

# Interaktive Visualisierung und Datenanalyse: Herausforderungen durch wachsende Datenmengen

Steffen Prohaska

## Zusammenfassung

Im Folgenden werden einige Ansätze diskutiert, wie interaktive Visualisierung angesichts wachsender Datenmengen weiterentwickelt werden kann. Neben der reinen Größe der Daten, die neue Herausforderungen an die Datenverarbeitung stellt, kann die zunehmende visuelle Komplexität der erzeugten Darstellungen das menschliche Wahrnehmungsvermögen übersteigen. Neue effiziente Darstellungsmethoden, die durch Merkmalsextraktion und Interaktionsmöglichkeiten unterstützt werden, bieten Lösungsansätze. Es wird weiter untersucht, in welchem Verhältnis Nutzen und Aufwand möglicher Lösungen stehen.

## 1 Einleitung

Ziel der visuellen Datenanalyse ist die graphische Darstellung wesentlicher Eigenschaften von Daten. Dies gilt insbesondere für Daten, die zu komplex oder zu groß sind, um sie auf andere Art zu analysieren. Der NSF Landmark Report *Visualization in Scientific Computing* (McCORMICK et al. 1987) wird oft als Ausgangspunkt der Visualisierung als eigenständiger Disziplin genannt. Beispiele für die Visualisierung sind alltägliche Dinge, wie Wetterkarten oder bildgebende Verfahren in der Medizin. Insbesondere in der wissenschaftlichen Forschung wird Visualisierung erfolgreich eingesetzt, um Bilddaten und Simulationsergebnisse auszuwerten. Interaktive Manipulation der computererzeugten Darstellungen ist dabei eine wichtige Komponente, die es oft erleichtert, diese Darstellungen zu ver-

stehen, Erkenntnisse zu gewinnen und Entscheidungen zu treffen.

Gleichzeitig werden wir Zeuge einer Informationsexplosion (LYMAN und VARIAN 2003). Im wissenschaftlichen Umfeld wachsen Bilddaten und Simulationsergebnisse in erheblichem Maße. Im Folgenden soll untersucht werden, welche Herausforderungen sich daraus für interaktive Visualisierung und Datenanalyse ergeben und wie mögliche Lösungsansätze aussehen.

## 2 Visualisierung und Datenanalyse

Visualisierung wird als Prozess beschrieben (VAN WIJK 2005, JOHNSON et al. 2006), der aus Eingabedaten durch Datenverarbeitung eine visuelle Darstellung erzeugt (Abb. 1). Diese wird vom Betrachter genutzt, um Entscheidungen zu treffen und neues Wissen zu erlangen. Dabei hat er die Möglichkeit, die Visualisierung zu kontrollieren. Schon vorhandenes Wissen wird seine Wahrnehmungs- und Kontrollmöglichkeiten erweitern. Es schafft die Möglichkeit, die Darstellung gezielt zu verändern oder ein anderes Darstellungsverfahren auszuwählen, das eventuell besser geeignet ist,

Deutsche Gesellschaft für Kartographie, Kartographische Schriften, Band 10: Aktuelle Entwicklungen in Geoinformation und Visualisierung. Beiträge des Seminars GEOVIS 2006, 5.–6. April 2006, Potsdam, 103–110

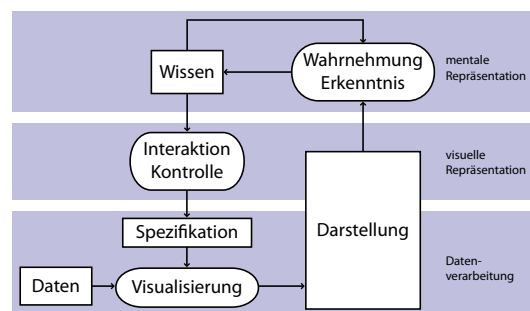
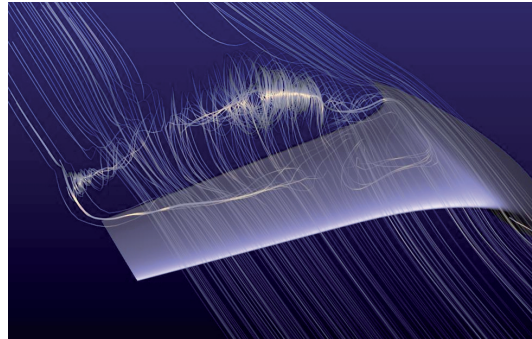
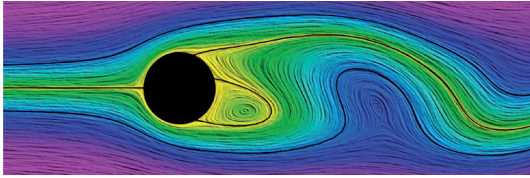


Abbildung 1 Visualisierung als Prozess mit Rückkopplung



**Abbildung 2** Vektorfeld-Visualisierung einer Strömung hinter einem Zylinder durch zweidimensionale Linien-Integral-Faltung (links) und einer Strömung um einen Flügel durch dreidimensionale beleuchtete Stromlinien (rechts)

um Erkenntnisse zu gewinnen. Der menschliche Betrachter ist aktiv in den Prozess einbezogen. Die Visualisierung zielt darauf ab, seine Möglichkeiten zu erweitern.

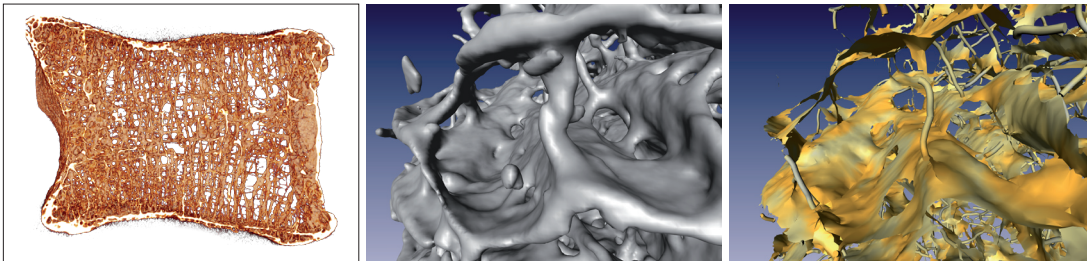
Der Prozess kann grob in drei semantische Ebenen eingeteilt werden (BRODLIE et al. 2004a):

- Die Ebene der *Datenverarbeitung* betrachtet Algorithmen und technischen Ressourcen, die es ermöglichen, visuelle Darstellungen der Eingabedaten zu erzeugen. Dieser Teil wird oft weiter unterteilt in Datenfilterung, Abbildung der ausgewählten Daten auf eine Geometrie und Bilderzeugung aus der Geometrie (Rendering).
- Die Ebene der *visuellen Repräsentation* untersucht Möglichkeiten und Lösungswege, um effiziente Darstellungsformen zu entwickeln, dem Nutzer die Bilder zu zeigen und Interaktionsmöglichkeiten bereitzustellen.

- Auf der dritten Ebene der *mentalen Repräsentation* sind Wahrnehmungs- und Erkenntnisprozesse angesiedelt. Wissen über diese Prozesse kann beitragen, effiziente visuelle Darstellungsformen zu finden.

Es wird häufig zwischen wissenschaftlicher Visualisierung von Daten, die einen direkten physikalischen Bezug haben, zum Beispiel Bilddaten, und Informationsvisualisierung von abstrakten Daten, zum Beispiel Börsenkursen, unterschieden (siehe beispielsweise CARD et al. 1999). Techniken der wissenschaftliche Visualisierung können weiter nach der Zahl und dem Typ der abhängigen Variablen in Skalar-/Vektor-/Tensor- und multivariate Visualisierung in ein/zwei/drei und mehr unabhängigen Dimensionen unterschieden werden.

Grundlegende Anwendungsaufgaben können in Illustration bekannter Sachverhalte (*descriptive visualization*), gezielte Suche nach Fakten (*analyti-*



**Abbildung 3** Visualisierung von Knochenfeinstruktur. Links: Volumen-Rendering eines Schnitts durch eine Mikro-CT-Aufnahme eines menschlichen Wirbelkörpers. Rechts: Ausschnitt in Isoflächendarstellung (Mitte) und in Skelettdarstellung (rechts), wobei linienartige und flächenartige Strukturen abstrakt dargestellt werden (PROHASKA und HEGE 2002)

*cal visualization*) und explorative Suche nach unbekanntem Sachverhalten (*exploratory visualization*) unterschieden werden (BERGERON 1993). Einen umfassenden Überblick über den aktuellen Stand der Forschung findet man im *Visualization Handbook* (HANSEN und JOHNSON 2005). Einige Beispiele für Vektorfeld-Verfahren sind in Abbildung 2 und für Skalarfeld-Verfahren in Abbildung 3 gezeigt.

### 3 Wachsende Datenmengen

Vor allem durch bildgebende Verfahren und Simulationsrechnungen werden stark wachsende Datenmengen produziert. In der klinischen Praxis werden heute in der Radiologie pro Untersuchung Bilddaten im Gigabyte-Bereich aufgenommen. Im Forschungsbereich kommen hochauflösende Computer-Tomographen, sogenannte Mikro-CTs, zum Einsatz, die Datensätze mit 2048x2048 oder 3072x3072 Pixel pro Schicht und mehreren tausend Schichten aufnehmen können (Abb. 3). Es ist zu erwarten, dass die Auflösung weiter wachsen wird. Konfokal-Mikroskope mit automatisch gesteuerten Objektträgern können große Flächen in mehreren Blöcken aufnehmen, die dann in ein Volumen zusammengefasst werden (Abb. 4). In der Histologie werden Präparate Schnitt für Schnitt bei hoher Auflösung erfasst. In diesen Fällen liegen einzelne Bilddatensätze im Bereich von einigen Gigabyte bis

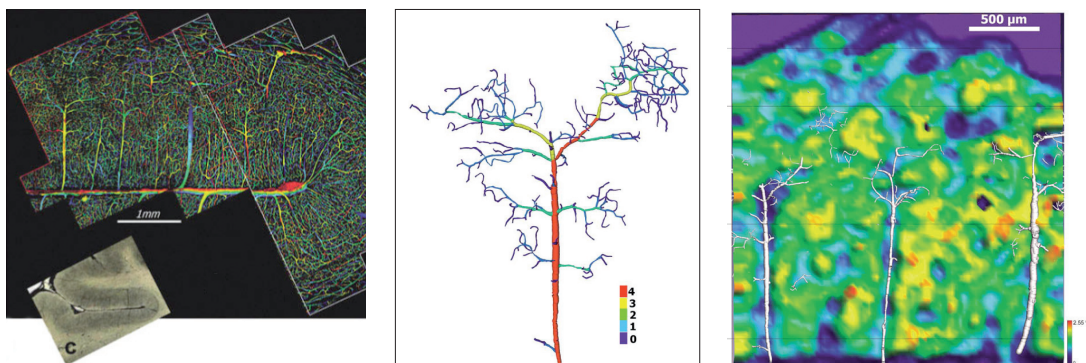
einigen hundert Gigabyte. Oft werden Messreihen aufgenommen mit dem Ziel, mehrere Datensätze miteinander zu vergleichen. In Simulationsrechnungen ist die Lage ähnlich. Einzelne Rechnungen können, auf mehrere Zeitschritte verteilt, Datenmengen bis in den Terabyte-Bereich erzeugen.

### 4 Ökonomie der Visualisierung

VAN WIJK schlug kürzlich vor, den Wert der Visualisierung in einem ökonomischen Modell zu erfassen (VAN WIJK 2005). Dabei führte er folgende Kosten ein:

1. Anfangskosten für die Entwicklung der Methode und für die Anschaffung und Installation von Hardware
2. Anfangskosten für den einzelnen Anwender, zum Beispiel zum Erlernen einer Methode
3. Anfangskosten pro Datensatz, zum Beispiel für Datenumwandlung und Wahl der Visualisierungsparameter
4. Zeit, die notwendig ist, um eine Darstellung zu verstehen und sie zu modifizieren, bis das gewünschte Ergebnis erreicht ist.

Diese Kosten müssen unterschiedlich oft aufgewendet werden und schlagen daher unterschiedlich zu Buche. Punkt 1 fällt nur einmal an, Punkt 2 zusätzlich für jeden Nutzer, Punkt 3 auch für jeden



**Abbildung 4** Extraktion von Mittellinien aus Bilddaten, die mit einem Konfokal-Mikroskop aufgenommen wurden. Links: Konfokalmikroskopie-Aufnahme eines Gehirnschnitts, die aus etwa 100 Blöcken zusammengesetzt wurde (insgesamt etwa 4 Gigabyte Bilddaten). Die Aufnahme ist nach der Tiefe des hellsten Voxels eingefärbt. Aus den Daten wurden Mittellinien extrahiert (in der Mitte ein Ausschnitt). Diese können beispielsweise zusammen mit dem mittleren Abstand zwischen den Gefäßen dargestellt werden (rechts). Außerdem werden sie verwendet um die Topologie des Gefäßnetzwerks zu analysieren (FOUARD et al. 2004, CASSOT et al. 2006).

Datensatz und Punkt 4 für jeden Interaktionsschritt. Dem gegenüber stellt er den Nutzen des neu gewonnenen Wissens.

Im skizzierten Modell sind niedrige Kosten erwünscht, zum Beispiel:

- flexible Methoden mit hohem Wiederverwendungswert
- kostengünstige Hardware
- einfache Nutzbarkeit, zum Beispiel durch eine integrierte Softwareumgebung am Arbeitsplatz des Forschers
- ein möglichst direkter Weg, die Originaldaten als Ausgangspunkt zu verwenden
- effektive Verfahren, die einfach verständlich sind und aussagekräftige Darstellungen erzeugen
- möglichst kurze Antwortzeiten bei Interaktion

Beim letzten Punkt sollten strenge Anforderungen gestellt werden. Denn falls Antwortzeiten eine gewisse Grenze überschreiten, wird das System aus Sicht des Nutzers wertlos. Das System unterliegt also Echtzeitanforderungen. So sollen Änderungen des Blickpunkts mit mehreren Bildern pro Sekunde erfolgen. Andere Parameteränderungen sollen innerhalb weniger Sekunden eine Antwort liefern.

Im Folgenden wird diskutiert, wie sich wachsende Datenmengen auf die skizzierte Ökonomie der Visualisierung auswirken. Dabei wird die Ebene der Datenverarbeitung und der visuellen Repräsentation betrachtet.

## 5 Datenverarbeitung

Wachsenden Datenmengen verlängern die Laufzeit von Algorithmen oder machen eine Ausführung bei mangelnden Ressourcen unmöglich. Im Folgenden werden diese Probleme und einige Lösungsmöglichkeiten an Hand einer einfachen Isoflächen-Darstellung eines Skalarfeldes diskutiert. Das Skalarfeld sei auf einem regulären Gitter gegeben. Der Nutzer kann einen Schwellenwert angeben, um die gewünschte Fläche auszuwählen.

Der *Marching-cubes*-Algorithmus (LORENSEN und CLINE 1987) löst dieses Problem, indem eine solche Fläche für jede Zelle konstruiert und diese Teilflächen zusammengefügt werden. Die erzeugte Geometrie wird in einem weiteren Rendering-

Schritt zur Bilderzeugung verwendet. In seiner ursprünglichen Version wird er auf jede Zelle angewandt, die Laufzeit steigt also linear mit der Datengröße. Schon bei moderaten Datengrößen, die noch in den Hauptspeicher eines aktuellen Rechners passen, kann dies zu Antwortzeiten führen, die interaktive Veränderungen des Schwellenwerts unmöglich machen.

LIVNAT (2005) diskutiert Möglichkeiten zur beschleunigten Isoflächen-Konstruktion (siehe auch Livnat 1999). In einem Vorverarbeitungsschritt wird eine Suchstruktur aufgebaut. Zu einem neuen Schwellenwert werden dann schnell die Zellen gefunden, die den Schwellenwert enthalten können. Die Zahl der verarbeiteten Zellen kann weiter reduziert werden, wenn die Konstruktion der Isofläche abhängig vom Blickpunkt erfolgt. Dabei wird jedoch die Trennung der Geometrieerzeugung und Rendering aufgehoben. Eine Implementierung kann dadurch komplexer werden.

Wenn die Datenmenge den zur Verfügung stehenden Hauptspeicher übersteigt, werden *out-of-core*-Verfahren benötigt, auch *external-memory*-Algorithmen genannt (für eine allgemeine Einführung VITTER 2001). Im Zusammenhang mit Isoflächen sind dabei vor allem Suchbäume und hierarchische Rendering-Methoden von Interesse. In SILVA ET AL. (2002) findet man eine umfassende Diskussion.

Ein anderer Möglichkeit bietet der Einsatz von leistungsfähigerer Hardware. Diese ist teuer und wird daher oft zentral installiert. Eine Herausforderung besteht darin, sie effizient zu nutzen. Brodlié et al. (2004a) diskutieren Infrastrukturfragen unter dem Schlagwort *visual supercomputing*. Die Einstiegshürde für Nutzer sollte möglichst niedrig sein. Bevorzugt wird die Darstellung am Arbeitsplatz des einzelnen Nutzer. Eine einfache Form der Realisierung ist eine Übertragung der erzeugten Darstellungen. Dies kann beispielsweise per *virtual network computer* (VNC) erfolgen (Richardson et al. 1998). Je nach verfügbaren Ressourcen am Arbeitsplatzrechner und an den zentral installierten Rechnern, wie Bandbreite, Rechen- und Graphikleistung, können verschiedene Verteilungen der Visualisierungs-Pipeline optimal sein. Shalf und Bethel (2003) diskutieren dies anhand einer Isoflächen-Darstellung. Je nach Konfiguration führt die Übertragung der Daten, der Geometrie

oder der erzeugten Darstellungen zur kürzesten Gesamtausführungszeit der Pipeline.

Es ergibt sich die Tendenz, dass mit größeren Datenmengen eine Übertragung der Bilder zu bevorzugen ist. Jedoch ist anzumerken, dass eine optimale Gesamtausführungszeit ein ungenügendes Kriterium ist, wenn die Antwortzeit bei der Interaktion zu groß wird. Erfolgversprechende Ansätze, Interaktivität sicherzustellen sind bildbasierte Rendering-Verfahren, die eingeschränkte Blickpunktwechsel ermöglichen, indem sie aus bereits übertragenen Darstellungen neue Blickpunkte interpolieren (BETHEL et al. 2000, LAMAR und PASCUCCI 2003). Am anderen Ende der Pipeline kann asynchronen Datenübertragung im Hintergrund genutzt werden, um die Interaktionsmöglichkeit zu entkoppeln (KÄHLER et al. 2005).

Eine weitere Möglichkeit große Datenmengen interaktiv zu visualisieren, ist die effiziente Nutzung moderner Hardware-Architekturen. Neben der klassischen Speicherhierarchie aus Festplatte, Hauptspeicher und Prozessor-Cache stehen auch spezialisierte Graphikprozessoren mit eigenem Speicher zur Verfügung. Der zunehmende Unterschied zwischen Rechenleistung und Speicherzugriffszeit, auch als *memory wall* bekannt (WULF und MCKEE 1995), ist beim Zugriff des Graphik-Prozessors auf Hauptspeicher noch dramatischer als beim Zugriff durch die CPU. Gleichzeitig bieten Graphik-Prozessoren aber die Möglichkeit, gleichbleibend hohe Bildwiederholraten zu erzielen, wenn die Daten erst einmal im Graphikspeicher platziert sind. Datenkompression kann verwendet werden, um den Graphikspeicher effizienter zu nutzen. Der Graphik-Prozessor wird in einem ersten Schritt eine unkomprimierte Darstellung für einen Teil der Daten erzeugen. Erst im zweiten Schritt wird er zur eigentlichen Bilderzeugung verwendet. Verlustbehaftete Datenkompression wurde zum Beispiel von FOUT et al. (2005) erfolgreich eingesetzt, um Volumen-Rendering von Daten bis zu 100 Gigabyte zu ermöglichen.

Es wurden kurz einige Ansätze vorgestellt, um interaktive Visualisierung großer Datenmengen zu ermöglichen, also Algorithmen zur Laufzeit-Optimierung, external memory, hierarchische Verfahren, verteilte Visualisierung (visual supercomputing) und die effiziente Nutzung neuer

Hardware-Architekturen. Alle Ansätze erhöhen die Komplexität der eingesetzten Software und verursachen damit höhere Entwicklungskosten. Im optimalen Falle bleibt die volle Flexibilität der ursprünglichen Methode erhalten, und die Anwender benötigen keine zusätzliche Einarbeitungszeit. Jedoch müssen bei fast allen spezialisierten Verfahren Vorverarbeitungsschritte durchgeführt werden, so dass der Aufwand steigt, bis ein Datensatz interaktiv visualisiert werden kann. Aus Entwicklersicht ist weiter zu beachten, dass für die unterschiedlichen Ansätze sehr unterschiedliches Wissen erforderlich ist, zum Beispiel über verteilte Systeme oder Details der Programmierung von Graphik-Hardware. Es ist daher eine Herausforderung, integrierte Softwaresysteme zu entwickeln, die für unterschiedliche Anwendungsszenarien optimale Möglichkeiten bieten.

Interaktivität kann oft sichergestellt werden, wenn Daten vorab auf einen leistungsfähigen Visualisierungsrechner übertragen werden, und sich ein Nutzer direkt zu dieser Maschine begibt. Auch wenn der Aufwand vor der Analyse der Daten hoch ist, kann dies eine wirtschaftliche Lösung sein, wenn danach effizientes Arbeiten möglich ist. Natürlich müssen auch die Kosten für die Anschaffung leistungsfähiger Hardware beachtet werden.

Neben dem Problem der Skalierbarkeit der Visualisierungsverfahren auf der Ebene der Datenverarbeitung gibt es noch weitere Herausforderungen auf der Ebene der visuellen Repräsentation.

## 6 Visuelle Repräsentation

Unabhängig von der Frage, ob eine Visualisierungsmethode schnell genug Darstellungen erzeugen kann, besteht das Problem, dass die Darstellungen mit wachsender Datengröße oft an Komplexität zunehmen. So reicht die Auflösung heutiger Bildschirme, die nur langsam steigt, häufig nicht aus, um alle nötigen Details einer Darstellung anzuzeigen. Interessante Effekte liegen womöglich im Sub-Pixel-Bereich und können nicht wahrgenommen werden. Auch kann die pure Komplexität der Darstellung das menschliche Wahrnehmungsvermögen übersteigen. Es wird unmöglich, wesentliche von unwichtigen Informationen zu trennen. Für manche Klassen von Daten, wie Zeitreihen oder Versuchs-

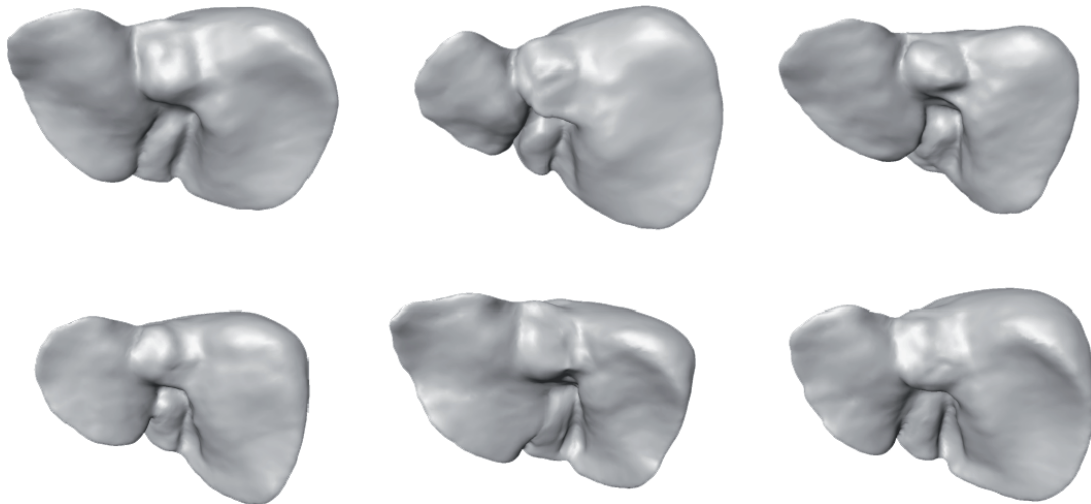
reihen, die miteinander verglichen werden sollen, genügen bekannte Verfahren oft nicht, um eine angemessene Darstellung zu erzeugen.

Das Visualisierungsmantra „*overview first, zoom and filter, then details-on-demand*“ (SHNEIDERMAN 1996) deutet einen Lösungsweg an. Dabei steht Interaktion im Vordergrund. Ausgehend von einem Überblick wird der Anwender sich auf Details konzentrieren. Nützlich ist es dabei diese immer auch im Kontext anzuzeigen. Ein gelungener Ansatz wurde kürzlich mit dem Visualisierungssystem *Vis-Trail* vorgestellt (BAVOIL et al. 2005). Das System ermöglicht, auf einfache Art mehrere dreidimensionale Ansichten eines oder mehrere Datensätze mit verschiedenen Visualisierungsparametern anzuzeigen und gemeinsam zu kontrollieren.

Eine weitere Möglichkeit ist die Merkmalsextraktion in einem Vorverarbeitungsschritt. Dabei kann anwendungsspezifisches Wissen eingebracht und eine abstrakte Repräsentation der Daten erzeugt werden, die die wesentlichen Eigenschaften zusammenfasst. Diese lassen sich meist kompakter speichern, was eine interaktive Darstellung ermöglicht. Als zwei Beispiele seien die Extraktion von

Mittellinien aus medizinischen Bilddaten (Abb. 4) und die Erzeugung und Darstellung eines mittleren anatomischen Modells mit seinen Hauptvariationen (Abb. 5) genannt. Auch in der Strömungsvisualisierung ist die Merkmalsextraktion ein aktives Forschungsgebiet. Einen Überblick findet man in POST et al. (2003).

Neben der Verbesserung der Darstellungsmöglichkeiten gibt es auch Chancen, die Interaktionsmöglichkeiten zwischen mehreren Nutzern zu verbessern. Wissenschaftliche Ergebnisse werden oft von Gruppen von Wissenschaftlern, die an unterschiedlichen Orten arbeiten, gemeinsam erarbeitet. Gerade umfassende Datenmengen machen es oft erforderlich, dass verschiedene Experten gemeinsam Entscheidungen diskutieren. Es ist eine Herausforderung für Visualisierungssysteme, solche Zusammenarbeit zu ermöglichen. Dabei kann es um räumlich getrennte Zusammenarbeit gehen, wie auch um verbesserte gemeinsame Interaktionsmöglichkeiten mit einer Visualisierung. In BRODLIE et al. (2004b) ist der Forschungsstand zu *collaborative visualization* dargestellt.



**Abbildung 5** 43 Computertomographie-Aufnahmen von menschlichen Lebern wurden segmentiert und in ein gemeinsames Koordinatensystem transformiert (Registrierung). Dann wurde ein anatomisches Modell erstellt, das die mittlere Form und die Hauptvariationen umfasst. Die drei dominierenden Variationen sind von links nach rechts dargestellt. Das Verfahren ist in LAMECKER et al. (2004) beschrieben.

Verfahren, die eine verbesserte Visualisierung von Zeit- und Messreihen und Parameterstudien ermöglichen, sind von allgemeinem Interesse. Schnell zu erlernende und einfach anzuwendende Verfahren wären wünschenswert, da sie auf eine breite Anwendergruppe zielen. Detailarbeit an den Verfahren kann später viel Zeit bei der vielfachen Anwendung sparen. Gleiches gilt für Möglichkeiten, die die Zusammenarbeit zwischen Anwendern fördern.

Wenn anwendungsspezifische Wissen einbezogen wird, hängt das Verhältnis von Aufwand zu Nutzen oft von der Zahl der zu analysierenden Datensätze ab. Bei einer kleinen Zahl kann eine semi-automatische Lösung, die vorhandene Verfahren geschickt nutzt, oft ein effizienter Weg sein, unter Einsatz von manueller Arbeit zum Ziel zu kommen. Wenn dies nicht möglich ist oder eine große Zahl von Anwendungsfällen auftritt, lohnt es sich, das anwendungsspezifische Wissen auszunutzen und spezialisierte Verfahren zu entwickeln. Merkmalsextraktion erfordert oft ein umfassendes Wissen zur Interpretation, so dass die Verfahren eine gewissen Einarbeitungszeit benötigen.

## 7 Zusammenfassung

Es wurden einige Ansätze diskutiert, wie interaktive Visualisierung angesichts wachsender Datenmengen weiterentwickelt werden kann. Neben der reinen Größe der Daten, die neue Herausforderungen an die Datenverarbeitung stellt, wie Algorithmen zur Laufzeit-Optimierung, *external memory*, hierarchische Verfahren, verteilte Visualisierung (*visual supercomputing*) und die effiziente Nutzung neuer Hardware-Architekturen, kann die zunehmende visuelle Komplexität der erzeugten Darstellungen das menschliche Wahrnehmungsvermögen übersteigen. Lösungsansätze sind neue effiziente Darstellungsmethoden, die durch Merkmalsextraktion und Interaktionsmöglichkeiten unterstützt werden,

Es wurde angedeutet, in welchem Verhältnis Nutzen und Aufwand möglicher Lösungen stehen. Dieser Blickwinkel ist aus Anwendersicht nicht zu unterschätzen. Da Visualisierung immer auch Anwendungswissenschaft ist, sollte diese Sichtweise auch in der Forschung nach neuen Visualisie-

rungsverfahren und verbesserten Algorithmen nicht übergangen werden.

## Danksagung

Die abgebildeten Visualisierungen wurden mit dem Visualisierungssystem *Amira* (STALLING et al. 2004) erstellt (siehe auch <http://amira.zib.de/>).

## Literatur

- BAVOIL, L, CALLAHAN, SP, CROSSNO, PJ, FREIRE, J, SCHNEIDEGGER, CE, SILVA, CT, VO, HT (2005): Vistrails: Enabling interactive multi-view visualizations. In: Proc. IEEE Visualization '05.
- BERGERON, D (1993): Visualization reference model (panel session position statement). In: Proc. IEEE Visualization '93, 337–342.
- BETHEL, W, TIERNEY, B, LEE, J, GUNTER, D, LAU, S (2000): Using high-speed WANs and network data caches to enable remote and distributed visualization. In: Proc. IEEE Supercomputing '00, 28.
- BRODLIE, K, BROOKE, J, CHEN, M, CHRISNALL, D, FEWINGS, A, HUGHES, C, JOHN, N, JONES, M, RIDING, M, ROARD, N (2004a): Visual supercomputing – technologies, applications and challenges. In: Eurographics, State of the Art Report.
- BRODLIE, KW, DUCE, DA, GALLOP, J., WALTONAND, JPRB, WOOD, JD (2004b): Distributed and collaborative visualization. Computer Graphics Forum, 23(2), 223–251.
- CARD, SK, MACKINLAY, JD, SHNEIDERMAN, B (1999): Readings in information visualization: using vision to think. Morgan Kaufmann Publishers, San Francisco.
- CASSOT, F, LAUWERS, F, FOUARD, C, PROHASKA, S, LAUWER-CANCES, V (2006): A novel three-dimensional computer assisted method for a quantitative study of microvascular networks of the human cerebral cortex. Microcirculation, 13, 15–32.
- FOUARD, C, MALANDAIN, G, PROHASKA, S, WESTERHOFF, M, CASSOT, F, MAZEL, C, ASSELOT, D, MARC-VERGNES, JP (2004): Skeletonization by blocks for large 3D datasets. Application to brain microcirculation. In: IEEE International Symposium on Biomedical Imaging: From Nano to Macro (ISBI '04). Arlington, Virginia.
- FOUT, N, AKIBA, H, MA, KL, LEFOHN, AE, , KNISS, J (2005): High-quality rendering of compressed volume data formats. In: BRODLIE, KW, DUKE, DJ, JOY, KI (eds.), Proceedings of The Joint EUROGRAPHICS-IEEE VGTC Symposium on Visualization.

- HANSEN, CD, JOHNSON, CR (2005): *The Visualization Handbook*. Elsevier.
- JOHNSON, C, MOORHEAD, R, MUNZNER, T, PFISTER, H, RHEINGANS, P, YOO, TS (eds.) (2006): *NIH-NSF Visualization Research Challenges Report*. U.S. National Institutes of Health, Bethesda, MD, U.S.A.
- KÄHLER, R, PROHASKA, S, HUTANU, A, HEGE, HC (2005): Visualization of time-dependent remote adaptive mesh refinement data. In: *Proc. IEEE Visualization '05*, 175–182.
- LAMAR, E, PASCUCCI, V (2003): A multi-layered image cache for scientific visualization. In: *PVG '03: Proc. IEEE symposium on parallel and large-data visualization and graphics*, 61–68.
- LAMECKER, H, SEEBASS, M, LANGE, T, HEGE, HC, DEUFLHARD, P (2004): Visualization of the variability of 3d statistical shape models by animation. In: *Proceedings MMVR, Studies in Health Technologies and Informatics*, Bd. 98, 190–196.
- LIVNAT, Y (1999): *NOISE, WISE and SAGE: Algorithms for rapid isosurface generation*. Dissertation, University of Utah.
- LIVNAT, Y (2005): *Accelerated isosurface extraction approaches*, Kap. 2, S. 39–55. Elsevier.
- LORENSEN, WE, CLINE, HE (1987): Marching cubes: a high resolution 3D surface construction algorithm. In: *STONE, M. (ed.): SIGGRAPH '87 Conference Proceedings, Computer Graphics, Volume 21, Number 4*, 163–170.
- LYMAN, P, VARIAN, HR (2003): How much information? <http://www.sims.berkeley.edu:8000/research/projects/how-much-info-2003/>
- MCCORMICK, BH, DEFANTI, TA, BROWN, MD (1987): *Visualization in scientific computing*. NSF Landmark Report.
- POST, FH, VROLIJK, B, HAUSER, H, LARAMEE, RS, DOLEISCH, H (2003): The state of the art in flow visualisation: Feature extraction and tracking. *Computer Graphics Forum*, 22(4), 775–792.
- PROHASKA, S, HEGE, HC (2002): Fast visualization of plane-like structures in voxel data. In: *Proc. IEEE Visualization '02*, Boston, Massachusetts, 29–36.
- RICHARDSON, T, STAFFORD-FRASER, Q, WOOD, KR, HOPPER, A (1998): Virtual network computing. *IEEE Internet Computing*, 2(1), 33–38.
- SHALF, J, BETHEL, EW (2003): The grid and future visualization system architectures. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 23(2), 6–9.
- SHNEIDERMAN, B (1996): The eyes have it: A task by data type taxonomy for information visualizations. In: *Proceedings of the 1996 IEEE Symposium on Visual Languages*, 336.
- SILVA, CT, CHIANG, YJ, EL-SANA, J, LINDSTROM, P (2002): Out-of-core algorithms for scientific visualization and computer graphics. *Visualization '02*, Course notes.
- STALLING, D, WESTERHOFF, M, HEGE, HC (2004): *Amira – a highly interactive system for visual data analysis*. In: *Johnson, CR, Hansen CD (eds.): Visualization Handbook*, Academic Press (in press).
- VAN WIJK, J (2005): The value of visualization. In: *Proc. IEEE Visualization '05*, 11.
- VITTER, JS (2001): External memory algorithms and data structures: Dealing with massive data. *ACM Computing Surveys*, 33(2), 209–271.
- WULF, WA, MCKEE, SA (1995): Hitting the memory wall: implications of the obvious. *SIGARCH Comput. Archit. News*, 23(1), 20–24.