

# Klimaänderung im Bild – Simulation und Visualisierung in der Erdsystemforschung

## Zusammenfassung

Viele Aussagen über das vergangene, das heutige und das zukünftige Klima lassen sich einzig anhand von Simulationsrechnungen mit numerischen Modellen treffen. Um nur die wichtigsten Komponenten und Wechselwirkungen des Klimasystems in räumlich und zeitlich ausreichender Genauigkeit zu simulieren, sind selbst leistungsfähigste Rechnersysteme Monate bis Jahre ausgelastet. Bei diesen Simulationsexperimenten fallen große Datenmengen an, zu deren Beherrschung es aufwendiger Speicher- und Archivierungstechnologien bedarf. Die Analyse und Auswertung der Modellergebnisse entwickelt sich angesichts des rasanten Datenwachstums zunehmend zu einer echten Herausforderung. Visualisierung als Werkzeug leistet heute einen wichtigen Beitrag zum Verständnis der Ergebnisse und könnte künftig noch an Bedeutung gewinnen, um dieser Herausforderung zu begegnen. Wo steht die Visualisierung im Bereich der Erdsystemforschung heute? Wissenschaftlich sind viele grundlegende Fragestellungen hinsichtlich der Visualisierung zeitabhängiger multivariater 3D-Daten gelöst – doch wie sieht die Praxis aus?

## AUTOR

Michael Böttinger

## Beobachtungen

Die Klima- und Erdsystemforschung ist auf möglichst umfassende Beobachtungen angewiesen. Aktuelle Beobachtungsdaten sind beispielsweise notwendig, um die relevanten Prozesse, die das Wetter- und Klimasystem bestimmen, im Detail zu untersuchen. Anhand von Beobachtungsdaten über längere Zeiträume können auch langsam ablaufende Änderungen erfasst werden.

## Abstract

Numerous findings with respect to the climate of the past, today and the future could only be achieved by means of simulations with numerical climate models. Such simulations need months or years to process on even the most powerful high performance computer systems. As a result of these numerical experiments, very large data sets are produced and hence complex storage and archiving technologies are needed. Dealing with statistical and visual analysis is increasingly becoming a real challenge due to the rapid growth of resulting data. Data visualisation is one of the key technologies in the process of understanding the simulation results. Where do we stand today with respect to the visualisation of earth system model data? Scientifically, many major questions concerning the visualisation of time dependent multivariate 3D data have been answered, but what is the practical availability of satisfactory visualisation solutions which fit our needs?

Umfangreichere meteorologische Beobachtungen gibt es etwa für die letzten 150 Jahre, allerdings ist die Dichte und Qualität der Beobachtungen heute wesentlich höher als etwa zu Beginn des letzten Jahrhunderts.

## Klimamodelle

Dennoch lassen sich viele Aussagen über das vergangene, das heutige und insbesondere auch über das zukünftige Klima einzig anhand komplexer Simulationsrechnungen mit numerischen Modellen treffen. Solche Rechenmodelle basieren auf mathematischen Formulierungen der Gesetzmäßigkeiten, die für die Komponenten

des Klimasystems, Atmosphäre, Ozean, Landoberfläche, Eis usw., gelten.

Im Fall der Atmosphäre sind die wichtigsten physikalischen Gesetze die Erhaltungssätze für Masse, Impuls und Energie sowie Zustandsgleichungen, welche die Abhängigkeit der Dichte von Flüssigkeiten oder Gasen von deren Temperatur und weiterer Zustandsgrößen beschreiben. Setzt man die jeweiligen Gleichungen zueinander in Beziehung, unter Berücksichtigung der auf der Erde herrschenden Randbedingungen wie Größe und Form der Erde, Erdrotation, chemische Zusammensetzung der Atmosphäre, Einstrahlung von der Sonne etc., erhält man Gleichungen, welche die physikalischen Vorgänge in der Atmosphäre beschreiben. Leider sind diese Gleichungen so kompliziert, dass sie sich nicht analytisch lösen lassen.

Die numerische Mathematik bietet aber den Ausweg, die Atmosphäre mit Hilfe eines Rechengitters in diskrete Volumenelemente aufzuteilen und mit Hilfe leistungsstarker Computer Näherungslösungen der Gleichungen für jede Gitterzelle zu berechnen.

Als Ergebnis erhält man für jede Gitterzelle eine Prognose darüber, welche Werte die physikalischen Größen wie z.B. Temperatur, Feuchtigkeit und Wind in diesem Volumenelement zu einem späteren Zeitpunkt annehmen.

Der Vorhersagezeitschritt hängt sehr stark von der räumlichen Auflösung des Rechengitters ab, da aus numerischen Gründen der Rechenzeitschritt umso kürzer gewählt werden muss, je feiner das Gitter ist. Bei den meisten heute eingesetzten globalen Atmosphärenmodellen mit horizontalen Gitterpunktabständen von 100 bis 250 km liegt dieser Zeitschritt in der Größenordnung von einigen Minuten.

In der Vertikalen verwenden viele Modelle unregelmäßige Abstände zwischen den horizontalen Schichten. Dort, wo vertikal die stärksten Änderungen in den physikalischen Parametern auftreten, werden die Abstände möglichst klein gewählt, dort wo „wenig passiert“, sind größere Abstände

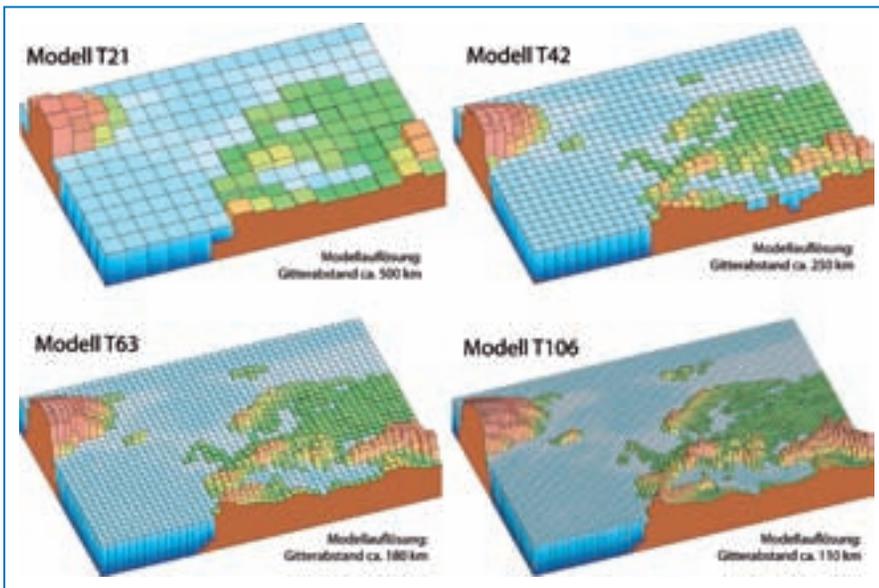


Abbildung 1. Am Beispiel der Modelltopographie sind verschiedene Gitterauflösungen des globalen Atmosphären-Modells ECHAM5 dargestellt. Gezeigt ist jeweils nur ein Ausschnitt.

Grafik: MPI-M.

de ausreichend. Im Fall der Atmosphäre ist der vertikale Abstand zwischen den Modellschichten daher nach unten hin am kleinsten, bei Ozeanmodellen ist es genau umgekehrt. Da der untere Rand der Atmosphäre durch die orographisch gegliederten Landmassen und die Meeresoberfläche begrenzt ist, nutzt man oft so genannte hybride Vertikalkoordinaten, die nach unten hin dem Gelände folgen und nach oben hin zunehmend durch Flächen gleichen Luftdrucks definiert sind.

Je feiner das Rechengitter ist, desto genauere und detailreichere Ergebnisse lassen sich erzielen – allerdings steigt der Rechenaufwand mit der Anzahl der Gitterzellen. Unter Berücksichtigung der notwendigen Anpassung des Simulationszeitschrittes erfordert schon eine Halbierung

des horizontalen Gitterpunktabstandes etwa die zehnfache Rechenzeit! Abbildung 1 zeigt die Modell-Topographien für unterschiedliche Modellkonfigurationen eines globalen Atmosphärenmodells, die auf Basis von höher aufgelösten Topographie-datensätzen wie des GLOBE-Datensatzes [NOAA/NGDC, 2007] berechnet wurden. Man sieht deutlich, dass orographische Merkmale wie z.B. die Alpen oder die Land-Meer-Verteilung bei größeren Modellgittern nur sehr unzureichend repräsentiert werden. Dies hat selbstverständlich Konsequenzen für die atmosphärische Zirkulation; regional differenzierte Ergebnisse können nur mit adäquat hoher Modellauflösung erzielt werden.

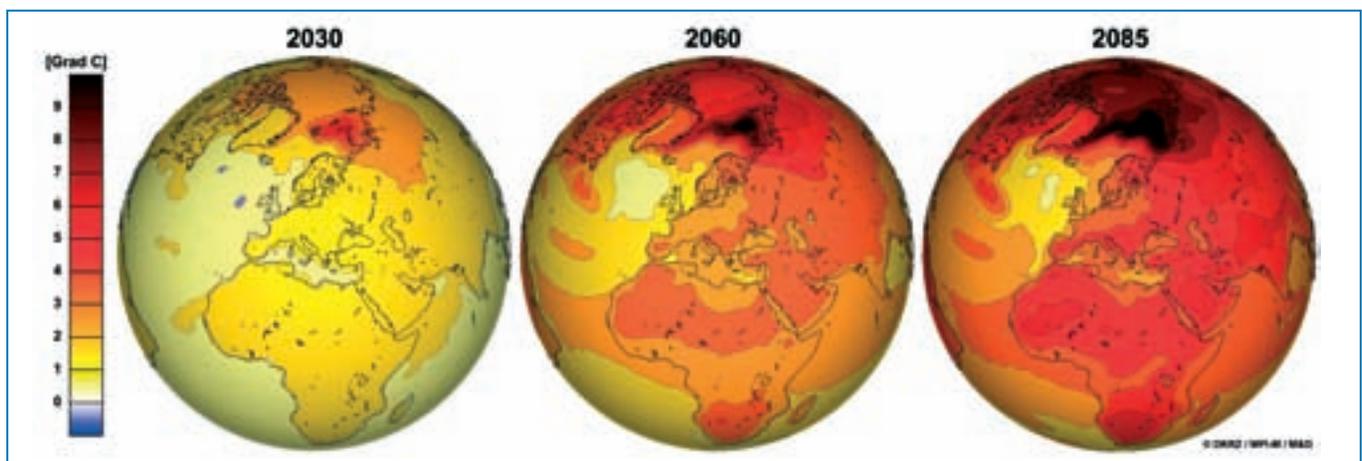
Um mit dem aktuellen globalen Atmosphärenmodell ECHAM5 [Roeckner et al.,

2003] des Max-Planck-Institutes für Meteorologie (MPI-M) die wichtigsten Vorgänge im Klimasystem über hunderte Jahre mit einer horizontalen Auflösung von ca. 200 km bei etwa 30 Schichten in der Vertikalen zu simulieren, müssen für mehrere hunderttausend Volumenelemente mehrere Millionen Zeitschritte berechnet werden. Für Simulationen mit komplexen Klimamodellen sind so viele Rechenoperationen erforderlich, dass diese selbst auf Supercomputern einige Monate dauern können: Mit ECHAM5/MPI-OM [Jungclaus et al., 2006], dem ebenfalls am MPI-M entwickelten gekoppelten Atmosphären-Ozean-Modell, müssen beispielsweise für jedes simulierte Jahr etwa  $4 \cdot 10^{14}$  Gleitkomma-Rechenoperationen ausgeführt werden. Im Rahmen der Rechnungen mit diesem Modell, die für den deutschen Beitrag zum 4. IPCC-Sachstandsbericht [IPCC, 2007] durchgeführt wurden, sind 5000 Modelljahre simuliert worden.

Eine Erhöhung der räumlichen Auflösung um den Preis einer Vervielfachung der Rechenzeit ist daher oft nicht möglich, sofern nicht neue Computer mit schnelleren Prozessoren zur Verfügung stehen oder das Modell durch Parallelisierung (gleichzeitiger Nutzung mehrerer Prozessoren) beschleunigt gerechnet werden kann.

Eine weitere Möglichkeit, zu regional differenzierteren Ergebnissen zu gelangen, ist das so genannte „Dynamische Downscaling“: Mit hoch aufgelösten Regionalmodellen, die an den Modellrändern mit bereits vorhandenen Daten, also z.B. vorher berechneten Ergebnissen globaler Modelle, angetrieben werden, können Simulationen für regional begrenzte Bereiche durchgeführt werden. Mit dieser Methode können die regional unterschiedlichen

Abbildung 2. Simulierte Änderung der bodennahen Lufttemperatur für das IPCC Szenario A1B, simuliert mit dem gekoppelten Atmosphären-Ozeanmodell ECHAM5/MPI-OM des Max-Planck-Institutes für Meteorologie.



Klimaänderungen auch für orographisch stark gegliederte Bereiche differenziert untersucht werden.

Der Begriff Wetter ist vornehmlich durch die physikalischen Prozesse in den unteren Schichten der Atmosphäre charakterisiert. Unter Wetter versteht der Mensch das, was er davon aktuell erleben kann: Wolken, Wind, Sonne, Niederschläge etc. Unter Klima versteht man die Statistik des Wetters über einen längeren Zeitraum, z.B. über 30 Jahre. Da das Wettergeschehen eine chaotische Natur hat, muss der betrachtete Zeitraum lang genug sein, um die Statistik überhaupt erst bilden zu können.

Wenn man Klima simulieren möchte, muss man neben der Atmosphäre auch weitere Komponenten des Klimasystems (einschließlich etwaiger Wechselwirkungen) berücksichtigen, wie z.B. den Ozean, die Landoberfläche und das Meereis.

Im Ozean gibt es eine vergleichbare Zirkulation wie in der Atmosphäre, die jedoch langsamer abläuft; es treten deutlich niedrigere Strömungsgeschwindigkeiten auf. Aus diesem Grund kann der Rechenzeitschritt in Ozeanmodellen länger gewählt werden als im Fall der Atmosphäre. Ozeanmodelle haben ihr eigenes Rechengitter; vielfach verwendet man heute aus numerischen Gründen sogar Gitter mit krummlinigen Koordinatensystemen [Marsland et al., 2003] (Abbildung 3).

An der Meeresoberfläche tauschen Atmosphäre und Ozean „Informationen“ aus: Wind, der die Meeresströmung antreibt, Wärmeaufnahme bzw. -abgabe sowie Niederschlag und Verdunstung. In einem Klimamodell funktioniert das ähnlich; Atmosphärenmodell und Ozeanmodell werden „gekoppelt“. Ein weiteres Computerprogramm, der „Koppler“, sorgt für einen möglichst effektiven Austausch der Informationen der unterschiedlich getakteten Einzelmodelle, so dass diese im Idealfall die benötigten Daten auf „ihrem“ Gitter ohne Wartezeit zur Verfügung haben.

Abbildung 4 zeigt schematisch das vom MPI-M entwickelte Klimamodell ECHAM5/MPI-OM, welches die wichtigsten physikalischen Prozesse in Atmosphäre und Ozean einschließlich des Meereises sowie einer Behandlung der Landoberfläche umfasst. Neben der Form der Landoberfläche (also der Orographie) und der damit verbundenen Unterteilung in Land und Meer hat auch ihre Beschaf-

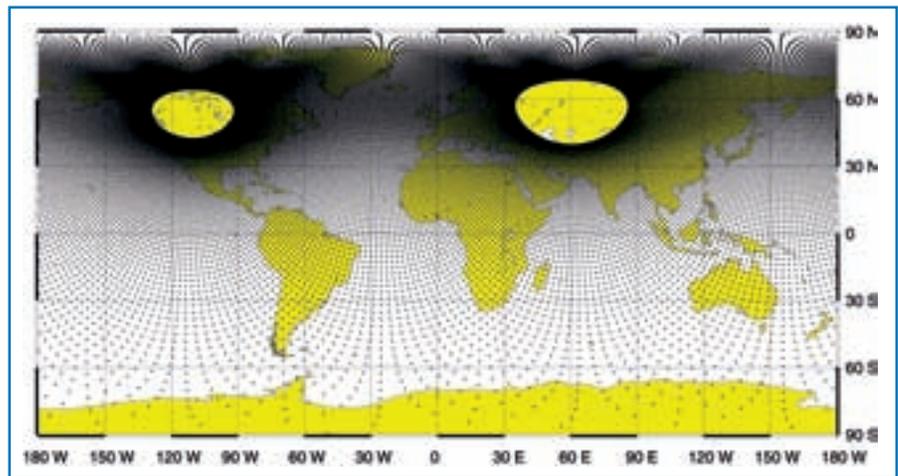


Abbildung 3. Krummliniges Modellgitter des ozeanischen Zirkulationsmodells MPI-OM in einer Konfiguration, die den Nordatlantik besonders hoch auflöst. Grafik: MPI-M.

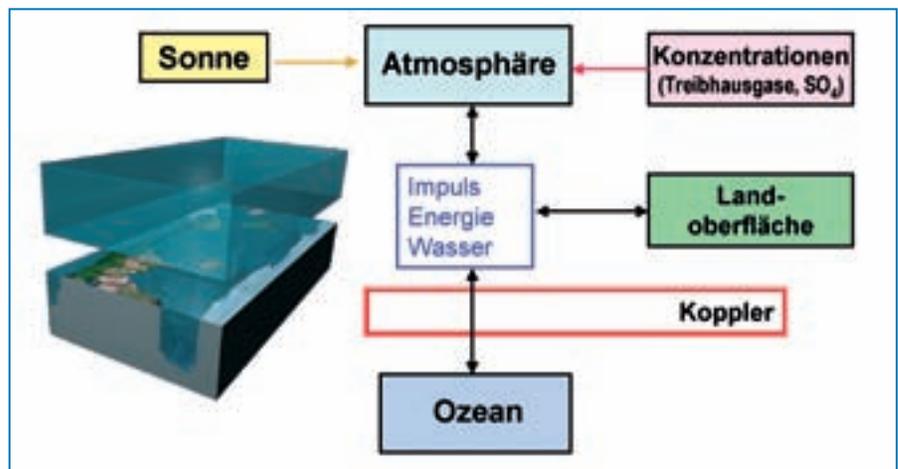
fenheit eine große Bedeutung. Dies betrifft besonders die für den hydrologischen Zyklus relevanten Bodenparameter sowie das Rückstreuvermögen für einfallendes Sonnenlicht (Albedo). In [Hagemann, 2002] wird beschrieben, wie die für ECHAM5 relevanten Bodenfelder auf Basis einer hoch aufgelösten Landökosystem-Klassifikation des USGS bestimmt wurden.

Im Gegensatz zur deterministischen Wettervorhersage über einige Tage, bei der man die Startbedingungen möglichst genau kennen muss, sind bei Klimasimulationen mit gekoppelten Modellen über Jahrzehnte oder Jahrhunderte die Randbedingungen von großer Bedeutung. Eine signifikante Änderung der Randbedingungen kann - mit einiger Zeitverzögerung - zu einem geänderten Klima führen. Das direkte Ergebnis ist ein Wetterverlauf (sowie der entsprechende Verlauf in den anderen Kompartimenten des Klimasystems, z.B. dem Ozean), der allerdings nicht direkt, wie bei einer Wettervorhersage, sondern über seine

statistischen Merkmale zu interpretieren ist. Wenn ein gekoppeltes Klimamodell das „bekannte“ Geschehen im physikalischen Klimasystem mit all seinen statistischen Eigenschaften, Mustern, etc. in ausreichender Genauigkeit reproduzieren kann, können damit verschiedenste Experimente durchgeführt werden.

Eine prominente Anwendung von gekoppelten Klimamodellen ist die Simulation von Klimaänderungsszenarien wie den bereits erwähnten IPCC-Rechnungen. Bei Treibhausgasszenarien gibt man z.B. die atmosphärischen Konzentrationen der Treibhausgase und Aerosole im Verlauf der Zeit als eine zeitlich veränderliche Randbedingung vor, und das Klimamodell berechnet die Antwort des physikalischen Klimasystems darauf. Im Fall der IPCC Rechnungen wurden zunächst Szenarien entwickelt, die möglichst die ganze Bandbreite verschiedener plausibler demographischer, technischer und politischer Entwicklungen beschreiben [IPCC, 2000]. Durch mensch-

Abbildung 4. Schematische Darstellung des gekoppelten Klimamodells ECHAM5/MPI-OM.



liche Aktivitäten werden je nach Landnutzung, Energieerzeugung, Verkehr etc. unterschiedliche Mengen verschiedener Spurengase und Aerosole freigesetzt. Auf Basis der Szenarien wird abgeschätzt, welche Emissionsverläufe für diese verschiedenen Gase und Aerosole damit verbunden sind. Um den für die Berechnung der Strahlung relevanten zeitlichen Verlauf der Konzentrationen dieser Substanzen zu erhalten, wurde mit einem separaten Kohlenstoffkreislaufmodell berechnet, wie groß der Anteil der von Vegetation und Ozean aufgenommenen Gase ist, und wie viel in der Atmosphäre verbleibt. Aktuell wird in der Klimaforschung an Erweiterungen der Klimamodelle gearbeitet, die auch den Kohlenstoff- sowie weitere Stoffkreisläufe simulieren. Der Vorteil solcher Erdsystemmodelle ist, dass damit auch Rückkopplungen zwischen den physikalischen und den chemisch-biologischen Komponenten simuliert und Klimaprojektionen direkt anhand von Emissionsszenarien berechnet werden können.

Um Zufallsergebnisse und statistisch abgesicherte Trends besser trennen zu können, werden oft so genannte Ensemble-Rechnungen durchgeführt: die Simulationen werden mit Variationen der Startwerte, aber unter Beibehaltung der Randbedingungen mehrere Male wiederholt.

Bei den Szenarienrechnungen für den deutschen Beitrag zum aktuellen vierten IPCC-Bericht, die mit dem beschriebenen vom MPI-M entwickelten gekoppelten Klimamodell auf den Höchstleistungsrechnern des Deutschen Klimarechenzentrums (DKRZ) durchgeführt wurden, hat man auf diese Weise jeweils drei Realisationen für jedes Szenario berechnet.

Experimente in dieser Größenordnung sind in vielerlei Hinsicht sehr aufwändig: selbst auf Supercomputern dauern sie sehr lange und es werden extrem viele Daten erzeugt, die abgespeichert und ausgewertet werden müssen. Die IPCC-Simulationen mit dem oben beschriebenen physikalischen Klimamodell haben auf dem HLRE, dem „Höchstleistungsrechnersystem für die Erdsystemforschung“ [Böttinger, 2004], über ein Jahr benötigt und während dessen etwa ein Viertel der gesamten Ressourcen belegt. Die Ergebnisse werden bei solchen Simulationen zunächst auf schnellen Festplattensystemen zwischengespeichert, und in einem möglichst bald folgenden zweiten Schritt archiviert. Weil diese Da-

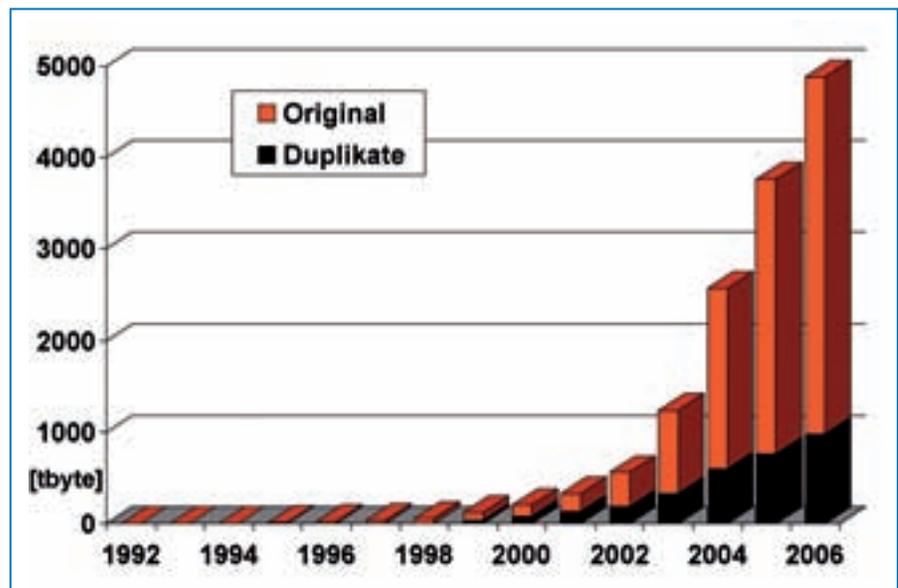


Abbildung 5. Entwicklung des Datenarchivs am Deutschen Klimarechenzentrum von 1992 - 2006.

ten von sehr vielen Arbeitsgruppen genutzt werden, wurden die Daten in einem relationalen Datenbanksystem (unter Oracle) abgespeichert, der CERA Klimadatenbank bzw. im „World Data Center for Climate (WDCC) [Modelle und Daten, 2007]. Von dort können die Daten von Klimaforschern und Klimafolgenforschern über das Internet ausgewählt und abgerufen werden.

Etwa 150 Terabyte, also 150 000 Gigabyte nehmen die Hamburger IPCC-Ergebnisse in der CERA-Klimadatenbank ein, die heute mit einer Datenbankgröße von mehr als 280 Terabyte eine der größten weltweit ist. Die Menge an Simulationsergebnissen, die in dem roboterbetriebenen Magnetbandarchiv des DKRZ gespeichert ist, ist allerdings noch um eine Größenordnung umfangreicher. In Abbildung 5 sieht man das exponentielle Anwachsen des Datenarchivs am DKRZ während der letzten 15 Jahre; heute sind dort etwa 6 Petabyte (also 6 000 Terabyte) Simulationsdaten archiviert und zugreifbar.

### Datenstrukturen und Formate

Für die weitere Speicherung, die weitere Auswertung und Visualisierung der Modellergebnisse sind Datenstruktur und Dateiformat von großer Bedeutung.

Die Daten einer Modellkomponente, z.B. der Atmosphäre, sind dreidimensional, zeitabhängig und multivariat; es gibt also für jedes Gitterelement Zahlenwerte für die verschiedenen physikalischen Größen - zu unterschiedlichen Zeitpunkten. Wie im letzten Abschnitt beschrieben, verwendet

man unterschiedliche Gitter für die Simulation der beteiligten Komponenten des Klimasystems, die auch für die Speicherung der Ergebnisse verwendet werden und möglichst von der Visualisierung direkt unterstützt werden sollten: Rektilineare Gitter (rechtwinklig, ungleichabständig), kurvilineare Gitter (gekrümmte Gitterlinien) und zunehmend auch irreguläre Gitter wie z.B. Dreiecksgitter (icosahedral).

Üblicherweise werden die Daten nicht für jeden Rechenzeitschritt abgespeichert, sondern so selten wie möglich - aber so oft wie nötig, um anhand der Daten die zu untersuchende Fragestellung noch bearbeiten zu können. Benötigt man beispielsweise den Tagesgang, muss die Ausgabe für jeden simulierten Tag mindestens vier Mal, also 6-stündig erfolgen. In diesem Fall repräsentieren die Zahlenwerte Mittelwerte für die entsprechenden Zeitintervalle.

Auch im Bereich der Klimaforschung haben sich einige „Standards“ entwickelt, die möglichst große Austauschbarkeit und Interoperabilität gewährleisten sollen. Das von der WMO (World Meteorological Organisation) definierte maschinenunabhängige GRIB-Format [ECMWF, 2007] hat sich bei vielen Einrichtungen und Forschungsgruppen als Quasi-Standard für Atmosphärenmodelldaten durchgesetzt, obwohl es mit verlustbehafteter Kompression arbeitet. In Anbetracht der Kosten für die Archivierung der großen Datenmengen müssen die Daten möglichst gut komprimiert abgespeichert werden, und für die Auswertung ist die verbleibende Ge- ▶

nauigkeit hoch genug.

Ein weiteres viel verwendetes Datenformat ist das ebenfalls maschinennunabhängige NetCDF-Format [Unidata, 2007] – ein „selbstbeschreibendes“ Format für geowissenschaftliche Daten. Dieses unterstützt die gleichzeitige Speicherung von Metadaten mit den Daten, wie z.B. einer Beschreibung des Experimentes, der Struktur der Daten, des Gitters, der enthaltenen Größen und deren Einheiten etc. Speziell für Klimasimulationen wurde eine Konvention entwickelt, die Regeln für Metadaten in diesem Bereich aufstellt: NetCDF-CF [Eaton et al., 2007]. Aufgrund seiner Vorzüge wird das Format oft bei der Auswertung und Visualisierung genutzt – leider aber ist aufgrund der bisher nicht unterstützten Kompression weniger gut für die Langzeitarchivierung großer Datensätze geeignet.

### Visualisierung in der Klimaforschung

Obwohl man es bei Klimasimulationen mit zeitabhängigen, dreidimensionalen multivariaten Daten zu tun hat, werden in der Fachliteratur fast ausschließlich Darstellungen von Kurven gemittelter Größen oder meist horizontalen 2D-Schnitten in der Form von Isolinien- oder Contourflächenkarten publiziert. 3D-Visualisierungen von Simulationsdaten werden in Fachzeitschriften im Bereich Klima- und Erdsystemforschung extrem selten verwendet. So findet sich im gesamten IPCC Bericht 2001 [IPCC, 2001], der Zusammenfassung der wichtigsten Publikationen zum Themenbereich „Klimaänderung“, keine einzige 3D-Visualisierung von Simulationsergebnissen.

Inhaltlich lassen sich allerdings auch viele Fragestellungen mit einfachen zweidimensionalen Kartendarstellungen oder sogar 1D-Kurvendarstellungen, z.B. des zeitlichen Verlaufs gemittelter Größen, beantworten – schließlich spürt der Mensch Klimaänderungen insbesondere dort, wo er lebt: nahe der Erdoberfläche. Für ein Verständnis der räumlich zeitlichen Struktur verschiedener physikalischer oder anderer Größen kann es auf der anderen Seite extrem hilfreich sein, die Daten dreidimensional und zeitabhängig – also animiert – darstellen zu können.

Ein weiterer plausibler Grund für den spärlichen Einsatz von 3D-Visualisierungen ist, dass bei schriftlichen Publikationen

meist eindeutige quantitative Darstellungen gefordert sind, die unter Verwendung der gleichen Eingangsdaten auch von anderen Wissenschaftlern reproduziert werden können. Dies ist bei 3D-Visualisierungen aufgrund der zusätzlichen Möglichkeiten (Kameraeinstellungen, Blickwinkel, Beleuchtung, etc.) prinzipiell nur eingeschränkt möglich.

Andere mögliche Gründe liegen darin, dass es meist zeitaufwändig und kompliziert ist, 3D-Visualisierungssysteme zu erlernen und damit eigene Daten zu visualisieren. Für viele Visualisierungssysteme müssen erst Kopien der Daten in einem jeweils spezifischen Format angelegt werden.

### Anforderungen

Je besser ein Visualisierungssystem Größe, Struktur und möglichst auch das Format von „typischen“ Klimamodelldaten direkt unterstützt und die anwendungsspezifischen Mindestanforderungen erfüllt, desto weniger Aufwand entsteht naturgemäß für den Anwender.

### Bezug zur Erde – geographisches Mapping

Im Hinblick auf die 3D-Visualisierung ist es insbesondere bei nicht-regulären Gittern notwendig, sich genauer mit dem geographischen Mapping, der Zuordnung der Volumenelemente zu geographischen Koordinaten zu befassen. Im Gegensatz zu den meisten GIS-Anwendungen sind die Daten nicht nur für die Erdoberfläche definiert, sondern – je nach Anwendung, auch für den Raum darüber oder darunter.

Jedem Gitterelement bzw. dessen Eckpunkten lassen sich in der Horizontalen eindeutige geographische Koordinaten zuordnen. In der Vertikalen werden, wie oben beschrieben, unterschiedliche Koordinatensysteme verwendet. Im Fall der Atmosphäre sollten die Vertikalkoordinaten aus Sicht des Visualisierungsprogramm möglichst für jede Schicht einheitlich durch Höhenwerte definiert sein, oder wenigstens in Form von Druckwerten, die man unter Vernachlässigung der lokalen wetterbedingten Druckvariationen auf Höhenkoordinaten überführen kann. Aus wissenschaftlicher Sicht wäre es wünschenswert, Daten direkt auf den für die Simulation verwendeten Originalgittern – etwa z.B. mit hybriden Vertikalkoordinaten – zu visualisieren. Allerdings wären hierfür weitere Daten wie z.B. der jeweilige Bodendruck und der

Modellorographie sowie Spezialkenntnisse zur Berechnung der Höhen notwendig.

### Special Values

Im Gegensatz zu Gittern von FEM-Modellen, die in der Regel nur dort Gitterelemente haben, wo auch Berechnungen durchgeführt werden müssen, sind die Gitter der Klimamodelle „flächendeckend“, sie füllen also den ganzen Raum des Modellgebietes. Im Falle des Ozeans führt dies dazu, dass viele Volumenelemente auch dort sind, wo gar kein Wasser vorhanden ist – nämlich in der Landmasse des Ozeanbeckens. Diese Gitterzellen (für die natürlich auch keine Berechnungen durchgeführt werden) werden in den Ergebnisdateien markiert: Man schreibt einen Wert hinein, der in den Daten nicht vorkommen kann, z.B. eine vorher festgelegte sehr große positive oder negative Zahl.

Ein Visualisierungsprogramm, welches dieses Konzept berücksichtigt, blendet die entsprechenden Gitterboxen ebenfalls einfach aus – die Stellen, wo dieser Wert auftaucht, werden einfach freigelassen. Insbesondere darf das Programm nicht zwischen Gitterzellen mit gültigen Werten und den markierten Zellen interpolieren, weil dort sonst völlig falsche Werte dargestellt werden.

### Standard: 2D-Visualisierung

Wie oben erwähnt, werden im „alltäglichen Wissenschaftsbetrieb“ hauptsächlich spezialisierte 2D-Lösungen eingesetzt, die im Hinblick auf die Visualisierung und Analyse meteorologischer oder ozeanographischer Simulationsdaten entwickelt wurden und die beschriebenen speziellen Anforderungen berücksichtigen.

Allen Lösungen dieser Art ist gemein, dass sie immer nur einen 2D-Schnitt durch den (zeitabhängigen) 3D-Datenraum darstellen können. Die Visualisierung erfolgt bei den meisten Systemen wahlweise interaktiv auf Kommandozeilenebene bzw. durch die Abarbeitung von vorher zusammengestellten Scripten (Beispiele: GrADS [COLA, 2007], CDAT [PCMDI, 2007], NCAR [NCAR, 2007], Ferret [NOAA/PMEL, 2007], GMT [GMT, 2007]). Einige Lösungen verwenden eigene Kommando- bzw. Scriptsprachen (z.B. GrADS); andere nutzen allgemein verfügbare und mächtigere Sprachen wie Python (z.B. CDAT). CDAT beinhaltet mit „vcdat“ auch ein graphisches User Interface, und NCAR Gra-

phics gibt es auch in Form von Programmierschnittstellen für FORTAN und C.

Der große Vorteil dieser Systeme ist, dass sie die notwendigen Datenformate direkt unterstützen und die gängigen 2D-Visualisierungs-Methoden (Isolinien, Contourflächen, Pfeildarstellungen für Vektorfelder etc.) in Kombination mit geographischem Mapping anbieten. Die Darstellung kann in verschiedenen Kartenprojektionen erfolgen. Zeitabhängige Daten lassen sich direkt als Animation darstellen. Der Lernaufwand der Systeme ist unterschiedlich hoch, aber vorgefertigte Scripte können meist mit relativ geringem Lern- und Arbeitsaufwand an konkrete Problemstellungen angepasst werden.

Eine weitere Funktionalität, welche für die Auswertung von Simulationen notwendig ist und welche die spezialisierten 2D-Systeme meist umfassen, ist die Möglichkeit, die Daten z.B. zeitlich oder räum-

lich zu filtern oder etwa mit anderen Daten zu verknüpfen. Wenn etwa eine Temperaturänderung visualisiert werden soll, muss man auf Gitterpunktebene eine Differenz zwischen einem Anfangszustand und dem geänderten Zustand bilden. Solche Operationen können zwar bereits vor der Visualisierung auf Dateiebene mit separaten Werkzeugen wie cdo [Schulzweida, 2007] oder nco [NCO, 2007] durchgeführt werden, aber gerade bei der interaktiven Arbeit mit Daten ist es effektiver, Visualisierung und Analyse in einer integrierten Umgebung nutzen zu können.

### High-End-Visualisierung

#### Motivation

Viele Vorgänge im Klimasystem sind Teil komplexer räumlich und zeitlich veränderlicher Prozesse und Wechselwirkungen in und zwischen den Kompartimenten Atmosphäre, Ozean, Kryosphäre und Biosphäre. Da mit 2D-Methoden weitestgehend nur einzelne Schnitte durch Raum und Zeit visualisiert werden können, ist oft das Betrachten sehr vieler Einzelbilder mit Darstellungen verschiedener Größen zu verschiedenen Zeiten für ein tief gehendes Prozessverständnis erforderlich.

Durch Verwendung mehrerer Methoden gleichzeitig (z.B. 2D-Contourflächen der Temperatur mit darüber gelegten Windpfeilen) sowie der animierten Darstellung für zeitabhängige Daten können manche Teilprobleme adäquat behandelt werden, aber einen umfassenderen und intuitiveren Zugang bietet die 3D-Visualisierung, da hier bei geschickter Wahl der Visualisierungsmethoden mehrere Größen gleichzeitig räumlich und animiert dargestellt werden können. Essentiell für ein räumliches Verständnis der Strukturen ist dabei die Bewegung der „Kamera“, um auch die Rückseite bzw. verdeckte Objekte zu erfassen. Bei der interaktiven 3D-Visualisierung kann der Betrachter die Kamera bzw. das Objekt

selbst steuern und sich entstandene „Fragen“ nach der räumlichen Struktur selbst beantworten. Darüber hinaus kann dieser Prozess durch die Verwendung von stereoskopischen Displays vereinfacht und beschleunigt werden.

In Anbetracht des rasanten Anwachsens der Datenmenge, die im Rahmen von Simulationsprojekten erzeugt werden, kann die 3D-Visualisierung potentiell einen wesentlichen Beitrag zur (visuellen) Qualitätskontrolle und Auswertung leisten, da qualitative Merkmale wie ungefähre Position, Form und Stärke von Extremwerten in zeitabhängigen dreidimensionalen Feldern visuell sehr schnell erfasst werden können.

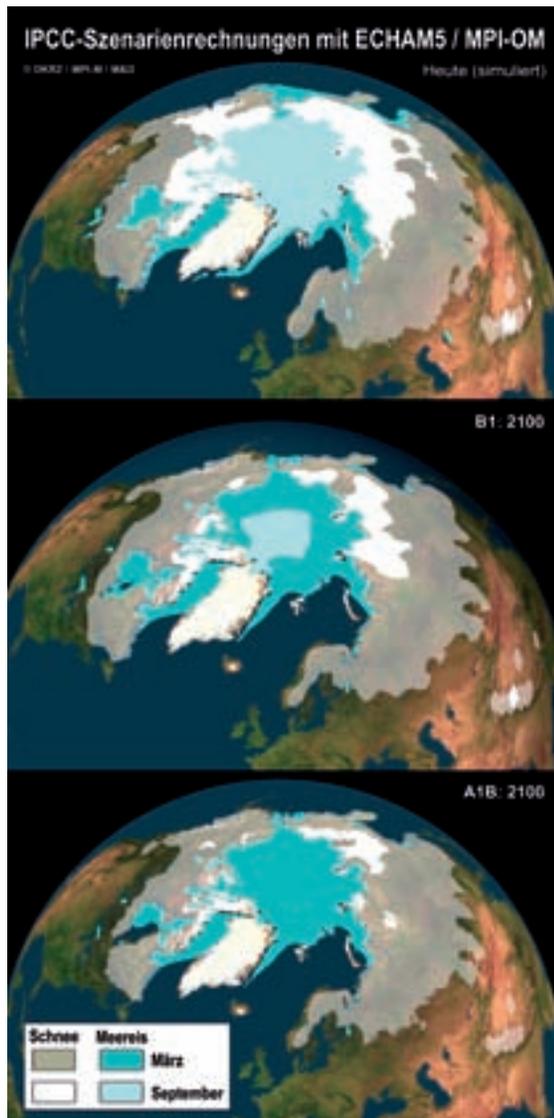
Ein weiteres wichtiges Einsatzfeld der High-End-Visualisierung liegt in der Aufbereitung von Simulationsergebnissen für die externe Kommunikation: Mit dem Thema Klimawandel liegt die Klima- und Erdsystemforschung in den letzten Jahren sehr stark im Blickpunkt der Öffentlichkeit. Aussagekräftige Darstellungen der Ergebnisse in Form von fernsehtauglichen Animationen und druckfähigen Grafiken (siehe Abbildung 2 und 6) sind heute unerlässlich, um Bevölkerung und Politik zu erreichen.

#### Software

Eine Vielzahl von Methoden und Algorithmen zur 3D-Visualisierung von zeitabhängigen skalaren und vektoriellen 3D-Daten sind bereits vor einigen Jahren entwickelt und veröffentlicht worden, und die wichtigsten sind im Funktionsumfang der hier diskutierten Lösungen enthalten. Neuere Entwicklungen aus den letzten Jahren sowie sinnvolle visuelle Verbesserungen, wie z.B. die Darstellung von Schatten, welche die Tiefenwahrnehmung verbessern, sind dagegen weder in kommerziellen Systemen noch in den meist schon betagteren frei verfügbaren Systemen enthalten.

Welche 3D-Visualisierungswerkzeuge sind für die Arbeit mit Klimamodell-daten geeignet und erfüllen die wichtigsten Anforderungen? Um es vorwegzunehmen: obwohl sich mit allen Systemen hervorragend einzelne Methoden anwenden bzw. Teilaufgaben lösen lassen, erfüllt heute leider kein einziges 3D-Visualisierungssystem wirklich alle Anforderungen und Wünsche, die bei der Arbeit mit Erdsystemmodell-daten auftreten. Eine Aufzählung solcher gewünschten anwendungsspezifischen ▶

Abbildung 6. Simulierte Meereis- und Schneebedeckung für heute und für die IPCC Szenarien A1B und B1 im Jahr 2100.



Merkmale wurde schon in [Böttinger, M., Biercamp, J, Schultz, M., 2002] gegeben.

Einige Lösungen sind frei verfügbar - sie sind meist in Form von Source Code erhältlich. Wenn ein Programm nicht bereits als ausführbare Binärversion für die angestrebte Plattform verfügbar ist, sollte man am besten über Programmiererfahrung verfügen; oft nämlich müssen systemspezifische Anpassungen vorgenommen werden und weitere (frei verfügbare) Softwarekomponenten installiert werden, damit sich das System übersetzen und installieren lässt. Solche Abhängigkeiten bestehen meist auch hinsichtlich der Versionen der verwendeten Komponenten, so dass es je nach Zielplattform einiger Arbeit bedarf, bis alles aufeinander abgestimmt installiert ist und die eigentliche Anwendung beginnen kann.

Kommerzielle Lösungen müssen verständlicherweise meist für ein breiteres Anwenderspektrum entwickelt werden, damit eine kritische Masse von (zahlenden) Nutzern Verbesserungen, Erweiterungen und Anpassungen an neue Hardware und Betriebssysteme finanziert. Als Gegenleistung für die zum Teil nicht geringen Anschaffungskosten und Wartungsgebühren erwartet der Anwender ein stabiles Produkt, welches ihm hilft, sich auf die eigentliche Anwendung – die Visualisierung seiner Daten – zu konzentrieren. Die grundlegenden und seit vielen Jahren bekannten Methoden wie Isosurfaces, Volume Rendering, etc. sollten einfach und ohne Einschränkungen auf bestimmte Gitter eingesetzt werden können. Darüber hinaus sollte man erwarten, dass nach und nach neuere Visualisierungsalgorithmen in den Funktionsumfang aufgenommen werden.

Im Folgenden werden die wichtigsten freien und kommerziellen 3D-Visualisierungslösungen beschrieben, die am DKRZ eingesetzt werden:

Vis5d [Hibbard W. L., et al. , 1994] wurde speziell für die interaktive Visualisierung von meteorologischen Simulationsdaten entwickelt, allerdings müssen die Daten zuvor in ein eigenes Format gebracht werden. Die aktuelle Version Vis5D+ unterstützt nur reguläre und rektilineare Modellgitter und ist daher nur für die Daten entsprechender Modelle geeignet. Der große Vorteil von Vis5D ist das wirklich gute Antwortverhalten der Applikation; mit geeigneter Hardware können kleine bis mittelgroße Datensätze mit einem hohen Maß

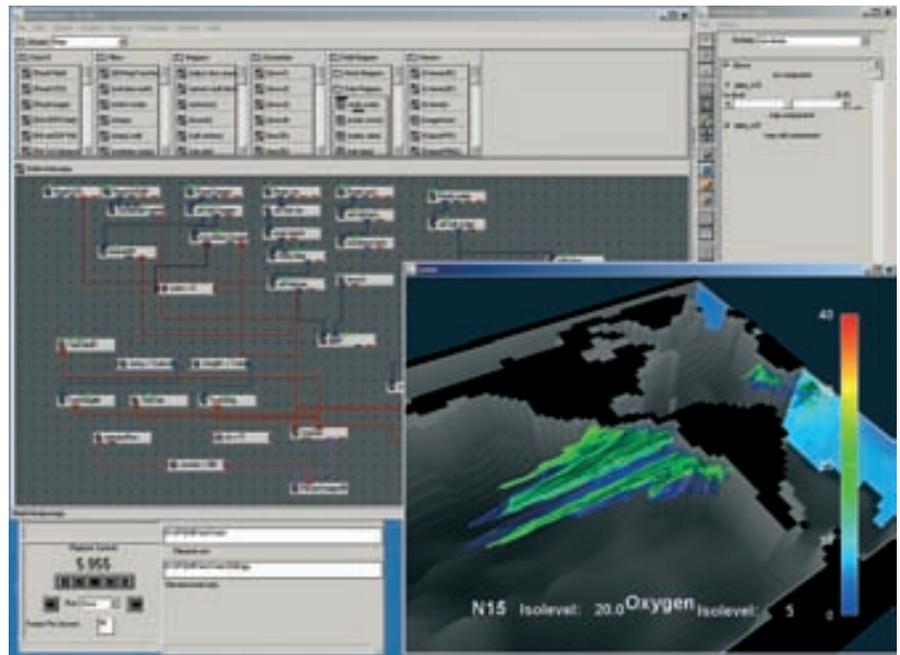


Abbildung 7. Graphisches User Interface von AVS/Express. Auf der linken Seite sieht man das Visualisierungsnetzwerk, rechts unten die resultierende Szene – Daten aus einem Biogeochemie Modell des Ozeans, entwickelt am Hamburger Max-Planck-Institut für Meteorologie.

an Interaktivität visualisiert werden. Leider wurde das System seit einigen Jahren nicht mehr weiterentwickelt und an neuere Hardware und die steigenden Datengrößen angepasst.

Am DKRZ wurden in den letzten Jahren viele Visualisierungsprojekte mit AVS/Express [Advanced Visual Systems, 2007] durchgeführt. AVS/Express ist ein kommerzielles Visualisierungssystem, bei dem die Anwendungen visuell in Form von Netzwerken - durch das visuelle Verknüpfen von Modulen aus mitgelieferten Modulbibliotheken – programmiert werden. AVS/Express ist sehr mächtig – es bietet unterschiedlichste Funktionen zur Visualisierung unterschiedlichster Datentypen. Hier mag auch der Grund dafür liegen, dass der Lernaufwand verhältnismäßig hoch ist: das GUI ist unübersichtlich (Beispiel: Abbildung 7) und die Software sehr komplex.

Standardmäßig läuft das Programm single-threaded – es nutzt also nur eine CPU bzw. bei Dual-Core CPUs nur einen Kern. Neuerdings gibt es bestimmte Module optional auch in einer parallelisierten Version (PST), so dass man Anwendungen mit Hilfe paralleler Hardware potentiell beschleunigen kann – sofern insbesondere die rechenintensiveren der verwendeten Module auch parallelisiert vorhanden sind. Eine weitere optionale Erweiterung ist die

AVS Multi Pipe Edition (MPE), mit der parallele Grafikhardware für das Rendern (Bildberechnung) einer Szene mit unterschiedlichen „Kameras“ genutzt werden kann, insbesondere für den Einsatz mit Tiled Displays, für eine passive Stereoprojektion oder bei immersiven VR-Systemen.

Amira [Mercury Computer Systems, 2007] wurde ursprünglich am Zuse Institut Berlin (ZIB) entwickelt und wird heute von der amerikanischen Firma Mercury Computer Systems als kommerzielles Produkt vertrieben. Das Bedienkonzept ist ähnlich wie bei AVS; Module werden visuell zu einem Netzwerk verknüpft, um eine Applikation zusammen zu stellen.

Auch Amira ist ein System, mit dem alle möglichen Datentypen visualisiert werden können, allerdings hat es besondere Stärken für Anwendungen im medizinischen und im geophysikalischen Bereich. Ebenso wie AVS gibt es für Amira eine VR-Erweiterung zur Nutzung immersiver Displays und paralleler Render-Hardware. Bis auf diese Möglichkeit, die eigentliche Grafikkalkulation für verschiedene Displays z.B. auf einem Cluster zu verteilen, ist das System bisher weitestgehend single threaded, also nicht parallelisiert.

Dennoch bietet Amira mit dem „Very Large Data Pack“ schon heute einen viel versprechenden Ansatz, um Datensätze in-

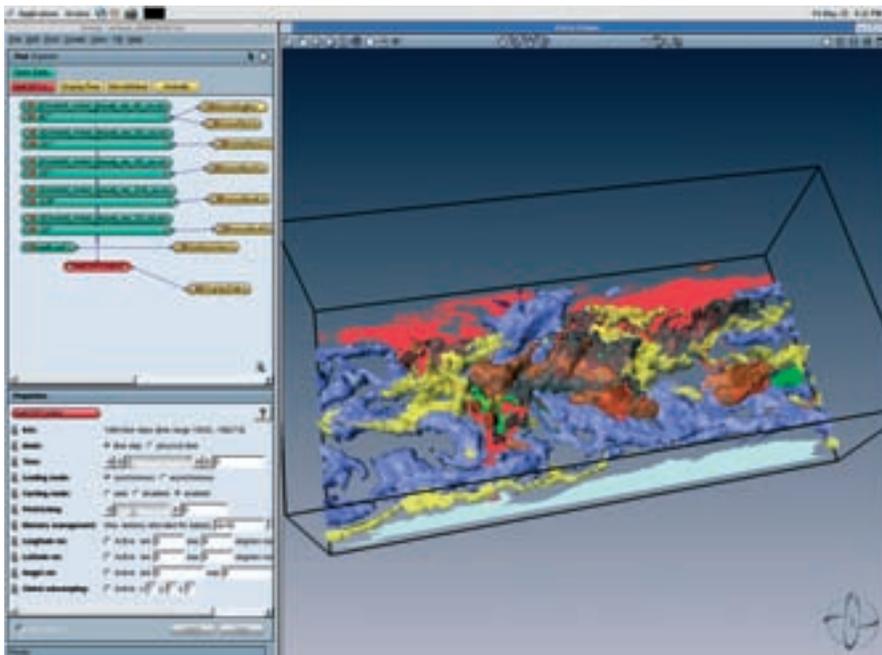


Abbildung 8. Visualisierung von fünf verschiedenen Aerosolen mit Amira.

teraktiv visualisieren zu können, die deutlich größer als der Hauptspeicher sind.

Zurzeit wird Amira im Hinblick auf Anwendungen im Bereich Klima- und Erdsystemforschung erweitert. Insbesondere soll das System um ein leistungsfähiges NetCDF-Dateninterface und durchgängiger Unterstützung der verschiedenen benötigten Gittertypen (einschließlich der Behandlung von Special Values) erweitert werden, so dass man keine Kopien der Daten in Spezialformaten für die Visualisierung anlegen muss. Abbildung 8 zeigt eine Amira-Anwendung, in der fünf verschiedene Skalarwerte mit dem Prototyp des neuen NetCDF-Moduls visualisiert werden. Weitere Funktionalitäten, die hinzukommen sollen, sind z.B. geographisches Mapping der Daten, unterschiedliche Displayprojektionen, aber auch mehrere methodische Erweiterungen sowie visuelle Verbesserungen.

Weitere kommerzielle Lösungen mit 3D-Funktionalität, die in von Nutzern des DKRZ verwendet werden, sind IDL [ITT Visual Information Solutions, 2007] und PV Wave [Visual Numerics, 2007]. Beide Produkte haben einen gemeinsamen Ursprung, werden aber seit etlichen Jahren separat weiter entwickelt. Es handelt sich in beiden Fällen um eine mittlerweile sehr umfangreiche Visualisierungs-Script-Sprache, die ursprünglich hauptsächlich für 2D-Grafik entwickelt wurde. Neuere objektorientierte Erweiterungen ermögli-

chen auch die interaktive 3D-Visualisierung, allerdings ist auch hier der Lernaufwand nicht unerheblich. Die Anwender am DKRZ nutzen hauptsächlich die 2D-Funktionalität der Systeme.

### Visualisierung in der Klimaforschung und GIS

Es gibt viele Gemeinsamkeiten zwischen typischen Anwendungen von Geographischen Informationssystemen und den Anforderungen, die im Rahmen der Arbeit mit Simulationsdaten aus dem Bereich Klimaforschung auftreten. Dennoch werden typische GIS-Systeme wenig von Klimamodellierern genutzt. Dies liegt zum Teil daran, dass GIS-Systeme, ähnlich wie viele allgemeine Visualisierungslösungen, kaum die in der Klima-Community verwendeten Datenformate unterstützen und alle oben beschriebenen Anforderungen erfüllen – insbesondere wäre eine direkte Unterstützung des Datenmodells (zeitabhängig, 3D Gitter, multivariat) vorteilhaft.

Gut nutzbar wären GIS-Systeme in diesem Zusammenhang für die 3D-Darstellung von 2D-Ergebnissen,

wie z.B. der erwarteten Niederschlagsänderung: Aufgrund des physikalischen Zusammenhangs zwischen Orographie und Niederschlag ist die gleichzeitige Darstellung der 3D-Topographie und des Niederschlages sehr instruktiv.

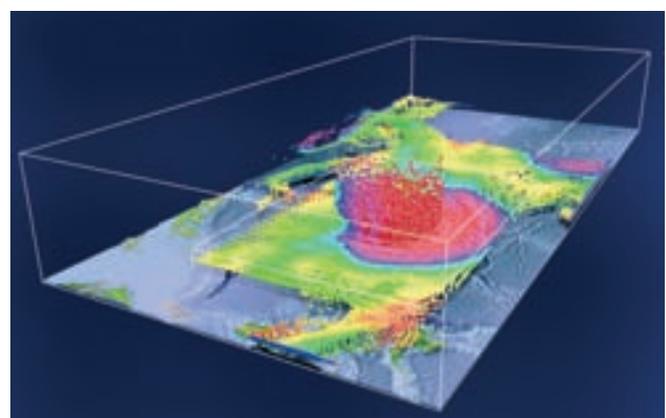
Systeme wie „Google Earth“, die heute von einer breiten Öffentlichkeit genutzt werden, wären potentiell gut geeignet, um Ergebnisse aus der Klimaforschung verfügbar und bekannt zu machen.

### Herausforderungen und Perspektiven

Hinsichtlich der Funktionalität bieten praktisch alle Systeme die wichtigsten Methoden an, wenngleich im Detail, z.B. im Bereich der Visualisierung von Vektorfeldern wie Wind und Ozeanströmung, noch einige funktionale Erweiterungen und Verbesserungen wünschenswert wären. Darüber hinaus ist aber zu kritisieren, dass heute bei den meisten Systemen nach wie vor einige Methoden (z.B. Volume Rendering) nur mit Einschränkungen hinsichtlich der Gittertypen (z.B. nur reguläre Gitter) angeboten werden. Eine durchgängige und vollständige Palette von Visualisierungsmethoden für alle vorkommenden Gittertypen würde die praktische Benutzbarkeit der Systeme deutlich verbessern.

In Bezug auf die Anpassung der Systeme an die aktuellen Entwicklungen und Tendenzen im Hardwarebereich bestehen große Defizite. In Anbetracht von Aussagen der Hardwarehersteller, dass der Leistungszuwachs im CPU-Bereich zukünftig hauptsächlich durch eine wachsende Anzahl von Rechenkernen (Multi-Core) auf den CPUs zu erwarten ist, wäre eine Parallelisierung der Visualisierungssoftware dringend notwendig. Im High-End-Bereich sollte die Verteilung der Anwendungen auf Cluster nicht auf das reine Rende- ▶

Abbildung 9. Visualisierung eines simulierten tropischen Wirbelsturms mit einem GPU basierten Partikelsystem. Die Farbe der Partikel ist ein Maß für die Geschwindigkeit. Grafik: Nicolas Cuntz, Universität Siegen



ring beschränkt bleiben; in Anbetracht der wachsenden Datenmengen sollten auch I/O und Berechnungen von verteilter Hardware profitieren können.

Im High-End-Bereich können heute mehrere Grafikkarten parallel verschiedene Teile der betrachteten Szenen berechnen. Diese Technik wird z.B. für Tiled Displays eingesetzt, also für hoch auflösende Darstellungen, die aus mehreren Einzel-Displays oder Projektoren zusammengesetzt werden. In ähnlicher Weise kann die Grafikkarte für ein Display auf Bildebene partitioniert und parallelisiert werden, und das Ergebnis auf Softwareebene wieder zusammengesetzt werden (Compositing).

Um den schnell wachsenden Anforderungen an Visualisierungssysteme durch immer größere Datensätze zu begegnen, können darüber hinaus moderne Technologien wie Out-of-Core Rendering-Methoden auf Basis von dynamischen Level of Detail (LOD)-Darstellungen helfen, die Interakti-

vität der Applikation zu gewährleisten.

Eine weitere Möglichkeit, die Datenvisualisierung bei bestimmten Methoden zu beschleunigen, ist die Nutzung der Grafikkarte (GPU) auch für Berechnungen. In [Cuntz, N., Leidl, M., Kolb, A., Rezk Salama, C., Böttinger, M., 2007] wird die Anwendung eines Partikelsystems zur Visualisierung zeitabhängiger Winddaten beschrieben, bei dem die Strömungsvisualisierung mit der Methode der Partikeladvektion für eine große Anzahl von Partikeln durch Nutzung der GPU mit interaktiven Bildraten durchgeführt werden kann. Bei der in Abbildung 9 gezeigten Visualisierung von Daten eines Atmosphärenmodells wurde bei Verwendung einer NVidia 8800 GTS eine Bildrate von 60 fps bei mehr als 200 000 Partikeln gemessen.

In einer Rechenzentrumsumgebung kann es auch sinnvoll sein, die Rohdaten innerhalb der leistungsfähigen lokalen Vernetzung zu belassen und mit Hilfe von Remote-3D-Rendering-Lösungen am Ar-

beitsplatz des Anwenders zu visualisieren, da das Übertragen der Daten bei größeren Datenmengen auch bei leistungsfähigen Internet-Verbindungen Tage bis Wochen dauern kann. Am DKRZ wird aus diesem Grund zurzeit ein Visualisierungsservice auf Basis eines HP SVA-Graphik-Clusters und der Remote-3D-Rendering-Lösung HP-Remote-Graphics eingerichtet. Dabei wird der von der Graphikhardware berechnete Bildstrom wieder ausgelesen und komprimiert an die Client-Software übertragen. Das Verfahren hat den weiteren Vorteil, dass der Anwender lokal nur sehr geringe Hardware-Anforderungen zu erfüllen hat, da nur der Bild-Strom dekomprimiert und dargestellt werden muss. ■

#### AUTOR

**Michael Böttinger**  
Deutsches Klimarechenzentrum  
Bundesstraße 55  
20146 Hamburg  
boettinger@dkrz.de

#### Literatur:

Advanced Visual Systems, 2007: AVS/Express, <http://www.avs.com/>

Böttinger, M., Biercamp, J., Schultz, M., 2002: Visualization in Earth System Science, Computer Graphics, Volume 36, Number 4

Böttinger, M., 2004: Das Erdsystem im Höchstleistungsrechner – Klimaprognosen. In: Max-Planck-Gesellschaft, Jahrbuch 2004

COLA, 2007: GrADS, <http://www.iges.org/grads/>

Cuntz, N., Leidl, M., Kolb, A., Rezk Salama, C., Böttinger, M., 2007: GPU-based Dynamic Flow Visualization for Climate Research Applications, in: Thomas Schulze, Bernhard Preim, Heidrun Schumann (Eds.): Simulation und Visualisierung 2007 (SimVis 2007), 8-9 März 2007, Magdeburg. SCS Publishing House e.V. 2007

Eaton et al., 2007: NetCDF Climate and Forecast (CF) Metadata Conventions, <http://cf-pcmdi.llnl.gov/>

ECMWF, 2007: GRIB encoding/decoding software, [http://www.ecmwf.int/products/data/software/grib\\_api.html](http://www.ecmwf.int/products/data/software/grib_api.html)

GMT, 2007: GMT - The generic Mapping Tools <http://gmt.soest.hawaii.edu/>

Hagemann, S, 2002: An improved land surface parameter data set for global and

regional climate models. Report No. 336, Max-Planck-Institut für Meteorologie, Hamburg, Germany, 21 pp.

Hibbard W. L., et al., 1994: Interactive Visualization of Earth and Space Science Computations, Computer 27, No. 7, July 1994, 65-72, Download: <http://vis5d.sourceforge.net/>

IPCC, 2000: Nakicenovic, N. and Swart, R. (Eds.), Emissions Scenarios, Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change

IPCC, 2001: Climate Change 2001: The Scientific Basis, edited by J. T. Houghton et al., Cambridge Univ. Press, New York.

IPCC, 2007: Working Group I Report „The Physical Science Basis“, in: <http://ipcc-wg1.ucar.edu/wg1/wg1-report.html>

ITT Visual Information Solutions, 2007: IDL, <http://www.ittvis.com/idl/>

Jungclaus et al., 2006: Ocean circulation and tropical variability in the coupled model ECHAM5/MPI-OM, J. Clim., 19(16), 3952– 3972.

Marsland et al., 2003, The Max-Planck-Institute global ocean/sea ice model with orthogonal curvilinear coordinates, Ocean Modelling, 5(2003), 91-127

Mercury Computer Systems, 2007: Amira, <http://www.tgs.com/products/amira.asp>

Modelle und Daten, 2007: World Data Center for Climate, <http://www.mad.zmaw.de/wdc-for-climate/>

NCAR, 2007: NCAR Graphics, <http://ngwww.ucar.edu/>, <http://www.ncl.ucar.edu/>

NCO, 2007: NCO - netCDF Operator, <http://nco.sourceforge.net/>

NOAA/NGDC, 2007: The Global One-km Base Elevation (GLOBE) Project, <http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/topo/globe.html>

NOAA/PMEL, 2007: Ferret, <http://ferret.wrc.noaa.gov/Ferret/>

PCMDI, 2007: CDAT, <http://www-pcmdi.llnl.gov/software-portal/cdat>

Roeckner et al., 2003: The atmospheric general circulation model ECHAM5, part I: Model description, Tech. Rep. 349, Max Planck Inst. for Meteorol., Hamburg, Germany.

Schulzweida, U., 2007: CDO - Climate Data Operators, MPI für Meteorologie, <http://www.mpimet.mpg.de/fileadmin/software/cdo/>

Unidata, 2007: NetCDF, <http://www.unidata.ucar.edu/packages/netcdf>

Visual Numerics, 2007: PV-Wave, <http://www.visual-nerumerics.de/produkte/wave/index.html>