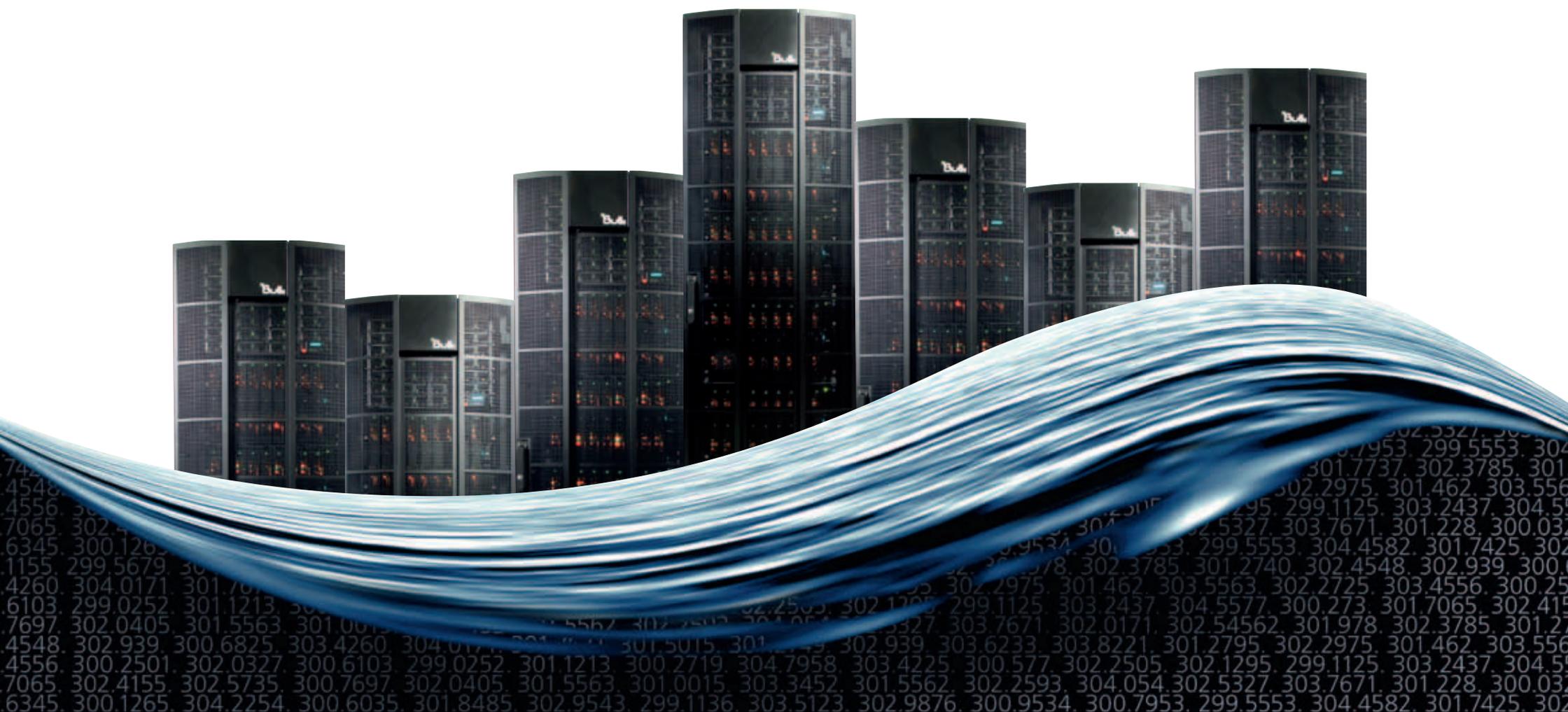


Rechner, Daten, Wissen

Das Deutsche Klimarechenzentrum:
Partner der Klimaforschung



Höchstleistung von Mensch und Technik	3
Top-Adresse für Klima- und Klimafolgenforscher	3
Klima und Modelle	4
Was ist los mit dem Klima?	5
Wie funktioniert ein Klimamodell?	6
Dafür brauchen wir Spitzentechnik	8
Rechnersysteme und Leistung	10
Die Kunst der Modellierung	11
Herzstück des DKRZ: der Supercomputer Mistral	12
Experten im Modellieren und Programmieren	13
Explosion der FLOPS und Bytes: Rechenleistung und wissenschaftlicher Fortschritt	14
Datenspeicher und Datendienste	16
Produktion riesiger Datenmengen	17
Schatzkammer des DKRZ: der Datenspeicher	18
Wertvolle Dienste für den Schatz der Klimaforscher	19
Service und Forschung	20
Hilfe zur effizienten Arbeit	21
Bewusster, sparsamer, zuverlässiger	22
Klimaforschung zum Anfassen	23
Nutzer und Projekte	24
Was erforschen die Nutzer?	25
Simulationen für die Weltklimaberichte	26
Organisation und Netzwerke	27
Das DKRZ und seine Partner	27

Top-Adresse für Klima- und Klima- folgenforscher

Was beeinflusst unser Klima? Wird es auf der Erde immer wärmer? Wie schnell steigt der Meeresspiegel? Und wie wird das Klima in 50 Jahren in Deutschland sein? Derlei Fragen lassen sich nur mit Supercomputern beantworten – und mit Wissen um deren effiziente Nutzung. Das Deutsche Klimarechenzentrum (DKRZ) bietet beides, und das maßgeschneidert für die Klimaforschung. Die Hochleistungsrechner und riesigen Datenspeicher ermöglichen, unser komplexes Klimasystem nachzubilden und zu erforschen. Der stetige Ausbau der Rechnerkapazitäten schafft die Voraussetzung für erstklassige Klimasimulationen und hält das DKRZ weltweit konkurrenzfähig. Dazu kommen mehr als 25 Jahre Erfahrung: Das hochqualifizierte wissenschaftliche und technische Fachpersonal unterstützt die Nutzer etwa bei der Optimierung von Klimamodellen, der Visualisierung von Simulationsergebnissen und dem Datenmanagement.

Damit bietet das DKRZ eine einzigartige Forschungsinfrastruktur für die modellbasierte Simulation des globalen Klimawandels und seiner Auswirkungen in den verschiedenen Regionen der Erde. Wenn es um Klimasimulationen und -daten geht, ist das DKRZ die zentrale Anlaufstelle für Wissenschaftler.

Team

- Sachkundig in der Erdsystemforschung
- Kompetent im Hochleistungsrechnen
- Erfahren im Datenmanagement
- Führend in der Visualisierung

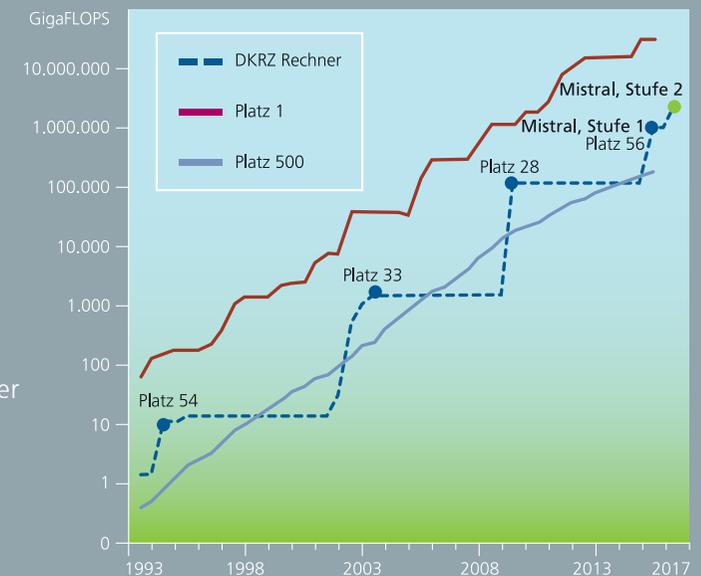
Darauf können sich Klima- und Klimafolgenforscher verlassen: Die Wissenschaftler, Techniker und Verwaltungsangestellten am DKRZ sorgen für ideale Forschungsbedingungen.



Technik

- Parallele Hochleistungsrechner: mehr Rechenkapazität als an einzelnen Forschungsinstituten und Universitäten
- Größtes Festplattensystem Europas
- Eines der größten Datenarchive weltweit

Oft weit vorn: Unter den 500 schnellsten Computern der Welt belegen die DKRZ-Rechner kurz nach der Installation meist vordere Plätze (TOP500-Liste: www.top500.org).



A blue-tinted image of the Earth's horizon, showing the curvature of the planet and some cloud patterns. The text "Klima und Modelle" is overlaid in white, bold font.

Klima und Modelle

Was ist los mit dem Klima?

Schon immer unterlag das Klima unserer Erde natürlichen Schwankungen. Mal erwärmte sich die Erde, dann kühlte sie wieder ab. Mit Hilfe von Eiskernen, Baumringen, fossilen Pollen oder Sedimenten der Ozeane rekonstruieren Wissenschaftler das Klima der vergangenen Jahrtausende. Diese Informationen fließen in Klimamodelle ein, die uns eine bessere Vorstellung vom Klimasystem und dem Klima der Zukunft liefern sollen.

Heute erwärmt sich die Erde mit noch nie dagewesener Geschwindigkeit. Seit Beginn der Industrialisierung vor gut 150 Jahren hat sich das natürliche Gleichgewicht geändert, das in den vergangenen Jahrtausenden für ein stabiles Klima sorgte: Der Mensch beeinflusst durch sein Handeln das globale Klima. Obwohl dies nachgewiesen ist, bleiben viele Fragen offen: Welche Veränderungen sind menschengemacht und welche beruhen auf natürlichen Schwankungen? Mit welcher Genauigkeit lässt sich Klima vorhersagen? Welche physikalischen, chemischen und biologischen Mechanismen beeinflussen die Klimavariabilität? Viele Details der komplexen Prozesse und Wechselwirkungen des Erdsystems sind heute noch unzureichend erforscht.



Zusammenspiel von Ozean, Atmosphäre und Weltraum

Das Klimasystem ist eine riesige Wärmekraftmaschine, ihr Motor ist die Sonneneinstrahlung. Die Unterschiede der einfallenden Sonnenstrahlung zwischen Äquator und Polarregionen, zwischen Tag und Nacht sowie Sommer und Winter erzeugen Temperatur- und Dichteschwankungen. Dadurch entsteht Wind, der die Ozeanströmungen antreibt. Energie-, Impuls- und Massefluss zwischen den Ozeanen, der Atmosphäre, Schnee und Eis sowie der Vegetation bestimmen die innere Dynamik des Klimasystems auf Zeitskalen von Stunden bis hin zu Jahrtausenden. Zudem verbrennt der Mensch Kohle und Erdöl, rodet Wälder, betreibt Ackerbau und Viehzucht und baut Städte – und bewirkt damit Emissionen von Treibhausgasen und Aerosolen. Treibhausgase behindern die Rückstrahlung von Wärme aus der Atmosphäre in den Weltraum, sodass sich der natürliche Treibhauseffekt verstärkt, während Aerosole vor allem die Einstrahlung verringern und eher abkühlend wirken. Langfristig beeinflussen auch Kontinentaldrift, Gebirgsbildung, Erosion sowie Veränderungen in der Erdumlaufbahn das Klima.



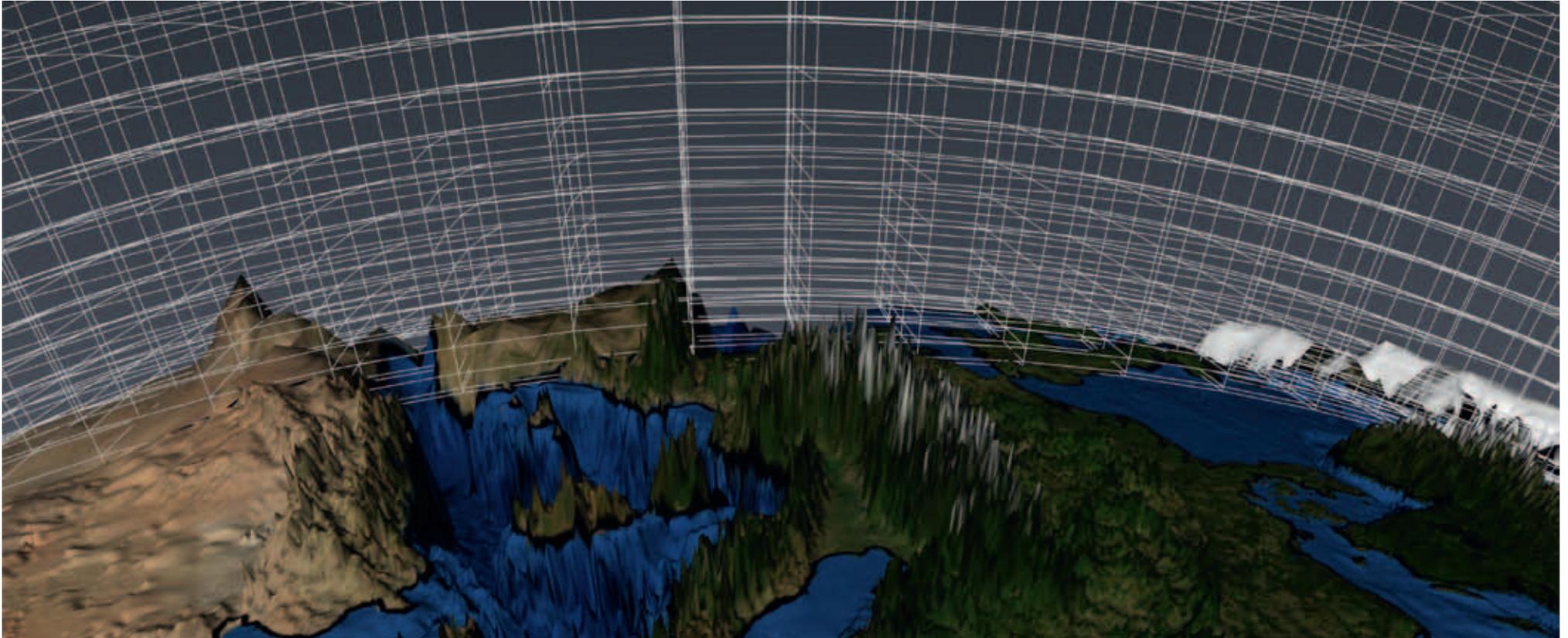
Wie funktioniert ein Klimamodell?

Klima- und Klimafolgenforschung ohne Modelle – das ist heute undenkbar. Dafür ist das Erdsystem viel zu komplex und dynamisch. Die Modelle helfen, bestimmte Prozesse, Wechselwirkungen und Gesetzmäßigkeiten des Klimasystems zu verstehen, und dienen der Simulation des vergangenen Klimas sowie der Projektion des künftigen Klimas.

Mit Hilfe von Klimamodellen wollen Forscher letztlich das gesamte Klimasystem nachbauen. Jedoch reagieren die verschiedenen Teilbereiche wie Ozean, Atmosphäre, Landoberfläche oder Meereis unterschiedlich schnell auf Veränderungen – jede Komponente hat ihren eigenen Takt. Daher ist es ungünstig, alle wichtigen Komponenten des Klimasystems in ein einziges Modell zu stecken. Vielmehr muss ein aufeinander aufbauendes System von mehreren Modellen entwickelt werden, um effizient die verschiedenen Zeitskalen und Kombinationen von Teilsystemen zu berücksichtigen.

Alles Mathematik

Viele Vorgänge im Erdsystem unterliegen bekannten Naturgesetzen. Mit mathematischen Gleichungssystemen lassen sich etwa der zeitliche Verlauf von Bewegung und die Änderung von Klimagrößen wie Temperatur oder Niederschlag innerhalb einer bestimmten Zeit



Im Modell werden Atmosphäre und Ozean in Gitterzellen zerlegt. Das Gitternetz umspannt die Erde.

beschreiben. Doch leider gibt es für diese Gleichungen keinen direkten analytischen Lösungsweg. Deshalb haben Klimaforscher numerische Modelle entwickelt, mit denen die Gleichungen näherungsweise im Computer gelöst werden können.

Zunächst werden Atmosphäre und Ozean und Landoberfläche jeweils in Millionen von Gitterzellen zerlegt. Für einen Vorhersagezeitschritt, etwa einige Minuten,

werden für jede einzelne Gitterzelle näherungsweise die Gleichungen gelöst, die beispielsweise für die Atmosphäre Bewegungen sowie Impuls-, Energie- und Masseflüsse beschreiben. Sind alle Werte berechnet, geht es auf Basis der neuen Zahlen gleich wieder von vorne los – so handelt man sich immer weiter voran in die Zukunft. So viele Rechnungen können nur Hochleistungscomputer stemmen. Je kleiner die Gitterzellen sind und je mehr Vorgänge berücksichtigt werden,

desto besser entspricht die Simulation dem tatsächlichen Klimageschehen.

Klimamodellierungen sind hochkomplex. Daher erfordern sie nicht nur ein genaues Verständnis der physikalischen, chemischen und biologischen Vorgänge im Erdsystem, sondern auch spezielle Fachkenntnisse bei der Programmierung der Supercomputer.

Dafür brauchen wir Spitzentechnik

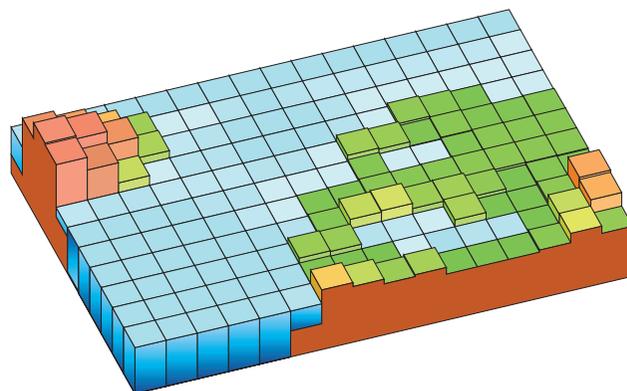
Auflösung, Verlässlichkeit, Datenauswertung – Klimamodellierung benötigt riesige Rechenkapazitäten und Datenspeicher. So hängt die Qualität von Klimamodellen stark von der Leistungsfähigkeit des Computers ab. Wie lange, vielfältig und effizient die entstehenden Datenberge genutzt werden können, ist dagegen eine Frage des Speicherplatzes auf den Festplatten und der Kapazität des Magnetbandarchivs.

Komplexes Klimasystem

Während sich die Forscher zu Beginn der Klimamodellierung auf die Simulation der physikalischen Vorgänge und die Kopplung etwa von Atmosphäre und Ozean konzentrierten, können sie heute mit dem Hochleistungsrechner des DKRZ auch chemische und biologische Vorgänge mit einbeziehen. Auch das Zusammenspiel von Klima, Gesellschaft und Wirtschaft lässt sich studieren. Das große Ziel ist die Entwicklung eines komplexen Erdsystemmodells, das alle physikalischen, chemischen und biologischen Wechselwirkungen zwischen den Komponenten des Klimasystems sowie soziale Aspekte einschließt.

Knackpunkt Auflösung

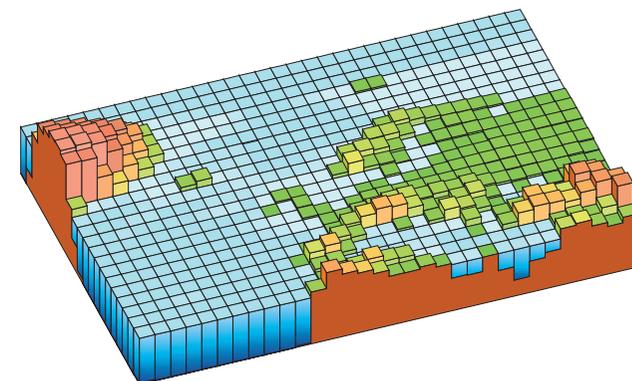
Je kleiner die Gitterzellen eines Klimamodells sind, desto höher ist die räumliche Auflösung des Modells und desto genauer das Rechenergebnis. Will man jedoch die Auflösung verdoppeln, verzehnfacht sich die benötigte Rechenzeit für dieselbe untersuchte Zeitspanne. Selbst die modernsten Supercomputer sind heute noch nicht leistungsfähig genug, um ein komplexes Klimamodell in so hoher Auflösung zu berechnen, dass es alle wichtigen kleinräumigen Prozesse darstellen kann.



Räumliche Auflösung: Ausschnitt des Rechengitters für Europa, Gitterabstand ca. 500 km

Verlässliche Ergebnisse

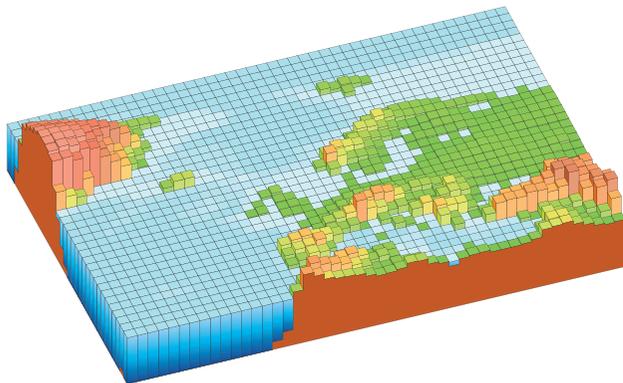
Wie verlässlich sind die Ergebnisse einer Klimasimulation? Eine berechtigte Frage, denn numerische Rechenmethoden reagieren oft empfindlich auf kleine Veränderungen der Startwerte einer Simulation. Deshalb führen Wissenschaftler sogenannte Ensemble-Berechnungen durch: Sie wiederholen die Modellrechnungen mehrfach mit leicht veränderten Startwerten. Statistische Analysen der Modellrechnungen geben Auskunft darüber, wie aussagekräftig die Ergebnisse letztlich sind. So lassen sich signifikante Trends von zufälligen Schwankungen unterscheiden. Der leistungsfähige DKRZ-Computer kann umfangreiche Ensembles berechnen.



Gitterabstand ca. 250 km

Jahrhunderte simulieren

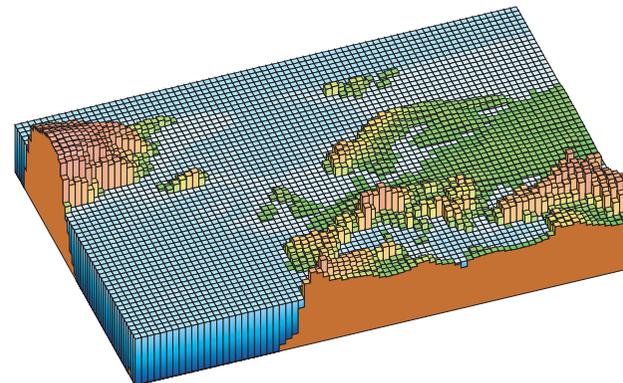
Viele Untersuchungen erfordern eine Simulation des Klimageschehens über mehrere Jahrhunderte. Damit das nicht mehrere Jahre dauert, müssen viele Jahre der untersuchten Zeitspanne an wenigen Tagen berechnet werden. Doch selbst die stärksten Supercomputer brauchen immer noch Monate, um beispielsweise eine Eiszeit zu berechnen.



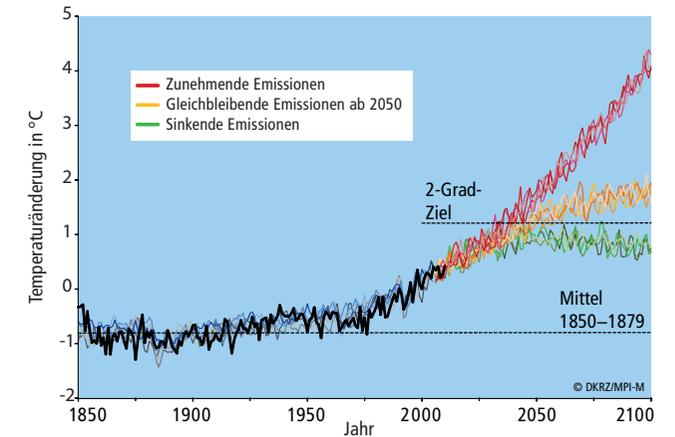
Gitterabstand ca. 180 km

Daten, Daten, Daten

Schnelle Rechner aber reichen nicht. Klimasimulationen produzieren riesige Mengen wertvoller Daten. Deren Auswertung kann manchmal Jahre dauern. Zudem sollen die Daten gut verwaltet sein, um für lange Zeit der deutschen und internationalen Forschung zu dienen. Das DKRZ verfügt sowohl über eines der größten Festplattensysteme als auch eines der leistungsfähigsten Magnetbandarchive weltweit. Wissenschaftler aus aller Welt arbeiten mit den hier gespeicherten Daten.



Gitterabstand ca. 110 km



Ensembles: Mehrere Berechnungen zur Änderung der globalen mittleren Jahrestemperatur gegenüber 1986 bis 2005 mit einem Modell des Max-Planck-Instituts für Meteorologie in Hamburg

Durchgefallen

Kleinräumige Vorgänge wie etwa die Wolkenbildung fallen durchs Raster der Gitterzellen. Wolken spielen aber eine wichtige Rolle für den Strahlungshaushalt auf der Erde: Einerseits reflektieren sie einfallende kurzwellige Sonnenstrahlen und wirken damit abkühlend. Andererseits behindern sie die Rückstrahlung langwelliger Wärmestrahlung in den Weltraum und tragen damit zum natürlichen Treibhauseffekt bei. Die Klimaforscher müssen den Einfluss der Wolken im Modell parametrisieren, also den mittleren Effekt kleinräumiger Prozesse näherungsweise für ganze Gitterzellen beschreiben.



Rechnersysteme und Leistung

Die Kunst der Modellierung

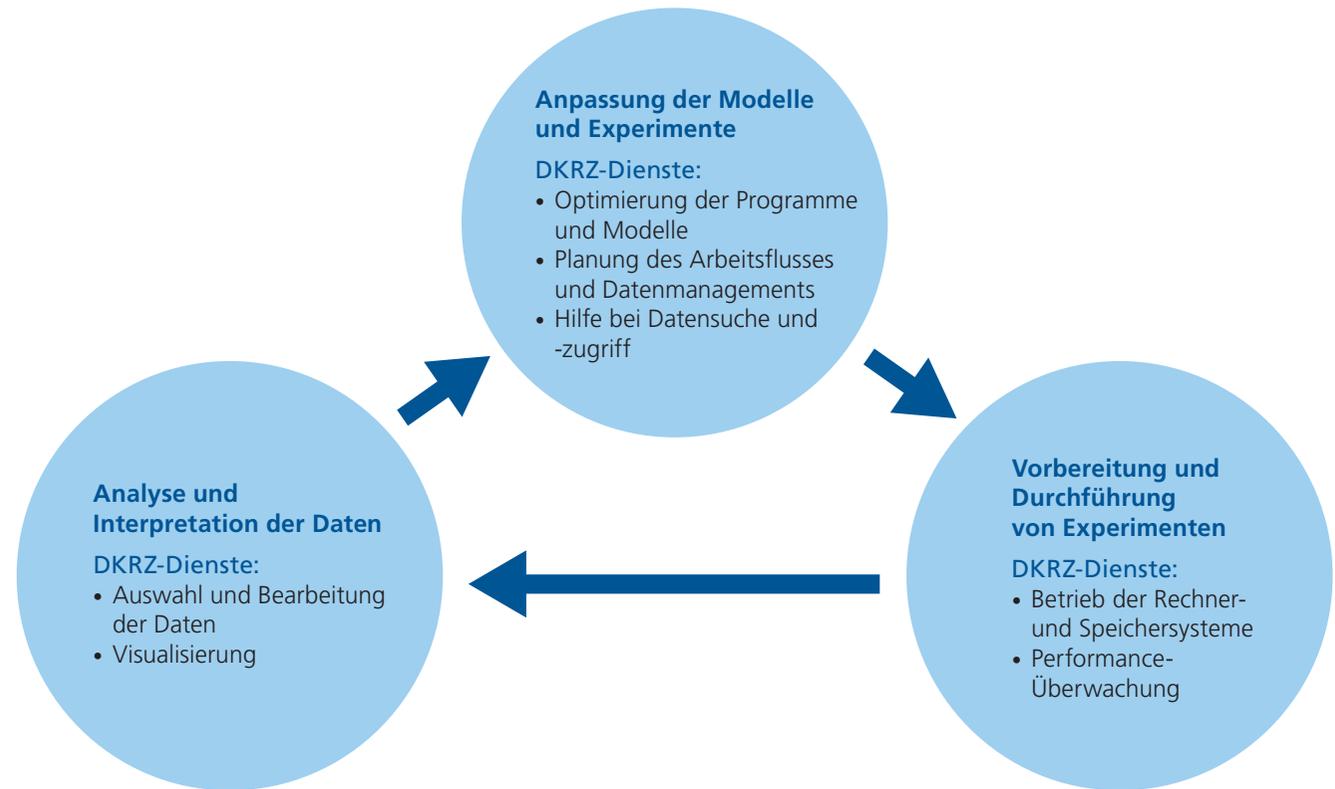
Wissenschaft beginnt mit Fragen, auf die es bisher keine oder nur unzureichende Antworten gibt. Um Fragen zum Klima zu beantworten, werden Simulationsmodelle entwickelt. Mit Technik und Expertise unterstützt das DKRZ die Forscher im gesamten Arbeitsfluss der Klimamodellierung.

Berechnungen als Programm

Meist wird für die Klimamodellierung die Programmiersprache FORTRAN eingesetzt, um die naturwissenschaftlichen Berechnungen in ein Computerprogramm zu verwandeln. Es gibt viele Möglichkeiten, solche Berechnungen als Programm zu formulieren, aber nicht immer läuft das Programm dann effizient. Mit speziellen Erweiterungen der Programmiersprache lassen sich die Berechnungen auf Hochleistungsrechnern beschleunigen – viele Rechenoperationen laufen dann parallel ab. Zudem müssen die Programme passend zum jeweiligen Rechnersystem optimiert werden.

Experimente mit virtueller Erde

Simuliert ein Modell die wichtigsten Vorgänge im Klimasystem realitätsnah, können die Wissenschaftler Experimente mit der virtuellen Erde machen – also im Rechner. Sie ändern beispielsweise langsam die chemische Zusammensetzung der Atmosphäre im Modell



Bei der Entwicklung der Klimamodelle greifen viele Arbeitsschritte ineinander: von der Anpassung der Modelle über die Vorbereitung von Experimenten bis hin zur Analyse der Daten. Das DKRZ unterstützt die Wissenschaftler dabei mit seinen Diensten.

und spielen so etwa mögliche zukünftige Entwicklungen der atmosphärischen CO₂-Konzentration durch. Die Ergebnisse werden in regelmäßigen Abständen gespeichert, weil nicht nur das Endergebnis zählt, sondern auch die ganze zeitliche Entwicklung. Die

Berechnung und Speicherung der Daten müssen dabei genau aufeinander abgestimmt sein, um etwa einen Datenstau oder Rechnerleerlauf zu verhindern.

Herzstück des DKRZ: der Supercomputer Mistral

Das aktuelle Hochleistungsrechnersystem für die Erdsystemforschung (HLRE-3) am DKRZ heißt „Mistral“ und besteht aus den Rechnerkomponenten, einem Festplattensystem sowie einer Hochleistungsvernetzung. Im Sommer 2015 übernimmt die fast zehnmal leistungsfähigere erste Ausbaustufe die Aufgaben des Vorgängers „Blizzard“. Mit dem Endausbau im Sommer 2016 verdoppelt sich die Rechenleistung von Mistral nochmals und erreicht eine Spitzenleistung von 3 Peta-FLOPS. Mit rund 3.000 Rechnerknoten und mehr als 68.000 Prozessorkernen sowie einem 50 Petabyte großen parallelen Dateisystem lassen sich etwa regionale Klimasimulationen in wesentlich höherer Auflösung durchführen und auswerten. Auch können mehr Prozesse in den Erdsystemmodellen berücksichtigt oder die Unsicherheiten in Klimaprojektionen reduziert werden.

Kurze Wege

Zusätzlich zu den Rechnerknoten verfügt Mistral über 24 Visualisierungsknoten mit leistungsfähigen Grafikprozessoren und hundert weitere Knoten für die Vor- und Nachbearbeitung sowie Auswertung



der Daten. Der Vorteil: Alle Komponenten sind über Lichtwellenleiter miteinander verbunden und greifen direkt auf den gemeinsamen Datenbestand zu. Auf dem Supercomputer berechnete Modellergebnisse lassen sich auf den Visualisierungsknoten analysieren.

In der zweiten Ausbaustufe 2016 besteht Mistral aus zehn solcher Schrankreihen – hier im Bild ein Teil des Festplattensystems (links) und der Rechnerknoten (rechts).

Experten im Modellieren und Programmieren

Das DKRZ-Fachpersonal steht den Klimawissenschaftlern bei der optimalen Nutzung der wertvollen Rechnerressourcen beratend zur Seite und bietet eine Reihe von Diensten rund um das Modellieren und Programmieren an: von der Unterstützung der Ausführung von Klimasimulationen, Parallelisierung und Optimierung der Simulationsprogramme bis hin zur Analyse und Visualisierung der Simulationsergebnisse.

Erstklassige Klimasimulationen

Einen erheblichen Teil der Rechenleistung des DKRZ nutzen Klimamodellierer für umfangreiche Simulationen im Rahmen internationaler Forschungsinitiativen und Modellvergleichsprojekte. Das DKRZ unterstützt die Forschergruppen dabei sowohl technisch wie auch mit Fachpersonal. Die Ergebnisse dieser Rechnungen können dann alle Forscher frei nutzen. Viele dieser Ergebnisse gehen in die regelmäßigen Berichte des Weltklimarats ein. Der deutsche Beitrag hierzu entsteht überwiegend auf den Supercomputern des DKRZ – das fordert die Ressourcen der DKRZ-Systeme aufs Äußerste heraus.

Maßgeschneiderte Supercomputer

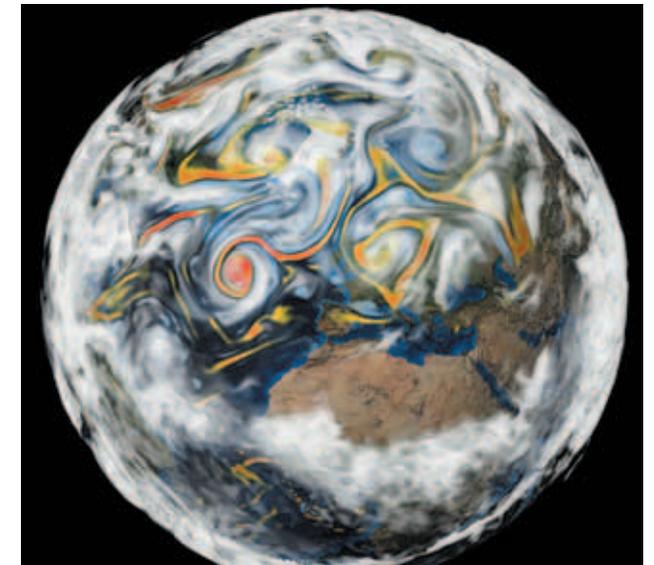
Aktuelle Technologie genau auf die Bedürfnisse der Klima- und Klimafolgenforschung abgestimmt – weltweit

gibt es nur wenige vergleichbare Computersysteme und keines davon ist genauso wie das des DKRZ konfiguriert. Um dessen Leistungsfähigkeit voll auszuschöpfen, sind die DKRZ-Mitarbeiter bestens mit seinen speziellen Eigenschaften vertraut. Davon profitieren die Nutzer etwa bei der Optimierung ihrer Programme. Zudem passen die Spezialisten am DKRZ die Klimamodelle an die steigende Parallelität der Rechnersysteme an: Hatte der erste DKRZ-Rechner vor gut 25 Jahren nur einen Prozessor, arbeiten heute mehr als 68.000 Prozessorkerne parallel.

Klimadaten in 3D

Doch was zeigen uns die vielen Daten aus den Klimasimulationen letztlich? Eine Schlüsseltechnologie zum Verständnis und zur Kommunikation der Ergebnisse ist die Visualisierung. Damit lassen sich die Klimadaten in bewegte 3D-Bilder verwandeln, denn die typischen Datensätze von Klimamodellen sind dreidimensional, zeitabhängig und erfassen viele Klimagrößen zugleich. Eine interaktive visuelle Datenanalyse beschleunigt zum einen das Erfassen der riesigen Datenmengen. Zum anderen nutzen Forscher solche Visualisierungen für Vorträge und Veröffentlichungen ihrer wissenschaftlichen Ergebnisse.

Der DKRZ-Superrechner produziert also nicht nur riesige Datenmengen, sondern macht diese auch sichtbar und verständlich. Eine an die Visualisierung von Klimadaten angepasste Software liest die speziellen Datenformate aus den Klimasimulationen und wickelt sie praktisch um eine 3D-Erde herum. Der besondere Service des DKRZ: Die fertigen Bilder landen direkt am Arbeitsplatz der Forscher. Am DKRZ können Klimadaten sogar interaktiv wie in einem 3D-Kino visualisiert werden.



Dieses hochauflösende Klimamodell zeigt die Bewölkung und die Wirbelstärke.

Explosion der FLOPS und Bytes: Rechenleistung und wissenschaftlicher Fortschritt



1985: Control Data Cyber-205

- 1 Prozessor
- 0,2 GigaFLOPS
- 0,032 Gigabyte Hauptspeicher
- 2,5 Gigabyte Festplattensystem



1988: Cray 2S

- 4 Prozessoren
- 2 GigaFLOPS
- 1 Gigabyte Hauptspeicher
- 25 Gigabyte Festplattensystem
- 1,2 Terabyte Magnetbandarchiv



1994: Cray C-916

- 16 Prozessoren
- 16 GigaFLOPS
- 2 Gigabyte Hauptspeicher + 4 Gigabyte RAM-Disk
- 128 Gigabyte Festplattensystem
- 10 Terabyte Magnetbandarchiv



1985

- Simulationen mit 3D-Atmosphären- oder Ozeanmodellen
- Entwicklung gekoppelter Modelle: 3D-Atmosphäre und ozeanische Deckschicht
- Ergebnisdaten: 4 Gigabyte
- Simulierte Zeit: Monate bis Jahre
- Gitterabstand Atmosphäre: 500 km

1990

- Simulationen mit gekoppeltem 3D-Atmosphäre-Ozean-Modell
- Experiment zur CO₂-Verdopplung
- Erste Simulationen mit kontinuierlichem CO₂-Anstieg
- Ergebnisdaten: 80 Gigabyte
- Simulierte Zeit: 200 Jahre
- Gitterabstand: 500 km

1995

- Simulationen mit verschiedenen möglichen Entwicklungen der CO₂-Konzentration in der Atmosphäre
- Erste Regionalmodelle
- Ergebnisdaten: 1 Terabyte
- Simulierte Zeit: mehrere 100 Jahre
- Gitterabstand: 500–250 km

In den vergangenen Jahrzehnten ist die Rechnerleistung am DKRZ enorm gestiegen. Dadurch konnten die Klimamodelle wesentlich weiterentwickelt werden. Erlaubte der erste DKRZ-Rechner nur die Simulation von Atmosphäre oder Ozean, lassen sich heute viele

zusätzliche Prozesse wie etwa der Kohlenstoffkreislauf miteinbeziehen. Zudem ermöglicht jedes neue Computersystem eine Ausdehnung der simulierten Zeitspannen und durch immer kleinere Gitterabstände eine höhere räumliche Auflösung. Dadurch nähern

sich die Simulationen immer weiter der Realität. Erreichen können sie diese allerdings nicht, da selbst die weltweit stärksten Klimarechner an Leistungsgrenzen stoßen und Modelle immer Vereinfachungen der Wirklichkeit sind.



2002: NEC SX-6 „Hurrikan“

- 192 Prozessoren
- 1,5 TeraFLOPS
- 1,5 Terabyte Hauptspeicher
- 60 Terabyte Festplattensystem
- 3,4 Petabyte Magnetbandarchiv



2009: IBM Power6 „Blizzard“

- 8.448 Prozessoren
- 158 TeraFLOPS
- 20 Terabyte Hauptspeicher
- 6 Petabyte Festplattensystem
- 60 Petabyte Magnetbandarchiv



2015/2016: Bull/Atos bullx B700 DLC „Mistral“

- 36.000/68.000 Prozessoren
- 1,4/3 PetaFLOPS
- 120/240 Terabyte Hauptspeicher
- 20/50 Petabyte Festplattensystem
- bis 500 Petabyte Magnetbandarchiv

2001 2002 2003 2004 2005 2006 2007 2008 2009 2010 2011 2012 2013 2014 2015

2004

- Berücksichtigung der Aerosole in der Atmosphäre
- Erstes hydrologisches Landmodell
- Ergebnisdaten: 150 Terabyte
- Simulierte Zeit: 5.000 Jahre
- Gitterabstand: 180 km

2010

- Darstellung des Kohlenstoffkreislaufs inklusive Biosphäre und Ozeanbiogeochemie
- Ensemble-Simulationen
- Ergebnisdaten: 1 Petabyte
- Simulierte Zeit: 10.000 Jahre
- Gitterabstand: 180–50 km

2015

- Wolkenauflösendes Regionalmodell für Deutschland mit 25 Milliarden Gitterzellen
- Ergebnisdaten: zwischen 1 und 20 Petabyte
- Simulierte Zeit: zwischen Monaten und 100.000 Jahren
- Gitterabstand Globalmodelle: 40 km (Atmosphäre), 10 km (Ozean)

A blue-tinted photograph of a server room aisle. In the foreground, a robotic storage system is visible, featuring a vertical column with a sliding mechanism. The column has labels 'AR' and '06' near the top and 'RR' and '07' near the bottom. The background shows rows of server racks filled with hardware. The floor has some markings, including 'Schwanz' and '07'.

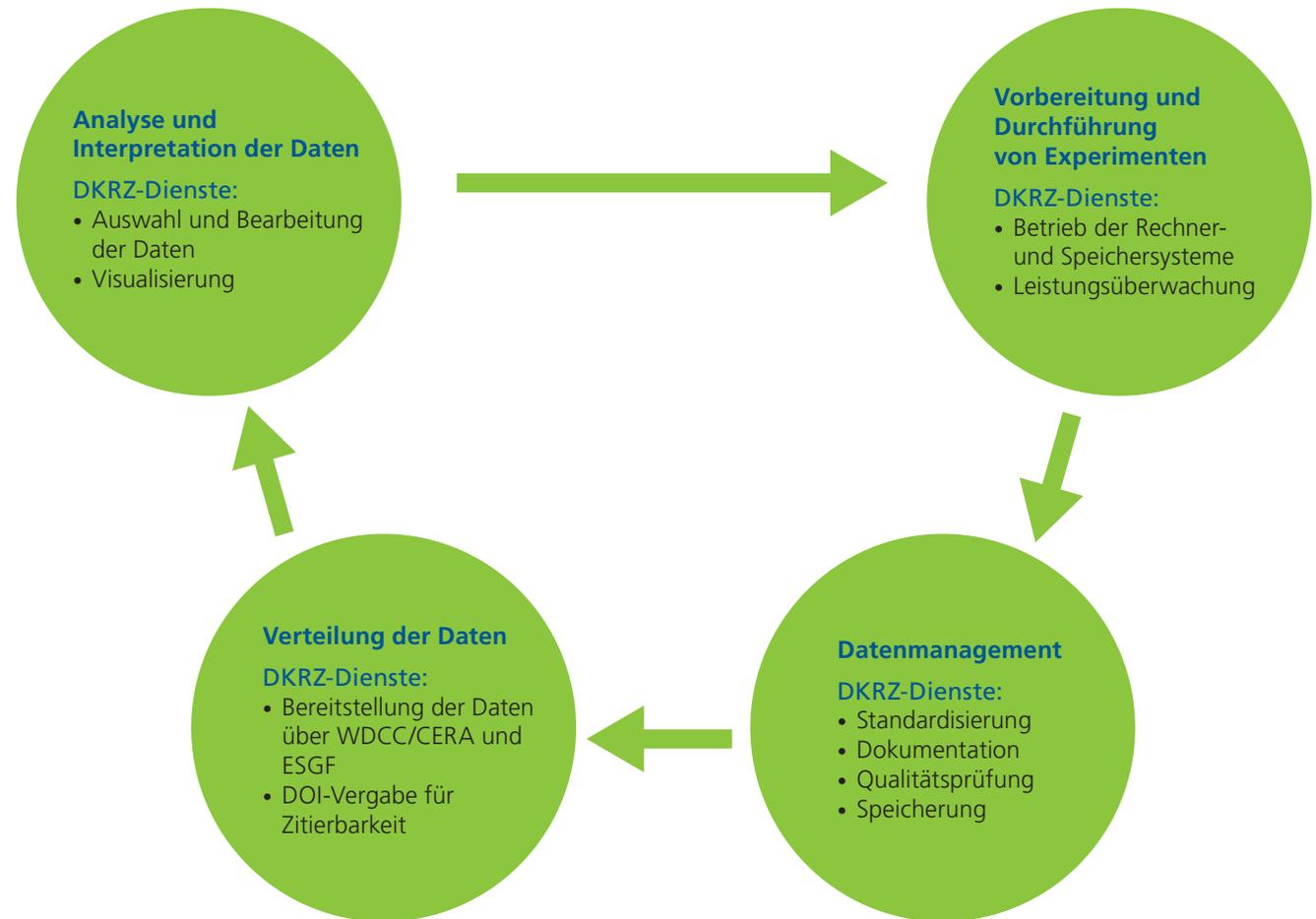
Datenspeicher und Datendienste

Produktion riesiger Datenmengen

Haben Klimaforscher ein Erdsystemmodell entwickelt, das unser Klimageschehen gut reproduziert, führen sie im Rechner mit dem Klima der Modellerde Experimente durch – und produzieren Daten. DKRZ-Experten helfen ihnen, für die Experimente benötigte Eingabedaten zu identifizieren und bereitzustellen sowie die Daten- und Informationsflüsse zu planen. Dabei muss alles auf die technische Systemumgebung abgestimmt werden: Das Hochleistungsrechnersystem, die Festplattenspeicher und das Archivsystem müssen Hand in Hand arbeiten, damit der Arbeitsfluss der Datenproduktion nicht ins Stocken gerät.

Hohe Anforderungen

Bei längeren Klimasimulationen erfolgt das Datenmanagement synchronisiert mit der Berechnung der Daten: Sie werden qualitätsgeprüft, standardisiert und archiviert. Wenn die Daten länger, also auch Jahre nach Beendigung eines Forschungsprojekts, und für unbeteiligte Wissenschaftler verfügbar bleiben sollen, müssen sie besondere Anforderungen erfüllen. Beispielsweise erhalten sie sogenannte Metadaten, die den Inhalt der jeweiligen Dateien beschreiben. Langzeitarchivierte Daten, die unverändert bleiben, werden publiziert und bekommen eine spezifische Bezeichnung zugewiesen: den DOI, den Digitalen Objektbezeichner. Wie Bücher über die ISBN sind diese Daten dann über den DOI eindeutig zitierbar. Klimadatenbanken und -portale



verteilen die Daten schließlich webbasiert an die Nutzer. Viele Daten aus den Modellexperimenten werden auch visualisiert, also in Bilder übersetzt.

Die Datenproduktion umfasst die Vorbereitung und Durchführung von Experimenten, das Datenmanagement, die Verteilung sowie die Analyse der Daten. Das DKRZ bietet seinen Nutzern zahlreiche Dienste an und optimiert die Datenflüsse. (WDCC: World Data Climate Center, CERA: Datenbank des WDCC, ESGF: Earth System Grid Federation)



Schatzkammer des DKRZ: der Datenspeicher

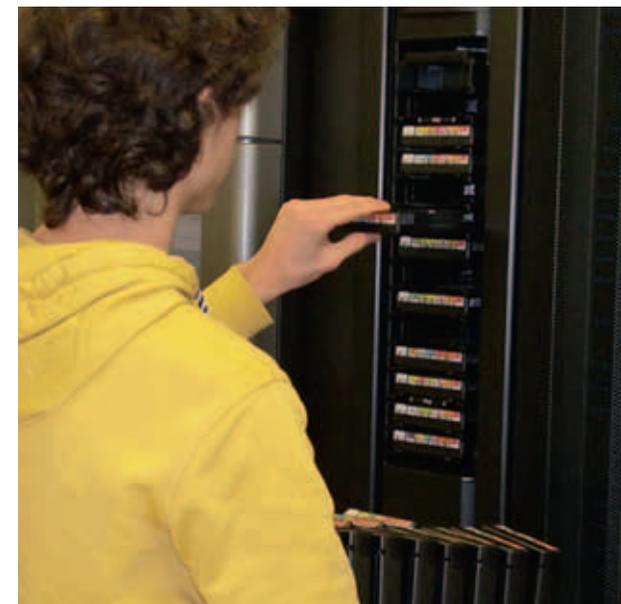
Das DKRZ besitzt einen der weltweit größten Datenspeicher. Anfang 2015 lagen hier 40 Petabyte Ergebnisdaten von Klimasimulationen, verteilt auf 20 Millionen Dateien. Zum Vergleich: Bei einer durchschnittlichen Filmlänge von zwei Stunden sind auf einer Hollywood-DVD etwa 5 Gigabyte Daten. Umgerechnet entsprechen 40 Petabyte also acht Millionen Spielfilmen und damit etwa 1.800 Jahren Film.

Ultraschnelle Übertragung

Die Daten sind in acht automatischen Bandbibliotheken auf insgesamt 77.000 Magnetbandkassetten untergebracht. Die Software „High Performance Storage System“ (HPSS) verwaltet alle Daten und fungiert als zentrale Ein- und Ausgabeschnittstelle des Magnetbandarchivs. Durch eine Erweiterung des Speichersystems im Jahr 2015 können Wissenschaftler nun ihre Klimadaten mit einer Bandbreite von 18 Gigabyte pro Sekunde zwischen Hochleistungsrechner und Archivsystem übertragen. Acht Roboterarme pro Bibliothek entnehmen angeforderte Kassetten und bringen sie zu einem der insgesamt 65 Bandlaufwerke, wo die Daten auf die Kassetten geschrieben oder von den Kassetten gelesen werden. Der dafür benötigte Zwischenspeicher – der Festplattencache – hat mit 5 Petabyte allein die Speicherkapazität von 5.000 gut ausgestatteten Laptops.

Starker Zuwachs

Mistral, der neue DKRZ-Hochleistungsrechner, kann so viele Daten produzieren, dass das Archiv stark wachsen wird: schätzungsweise um 75 Petabyte pro Jahr. Technisch kann es im Jahr 2020 etwa 500 Petabyte Klimadaten beherbergen.



Der Datenschatz auf den Magnetbandkassetten ist bestens geschützt: Eine Sauerstoffreduzierung im Datenarchiv verhindert Brände. Außerdem lagert das DKRZ Kopien der wichtigsten Daten in getrennten Räumen.

Wertvolle Dienste für den Schatz der Klimaforscher

Erzeugung, Speicherung, Auswertung, Archivierung, Verteilung und Visualisierung – das DKRZ unterstützt mit seinen Diensten den gesamten Lebenszyklus von Klimamodelldaten. Das am DKRZ angesiedelte World Data Center for Climate (WDCC) bietet den Wissenschaftlern die Langzeitarchivierung ihrer Ergebnisdaten. Webbasiert können sie zudem den großen Fundus solcher Daten sowie die umfangreichen Ergebnisse großer Verbundprojekte nach bestimmten Kriterien durchsuchen. So erhalten sie die optimale Datenbasis für bestimmte wissenschaftliche Fragestellungen. Das technische Rückgrat bildet das Datenbanksystem CERA (Climate and Environmental Retrieval and Archive). Mit der Suchmaschine lassen sich die Datensätze finden, die den gesuchten Kriterien wie Zeitraum und Auflösung entsprechen. Den gefundenen Datensatz können die Forscher dann herunterladen und analysieren.

Das DKRZ ist am internationalen Erdsystem-Datenverbund (Earth System Grid Federation, ESGF) beteiligt, einer Dateninfrastruktur mit Datenknoten in Europa, den USA, Kanada, China, Japan und Australien. Hier lagern in verschiedenen Archiven Daten, die bei Vergleichsexperimenten von globalen und regionalen Klimamodellen sowie aus Vergleichen mit Beobachtungsdaten gewonnen werden.

Dreh- und Angelpunkt für internationale Projekte

Das DKRZ ist eines der wenigen Zentren weltweit, das für den Weltklimabericht zwei Rollen spielt: Zum einen fungiert es als Datenknoten, zum anderen als Zugangsknoten, damit Wissenschaftler auf die weltweit verteilten Daten zugreifen können. Für nationale und internationale Verbundprojekte führt das DKRZ auch sogenannte Konsortialrechnungen durch, die für eine größere Gemeinschaft von Interesse sind. Die DKRZ-Mitarbeiter bereiten die Daten so auf, dass die Forscher sie einfach nutzen können.

Eine Frage des Datenmanagements

Im Langzeitdatenarchiv des DKRZ können Nutzer ihre Daten nach Ende eines Forschungsprojekts für mindestens zehn Jahre auf Magnetbändern speichern und für Dritte bereitstellen. Die DKRZ-Datenmanager versehen die Daten mit weiteren Informationen, den Metadaten sowie der DOI-Nummer für die Zitierbarkeit, und pflegen sie in die CERA-Klimadatenbank ein.

Im Projekt IS-ENES des European Network for Earth System Modeling (ENES) pflegt das DKRZ auch ein

internetbasiertes Portal, das Informationen und Zugangswege zu den europäischen Erdsystemmodellen zusammenfasst. Außerdem analysiert das DKRZ Klimamodelle im Hinblick auf zukünftige Rechnerarchitekturen.

Forscher setzen auf DKRZ-Dienste

- 5.743 Wissenschaftler nutzen die WDCC-Dienste
- Klimadatenbank CERA auf 4.033 Terabyte angewachsen
- Jeden Monat durchschnittlich 205.000 Zugriffe auf die CERA-Datenbank

Stand 2014



Service und Forschung

Hilfe zur effizienten Arbeit

Am DKRZ sind Klimaforscher bestens aufgehoben. Neben der kontinuierlichen Wartung und regelmäßigen Aktualisierung der Systeme liegt dem DKRZ alles am Herzen, was das Arbeiten im virtuellen Erdsystemlabor erleichtert. Dank spezieller Fachberatung, Ausbildung und Schulung können die Nutzer die Rechnerressourcen effizient nutzen sowie ihre Klimamodelle weiterentwickeln und verbessern.

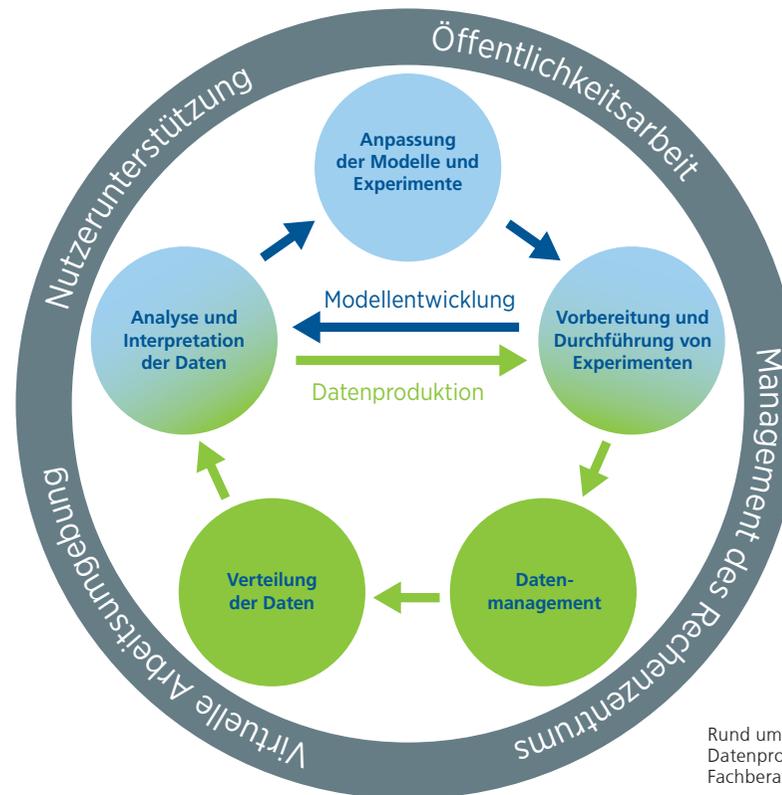
In Workshops erarbeiten die Spezialisten des DKRZ und anderer Institutionen beispielsweise gemeinsam mit den Teilnehmern Optimierungsansätze für Computeranwendungen in der Klimamodellierung. Ebenso schulen DKRZ-Experten die Nutzer in der Entwicklung von komplexen parallelen Programmen – speziell im Hinblick auf die eingesetzten Rechnerarchitekturen. Zudem geht es um den Umgang mit Daten: Um Daten zu veröffentlichen und nachhaltig nutzbar zu machen, müssen auch sogenannte Metadaten zur Dokumentation der Klimadaten abgespeichert werden. Darüber hinaus lernen die Nutzer in Workshops verschiedene Visualisierungstechniken.

Virtuelle Arbeitsumgebung

Die Datenmengen in der Klimaforschung sind heute so groß, dass sie nicht auf einzelne Arbeitsplatzrechner passen. Deshalb bietet das DKRZ seinen Nutzern mit

Cloud-Services leistungsfähige virtuelle Arbeitsumgebungen und integriert speziell konfigurierte Projektserver der Nutzer in das Rechenzentrum.

Zusammen mit anderen Institutionen hat das DKRZ in den vergangenen Jahren auch virtuelle Datenetzwerke speziell für die Wissenschaft aufgebaut. Das DKRZ berät Institute der Klimafolgenforschung und begleitet sie beim Einstieg in die virtuellen Klimadatenverbände. Ebenso sind neue Konzepte für die



Rund um die Arbeitsflüsse der Modellentwicklung und Datenproduktion steht das DKRZ seinen Nutzern mit Fachberatung und vielen weiteren Diensten zur Seite.

Langzeitarchivierung und gemeinsame Nutzung von wissenschaftlichen Daten entstanden. Ein am DKRZ entwickelter Leitfaden und eine Checkliste erleichtern heute den Aufbau von Forschungsdatenarchiven. Auch die praktische Nutzbarkeit der Daten wurde verbessert: Die speziell in der Klimaforschung verwendeten Datenformate lassen sich auch in Formate umwandeln, mit denen gängige Computersoftware arbeitet.

Bewusster, sparsamer, zuverlässiger

Durch eigene Forschung verbessert das DKRZ die Methoden des Hochleistungsrechnens und der Datenverwaltung. Mit jeder neuen Rechnergeneration vergrößert sich die Kluft zwischen der theoretischen Spitzenleistung des Rechners und der tatsächlich mit Klimamodellen erreichten Rechengeschwindigkeit. Daher forscht das DKRZ an neuen Programmierkonzepten, um die Leistung der Rechner besser auszuschöpfen – optimierte Programme sparen auch elektrische Energie.

Ebenso beteiligt sich das DKRZ an Forschungsprojekten, die sich mit einer effizienten und zuverlässigen Verwaltung von großen Datenmengen befassen. Zum Beispiel werden im Projekt Large-Scale Data Management and Analysis (LSDMA) in Kooperation mit anderen wissenschaftlichen Einrichtungen spezielle Methoden und Infrastrukturen für den gesamten Lebenszyklus der umfangreichen Datenmengen entwickelt. Dabei entstehen institutionsübergreifende „Datenlebenszyklus-Laboratorien“ sowie ein Datendienst-Integrationsteam, das Technologien für Verwaltung, Zugriff, Sicherheit, Speicherung und Archivierung der Daten entwickelt und bereitstellt.



Auf dem Dach des DKRZ sind Ventilatoren installiert. Sie geben die vom Rechner produzierte Wärme ins Freie ab.

Gelebte Verantwortung: Grünes Rechenzentrum

Hochleistungsrechnen verbraucht viel Strom – und Stromverbrauch bedeutet CO₂-Produktion. Keine Frage: Als Klimarechenzentrum nimmt das DKRZ seine Verantwortung gegenüber der Umwelt sehr ernst und setzt bei seinen Rechnersystemen nicht nur auf Spitzenrechenleistung, sondern auch auf sparsamen Energieverbrauch. Der neue Supercomputer Mistral ist zwar mit 3 PetaFLOPS Spitzenrechenleistung ein wahres Kraftpaket, aber auch hinsichtlich der Energieeffizienz vorbildlich: Trotz 20-facher Leistungssteigerung gegenüber seinem Vorgänger schluckt Mistral nicht mehr Strom.

Das Rechnersystem ist mit einer Warmwasserkühlung ausgestattet. Die Wärme wird direkt dort abgeführt, wo sie entsteht: am Prozessor und den Hauptspeichermodule. Diese sind weniger hitzeempfindlich als ältere Systeme. Dadurch darf die Kühlflüssigkeit so heiß werden, dass sie ganzjährig ihre Wärme über das Dach des DKRZ-Gebäudes abgeben kann. Man braucht also keine elektrische Kühlung – das spart Energie. Der Aufwand und die Kosten für die Klimatisierung des Rechners lassen sich dadurch stark reduzieren. Zudem leistet das DKRZ einen weiteren Beitrag zum Klimaschutz: Es bezieht seinen Strom aus erneuerbaren Energien.

Klimaforschung zum Anfassen

Das DKRZ ermöglicht nicht nur hochklassige Klimaforschung, sondern informiert die Öffentlichkeit, Medien, Politiker und Fachleute auch über seine Dienste und neue Ergebnisse der Klimaforschung. Jährlich kommen etwa tausend Besucher, darunter viele Schulklassen, die sich für den Klimawandel, Klimasimulationen und die Supercomputer interessieren. Beim GreenDay oder Girls' Day können Schülerinnen und Schüler in den Beruf eines Klimaforschers reinschnuppern.

Beim Hamburger Tag der Klimawissenschaften, anlässlich der Nacht des Wissens, auf dem Extremwetterkongress oder anderen Veranstaltungen bieten DKRZ-Mitarbeiter Klimaforschung zum Anfassen: Am Klimaglobus oder durch 3D-Brillen können die Besucher mögliche Auswirkungen des Klimawandels verfolgen. Zudem unterstützt das DKRZ Ausstellungen wie die Expo 2015 in Mailand oder den Science-Tunnel der Max-Planck-Gesellschaft mit Exponaten.

Ein Modell für jedermann

Da Klimamodelle für Laien oft ein Rätsel sind, hilft das DKRZ bei der Aufbereitung eines einfachen Klimamodells mit. Dieses sollen Schüler, Studenten und andere Interessierte auf normalen PCs anwenden können – beispielsweise um auszuprobieren, wie

erhöhte Konzentrationen von Treibhausgasen das Klima beeinflussen. Trotz starker Vereinfachungen sind die Ergebnisse in Grundzügen mit denen komplexer Klimamodelle vergleichbar.

Allgemeinverständliche Publikationen zeigen einen Querschnitt der Arbeit am DKRZ und informieren über aktuelle Aktivitäten und Themen. Dazu gehören unter anderem eine Festschrift zum 25-jährigen Jubiläum mit einem historischen Abriss, das alle zwei Jahre erscheinende Jahrbuch und die DKRZ-Mitteilungen.

Ebenso sind Mitarbeiter des DKRZ gefragte Ansprechpartner für Rundfunk, Fernsehen und Zeitungen.

Dem Fachpublikum präsentiert das DKRZ seine Arbeit auf nationalen und internationalen Konferenzen wie der International Supercomputing Conference oder der Generalversammlung der European Geosciences Union. Ebenso halten DKRZ-Mitarbeiter regelmäßig Fachvorträge zur Klimaforschung, zum Hochleistungsrechnen, Datenmanagement oder zur Visualisierung.



Besucher der Nacht des Wissens 2013 im Geomatikum der Universität Hamburg



Nutzer und Projekte

Was erforschen die Nutzer?

Mehr als 1.500 Wissenschaftler nutzen die Rechner und Dienste des DKRZ. Jeder Klimaforscher in Deutschland kann Rechenzeit beantragen. Für viele Forschungsprojekte wird auch in Kooperation mit europäischen und internationalen Wissenschaftlern am DKRZ gerechnet. Einige Beispiele:

MiKlip: Jahre bis Jahrzehnte vorhersagen

Wirtschaft, Politik und Gesellschaft planen nicht in Jahrhunderten, sondern in Jahrzehnten und Jahren. Dafür brauchen sie „mittelfristige Klimaprognosen“, abgekürzt MiKlip. In dem gleichnamigen Projekt, an dem sich 23 deutsche Forschungsinstitute beteiligen, entsteht ein Modellsystem für solche Klimaprognosen. Das DKRZ ist die technische Zentrale des Projekts: Auf dem Hochleistungsrechner führen die Forscher globale oder regionale Klimasimulationen durch, um den Einfluss verschiedener Prozesse auf die Vorhersagbarkeit des Klimas für verschiedene Regionen zu untersuchen. Ebenso verteilt das DKRZ die entstehenden Daten weiter.

HD(CP)²: Wolken und Niederschlag verstehen

„High definition clouds and precipitation for advancing climate projections“ – das ist der vollständige Name

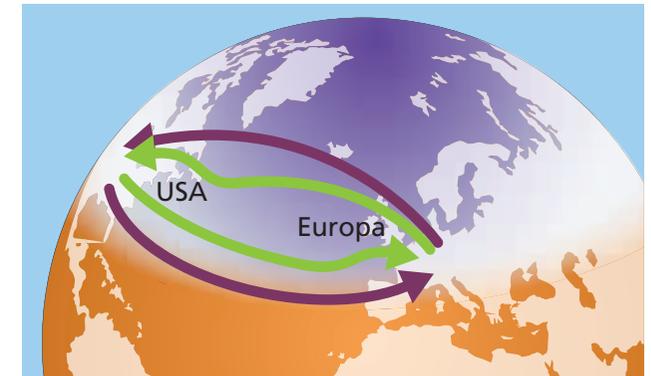
des Projekts HD(CP)². Darin werden Wolken- und Niederschlagsprozesse untersucht, um deren Einfluss auf das Klimasystem besser zu verstehen, denn sie stellen eine der größten Unsicherheiten bei Klimaprojektionen dar. Messende und modellierende Forscher arbeiten hierbei eng zusammen: Ein weiterentwickeltes Modell soll für Deutschland Wolken- und Niederschlagsprozesse in sehr hoher Auflösung simulieren, um sie dann mit Beobachtungsdaten zu vergleichen. Das DKRZ spielt eine zentrale Rolle bei der Modellierung.

REACT4C: Klimaaoptimierte Flugrouten

Durch Emissionen von Kohlendioxid, Stickoxiden, Wasserdampf, Kohlenmonoxid, unverbrannten Kohlenwasserstoffen sowie von Ruß-Aerosolen trägt die Luftfahrt zum Klimawandel bei. Die internationalen Partner des Projekts REACT4C, unter anderem die Europäische Organisation zur Sicherung der Luftfahrt EUROCONTROL, haben mit einem kombinierten Klima-Chemie-Modell und einem Luftverkehrsmodell untersucht, welche Routenänderungen nötig wären, um den Einfluss transatlantischer Flüge auf den Klimawandel zu verringern.

Ein Kernstück dabei war die Berechnung komplizierter Klimakostenfunktionen – etwa zwei Millionen Prozessorstunden des DKRZ-Supercomputers Blizzard wurden

für die Simulationen aufgewandt. Das Ergebnis: Mit Änderungen der Streckenführung und Flughöhe lässt sich die Klimawirkung dieser Flüge verringern – je nach Ausmaß der Klimaaoptimierung ist das mit mehr oder weniger zusätzlichen Kosten verbunden.



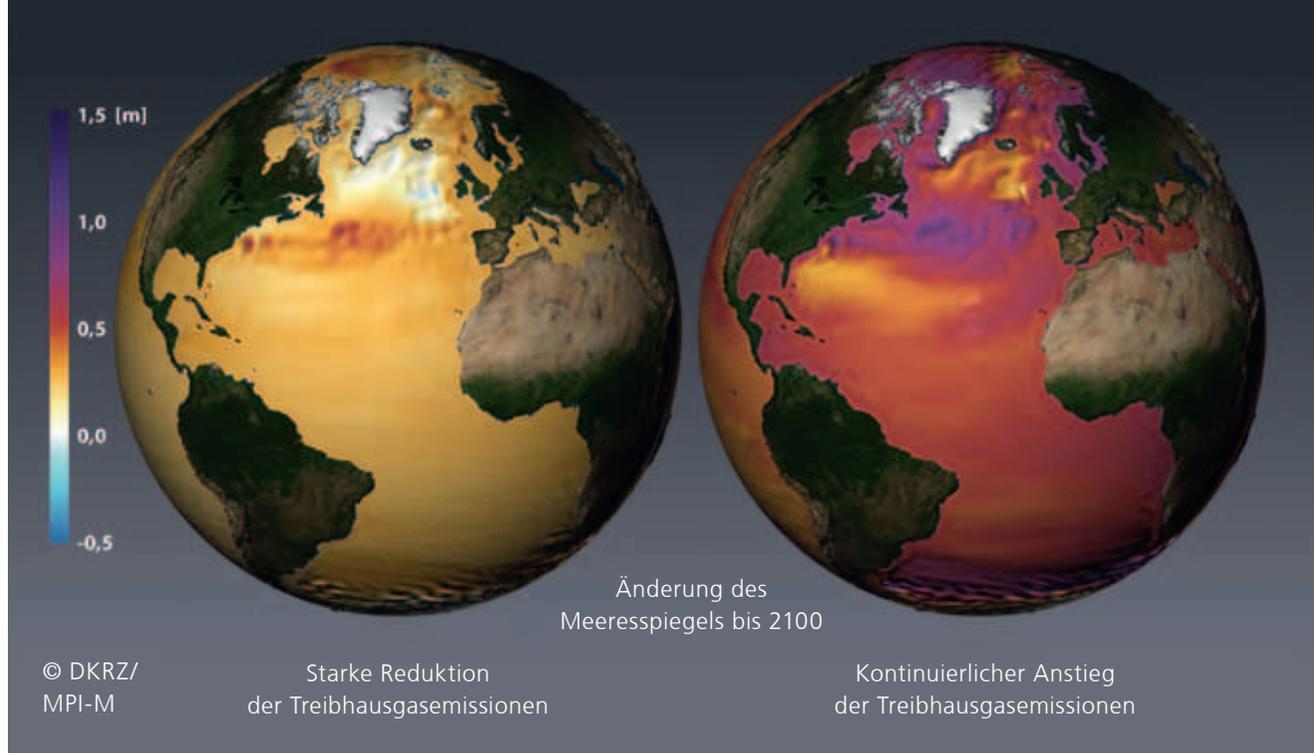
REACT4C: Routenführung für kostenoptimierten Luftverkehr (violette Pfeile) und für klimaaoptimierten Luftverkehr (grüne Pfeile)

Simulationen für die Weltklimaberichte

Regelmäßig fasst der Weltklimarat (IPCC) den Stand der Klimaforschung zusammen. Dafür berechnen Klimamodellierer weltweit in Modellvergleichsprojekten, die CMIP (Coupled Model Intercomparison Project) genannt werden, standardisierte Simulationen. So lassen sich die Ergebnisse gemeinsam auswerten und miteinander vergleichen. Am CMIP5-Projekt für den Weltklimabericht von 2013/2014 beteiligten sich 25 Forschergruppen aus 19 Ländern mit 58 Modellen. Sie simulierten das Klima der Vergangenheit von 1850 bis 2005 und erstellten Projektionen des zukünftigen Klimas bis ins Jahr 2300. Hierfür verwendeten die Wissenschaftler Szenarien mit verschiedenen standardisierten Entwicklungen der künftigen Treibhausgasemissionen. Darüber hinaus wurde das Klima der vergangenen 1.000 Jahre untersucht, und erstmals entstanden Vorhersagen für das Klima in den nächsten zehn Jahren.

Der deutsche Beitrag

Auch in Deutschland haben Klimamodellierer mitgemacht. Sie rechneten auf dem DKRZ-Rechner mit einem Erdsystemmodell vom Max-Planck-Institut für Meteorologie, das auch den Kohlenstoffkreislauf mit-simuliert. Die 350 Klimaexperimente mit den berechneten 13.000 Modelljahren belegten rund zwei Jahre



Je nachdem, wie sich die Emissionen der Treibhausgase künftig entwickeln werden, steigt der Meeresspiegel des Atlantiks und der Polarmeere in den kommenden Jahrzehnten mehr oder weniger stark an (Berechnung mit dem Erdsystemmodell des Max-Planck-Instituts für Meteorologie).

ein Viertel des DKRZ-Supercomputers – normale Notebooks hätten dafür mehr als 1.000 Jahre benötigt. Ebenso spielte das DKRZ eine wichtige Rolle bei der internationalen Verteilung der CMIP5-Daten.

Noch nicht zu spät

Die Simulationen zeigen: Wir können das Zwei-Grad-Ziel noch erreichen. Vorausgesetzt, wir verringern sofort und drastisch die Emissionen von Treibhausgasen. Steigen die CO₂-Konzentrationen aber weiter an, würden sich nicht nur die Temperaturen verändern, sondern auch andere Klimafaktoren. Beispielsweise

könnten die Ozeane schnell versauern. Besonders hart träfe dies kalkschalenbildende Tiere wie Korallen.

Die Ergebnisse der globalen Berechnungen bildeten auch die Datengrundlage für regionale Simulationen. Mit Regionalmodellen berechneten Forscher das Klima für Afrika und Europa – immerhin mit einer Auflösung von 12 bis 50 Kilometern.

Über den weltweiten Erdsystem-Datenverbund ESGF und das World Data Center for Climate können Wissenschaftler, Politiker und andere Entscheidungsträger auf die wichtigsten Daten der CMIP5-Rechnungen zugreifen.

Das DKRZ und seine Partner

Das DKRZ ist eine gemeinnützige GmbH mit vier Gesellschaftern.



Gefördert von:



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



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
Michael Böttinger, Jana Meyer,
Öffentlichkeitsarbeit DKRZ
Daniela Schmidt, wissen und worte

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

Druck
Druckkontor Emden DE GmbH & Co. KG
www.druckkontor-empden.de

Bildnachweis
© Constant/shutterstock.com (Titel)
© cherezoff@fotolia.com (S. 6)
© everythingpossible/fotolia.com (S. 20)
© psdesign1/fotolia.com (S. 24)
© DKRZ (alle weiteren Fotos und Grafiken)

© DKRZ 2015
Klimaneutral gedruckt auf FSC-zertifiziertem Papier

