# Extraktion topologischer Strukturen von 2D- und 3D-Vektorfeldern

Tino Weinkauf

Courant Institute of Mathematical Sciences
New York University
weinkauf@courant.nyu.edu

**Abstract:** Die Analyse von großen und hochdimensionalen Simulationsdaten stellt eine Herausforderung dar, bei der sich die Verwendung von automatisierbaren Werkzeugen bewährt hat, die eine Konzentration auf die wesentlichen Informationen erlauben. Topologische Analyseverfahren erlauben eine zielorientierte Untersuchung der relevantesten Strukturen in einem Datensatz.

In diesem Artikel werden neue Algorithmen und Ansätze zur Extraktion, zeitlichen Verfolgung und Visualisierung von topologischen Strukturen in Vektorfeldern vorgestellt. Zur vereinfachten Darstellung topologischer Skelette von komplexen 3D Vektorfeldern wurde das neue Konzept der Konnektoren entwickelt. Die erste Visualisierungstechnik für 3D kritische Punkte höherer Ordnung und die zugehörige Klassifikation werden vorgestellt. Auf Basis dieser Theorie wurden zwei neue Anwendungen zur topologischen Simplifizierung und Konstruktion von 3D Vektorfeldern entwickelt. Desweiteren wird der erste generische Ansatz zur Extraktion von Merkmalen vorgestellt, der es erlaubt, eine Vielzahl von geometrisch definierten, lokalen und globalen Merkmalen in Skalar- und Vektorfeldern zu extrahieren und zeitlich zu verfolgen. Die Verwendung generischer Konzepte und gitterunabhängiger Algorithmen zielt auf eine breite Anwendbarkeit der Methoden bei gleichzeitig vergleichsweise geringem Implementationsaufwand. Zu den weiteren Beiträgen der vorgestellten Dissertation gehören der erste topologiebasierte Ansatz zur Visualisierung von zwei-parameterabhängigen 2D Vektorfeldern und eine umfassende Studie von Wirbelstrukturen.

Die in diesem Artikel vorgestellte Dissertation wurde an der Fakultät für Informatik der Universität Magdeburg verteidigt und die vorgestellten Arbeiten in begutachteten internationalen Konferenzbänden, Zeitschriften und Büchern veröffentlicht.

## 1 Einleitung

Die uns zur Verfügung stehende Rechenkapazität steigt stetig. Im Jahre 1993 kam der schnellste Höchstleistungsrechner gerade mal auf 59.7 GFlop/s, Ende 2008 gab es bereits zwei Installationen oberhalb der Petaflop-Grenze [MSDS]. Eine höhere Rechenkapazität ermöglicht komplexere Simulationen, die ihrerseits notwendig sind, um natürliche Prozesse (z.B. Strömungen, Molekülverhalten, Turbulenz, Klimaveränderungen) genauer analysieren zu können. Somit steigt zusammen mit der Rechenkapazität auch die Größe und Komplexität der Simulationsergebnisse. In vielen Fällen sind diese Datensätze zumindest vierdimensional, z.B. mit drei räumlichen Dimensionen und Zeit. In einigen Fällen werden sogar höherdimensionale Datensätze produziert, da zusätzliche Parameter betrachtet werden.

Allein die Größe der Datensätze erfordert eine zumindest teilweise Automatisierung der Datenanalyse. Dies kann durch die Extraktion sogenannter Merkmale (engl. *features*) erreicht werden. Ein *Merkmal* – so soll der Begriff im Folgenden verwendet werden – ist ein mathematisch wohl-definiertes, geometrisches Objekt (Punkt, Linie, Fläche, ...), dessen eigentliche Definition und Interpretation von der zugrunde liegenden Anwendung abhängt, aber üblicherweise repräsentiert es wichtige Strukturen (z.B. Wirbel oder Staupunkt in einer Strömung) oder Änderungen solcher Strukturen (z.B. Bifurkationen). Eine Datenauswertung profitiert von einer automatisierten Extraktion von Merkmalen in vielerlei Hinsicht:

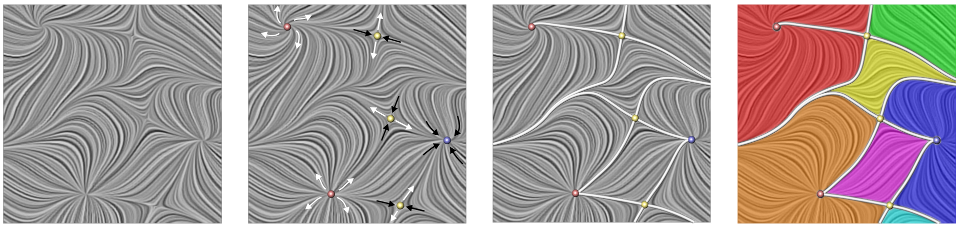
- **Informationsreduzierung**
  Das menschliche Gehirn erfasst im Wesentlichen drei Dimensionen und deren computergestützte Darstellung ist selbst mithilfe modernster Hardware nur bedingt möglich. Somit können also immer nur Teile der komplexen, hochdimensionalen Simulationsergebnisse zu einem Zeitpunkt dargestellt werden. Eine Merkmalsextraktion reduziert die Daten auf eine vergleichsweise kleine Menge von geometrischen Objekten. Desweiteren erlaubt eine Quantifizierung der extrahierten Merkmale den Aufbau einer Merkmalshierarchie, welche durch die Filterung unwichtiger Strukturen zu vereinfachten, leichter verständlichen Darstellungen führt.

- **Zielorientierte Untersuchungen**
  Merkmalsextraktion kann verwendet werden, um automatisiert die interessantesten Aspekte eines Datensatzes zu identifizieren, z.B. Zeitpunkte, an denen strukturelle Änderungen stattfinden. Dies hilft einem Nutzer bei der manuellen Untersuchung des Datensatzes. Es ermöglicht die Konzentration auf bestimmte Aspekte des untersuchten Phänomens. Dies führt zu einer zielorientierten, anwendungsgetriebenen Studie der wichtigsten Strukturen in einem Datensatz.

- **Verlagerung der Datenanalyse auf den Höchstleistungsrechner**
  In einigen Fällen ist es von Vorteil die Daten gleichzeitig mit der Simulation zu analysieren. Dies ist zum Beispiel dann der Fall, wenn die Datensätze zu groß sind, um effizient von handelsüblicher Desktophardware verarbeitet zu werden. Merkmalsextraktion kann sehr einfach automatisiert werden und ist somit sehr gut für den Einsatz auf Höchstleistungsrechnern geeignet.

- **Interaktive Visualisierung**
  Die Menge der extrahierten Merkmale ist üblicherweise klein genug, um interaktiv von handelsüblicher Hardware verarbeitet und dargestellt zu werden.

- **Objektivere Analyse**
  Im Vergleich zu herkömmlichen Visualisierungsverfahren benötigt man zur Extraktion von Merkmalen üblicherweise weniger oder gar keine Parameter. Somit hängt die Interpretation der Ergebnisse weniger von einer benutzerdefinierten Parametrisierung ab (z.B. Isowert, Transferfunktion).



(a) Stromlinien. (b) Quellen (rot), Senken (blau), und Sattel (gelb). (c) Separationslinien ausgehend von den Satteln. (d) Regionen unterschiedlichen Strömungsverhaltens.

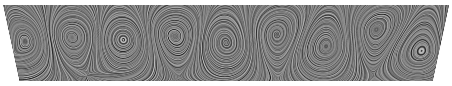
Abbildung 1: Topologie eines einfachen 2D-Vektorfeldes.

- **Zeitersparnis**
  Die vom Anwender aufzubringende Zeit zur Analyse der Daten wird reduziert, weil Teile der Analyse automatisiert sind und der manuelle Teil interaktiv ist.

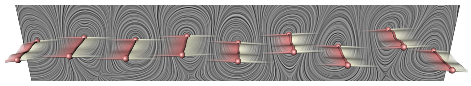
Die diesem Artikel zugrunde liegende Dissertation beschäftigt sich mit der merkmalsbasierten Analyse von Vektorfeldern. Diese Daten kommen in einer Vielzahl von Anwendungen vor, u.a. als Strömungsfelder bei Brennkammern, Turbomaschinen oder Flugzeugen, aber auch als Blutfluss in der Medizin. Vektorfelder werden auch zur Beschreibung der Dockingeigenschaften von Molekülen genutzt – sie haben mithin eine wichtige Bedeutung bei der Suche nach neuen Wirkstoffen in der Pharmazie.

Die Dissertation beschäftigt sich mit der Extraktion und Untersuchung *topologischer* Strukturen von Vektorfeldern. Topologie ist ein etabliertes Teilgebiet der Mathematik. Es erlaubt die Komprimierung von Daten auf ein strukturelles Skelett. Bei Vektorfeldern bedeutet dies die Segmentierung des Definitionsbereichs in Gebiete unterschiedlichen Strömungsverhaltens. Abbildung 1a verdeutlicht dies anhand eines 2D-Vektorfeldes: Bei einer topologischen Analyse beginnt man zunächst mit der Extraktion sogenannter kritischer Punkte, welche die Nullstellen eines Vektorfeldes darstellen. Wie Abbildung 1b zeigt, gibt es verschiedene Strömungsmuster in der Nähe kritischer Punkte, was eine Klassifikation in Quellen, Senken und Sattelpunkte ermöglicht. Das Strömungsverhalten um Quellen und Senken ist entweder komplett abstoßend oder anziehend. In der Nähe eines Sattels ist es eine Mischung aus abstoßendem und anziehendem Strömungsverhalten. Die Abgrenzung dieser Gebiete voneinander wird durch bestimmte Stromlinien gegeben. Man nennt sie Separationslinien bzw. Separatrizen (Abbildung 1c). Wie Abbildung 1d zeigt, unterteilen diese Separationslinien das Vektorfeld in Regionen unterschiedlichen Strömungsverhaltens. Kritische Punkte und Separatrizen bilden zusammen eine Graphstruktur, die *topologisches Skelett* bzw. *Morse-Smale Komplex* genannt wird. Das topologische Skelett von 3D-Vektorfeldern beinhaltet zusätzlich zu den Separationslinien noch Separationsflächen (genauere Erläuterungen in Abschnitt 2.1). Strukturelle Veränderungen des topologischen Skeletts in einem zeitabhängigen Datensatz werden *Bifurkationen* genannt (siehe auch Abschnitt 3.2).

Topologische Untersuchungen können die Strömungsanalyse in vielfältiger Weise unterstützen. So kann beispielsweise die Topologie des Geschwindigkeitsfeldes einer Strömung



(a) Die Visualisierungsmethode der Linienintegralfaltung stellt Wirbel bildlich dar, jedoch ist eine Messung ihrer Eigenschaften nicht möglich.



(b) Eine im Rahmen der Dissertation entwickelte merkmalsbasierte Methode extrahiert Wirbelkerne als geometrische Objekte (rote Linien) und verfolgt deren zeitliche Entwicklung (halbtransparente Flächen).

Abbildung 2: Der Unterschied zwischen visueller und merkmalsbasierter Analyse einer Zylinderumströmung. Die Daten stammen von Bernd R. Noack (TU Berlin) und Gerd Mutschke (FZ Rossendorf).

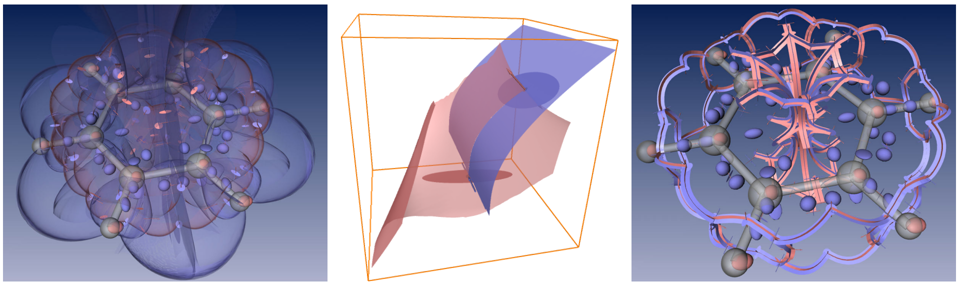
als kondensierte Repräsentation der Stromlinien gesehen werden und somit als skelettartige, vereinfachte Darstellung der Strömung dienen. Solch eine Darstellung bedingt jedoch die Wahl eines Inertialsystems, was nicht in allen Fällen möglich ist. Eine weitere Anwendung ist die Beschreibung von Wirbeln mittels topologische Strukturen von abgeleiteten Vektorfeldern. Dies ermöglicht eine Galilei-invariante Analyse von wichtigen Strömungsprozessen wie z.B. Mischung.

Die im Rahmen der vorgestellten Dissertation entwickelten merkmalsbasierten Methoden ermöglichen neue Formen der Analyse im Vergleich zu bisherigen Visualisierungsverfahren. Dies soll am Beispiel von Abbildung 2 verdeutlicht werden. Dargestellt ist die Strömung hinter einem Zylinder, deren Hauptmerkmal die sogenannte von Kármán'sche Wirbelstraße ist. Die Wirbel werden durch die herkömmliche texturbasierte Visualisierung (Linienintegralfaltung) in Abbildung 2a klar dargestellt. Ebenso kann die zeitliche Entwicklung der Wirbel mittels Animation durch diese Methode bildlich erfasst werden. Jedoch ist man mit dieser reinen Darstellungsmethode nicht in der Lage, zwischen den verschiedenen Wirbeln explizit zu *unterscheiden* oder gar deren Pfad, Geschwindigkeit oder Lebensdauer zu *messen*. Die in Abbildung 2b gezeigte merkmalsbasierte Wirbelanalyse ermöglicht dies, da die Wirbel als ausgezeichnete geometrische Objekte extrahiert wurden. Eine darauf aufbauende Quantifizierung der Wirbel bezüglich ihrer Stärke ermöglicht zudem die Auswahl der wichtigsten Strukturen.

In den folgenden Abschnitten werden die Hauptbeiträge der vorgestellten Dissertation kurz erläutert und mit anschaulichen Beispielen aus der Praxis untermauert. Abschnitt 2 behandelt die Beiträge zu den theoretischen Grundlagen der Topologie. Abschnitt 3 stellt die wichtigsten algorithmischen Neuentwicklungen zur Extraktion topologischer Strukturen und anderer Merkmale vor. Eine Zusammenfassung wird in Abschnitt 4 gegeben.

## 2 Erweiterungen der theoretischen Grundlagen

Im Rahmen der vorgestellten Dissertation wurden die theoretischen Grundlagen der Topologie um einige Konzepte erweitert. Die wichtigsten Konzepte werden im Folgenden dargestellt.



(a) Topologisches Skelett mit Separationsflächen. (b) Sattelkonnektor als Schnittkurve zweier Separatrizen. (c) Topologisches Skelett mit Sattelkonnektoren.

Abbildung 3: Topologische Visualisierungen des elektromagnetischen Feldes des Benzolmoleküls.

## 2.1 Konnektoren

Die Topologie von 3D-Vektorfeldern unterscheidet sich vom 2D-Fall zunächst darin, dass es im 3D zwei verschiedene Arten von Sattelpunkten gibt: sogenannte *anziehende* und *abstoßende* Sattel, bei denen das jeweilige Strömungsverhalten (anziehend, abstoßend) dominiert. Zudem gehen von den 3D-Sattelpunkten nicht nur Separationslinien, sondern auch Separationsflächen aus.

Abbildung 3 zeigt dies am Beispiel des elektrostatischen Feldes des Benzolmoleküls. Dieses Gradientenfeld enthält 184 kritische Punkte. Die Separationsflächen in Abbildung 3a werden durch 78 anziehende und 43 abstoßende Sattelpunkte erzeugt. Diese Flächenstrukturen überdecken sowohl sich selbst als auch andere topologische Strukturen. Selbst die gewählte halbtransparente Darstellung genügt nicht, um das visuelle Durcheinander auf ein akzeptables Maß zu reduzieren.

Im Rahmen der Dissertation wurde das neue Konzept der *Sattelkonnektoren* eingeführt [TWHS03]. Hierbei handelt es sich um die Schnittkurve von zwei sich durchdringenden Separationsflächen, wobei eine der Separatrizen von einem anziehenden Sattel $A$ und die andere von einem abstoßenden Sattel $R$ kommen muss. Es lässt sich zeigen, dass ein Sattelkonnektor eine spezielle Stromlinie ist, die die beiden Sattelpunkte $A$ und $R$ miteinander verbindet. Ein Sattelkonnektor ist ein stabiles Element in einem topologischen Skelett. Abbildung 3b zeigt dies an einem einfachen Beispiel.

Sattelkonnektoren können u.a. verwendet werden, um topologisch komplexe 3D-Vektorfelder visuell vereinfacht darzustellen. Abbildung 3c zeigt dies am Benzolmolekül: die 129 gefundenen Sattelkonnektoren werden anstelle der Separationsflächen dargestellt. Obwohl die Konnektoren nur den ungefähren Verlauf der Separatrizen widerspiegeln, erlaubt diese Darstellung ob ihrer visuellen Reduktion doch deutlich mehr Einblick in die Symmetrie und Dreidimensionalität dieses Datensatzes. Zudem wird dem Anwender die Möglichkeit gegeben, die Darstellung einzelner Separationsflächen interaktiv durch Wahl eines Sattelkonnektors ein- bzw. auszuschalten. Somit kann also die Segmentierung des Vektorfeldes durch das topologische Skelett interaktiv exploriert werden.

Das Konzept der Sattelkonnektoren wurde auf Separationsflächen erweitert, die durch Kurven (*boundary switch curves*) am Rand des Definitionsbereiches entstehen [WTHS04a]. Solche Betrachtungen von Rändern des Definitionsbereiches sind insbesondere in der Strömungsmechanik zur Identifikation ablösenden Strömungsverhaltens von Bedeutung.

Wie im Rahmen dieser Arbeit gezeigt wurde, hat das Konzept der Sattelkonnektoren neben den Visualisierungsaspekten weitere Anwendungen:

- Die Anzahl von Sattelkonnektoren spielt eine entscheidende Rolle, um Aussagen über die topologische Komplexität von Vektorfeldern herzuleiten [TWHS07].
- Sattelkonnektoren dienen als unverzichtbares Hilfsmittel bei der topologischen Konstruktion von 3D-Vektorfeldern [WTHS04b].
- Sattelkonnektoren geben Auskunft über die Mischungsverhältnisse in einer Strömung [TWHS03].

Zudem kann der Algorithmus zur Extraktion von Sattelkonnektoren in leicht modifizierter Form zur Identifikation globaler Bifurkationen verwendet werden – siehe Abschnitt 3.2.

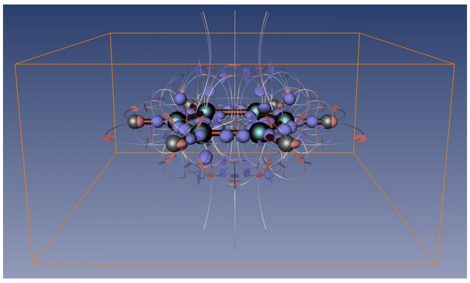
## 2.2 Topologie höherer Ordnung

Die Topologie eines Vektorfeldes wird in der Regel unter der Voraussetzung betrachtet, dass sich das Vektorfeld in der Nähe eines kritischen Punktes linearisieren lässt. Dies ist jedoch nicht in allen Anwendungen der Fall und insbesondere durch Symmetrie in den Daten entstehen topologische Elemente höherer Ordnung.

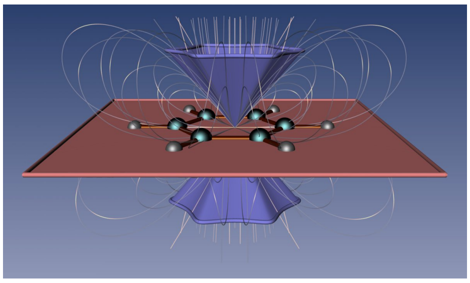
Im Rahmen der vorgestellten Dissertation wurde die erste Klassifikation für kritische Punkte höherer Ordnung in 3D-Vektorfeldern entwickelt und darauf aufbauend auch die erste Visualisierungstechnik für diese Strukturen eingeführt [WTHS04b]. Aufbauend auf dieser Theorie wurden zwei neuartige Anwendungen entwickelt: *Konstruktion* und *Simplifikation* von 3D-Vektorfeldern.

Die topologische Konstruktion von 3D-Vektorfeldern basiert auf der Vorgabe eines topologischen Skelettes zu dem ein zugehöriges Vektorfeld gefunden werden soll, welches eben jene vorgegebenen topologischen Strukturen enthält. Dieser Ansatz lässt sich u.a. anwenden zur topologie-erhaltenden Kompression von Vektorfeldern, zur Erstellung von Vorgaben für Pattern Matching Algorithmen oder als Teil eines Reverse Engineering Ansatzes bei der Strömungsoptimierung [WTHS04b].

Die Simplifikation von 3D-Vektorfeldern beruht auf einem neuen Verfahren zur Extraktion kritischer Punkte höherer Ordnung [WTS$^+$05] und erlaubt es, die Darstellung eines Clusters kritischer Punkte erster Ordnung durch einen einzigen kritischen Punkt höherer Ordnung zu ersetzen. Diese Neuentwicklung ermöglicht es, auch komplizierteste topologische Strukturen auf visuell leicht verständliche ikonische Darstellungen zu reduzieren. Dies soll am Beispiel des elektrostatischen Feldes des Benzolmoleküls in Abbildung 4 veranschaulicht werden: Dieses Feld beschreibt die vom elektrostatischen Potenzial des



(a) 184 kritische Punkte finden sich in dem Datensatz vor der Simplifikation. Die Box um das Molekül stellt das gewählte Gebiet für die Simplifikation dar.



(b) Topologisch simplifizierte Repräsentation mit einem kritischen Punkt höherer Ordnung. Hierdurch wird das Fernfeld-Verhalten des Benzols deutlich.

Abbildung 4: Topologische Simplifikation am Beispiel des elektrostatischen Feldes des Benzols.

Benzols ausgehende Kraft auf eine positive Punktladung an jedem Ort im Raum. Wenn eine solche Punktladung sehr nah am Molekül ist, so wird das am nächsten gelegene Atom die stärkste Kraft auf die Punktladung ausüben – es also anziehen oder abstoßen. Der Einfluss eines einzelnen Atoms nimmt jedoch mit zunehmender Entfernung vom Molekül ab: Je weiter die Punktladung vom Molekül entfernt ist, desto gleichverteilter ist der Einfluss aller Atome. Mit anderen Worten, das Molekül als Ganzes übt eine Kraft auf eine weit entfernte Punktladung aus. Man kann also bei einem Molekül zwischen einem Nah- und einem Fernfeld unterscheiden.

Das Verhalten im Nahfeld wird durch die 184 kritischen Punkte in Abbildung 4a charakterisiert. Das Verhalten im Fernfeld kann mittels topologischer Simplifikation dieser kritischen Punkte dargestellt werden. Dazu wird eine Box um das Molekül gelegt, die das gewählte Gebiet für die Simplifikation darstellt. Nach Anwendung der Simplifikation werden alle 184 kritischen Punkte durch eine einzelne Ikone eines kritischen Punktes höherer Ordnung repräsentiert (Abbildung 4b). Diese Ikone zeigt deutlich das Verhalten im Fernfeld des Benzols: Die rote Symmetrieebene bildet eine klare Abgrenzung zwischen den beiden trichterförmigen, anziehend wirkenden Strukturen auf beiden Seiten des Moleküls. Dieses Verhalten wurde durch weitere Tests in [WTS+05] bestätigt.

## 3 Algorithmen zur Merkmalsextraktion und -verfolgung

Ein wesentlicher Teil der vorgestellten Dissertation beschäftigt sich mit der Entwicklung neuer Algorithmen zur Extraktion und zeitlichen Verfolgung von topologischen Strukturen und anderen Merkmalen wie z.B. Wirbelkernlinien in Strömungsfeldern oder Extremalstrukturen in Skalarfeldern. Es handelt sich also um eine große Anzahl verschiedener Merkmale für die in der Literatur mindestens ebenso viele verschiedene Algorithmen zu finden sind. Im Rahmen der Dissertation ist es gelungen, ein einheitliches Konzept zur Extraktion dieser Strukturen zu entwickeln, welches den Implementationsaufwand im Vergleich zu bisherigen Ansätzen signifikant reduziert. Dieses soll im folgenden Abschnitt dargestellt werden. Im Abschnitt 3.2 werden dann einige Realisierungen dieses Konzepts hervorgehoben und erläutert.

## 3.1 Einheitliches Konzept zur Merkmalsextraktion

Im Rahmen der Dissertation wurde der erste generische Ansatz zur Extraktion lokaler und globaler Merkmale entwickelt: statt einzelner Algorithmen für jedes einzelne Merkmal wird ein algorithmisches Gesamtkonzept für alle Merkmale verwendet. Dazu wurden die Definitionen der verschiedenen Merkmale mithilfe *generischer, mathematischer Konzepte* vereinheitlicht. Die Algorithmen wurden so formuliert, dass sie sich für andere Merkmale *wiederverwenden* lassen – somit kann man sich auf eine kleine Anzahl bereits getesteter Implementationen konzentrieren. Zudem wurde darauf geachtet, dass die Ausgabe eines Algorithmus als Eingabe des nächsten Verwendung finden kann – dies ermöglicht den Aufbau komplexer Extraktionsverfahren durch *Verkettung* einfacher Grundalgorithmen. Um die Anwendbarkeit zu erhöhen, sollten die Techniken so unabhängig wie möglich von der Gitterstruktur der Daten sein.

Das entwickelte Konzept heisst *Unified Feature Extraction Architecture (UFEA)* und besteht aus nur drei Grundalgorithmen, die zu implementieren sind, um eine Vielzahl von Merkmalen mittels einer Kombination dieser Grundalgorithmen zu extrahieren und zeitlich zu verfolgen:

- Finden von Nullstellen
- Integration von Stromobjekten (Stromlinien, -flächen, etc.)
- Schneiden von Stromobjekten

Für die ersten beiden Algorithmen gibt es eine Reihe von getesteten und effizienten Implementationen in numerischen Bibliotheken. Für den dritten Grundalgorithmus wurde ein Ansatz im Rahmen dieser Dissertation entwickelt.

Dieser Ansatz wird durch zwei Konzepte ermöglicht, die im Rahmen dieser Dissertation entwickelt bzw. erweitert wurden: Das Konzept der *Konnektoren* ermöglicht die Extraktion globaler Merkmale wie z.B. geschlossener Stromlinien. Das Konzept der *Feature Flow Fields* [TS03] kommt hauptsächlich zur zeitlichen Verfolgung von Merkmalen zum Einsatz und wurde in der Dissertation stark erweitert [WTHS07, TSW$^+$05]. Beide Konzepte dienen der generischen Formulierung von Merkmalsdefinitionen und lassen sich mithilfe der obigen Grundalgorithmen darstellen.

## 3.2 Neue Algorithmen zur Merkmalsextraktion

Auf Basis der UFEA ist es in der Dissertation gelungen, Extraktionsverfahren für Merkmale zu entwickeln, für die es bisher in der Literatur keine Verfahren gab. So stellt die

Dissertation das erste Verfahren zur zeitlichen Verfolgung geschlossener Stromlinien vor, das zudem in der Lage ist, sogenannte *cyclic fold* Bifurkationen zu detektieren, welche die Entstehung bzw. die gegenseitige Auslöschung von geschlossenen Stromlinien darstellen. Ebenso wurden erstmals Verfahren zur Detektion von *saddle connections* und *periodic blue sky* Bifurkationen entwickelt. All diese Merkmale stellen wichtige globale Bifurkationen bei der zeitlichen Entwicklung eines topologischen Skeletts dar, weil sie strukturelle Änderungen in der Konnektivität der kritischen Punkte beschreiben.

Die Arbeit stellt den ersten topologischen Extraktions- und Visualisierungsansatz für zwei-parameterabhängige Vektorfelder vor [WTHS06]. Solche Vektorfelder finden sich häufig in der Strömungsoptimierung – sie beschreiben eine Strömung in Abhängigkeit mehrerer Parameter wie z.B. Anstellwinkel eines Flugzeugflügels und Stärke einer Aktuation.

Zum ersten Mal wurde im Rahmen der Dissertation das Rotationsverhalten von Pfadlinien in zeitabhängigen Strömungen mathematisch beschrieben – was auf Basis der UFEA zum ersten Extraktionsverfahren für Wirbelkernlinien geführt hat, die auf dem Verhalten von Partikeln in zeitabhängigen Strömungen beruhen [WSTH07]. Bisherige Verfahren haben nur das Verhalten von Stromlinien untersucht und somit konnten die speziellen Charakteristika zeitabhängiger Strömungen nicht erfasst werden.

## 4 Zusammenfassung

Die vorgestellte Dissertation hat eine Reihe von Beiträgen auf dem Gebiet der merkmalsbasierten Datenanalyse erbracht, die in realen Anwendungen (u.a. Strömungsmechanik) nicht nur zu einer effizienteren Analyse geführt haben, sondern bestimmte Formen der Datenauswertung überhaupt erst ermöglicht haben. So wurde das neue Konzept der Sattelkonnektoren eingeführt, welches zum ersten Mal die Visualisierung komplexer 3D-Topologien ermöglicht. Ebenso wurden zum ersten Mal Extraktions- und Visualisierungstechniken für topologische Strukturen höherer Ordnung und in zwei-parameterabhängigen Vektorfeldern vorgestellt. Die *Unified Feature Extraction Architecture (UFEA)* stellt den ersten generischen Ansatz zur Extraktion lokaler und globaler Merkmale da und reduziert damit den Implementationsaufwand für die Vielzahl von damit beschreibbaren Merkmalen auf die Implementation von drei einfachen Grundalgorithmen. Die UFEA wurde erfolgreich zur Extraktion von topologischen Strukturen, Wirbel- und Extremalstrukturen eingesetzt.

## Literatur


[MSDS] H. Meuer, E. Strohmaier, J. Dongarra und H. Simon. TOP500 Supercomputer Sites. http://www.top500.org/.

[TS03] H. Theisel und H.-P. Seidel. Feature Flow Fields. In *Data Visualization 2003. Proc. VisSym 03*, Seiten 141–148, 2003.

[TSW+05] H. Theisel, J. Sahner, T. Weinkauf, H.-C. Hege und H.-P. Seidel. Extraction of Parallel Vector Surfaces in 3D Time-Dependent Fields and Application to Vortex Core Line

Tracking. In *Proc. IEEE Visualization 2005*, Seiten 631–638, 2005.

[TWHS03] H. Theisel, T. Weinkauf, H.-C. Hege und H.-P. Seidel. Saddle Connectors - An Approach to Visualizing the Topological Skeleton of Complex 3D Vector Fields. In *Proc. IEEE Visualization 2003*, Seiten 225–232, 2003.

[TWHS07] H. Theisel, T. Weinkauf, H.-C. Hege und H.-P. Seidel. On the Applicability of Topological Methods for Complex Flow Data. In H. Hauser, H. Hagen und H. Theisel, Hrsg., *Topology-based Methods in Visualization*, Mathematics and Visualization, Seiten 105–120. Springer, 2007.

[WSTH07] T. Weinkauf, J. Sahner, H. Theisel und H.-C. Hege. Cores of Swirling Particle Motion in Unsteady Flows. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics (Proceedings Visualization 2007)*, 13(6), November - December 2007.

[WTHS04a] T. Weinkauf, H. Theisel, H.-C. Hege und H.-P. Seidel. Boundary Switch Connectors for Topological Visualization of Complex 3D Vector Fields. In *Data Visualization 2004. Proc. VisSym 04*, Seiten 183–192, 2004.

[WTHS04b] T. Weinkauf, H. Theisel, H.-C. Hege und H.-P. Seidel. Topological Construction and Visualization of Higher Order 3D Vector Fields. *Computer Graphics Forum (Eurographics 2004)*, 23(3):469–478, 2004.

[WTHS06] T. Weinkauf, H. Theisel, H.-C. Hege und H.-P. Seidel. Topological Structures in Two-Parameter-Dependent 2D Vector Fields. *Computer Graphics Forum*, 25(3):607–616, September 2006.

[WTHS07] T. Weinkauf, H. Theisel, H.-C. Hege und H.-P. Seidel. Feature Flow Fields in Out-of-Core Settings. In H. Hauser, H. Hagen und H. Theisel, Hrsg., *Topology-based Methods in Visualization*, Mathematics and Visualization, Seiten 51–64. Springer, 2007.

[WTS+05] T. Weinkauf, H. Theisel, K. Shi, H.-C. Hege und H.-P. Seidel. Extracting Higher Order Critical Points and Topological Simplification of 3D Vector Fields. In *Proc. IEEE Visualization 2005*, Seiten 559–566, 2005.

**Tino Weinkauf** wurde am 31. Oktober 1974 in Rostock geboren. Er studierte Informatik an der Universität Rostock mit den Schwerpunkt Computergraphik und erhielt sein Diplom im Jahre 2000. Von 2001 bis 2009 arbeitete er als wissenschaftlicher Angestellter am Zuse-Institut Berlin und begann dort Ende 2003 die Arbeit an seiner Dissertation im Rahmen des DFG Sonderforschungsbereiches 557 „Beeinflussung komplexer turbulenter Scherströmungen". Die Dissertation wurde an der Universität Magdeburg im Oktober 2007 eingereicht und erhielt den Karin-Witte-Preis. Seit März 2009 forscht er als PostDoc am Courant Institute der New York University. Dies wird durch ein Feodor Lynen-Stipendium der Alexander von Humboldt-Stiftung ermöglicht. Seine Forschungsinteressen liegen in den Bereichen der Visualisierung und Computergraphik, insbesondere bei der topologischen Datenanalyse und der geometrischen Modellierung. Er ist aktives Mitglied in Programmkomitees von internationalen Graphik- und Visualisierungstagungen.