatenstich ist Ende 2013 geplant.

Umbauarbeiten für ein neues DKRZ-Gebäude beginnen

Vierter Weltklimabericht erscheint

Direktoren im Nebenamt: Professor Jochem Marotzke (Wissenschaft) und Stefan Heinzel (Technik)

Starkes stärken: der KlimaCampus

Die Exzellenzinitiative des Bundesforschungsministeriums macht's möglich: Die in Jahrzehnten gewachsene Hamburger Kompetenz in der Klimaforschung erhält 2007 den Ritterschlag und wird als Exzellenzcluster Integrated Climate System Analysis and Prediction (ClISAP) für zunächst fünf Jahre mit 31 Millionen Euro gefördert.

Der Verbund aus Universität Hamburg, Max-Planck-Institut für Meteorologie, GKSS-Forschungszentrum Geesthacht (ab 2010 Helmholtz-Zentrum Geesthacht) und DKRZ bekommt zusätzliche Stellen und wird noch besser vernetzt – der KlimaCampus entsteht. Damit gelingt endgültig der Brückenschlag zwischen den Disziplinen. Meteorologen, Meereskundler, Geophysiker und Ökologen arbeiten eng mit Sozial- und Wirtschaftsexperten, Medienwissenschaftlern und Friedensforschern zusammen. Nachhaltige Unterstützung erhält die Hamburger Klimaforschung 2012: Exzellente Forschungsergebnisse und die Zusage der Stadt Hamburg für ein neues Gebäude schaffen beste Rahmenbedingungen für weitere fünf Jahre Förderung.



2008



Erde an Bildschirm

Computerspiele machen es vor: Durch flüssige Bewegungsabläufe und Interaktion lösen wir Rätsel oder andere Aufgaben in virtuellen 3D-Welten. Mit der gleichen 3D-Technologie verwandeln Wissenschaftler Klimadaten in Bilder. Bislang müssen sie für solche Visualisierungen die Daten aus ihren Modellrechnungen vom Hochleistungsrechner auf einen starken Rechner an ihrem Arbeitsplatz übertragen. Klimamodelle mit immer höherer Auflösung produzieren aber immer mehr Daten, sodass die Anforderungen an Vernetzung und Ausstattung der Rechner zunehmend steigen.

Im Jahr 2007 schlägt das DKRZ zwei Fliegen mit einer Klappe: Es installiert einen zentralen Visualisierungsserver und gleichzeitig eine Software für netzwerkbasierte 3D-Visualisierung. Ein Datentransfer ist nun nicht mehr nötig, die Daten bleiben im Rechenzentrum. Fehlt nur noch ein einfaches Anwendungsprogramm. Ab 2008 liest „Amira ClimateViz“ (heute „Avizo Green“) die speziellen Datenformate der Klimamodelle, wickelt die Daten quasi direkt um die 3D-Erde herum und schickt die fertigen Bilder an den Arbeitsplatz der Klimaforscher. Maus- und Tastaturbefehle werden in umgekehrter Richtung versendet.

Mehr als 1.000 Klimaforscher nutzen DKRZ-Rechner

Berufungsverfahren für Professur „Wissenschaftliches Rechnen“ und Leitung des DKRZ läuft

Im „Millennium-Projekt“ werden vergangene 1.200 Jahre simuliert



DKRZ-Geschäftsführer Ludwig, Bundesforschungsministerin Schavan und Hamburgs Erster Bürgermeister von Beust (v. l.) starten Berechnungen für fünften Weltklimabericht.



Mit Platzbedarf von 250 Quadratmetern würde Blizzard etwa fünf Zwei-Zimmer-Wohnungen füllen.



Im neuen DKRZ-Gebäude arbeiten „Modelle & Daten“ und die DKRZ-Mitarbeiter wieder unter einem Dach.

Schlag auf Schlag

Neues Haus, neuer Rechner, neuer Chef: Im Jahr 2009 überschlugen sich die Ereignisse. Die Hansestadt Hamburg hat mit 26 Millionen Euro für das DKRZ ein Gebäude grundlegend modernisiert. Darin steht seit Februar Europas größter Klimarechner „Blizzard“ und arbeitet seit Mai Geschäftsführer Thomas Ludwig. Ein Grund zum Feiern: Am 10. Dezember 2009 wird das neue DKRZ offiziell eingeweiht. Mit von der Partie sind Hamburgs Erster Bürgermeister Ole von Beust und Bundesforschungsministerin Professorin Annette Schavan. Ihr Ministerium hat in den Supercomputer und das neue Datenarchiv 35 Millionen Euro investiert – „für die deutsche Spitzenstellung in der Klimaforschung“, sagt Schavan.

Per Knopfdruck starten die Ministerin, Hamburgs Bürgermeister und der neue DKRZ-Chef symbolisch die Berechnungen für den Weltklimabericht 2013. Einen Großteil davon wird Blizzard erledigen. Und noch mehr: Mit seiner Leistung von fast 160 Teraflop pro Sekunde können Wissenschaftler nun im globalen Modell regionale Klimaphänomene wie Stürme und sehr kleine Meereswirbel exakter berechnen. Im neuen, weltweit größten Klimadatenarchiv jonglieren jetzt 56 Roboterarme 65.000 Magnetbandkassetten, auf die mehr als 60 Petabyte Daten passen.

Neuer Geschäftsführer Thomas Ludwig erhält gleichzeitig Professur für Wissenschaftliches Rechnen

Kaufmännischer Geschäftsführer wird Michael Truchseß

Erste Hamburger Klimawoche

Wieder vereint

Nach zehn Jahren Trennung kommen die technische und die wissenschaftliche Seite von Datenmanagement und Modellunterstützung auch personell wieder zusammen: Die Arbeitsgruppe „Modelle & Daten“, im Jahr 2000 aus dem DKRZ herausgelöst und als eigenständige Gruppe vom Bundesministerium für Bildung und Forschung gefördert, geht 2010 als DKRZ-Abteilung „Datenmanagement“ wieder an Bord. Dafür greifen die Gesellschafter tief in die Tasche und erhöhen das jährliche Budget um eine Dreiviertelmillion Euro.

Die neue Abteilung betreut nicht nur die Klimadatenbank und die Langzeitarchivierung der Datensätze, sondern bauen nun auch die passende Infrastruktur dafür auf. Angesichts rapide wachsender Datenmengen im mehrstelligen Petabyte-Bereich ist es zunehmend eine Herausforderung, Strategien und Lösungen für die Verteilung und Archivierung der Klimadaten zu entwickeln – zwei Dienste, die für internationale Modellvergleichsstudien und die weltweite Zusammenarbeit in der Klima- und Klimafolgenforschung unabdingbar sind.

Klimaglobus von DKRZ und Climate Service Center auf der Weltausstellung in Shanghai

Erste internationale Konferenz über energieeffizientes Hochleistungsrechnen „EnA-HPC“

„Tatort“-Kommissar Cenk Batu (Mehmet Kurtulus) findet Beweise im DKRZ



Wissen für alle

Newsletter „TerraFLOPS“
als „DKRZ-Mitteilungen“
neu aufgelegt

EU-Projekt EUDAT
will europäisches
Datennetzwerk aufbauen

Visualisierungsserver
„Vision“ aufgerüstet –
heißt jetzt „Halo“

Wie schnell sich Informationstechnologie wandelt, sieht das DKRZ nicht nur an den Supercomputern. Der vor neun Jahren entwickelte Webauftritt ist nun „von gestern“ und wird 2011 rundum erneuert: mit modernem Design, neuer Struktur und spannenden Inhalten. Überhaupt präsentiert sich das DKRZ stark in der Öffentlichkeit. Auf zahlreichen Veranstaltungen informiert es interessierte Laien, Medien und Fachleute über seine Dienste und neue Ergebnisse aus der Klimaforschung.

Ein Besuchermagnet ist der Klimaglobus: Auf der Hamburger Klimawoche, dem Extremwetterkongress und bei der Nacht des Wissens reisen Hunderte Besucher interaktiv durch die Zeit und staunen über die möglichen Auswirkungen des Klimawandels rund um den Globus. Auch am GirlsDay und 2012 am GreenDay öffnet das DKRZ seine Türen, damit Jugendliche hinter die Kulissen der Klimaforschung schauen können und vielleicht „Blut lecken“ – so entstehen Berufswünsche. Wo der Superrechner zu Hause ist, wollen 2011 erstmals mehr als tausend Besucher bei Führungen durch den Rechnerraum erfahren.

Können Superrechner immer mehr leisten?

„Schnelle Rechenkerne sind gefragt“

Jede neue Rechnergeneration bietet mehr Leistung – das aber nicht unbegrenzt. Wo genau liegen die Grenzen dieses Wachstums? Ein Gespräch mit dem Informatiker Stefan Heinzl über die Herausforderungen, vor denen die Rechnertechnik heute steht.

Wodurch hebt sich das DKRZ von anderen wissenschaftlichen Rechenzentren ab?

Durch das Datenaufkommen. Nehmen wir das sehr einfache Beispiel Primzahlen. Rechnet man deren Reihe weiter, ergibt sich stets nur eine neue Primzahl. Dagegen werfen Klimamodelle Unmengen Daten aus, die analysiert und archiviert werden müssen. Ein Hochleistungsrechenzentrum der Klimaforschung muss dafür speziell ausgerichtet sein.

Rechnerleistung gibt es nicht unbegrenzt. Wo liegen technische Hürden?

In den nächsten acht Jahren – weiter möchte ich nicht gehen – wird es wohl keine gravierenden physikalisch-technischen Grenzen geben: Die digitale Technik ist noch nicht ausgereizt. Aber die Klimaforschung wird es schwerer haben als andere Zweige, neue Technologien auszunutzen.

Warum ist das so?

Rechnerleistung wächst heute, indem Hunderttausende Rechenkerne, die eigentlichen Verarbeitungseinheiten, parallel rechnen. Doch die Zeit, eine wichtige Dimension für die Klimaforschung, lässt sich nicht parallelisieren. Man braucht die Ergebnisse für das Jahr 2050, damit das Modell weitere Daten für 2051 errechnen kann. Im Idealfall sollten dafür die einzelnen Rechenkerne besonders schnell sein. Da diese dann aber sehr viel Strom verbrauchen, ist das nicht mehr sinnvoll.

Größer und komplizierter bedeutet oft auch empfindlicher. Wie stabil sind die Rechner von morgen?

Es sind immer mehr Prozessoren und Speichermodule beteiligt. Umso eher fällt davon einmal eine Komponente aus. Das Steuersystem muss in der Lage sein, selbstständig Defektes gegen Funktionstüchtiges auszutauschen. Und das Programm, das gerade läuft, muss sich den Stand merken, als es unterbrochen wurde, und genau dort weiterarbeiten. Weltweit arbeiten viele Gruppen daran, dass dies bei großen Applikationen möglich wird.

Heutige digitale Computer arbeiten nach den Gesetzen der klassischen Physik und Informatik. Die Quantenmechanik brächte demgegenüber vielleicht einen wahren Leistungsboom. Wagen Sie einmal einen Gedanken daran ...

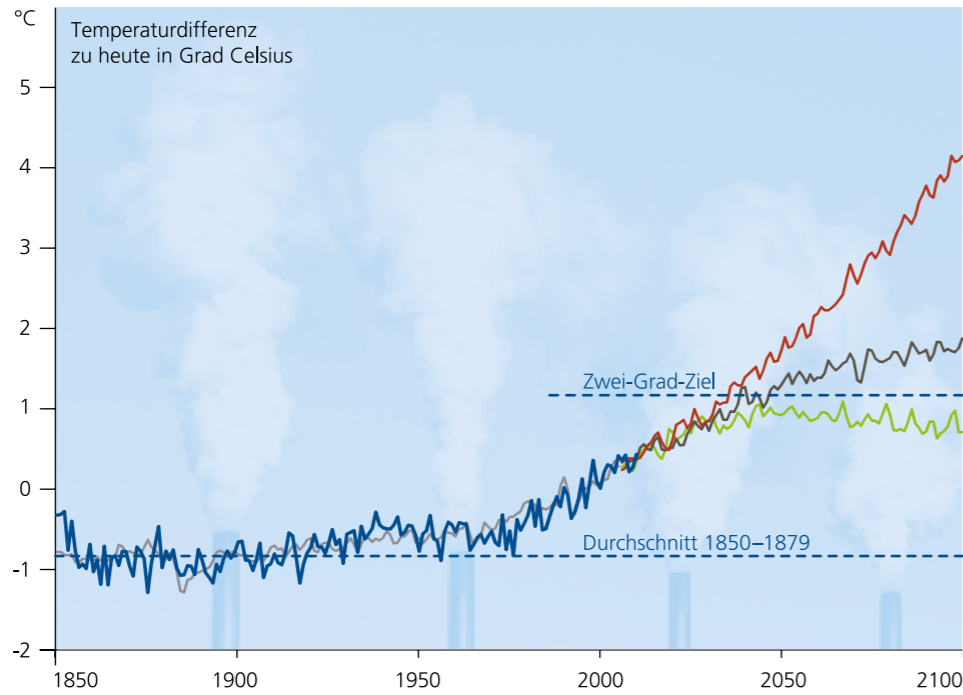
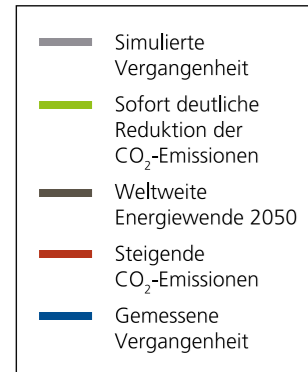
Noch ist das ein theoretisches Konstrukt. Rechenzentren planen kaum weiter als zehn bis zwölf Jahre. In dieser Zeit kommt der Quantencomputer noch nicht. Aber danach wird die Technik irgendwann eine andere Richtung einschlagen müssen. Sonst geht es mit der Leistungssteigerung nicht mehr weiter.



Stefan Heinzl, DKRZ-Direktor im Nebenamt von 2006 bis 2009 und seit 1993 Leiter des Rechenzentrums Garching der Max-Planck-Gesellschaft

Gestern, heute und morgen

Seit Beginn der Industrialisierung ist die globale mittlere Temperatur um 0,8 Grad Celsius gestiegen. Verschiedene Szenarien zeigen, wie stark sie bis 2100 weiter steigen wird – je nachdem, wie wir künftig mit CO₂-Emissionen umgehen (Simulationen mit dem Modell MPI-ESM).



Klimaziel noch erreichbar

Durch Forschung und neue Technologien wächst das weltweite Klimawissen kontinuierlich. Den neuesten Stand dokumentieren Wissenschaftler alle fünf bis sieben Jahre im Weltklimabericht des Weltklimarats. Für den deutschen Beitrag zum nunmehr fünften Bericht und das internationale Modellvergleichsprojekt „CMIP5“ simuliert der DKRZ-Rechner „Blizzard“ mehr als 15.000 Erdenjahre. Allein am DKRZ sind mehr als zehn Spezialisten mit dem Projekt beschäftigt.

Das neue Klimamodell MPI-ESM des Max-Planck-Instituts für Meteorologie ist um zwei Komponenten des Klimasystems erweitert: die Landvegetation und die Biogeochemie des Ozeans, also beispielsweise die Entwicklung von Algen. Bisher mussten die Forscher auf diese wichtigen Komponenten und die Darstellung von deren Wechselwirkungen mit anderen Teilen des Klimasystems verzichten, weil die Rechnungen zu lange gedauert hätten. Blizzard braucht dennoch zwei Jahre – 2012 werden die Ergebnisse veröffentlicht. „Nach unseren Rechnungen können wir die Erderwärmung in diesem Jahrhundert auf unter 2 Grad Celsius begrenzen. Allerdings nur mit drastischer Minderung der Kohlendioxidemissionen“, sagt Professor Jochem Marotzke, Direktor am Institut.

Bundesforschungsministerium fördert Exzellenzcluster CliSAP weitere fünf Jahre

Am 11. November 2012 feiert das DKRZ seinen 25. Geburtstag

DKRZ organisiert Workshop zur Analyse und Optimierung von parallelen Programmen

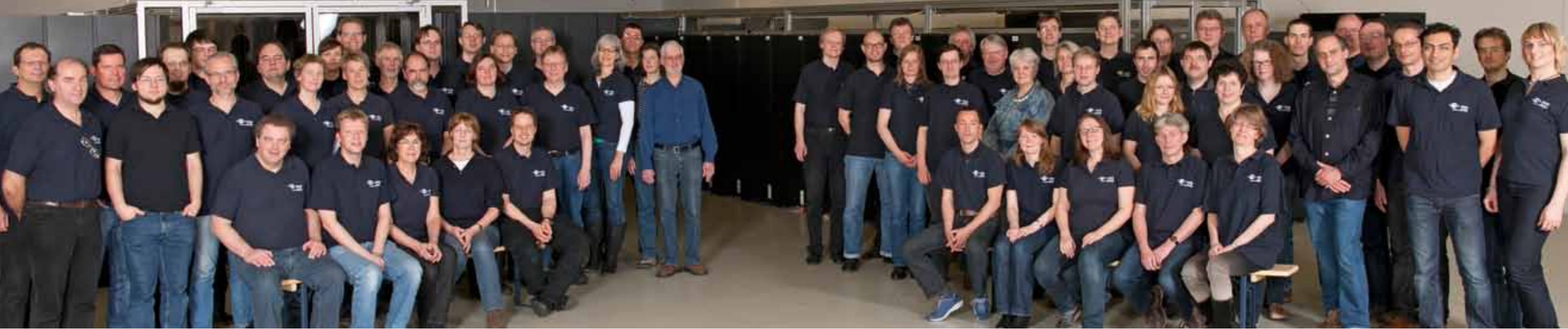
Vision

„Das DKRZ erschließt der Klimaforschung verlässlich das Potenzial des sich beschleunigenden technischen Fortschritts.“ Das ist unsere Vision. Angesichts einer Leistungssteigerung der Spitzenrechner um das 1.000-Fache alle zehn Jahre offenbart sich hier eine Herausforderung. Komplexere Rechnerstrukturen, eine zunehmend kompliziertere Programmierung, sprunghaft wachsende Datenmengen und ein ständig steigender Stromverbrauch – all dies stellt Betreiber und Nutzer vor große Probleme. Technische Lösungen dafür werden in der Informatik erarbeitet. Aufgabe des DKRZ ist es dann, die Systemleistung in wissenschaftliche Produktivität umzusetzen.

Mit der Leistungsfähigkeit der Systeme wachsen auch die Erkenntnismöglichkeiten der Wissenschaftler: Modellierungen erfassen weitere Klimaprozesse und lösen die Geschehnisse zeitlich und räumlich feiner auf. Die moderne, datenintensive Wissenschaft wird neue Einsichten vermehrt aus der Analyse bereits vorhandener Daten schöpfen und ihre Produktivität nochmals steigern.

Die kommenden 25 Jahre, an deren Ende die Leistung unseres aktuellen Superrechners voraussichtlich in batteriebetriebenen Geräten für die Hosentasche steckt, werden eine intensivere Zusammenarbeit zwischen den Wissenschaften erfordern. So ist es nicht nur Vision, sondern auch Aufgabe des DKRZ, dem Klimaforscher das Potenzial dieses technischen Fortschritts zu erschließen. Eine technische, wissenschaftliche und gesellschaftspolitische Aufgabe, der die DKRZ-Mitarbeiter mit Engagement begegnen werden.





Das DKRZ und seine Partner

Seit der Gründung des Deutschen Klimarechenzentrums im Jahr 1987 hat sich die Zahl der Mitarbeiter mehr als verdreifacht. Heute arbeiten hier 71 Wissenschaftler, Techniker und Verwaltungsangestellte – derzeit werden 18 Projektmitarbeiter über Drittmittel finanziert. Darüber hinaus sind in der Universitätsforschungsgruppe des Geschäftsführers Professor Thomas Ludwig weitere zwölf Mitarbeiter tätig.

Das DKRZ ist eine gemeinnützige GmbH mit vier Gesellschaftern.

Als wichtiger Partner ist das DKRZ in nationale, europäische und internationale Kooperationen integriert.



MAX-PLANCK-GESELLSCHAFT

Max-Planck-Gesellschaft zur Förderung der Wissenschaften e.V.



Hamburg

Freie und Hansestadt Hamburg
vertreten durch die Universität Hamburg

**Helmholtz-Zentrum
Geesthacht**

Zentrum für Material- und Küstenforschung

Helmholtz-Zentrum Geesthacht



Alfred-Wegener-Institut
für Polar- und Meeresforschung
in der Helmholtz-Gemeinschaft

Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung



Universität Hamburg
DER FORSCHUNG | DER LEHRE | DER BILDUNG



Centrum für Erdsystemforschung und
Nachhaltigkeit an der Universität Hamburg



KlimaCampus



Max-Planck-Institut
für Meteorologie



CSC
Climate Service Center
Germany
Eine Einrichtung des Helmholtz-Zentrums Geesthacht



GA
Gauß-Allianz



Deutsches
Klima
Konsortium



ICSU
WORLD DATA SYSTEM

Impressum

Herausgeber

Deutsches Klimarechenzentrum GmbH
Bundesstraße 45a
20146 Hamburg

www.dkrz.de
info@dkrz.de

Konzept und Koordination

Daniela Schmidt, wissen und worte
www.wissen-und-worte.de

Text und Redaktion

Daniela Schmidt, wissen und worte
Cornelia Reichert, Wortboten

Michael Böttinger, Jana Meyer
Öffentlichkeitsarbeit DKRZ

Gestaltung

Gerrit Horwege, Jeran und Horwege Design GbR
www.j-h-design.de

Druck

schulzdialog gmbh
www.schulzdialog.de

Bildnachweis

© magann/Fotolia.com (Titel und Innentitel), Frank Siemers (S. 2, S. 39, S. 50, S. 51), Bundesministerium für Bildung und Forschung (S. 4), Max-Planck-Gesellschaft e.V. (S. 4), Universität Hamburg (S. 5), Helmholtz-Zentrum Geesthacht (S. 5), Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung (S. 5), Michael Böttinger/DKRZ (Visualisierungen S. 10, S. 16, S. 26, S. 30, S. 31, S. 36), © Hubert Körner/Fotolia.com (S. 11, l.), © Carsten Weigel/Fotolia.com (S. 11, u. r.), © Thinkstockphotos.de (S. 11, o. r.), © Thinkstockphotos.de (S. 17), © iStockphoto.com/pro6x7 (S. 19), Daniela Schmidt (S. 22, S. 23), Max-Planck-Institut für Meteorologie (Grafik S. 23), © iStockphoto.com/vesilvio (S. 24), © Thinkstockphotos.de (S. 32), © Thinkstockphotos.de (S. 33), © Thinkstockphotos.de (S. 38), Siegerentwurf des Hochbaulichen Wettbewerbs 2011 „Neubau am Geomatikum“ – Eingereichter Wettbewerbsentwurf der Architekten HTP Hidde Timmermann Partnerschaft, Braunschweig (S. 40 l.), Rechenzentrum Garching der Max-Planck-Gesellschaft (S. 47), © iStockphoto.com/sharply_done (S. 48), DKRZ (alle weiteren Fotos und Grafiken)

Klimaneutral gedruckt auf FSC-zertifiziertem Papier



