

# Visualisierung als Werkzeug zur Analyse von Klimasimulationsdaten

Michael Böttinger<sup>1</sup>, Volker Gülzow<sup>1</sup>, Joachim Biercamp<sup>1</sup>

## Abstract

Climate research relies on compute and data intensive simulations, which have become possible during the last two decades. State of the art climate simulations are performed with coupled numerical models of the subsystems ocean, atmosphere, cryosphere and the biosphere. The resulting data sets consist of numerical values for several physical quantities like velocity components, pressure, temperature etc. on regular grids at discrete time stamps. The analysis of these multi dimensional data sets can only be done by statistical and visual methods. Although 2-D visualization methods are only capable to give information about small slices of the total data volume at a time, they are often very useful and widely used for routine analysis of model data and for the publications of results. For a more detailed visual investigation of the data and in order to study the time dependence of the results more sophisticated approaches are mandatory. 3-D visualization techniques allow the study of the three dimensional structure of physical quantities. Animated 3-D visualizations can show in great depth the trends of even more than one relevant physical property. An even better understanding of the data might be enabled through the skilful use of stereoscopic techniques.

## 1. Klimasimulationen

Die Simulation hat als dritte Disziplin neben der Theorie und dem Experiment ihren anerkannten Platz als Mittel zur Erkenntnisgewinnung gefunden. Für die Klima- und "Global Change"-Forschung ist sie zu einem unverzichtbaren Hilfsmittel geworden. Dieses hat nicht zuletzt den praktischen Hintergrund, daß der Klimaforschung in den meisten Fällen kein geeignetes Labor zur Verfügung steht; Experimente mit der Erde verbieten sich von selbst. In diesem Sinne stellen Höchstleistungsrechner das Labor der Forscher dar. Möglich wurde dieses erst durch die rasante Entwicklung der Rechenleistung in den letzten dreißig Jahren, die wiederum stark durch die Anforderungen der Klima- und Wettervorhersageforschung beeinflußt wurde. Aber

---

<sup>1</sup> Deutsches Klimarechenzentrum, Bundesstr. 55, 20146 Hamburg, email: <name>@dkrz.de  
<http://www.dkrz.de/>

selbst heute werden die Bedürfnisse der Klimaforscher an DV-Ressourcen der verschiedensten Art noch nicht befriedigt.

Während die Wettervorhersage als nahe Verwandte der Klimasimulation ihren immensen Rechenbedarf aus der notwendigen feinen Auflösung einerseits und der Datenassimilation andererseits herleitet, ergibt sich der Rechenbedarf der Klimaforschung vor allem aus der Länge der Simulationszeiträume. Wettervorhersagen werden für höchstens 10 Tage im voraus berechnet. Klimaforscher, die die mittleren Zustände des Gesamtsystems behandeln, betrachten Zeiträume von bis zu Tausenden von Jahren. Ein zusätzlicher Rechenbedarf rührt aus der notwendigen Behandlung weiterer klimarelevanter Subsysteme wie dem Ozean, der Kryosphäre (Eisbedeckung) und der Biosphäre her (Abbildung 1). Mit Hinblick auf die Luftverschmutzung, z.B. Aerosole oder die Ozonproblematik etc., wächst die Bedeutung der Luftchemie, die es ebenfalls zu berücksichtigen gilt.

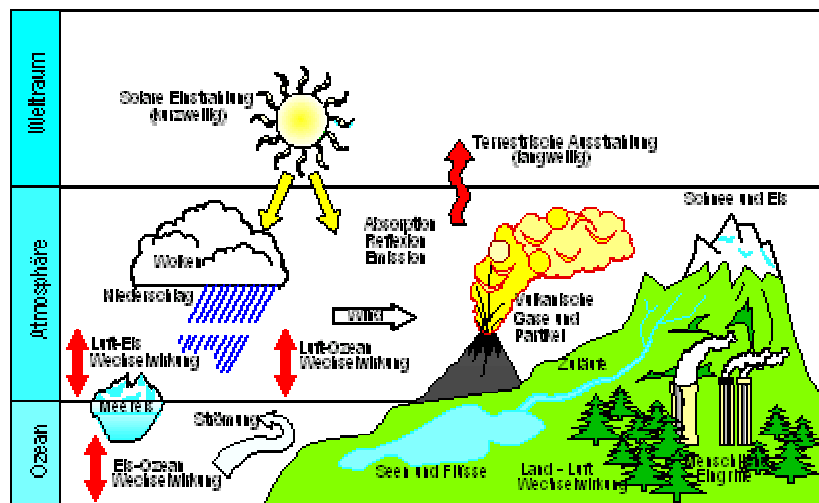


Abbildung 1: Das Klimasystem

Neben der Vertiefung des grundsätzlichen Verständnisses der klimarelevanten Prozesse und deren Zusammenspiels beschäftigt sich die Klimaforschung heute vornehmlich mit der Frage der Veränderlichkeit des Klimasystems. Ein prominentes Beispiel für eine natürliche Klimavariabilität ist das „El Niño„ Phänomen, welches in regelmäßigen Abständen das Wetter in weiten Teilen der Welt beeinflusst. Die Frage der globalen Erwärmung der Erde auf Grund von Treibhausgasemissionen, eine

anthropogene - also menschengemachte - Klimaänderung, ist ein weiterer wesentlicher Forschungsschwerpunkt.

Mit gekoppelten Modellen der Klimasubsysteme versucht man einerseits das heutige Klima mit ausreichender Genauigkeit zu reproduzieren und andererseits durch Experimente mit veränderten Randbedingungen - etwa der erwarteten Entwicklung des CO<sub>2</sub>-Gehaltes der Atmosphäre für die kommenden 100 Jahre - Aussagen über das Klima der Zukunft oder der Vergangenheit treffen. Gerade die Kopplung der Modelle stellt neben der Modellierung der einzelnen Subsysteme für sich genommen hohe Anforderungen. Einerseits sind die exakten Austauschmechanismen zwischen den Komponenten derzeit noch aktueller Forschungsgegenstand, andererseits bereiten die unterschiedlichen Zeitverhalten der Subsysteme erhebliche technische Probleme.

## 2. Klimaforschung und Informatik

Klimaforschung erfordert ein hohes Maß an Interdisziplinarität. Neben der Vielzahl naturwissenschaftlicher und mathematischer Fragestellungen wirft die Klimaforschung eine Reihe von Problemen der praktischen Informatik auf (Sell/Gülzow 1995). Diese Präsentation soll sich im weiteren vornehmlich auf die Visualisierung von Modelldaten beziehen, die anderen Bereiche sollen allerdings nicht unerwähnt bleiben.

Zuerst stellt sich das Problem der Rechenleistung. Globale Klimamodelle wie etwa ein Atmosphärenmodell in einer zur Zeit von der Wissenschaft angestrebten bzw. für nötig befundenen horizontalen Auflösung von ca. 1° (~100 km) benötigen etwa 10<sup>17</sup> Floating Point Operationen für einen 100 Jahres Simulationslauf - ein Aufwand, der mit den zur Zeit eingesetzten Systemen nicht in akzeptabler Zeit bewältigt werden kann. Bei einem angenommenen 100 GFlops sustained leistenden Rechner führt dieser Rechenaufwand auf 10<sup>6</sup> Sekunden oder rund 300 Stunden Rechenzeit. Natürlich setzt die heutige Rechnerarchitektur dieser Leistungsklasse voraus, daß das Modell hinlänglich parallelisiert ist. Die Klimaforschung hat hier gegenüber der Wettervorhersage den Nachteil der kleineren Auflösung, was schnell zu einem ungünstigen Kommunikations-zu-Rechenzeitverhältnis führt. Gleichwohl lassen sich auch in der Klimaforschung gute Ergebnisse auf Parallelrechnern erzielen (Gülzow et al. 1998). Wie in Tabelle 1 dargestellt ist, liefert beispielsweise das Regionalmodell REMO bei moderater Auflösung mit durchschnittlich 60 MFlops/Prozessor auf einer Cray T3E-900 vielversprechende Ergebnisse auf bis zu 64 Prozessoren.

Neben der Rechengeschwindigkeit ist die Problematik der Datenversorgung und -ableitung durch Hochgeschwindigkeitsnetze von besonderer Bedeutung. Die Datenhaltung selbst oder genauer die Datenexploration ("Datamining"), d.h. das Selektieren bestimmter Datenbereiche nach vorgegebenen Kriterien aus einem gesamten Experimentbestand, ist ein durchaus noch ungelöstes Problem. Auch am DKRZ

werden hierzu Lösungsversuche unternommen, die die speziellen Datenstrukturen bereits berücksichtigen (Lautenschlager 1997)

Anzahl der CPUs	Zeit pro Zeitschritt Normal [s]		Zeit pro Zeitschritt Strahlung [s]		Speed-Up Normal / Strahlung		Effizienz [%] Normal / Strahlung	
	T3D	T3E	T3D	T3E	T3D	T3E	T3D	T3E
4	6.5	1.73	100.5	22.9	1/1	1/1	100/100	100/100
8	3.5	1.00	59.4	13.7	1.86/1.69	1.73/1.67	93/85	87/84
16	1.9	0.52	26.6	6.65	3.42/3.78	3.33/3.44	86/95	83/86
32	1.26	0.30	15.56	3.80	5.16/6.64	5.77/6.03	65/81	72/75
64	0.76	0.27	9.77	2.80	8.55/10.3	6.41/8.18	53/64	40/51
128	0.55	0.22	7.03	1.50	11.8/14.3	7.86/15.2	37/45	25/48

Tabelle 1: Leistung des Regionalmodells REMO auf einer Cray T3D und Cray T3E-900, jeweils für einen normalen Zeitschritt und einen Zeitschritt, der zusätzlich die Strahlungsphysik berücksichtigt

### 3. Datenstrukturen

Diese ergeben sich durch die verwendeten Rechengitter, auf denen die Klimasubsysteme simuliert werden. Bei den aus Gründen der begrenzten Rechenleistung zur Zeit verwendeten gekoppelten globalen Klimamodellen werden Atmosphäre und Ozean z.B. jeweils auf einem Gitter mit einer horizontalen Auflösung von ca.  $2,5^\circ$  ( $\sim 250$  km) bei 19 oder mehr vertikal verteilten Schichten berechnet. Für jeden Gitterpunkt werden die physikalischen Größen, die den Zustand der Klimasubsysteme beschreiben, berechnet und für regelmäßige Zeitabstände abgespeichert. Im Sinne der Datenspeicherung läßt sich das n-Tupel der physikalischen Variablen als eine eigene Dimension auffassen. So ergibt sich mit den drei Dimensionen des Raumes, der Anzahl der Variablen und schließlich der Zeit eine insgesamt fünfdimensionale Datenstruktur (Hibbard 1994) als Grundlage für die weiteren Auswertungen.

Der zeitliche Abstand zwischen den abzuspeichernden Datensätzen hängt größtenteils von der jeweiligen wissenschaftlichen Aufgabenstellung und den verfügbaren Speichermöglichkeiten ab. Üblich sind z.B. Intervalle von 6 oder 12 Stunden für die Atmosphäre, während die Daten der Ozeanmodelle oft nur monatlich abgespeichert werden. Für eine Simulation der Atmosphäre über 100 Jahre ergibt sich für den Fall der Atmosphäre mit der oben angegebenen räumlichen Struktur bei 12-stündiger unkomprimierter Speicherung bei 32 Bit Wortlänge ein Datensatz von insgesamt etwa 700 GBytes. Bei der oben erwähnten 2.5-fach höheren horizontalen Auflösung ergäbe sich bei unter Beibehaltung der vertikalen Auflösung schon ein um den Faktor 6.25 höheres Datenvolumen, also ca. 4.5 TBytes. Zur Entlastung der Mas-

senspeichersysteme werden die Daten vor der Archivierung als GRIB (WMO) mit einem von der WMO (World Meteorological Organization) speziell für meteorologische Modelldaten entwickelten Verfahren auf etwa 1/4 komprimiert.

#### 4. Visualisierung als Werkzeug

Die Auswertung solch großer Datensätze ist ohne Visualisierung, welche die physikalische Bedeutung abstrakter Zahlenfelder sichtbar macht, nicht mehr denkbar. Im Verlauf des ganzen wissenschaftlichen Arbeitsprozesses sind Klimamodellierer auf das Werkzeug Visualisierung angewiesen, um die Rechenergebnisse zu kontrollieren, auszuwerten und veröffentlichen zu können.

Die routinemäßige Auswertung von Simulationsrechnungen erfolgt zum großen Teil auf visueller Basis: neben der Kontrolle einiger statistischer Kenngrößen helfen vor allem graphische Darstellungen, einen schnellen Überblick über Verlauf und Ergebnisse der Rechnungen zu erlangen. In der Regel erzeugt man für jedes Sub-Modell eine Reihe von 2-D-Standard-Plots und Liniengrafiken, die noch während des Modellaufes einen Überblick über den aktuellen Status der Modellrechnung erlauben. Typisch ist z.B. die Darstellung skalarer Größen mit Isolinien oder Farbflächen, die über einer Landkarte gezeichnet werden (Abbildung 2b). Vektorielle Größen - wie z.B. der Wind - werden mit Pfeilen oder Stromlinien dargestellt.

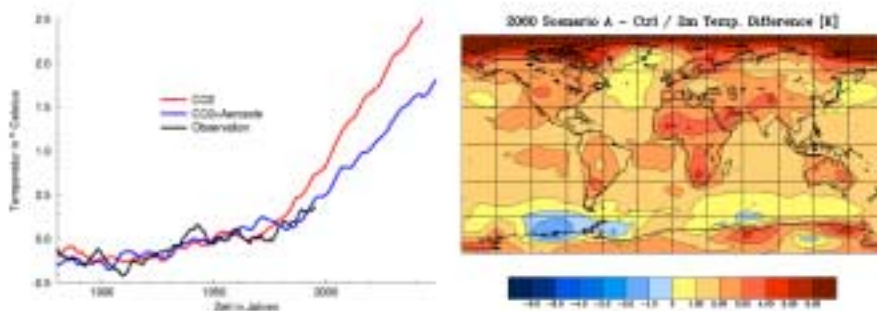


Abbildung 2: Zwei Beispiele für 2-D-Techniken: a) Temperatur als global gemittelte Größe als Funktion der Zeit, b) horizontaler Schnitt durch das Temperaturfeld zu einem gegebenen Zeitpunkt

Ergänzt werden diese Momentaufnahmen durch Darstellungen von Zeitreihen einiger integrierter Größen wie z.B. der globalen Mitteltemperatur (Abbildung 2a). Diese Arbeitsweise ähnelt sehr dem Produktionsbetrieb der Wetterdienste.

Auf diese Weise werden jedoch nur wenige Scheibchen aus dem Datenraum betrachtet; Ausreißer oder andere Auffälligkeiten können so leicht unerkannt bleiben.

Da das menschliche Auge recht empfindlich auf Änderungen in Mustern oder auf Sprünge in sonst gleichmäßigen Bewegungen reagiert, läßt sich durch die Animation möglichst vieler Zeitpunkte der oben erwähnten Standardplots eine umfassendere Übersicht über das zeitliche Verhalten der Modelle gewinnen. Ebenso kann eine Animation eines 2-D-Schnittes über die dritte räumliche Dimension bei 'eingefrorener' Zeit helfen, räumliche Strukturen schnell zu erfassen.

Noch besser geeignet zur Untersuchung der dreidimensionalen Struktur einzelner Modellgrößen ist die Berechnung und Darstellung dreidimensionaler Geometrien aus den Daten. Spezielle 3-D-Visualisierungsprogramme bieten in der Regel verschiedene Möglichkeiten an, die - in unserem Fall z.B. auf ungleichabständigen rechtwinkligen Gittern vorliegenden - Daten räumlich darzustellen. Die 3-D-Darstellung von 2-D-Schnitten durch den Datenraum oder von Isoflächen (Flächen im Raum mit gleichem skalaren Wert) sind Beispiele für Standardmethoden solcher Programme. Die Wahl der Methode ist meist von der darzustellenden physikalischen Größe abhängig. So ist z.B. ein Temperaturfeld der Atmosphäre wegen seiner horizontalen Schichtung nicht geeignet, um durch im Raum liegende einzelne Objekte wie z.B. Isoflächen visualisiert zu werden, während andere Größen wie die relative Feuchte gut isolierbare Strukturen aufweisen.

Diese Methoden erlauben allerdings ebenfalls nur eine vereinfachte Sicht auf die Daten: die Schnitte zeigen zwar den ganzen Wertebereich einer Variable, jedoch nur für zwei Dimensionen des Raumes - auch wenn die Phantasie des Betrachters es erlaubt, sich eine Vorstellung von der vermutlichen Beschaffenheit der Variablen zwischen verschiedenen im Raum dargestellten Schnitten zu machen. Dreidimensionale Isoflächen zeigen dagegen nur die Fläche im Raum, auf der die betrachtete Größe einen einzigen ausgewählten Wert aufweist.

Die Methode des „Volume Rendering“, speziell z.B. die „Ray Casting“-Technik (Elvins 1992), bietet dagegen die Möglichkeit der Abbildung des nahezu ganzen Wertebereichs einer Variablen in allen drei Dimensionen des Raumes. Hierbei werden allen den Gitterboxen entsprechenden Volumenzellen Farb- und Transparenzwerte zugeordnet; eine Integration dieser Werte durch das Datenvolumen ergibt den Farb- und Transparenzwert für jeden Bildpunkt. Durch die Möglichkeit des kontinuierlichen Transparenz-Mappings ist diese Methode besonders geeignet, um Strukturen mit unscharfen Konturen zu visualisieren - als Beispiel sei hier nur die Bewölkung genannt.

Aufgrund der Möglichkeit, gleichzeitig mehrere Visualisierungsmethoden sowie mehrere Instanzen dieser Methoden anwenden zu können, eignen sich 3-D-Visualisierungssysteme weitaus besser als reine 2-D-Methoden, um Zusammenhänge zwischen verschiedenen physikalischen Parametern - der vierten Dimension des Datenraumes - zu untersuchen und zu veranschaulichen. Dies gilt vor allem für die Untersuchung isolierter Ereignisse und Mechanismen des Klimageschehens wie z.B. eines tropischen Wirbelsturmes oder des periodisch auftretenden El-Niño-Phänomens. In diesem Kontext liegt die Schwierigkeit allerdings darin, sich selbst nicht den Blick

durch ungünstige Auswahl der Methoden und deren Parametereinstellungen zu verstellen. Je mehr physikalische Größen auf einmal betrachtet werden sollen, desto mehr Information muß häufig von einzelnen Größen weggelassen werden: Da jede

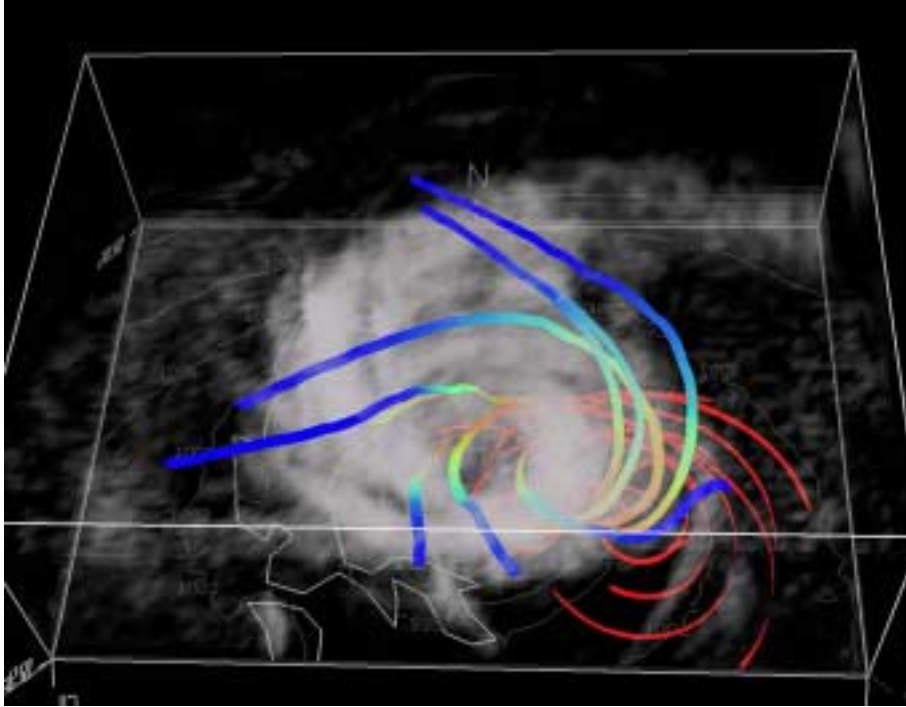


Abbildung 3: Tropischer Wirbelsturm. Die relative Feuchte ist mit Volume Rendering als graue Wolke dargestellt. Die Trajektorien zeigen den Weg von Luftteilchen, die Feuchtigkeit in die Höhe transportieren.

Größe zur Vermeidung von Mehrdeutigkeiten mit einer ihr eigenen Farbskala dargestellt werden sollte, wird die Möglichkeit, den Wertebereich durch möglichst unterschiedliche Farben auszudrücken, mit steigender Anzahl von Variablen immer kleiner. Isoflächen verschiedener physikalischer Größen können sich überschneiden oder den Blick auf andere wichtige Bildelemente versperren.

Die Methode der Animation über die Zeit ermöglicht es schließlich, auch die fünfte Dimension der Datenstruktur in einer - allerdings bewegten - Darstellung zu berücksichtigen. Zusätzliche Visualisierungsmethoden für zeitabhängige vektorielle Daten ergänzen diese Möglichkeit. So zeigt die berechnete Bewegung von Luftteil-

chen im Windfeld eines tropischen Wirbelsturmes (Abbildung 3) beispielsweise eindrucksvoll, wie über dem Meer warme feuchte Luft in das Zentrum des Sturms gelangt, wo diese durch die starke Konvektion in sehr große Höhen transportiert wird (und hier schnell abkühlt, kondensiert und so für starke Niederschläge sorgt).

Die räumliche Tiefe der Szenenelemente ist in einer komplexen statischen 3-D-Darstellung häufig schwer zu erkennen. Mit der Möglichkeit, die betrachtete Szene interaktiv zu drehen, zu verschieben oder näher heranzufahren, kann der Betrachter die Struktur verstehen, indem er die Information aus den verschiedenen Blickwinkeln auswertet und „sich merkt,“.

Da das räumliche Sehen auf der leicht unterschiedlichen Position der beiden Augen beruht, kann eine stereoskopische Darstellung, also entsprechend berechnete unterschiedliche Bilder für beide Augen, den Verständnisprozeß bei der Arbeit mit 3-D-Visualisierungssystemen erheblich vereinfachen und beschleunigen. Dies trifft insbesondere für das Studium von 3-D-Animationen zu, da sich deren Bildelemente mit der Zeit bewegen und verändern.

Das räumliche Sehen ist eine gemeinsame Grundvoraussetzung der verschiedenen Virtual-Reality-Techniken (VR), da hierdurch das Gefühl des „Eintauchens“, des Betrachters in die künstliche Welt begünstigt wird. Dieses Gefühl wird durch eine möglichst natürliche Steuerung der Kameraperspektive verstärkt; so wird bei einem VR-Helm (Head Mounted Display oder HMD) die Position und Lage des Kopfes kontinuierlich bestimmt (Head Tracking) und zur Steuerung des Blickwinkels verwendet. Spezielle Eingabegeräte wie 3-D-Maus oder Datenhandschuh ermöglichen schließlich die Interaktion mit der virtuellen Welt; hiermit kann beispielsweise Einstellung und Positionierung von Visualisierungswerkzeuge erfolgen.

VR-Methoden sind auch im Bereich der Visualisierung von Klimamodelldaten sinnvoll einsetzbar (Jaswal 1997). Wie weit das wirkliche Eintauchen in das visualisierte Datenvolumen gegenüber der Arbeit mit Maus und Tastatur gewinnbringend ist, ist sicher von Fall zu Fall zu beurteilen. Es ist jedoch mindestens einige Einarbeitungszeit erforderlich, um in der Datenwelt zu navigieren und schnell zu den gewünschten Ergebnissen zu kommen. Einige Arbeiten am DKRZ mit einem System, in welchem der Betrachter über Blickrichtung und Position des Kopfes die Perspektive beeinflussen kann, die künstliche Welt aber einem Aquarium gleich hinter der Mattscheibe des Bildschirms zu sehen ist, sind sehr positiv verlaufen. Es ist beispielsweise sehr vorteilhaft, die Parameter der Visualisierungsmethoden einstellen zu können, während die Perspektive über das Head Tracking kontrolliert wird.

## **5. Hardware-Anforderungen**



Eine wichtige technische Voraussetzung für den Einsatz von 3-D-Visualisierungswerkzeugen ist ein Rechnersystem mit Hardware-3D-Beschleunigung: erst die Möglichkeit, die Perspektive mit z.B. der Maus bei hohen Bildwiederholraten zu steuern, läßt im Kopf des Betrachters die Illusion eines echten 3-D-Objektes hinter der Glasscheibe des Bildschirms entstehen und dessen Struktur verstehen. Dieser Effekt wird durch eine stereoskopische Darstellung bei Verwendung einer LCD-Shutter-Brille verstärkt; die Position einzelner Objekte in der Tiefe des Raumes kann schneller erfaßt werden. Für VR-Installationen die ein Eintauchen in den Datenraum ermöglichen, wie z.B. eine CAVE (Jaswal 1997), sind weitere Komponenten notwendig: Head-Tracking, Projektionssysteme, Datenhandschuh etc.

Weitere Anforderungen an die Hardware ergeben sich durch die oben angegebene Größe eines typischen Experiment-Datensatzes. Um möglichst kurze Antwortzeiten zu ermöglichen, sollten die zu untersuchenden Daten idealerweise auf einer lokalen schnellen Platte liegen und der Hauptspeicher der Visualisierungs-Workstation so bemessen sein, daß wenigstens ein Zeitschritt dort Platz findet. Die Untersuchung von zeitlichen Abläufen mittels 3-D-Animation erfordert allerdings, daß alle zu untersuchenden Zeitschritte im Hauptspeicher liegen, da sonst keine flüssige Bewegung erzielt werden kann.

Selbstverständlich ist auch die CPU-Leistung insbesondere bei der interaktiven Arbeit mit den Daten von großer Bedeutung. Berechnungen von Isoflächen, Volume-Rendering und die Berechnung von Trajektorien sind Beispiele für rechenintensive Methoden, die insbesondere bei großen Datenfeldern Wartezeiten mit sich bringen. Da einige 3-D-Visualisierungssysteme die parallele Ausführung solcher Berechnungsaufgaben unterstützen, kann der Einsatz von Mehrprozessorsystemen mit symmetrischem Multiprocessing das Antwortverhalten deutlich verbessern, wenn mehrere rechenintensive Methoden gleichzeitig angewandt werden müssen.

## 6. Visualisierungssoftware

Die Werkzeuge, die zur Visualisierung in der Klimaforschung eingesetzt werden, reichen von FORTRAN-Programmierbibliotheken über interaktive Kommando- oder Script-gesteuerte 2-D-Tools bis hin zu verschiedenen komplexen 3-D-Systemen. Jedes verwendete System hat dabei seine Vor- und Nachteile; die oben erwähnten 2-D-Standard-Plots etwa können automatisch während der Modellrechnungen zu definierten Abständen im Batch-Betrieb erzeugt werden. Ergebnisse von verschiedenen Experimenten und lassen sich so meist besser vergleichen als mit 3-D-Darstellungen, die ja in der Regel eher nur eine qualitative Analyse der Daten erlauben. Am DKRZ setzt man dazu die am National Center for Atmospheric Research (NCAR) entwickelte Graphikbibliothek "NCAR-Graphics" ein (<http://ngwww.ucar.edu/>). Sie bietet die in den Geowissenschaften notwendigen Mapping-Funktionen und eine sehr

tiefgehende Steuerungsmöglichkeit aller möglichen Bildparameter, so daß qualitativ sehr hochwertige 2-D-Graphiken erzeugt werden können.

Die Möglichkeit, interaktiv Teilansichten des Datenvolumens zu definieren, zu visualisieren und auf gefundene Erkenntnisse unmittelbar durch die Erstellung neuer Ansichten ohne lange Editier-, Kompilier- und Ladezeiten reagieren zu können, ist ein wesentlicher Vorteil eines auf einem Kommandozeileninterpreter basierenden Visualisierungssystems. Solche Systeme lassen sich in der Regel auch über Scripte im Batchmodus nutzen. Im Gegensatz zu den kommerziellen Systemen IDL und PV-Wave ist das frei erhältliche GrADS (Grid Analysis and Display System: <http://grads.iges.org/grads>) ein speziell für meteorologische Fragestellungen konzipiertes 2-D-Paket dieser Kategorie, welches am DKRZ aufgrund der einfachen Erlernbarkeit und den fachspezifischen Extras zunehmend eingesetzt wird.

Im Bereich der interaktiven 3-D-Visualisierung gibt es zur Zeit zwei grundsätzlich verschiedene Werkzeugtypen: geschlossene Applikationen mit festgelegtem Funktionsumfang sowie offene, erweiterbare modulare Programmierumgebungen, mit denen bedürfnisgerechte eigene Applikationen gebildet werden können.

Für den Anwender hat der erste Typus den Vorteil, daß die Bedienung des Programmes in der Regel schnell erlernt werden kann. Vis5D (Hibbard et al., 1994) ist ein derartiges frei verfügbares (<http://www.ssec.wisc.edu/~billh/vis5d.html>) Werkzeug, das speziell zur 3-D-Visualisierung von Atmosphären-Modelldaten entwickelt wurde. Die enthaltene gute Grundausstattung an Visualisierungsmethoden bei einem hohen Maß an Interaktivität reicht in den meisten Fällen aus, um sich an der Graphikworkstation einen guten Überblick über die Struktur der betrachteten Daten zu verschaffen. Wenn die angebotenen Methoden allerdings nicht ausreichen, läßt sich das Programm nicht ohne größeren Programmieraufwand (es ist als Source Code verfügbar) erweitern.

Die Flexibilität im Hinblick auf Erweiterungen ist eine Stärke der modularen Visualisierungs- und Programmiersysteme wie AVS, AVS/Express (<http://www.iavsc.org/>, <http://www.avs.com>), NAG Explorer, IBM Data Explorer. Demgegenüber steht die relativ hohe Einarbeitungszeit, die erforderlich ist, um diese Systeme zu bedienen oder durch das Hinzufügen selbstgeschriebener Module zu erweitern. Es ist aber durchaus möglich, mit solchen Systemen eigene maßgeschneiderte Visualisierungsapplikationen zu entwickeln, deren Bedienung selbst wieder einfacher erlernbar ist.

Am DKRZ werden sowohl die geschlossene Applikation Vis5D als auch das modulare Visualisierungssystem AVS5 bzw. AVS/Express zur 3-D-Visualisierung eingesetzt. Vis5D erfordert eine deutlich kürzere Einarbeitungszeit als AVS und wird daher eher auch von den wissenschaftlichen Nutzern des DKRZ akzeptiert. Da Vis5D primär für Daten von Atmosphärenmodellen entwickelt wurde, hat das Programm hier natürlich seine Stärken. Die Visualisierung von Ozeanmodelldaten ist zwar ebenfalls möglich, doch ist hier ein höherer Aufwand zu treiben, um qualitativ gleichwertige Ergebnisse zu erreichen. Als Beispiel sei hier nur erwähnt, daß Vis5D

standardmäßig die Geometrie der Landtopographie, nicht jedoch die der Bathymetrie darstellen kann.

Das kommerzielle Visualisierungssystem AVS bzw. AVS/Express ist im Gegensatz zu Vis5D nicht im Hinblick auf eine bestimmte Anwendung oder einen bestimmten Datentyp entwickelt worden. Dieser allgemeine Ansatz ist zugleich Schwäche und Stärke dieser Klasse von Systemen: um eine mit Vis5D vergleichbare, einfach zu bedienende Visualisierungsapplikation für einen bestimmten Datentyp zu entwickeln, ist ein großer Einarbeitungs- und Entwicklungsaufwand notwendig. Die Performance einer solchen Applikation wird nicht die der schlankeren, fachbezogenen Applikation Vis5D erreichen. Auf der anderen Seite erlaubt der allgemeine Ansatz eher, das System über selbstgeschriebene oder veränderte Module zu erweitern und eigene Visualisierungsmethoden zu implementieren. Am DKRZ wird AVS und AVS/Express vor allem in Fällen eingesetzt, in denen die Möglichkeiten und Flexibilität anderer Systeme nicht ausreicht. Ein Beispiel hierfür ist in Abbildung 4 dargestellt: einer Visualisierung des mittleren Massentransportes des Golfstromes anhand der Daten eines Ozeanmodelles mit den Methoden der Partikel-Advektion und Trajektorien.

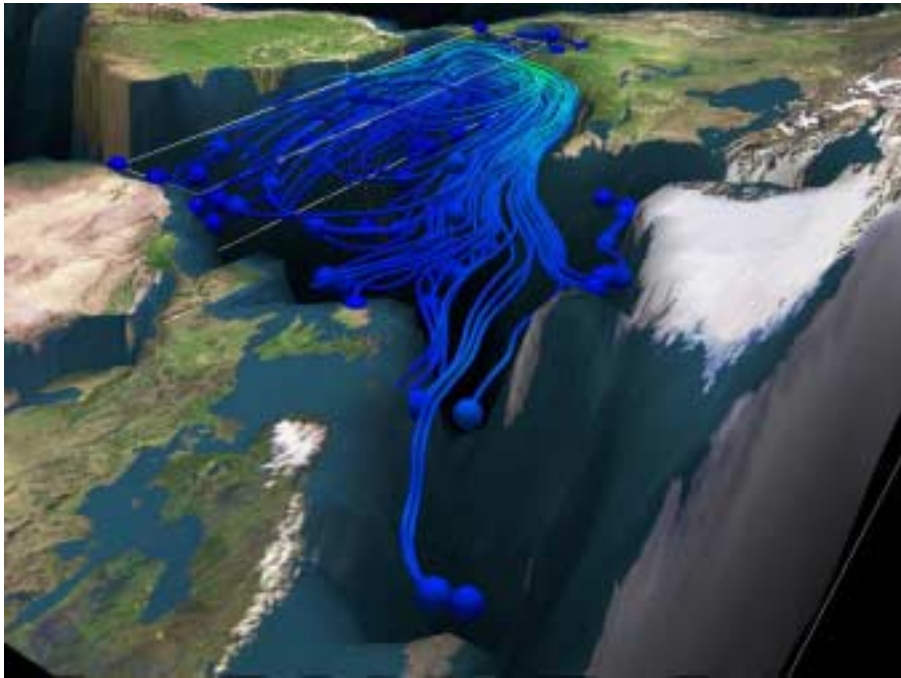


Abbildung 4: Visualisierung des mittleren Golfstromes anhand des Strömungsfeldes mit der Methode der Partikeladvektion

## 7. Zusammenfassung

Die Wahl des Werkzeugs ist häufig eine Frage des erlaubten Aufwandes und hängt letztlich von der konkreten Aufgabenstellung ab. So wird man sich für die tägliche Routinearbeit eher mit einem einfach zu erlernenden, aber in den Methoden begrenzten System auseinandersetzen, während man für aufwendige Visualisierungsprojekte, deren Ergebnisse z.B. im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit eingesetzt werden sollen (Biercamp et al., 1995,1997), eher in Kauf nimmt, komplexere Systeme und 3-D-Methoden zu nutzen und notwendige Erweiterungen selbst durchzuführen. Alle betrachteten Visualisierungsprogramme haben Stärken und Schwächen, so daß die Beschränkung auf nur ein Softwareprodukt, welches alle Anforderungen erfüllt, nicht möglich ist.

Allgemein gilt, je komplexer und anspruchsvoller die gewählten Visualisierungsmethoden sind, um so teurer ist die notwendige Hardware und um so aufwendiger ist deren Anwendung. Speziell im Fall der Höchstleistungsgrafik und Virtual Reality sind zur Zeit so hohe Investitionen an Zeit und Geld erforderlich, daß im wissenschaftlichen Alltag eher einfacheren Methoden der Vorzug gegeben wird.

## Literaturverzeichnis

- Biercamp, J., Böttinger, M., Hasselmann, K.(1995): Klimasimulationen - Vorhersage des Globalen Wandels, DKRZ, 1995, Video, 18 Minuten
- Biercamp, J., Böttinger, M., Hasselmann, K.(1997): Facing Climate Change - Long Term Strategies, DKRZ; 1997, Video, 14 Minuten
- Elvins, T. T., (1992): A Survey of Algorithms for Volume Visualization, Computer Graphics, Volume 26, Number 3
- Gülzow, V., Diehl, T., Foelkel, F.(to appear 1998): About the Parallelization of Climate Models, ParCo `97, Proceedings; Parallel Computing: Fundamentals, Applications and New Directions; EDS: E.D'Hollander, G. Joubert, F.Peters and U.Trottenberg; Elsevier, to appear
- Hibbard W. L., Paul B. E., Santek D. A., Dyer C. R., Battaiola A. L., and Voidrot-Martinez M-F. (1994): Interactive Visualization of Earth and Space Science Computations, Computer 27, No. 7, July 1994, 65-72.
- Jaswal, V. (1997): CAVEvis: Distributed Real-Time Visualization of Time-Varying Scalar and Vector Fields Using the CAVE Virtual Reality Theater, Proceedings IEEE Visualization '97
- Lautenschlager, M. (1997): Concept of the Climate Database system at the DKRZ, in: M. Lautenschlager, M. Reinke (Hrsg.): Climate and Environmental Database Systems, Kluwer Academic Publishers
- Sell, W., Gülzow, V. (1995): Data Processing Requirements for Global Climate Simulations, FOKUS, Praxis Information und Kommunikation, Bd 13, 1995
- WMO (1988): WMO-Nr. 306 Manual on Codes, Volume 1, International Codes, Part B, Sekretariat der WMO, Genf