

# Sichtbarkeitsoptimierung und Massebehaftete Partikel in der Strömungsvisualisierung<sup>1</sup>

Tobias Günther<sup>2</sup>

**Abstract:** Die folgende Arbeit ist im Bereich der wissenschaftlichen Visualisierung angesiedelt, die sich als Teilgebiet der Computergrafik versteht und interdisziplinär mit anderen wissenschaftlichen Disziplinen, wie etwa der Meteorologie, der Medizin und dem Ingenieurwesen, verknüpft ist. Im ersten Teil werden optimierungsbasierte Ansätze vorgestellt, die die Sichtbarkeit von allgemeinen Linien und Flächen einstellen um eine Balance zwischen der Darstellbarkeit von Informationen und der Vermeidung von Verdeckung zu finden. Der zweite Teil ist neuen Visualisierungsmethoden für zeitabhängige Strömungen gewidmet, was die erwartungstreue Darstellung von integrationsbasierten Skalarfeldern und die Einführung einer neuen Klasse von Wirbeldefinitionen beinhaltet. Im dritten Teil werden massebehaftete Partikel als ein neues Anwendungsfeld in der Strömungsvisualisierung eingeführt. Im Einzelnen wird Integralgeometrie extrahiert und visualisiert, das Wirbelverhalten und die Separation von masse-abhängigen Partikeln studiert, traditionelle Vektorfeldtopologie auf den masse-abhängigen Fall erweitert und ein neuer Ansatz zur Entdeckung der Herkunft von Schmutzpartikeln in Strömungen präsentiert.

Die in diesem Artikel vorgestellten Methoden wurden in einer Dissertation [Gü16] veröffentlicht, die von der Fakultät für Informatik der Universität Magdeburg angenommen wurde. Die einzelnen vorgestellten Verfahren sind in begutachteten internationalen Zeitschriften veröffentlicht worden.

## 1 Sichtbarkeitsoptimierung

In der 3D Strömungsvisualisierung kommt es häufig zu Verdeckungsproblemen, sobald dichte Linienfelder oder mehrere Flächen dargestellt werden. Ein wichtiger Aspekt ist daher die sorgfältige Auswahl von Darstellungsprimitiven, sodass die relevanten Strukturen im Datensatz bestmöglich kommuniziert werden können.

### 1.1 Sichtbarkeitsoptimierung für 3D Linienfelder

Die Auswahl von Stromlinien, die ein Vektorfeld bestmöglich repräsentieren ist ein fundamentales und bereits lange ausstehendes Problem [GRT13]. Wenn zu viele Linien gezeigt werden, kommt es zu Verdeckungen von relevanten Strukturen. Wenn Linien entfernt werden, ohne deren Rolle im Bild zu beachten, können wichtige Strukturen verloren gehen. Des Weiteren wäre dadurch nicht sichergestellt, dass relevante Strukturen nicht verdeckt werden. Letzten Endes gilt es daher immer eine Balance zwischen der Präsentation relevanter Information und der Vermeidung von Verdeckungen zu finden. Die Aufgabe

---

<sup>1</sup> Englischer Titel der Dissertation: Opacity Optimization and Inertial Particles in Flow Visualization

<sup>2</sup> ETH Zürich, tobias.guenther@inf.ethz.ch

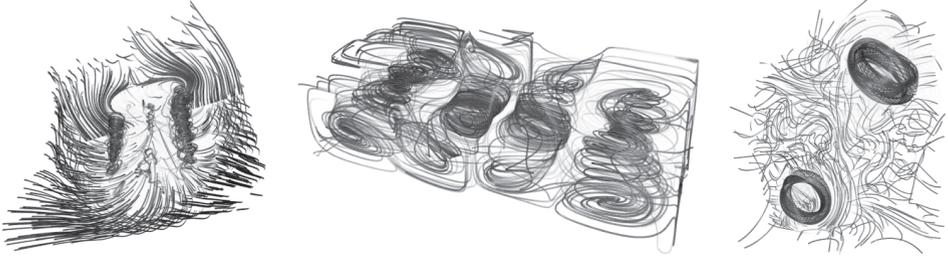


Abb. 1: Anwendungen der interaktiven, globalen Linienselektion. Die Lösung der linearen Optimierung mit beschränktem Lösungsraum berechnet Transparenzen, die den Blick auf relevante Strukturen freigeben, die vom Nutzer als wichtig eingestuft wurden, wie bspw. Wirbel hinter einem Hubschrauber (links), Konvektionszellen (mitte) und Feldlinien von magnetischen Ringen (rechts).

ist es daher eine Visualisierung zu erschaffen, die die Sicht auf relevanten Strukturen freigibt. Gegeben ist hierfür eine Menge an Linien und ein benutzerdefiniertes Wichtigkeitsmaß. Das vorgeschlagene Verfahren diskretisiert die Linien in Segmente und minimiert die folgende quadratische Energie, wobei  $g_i$  die Wichtigkeit eines Segments,  $h_{ij}$  den Verdeckungsgrad zweier Segmente und  $a_{ij}$  die Nachbarschaft zweier Segmente bezeichnet:

$$E = \frac{p}{2} \sum_{i=1}^n (\alpha_i - 1)^2 \quad (1)$$

$$+ \frac{q}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \left( \alpha_i (1 - g_i)^\lambda h_{ij} g_j \right)^2 \quad (2)$$

$$+ \frac{r}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \left( \alpha_i (1 - g_i)^\lambda h_{ji} g_j \right)^2 \quad (3)$$

$$+ \frac{s}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{a_{ij}}{2} (\alpha_i - \alpha_j)^2 \quad (4)$$

unter der Nebenbedingung  $0 \leq \alpha_i \leq 1$ . Term (1) agiert als Regularisierung um die Sichtbarkeit zu maximieren. Weiterhin wird die Verdeckung von relevanten Strukturen minimiert (2), der Hintergrund aufgeräumt (3) und der Transparenzverlauf entlang der Linien geglättet (4). In Abbildung 1 sind Beispiele zu sehen: Wirbelstrukturen in der Luftströmung hinter einem Hubschrauber (der Hubschrauber selbst ist nicht dargestellt), Konvektionszellen in einer dünnen Schicht Flüssigkeit, die von unten erhitzt wird um Auftrieb zu erzeugen und Feldlinien von magnetischen Ringen, die im Laufe einer Simulation zerfallen und sich neu formieren. Im Vergleich zu existierenden Arbeiten ist dies das erste Verfahren, das eine globale Optimierung ausführt, sowie interaktiv und blickabhängig ist.

## 1.2 Hierarchische Sichtbarkeitsoptimierung für Zeitabhängige 3D Linienfelder

Die Selektion von relevanten Linien in zeitabhängigen Strömungen wurde in der Literatur bislang noch nicht betrachtet. Aus diesem Grund wird die oben vorgestellte Sichtbarkeitsoptimierung erweitert [GRT14], wofür zwei Schritte notwendig sind. Zunächst muss die

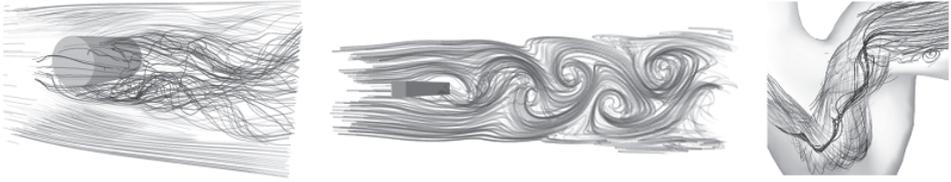


Abb. 2: Sichtbarkeitsoptimierung für eine zeitabhängige, turbulente Zylinderströmung (links), eine von-Kármánsche Wirbelstraße (mitte) und Blutfluss (rechts).

Rechenzeit verkürzt werden, um die Sichtbarkeit von Linien berechnen zu können, die sich mit der Zeit verformen. Des Weiteren muss die zeitliche Kohärenz sichergestellt werden, um störendes Flackern zu vermeiden. Die Rechenzeit der Sichtbarkeitsoptimierung wird durch die Anzahl der Unbekannten bestimmt, d.h., die Anzahl der Liniensegmente für die die Transparenz berechnet werden soll. Um die Anzahl der Segmente zu reduzieren, wird eine blickabhängige Unterteilung der Linien durchgeführt, sodass nahe der Kamera feiner unterteilt wird als im fernen Hintergrund. Mögliche Unterteilungen werden hierarchisch vorberechnet und können zur Laufzeit ausgewählt werden, sodass ein Budget an Liniensegmenten eingehalten wird und die Liniensegmente auf dem Bildschirm gleichgroß sind. Um die zeitliche Kohärenz sicherzustellen wird die zu minimierende Energie um einen weiteren Energieterm ergänzt, der das Ergebnis zeitlich glättet. Abbildung 2 zeigt Beispiele: eine turbulente Zylinderströmung in der sich starke Verwirbelung hinter einem Hindernis entwickelt, eine ruhigere Strömung in der sich die bekannte von-Kármánsche Wirbelstraße herausbildet und die Verwirbelung von Blut in einem Blutgefäß.

### 1.3 Sichtbarkeitsoptimierung für Flächen

Der nächste Schritt ist die Erweiterung der Sichtbarkeitsoptimierung auf Flächen [Gü14]. Die Idee ist hierbei sehr ähnlich zum bisherigen Verfahren. Zunächst wird eine gegebene Menge an Flächen in Patches unterteilt. Für jedes Patch wird eine quadratische Energie unter Nebenbedingungen minimiert, die die optimale Sichtbarkeit der Patches bestimmt. Die Unterteilung der Flächen und die Berechnung der Energieterme sind jedoch aufwändiger, als es bei den Linien der Fall war. Um die Flächen in etwa gleichgroße Patches zu zerlegen, wird eine Menge von Punkten uniform auf den Flächen verteilt, sodass deren geodätische

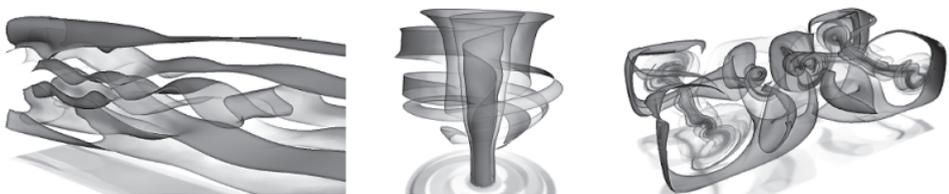


Abb. 3: Sichtbarkeitsoptimierung für Stromflächen in einer Zylinderströmung (links), einem statischen Mixer (mitte) und einer Konvektionsströmung (rechts).

Abstände untereinander maximiert werden. Die etwa gleichgroßen Patches ergeben sich aus den Voronoi-Regionen um den Punkten. Die resultierenden Visualisierungen sind nach wie vor blickabhängig, zeitlich kohärent und interaktiv. Abbildung 3 zeigt einige Ergebnisse in einer Zylinderströmung, in einem statischen Mixer, sowie in der bereits zuvor verwendeten Konvektionsströmung.

## 2 Merkmalsextraktion in zeitabhängigen Strömungen

Die Entwicklung von Analysemethoden für zeitabhängige Strömungen ist seit Jahren ein hochaktuelles Forschungsthema. Im Folgenden werden Techniken aus dem Lichttransport inhomogener partizipierender Medien auf die erwartungstreue Darstellung von integrationsbasierten Skalarfeldern angewendet, beispielsweise auf den sogenannten Finite-Time Lyapunov Exponent. Des Weiteren wird eine neue Klasse von Wirbeldefinitionen für Strömungen vorgestellt, die von rotierenden mechanischen Teilen induziert werden, wie etwa Rührwerken, Hydrozyklonen, Zentrifugalpumpen oder Ventilatoren.

### 2.1 Monte Carlo Rendering von Finite-Time Lyapunov Exponenten

Für die Verbesserung der Genauigkeit von Wettervorhersagen gewinnen hochauflösende, multimodale Klimadaten zunehmend an Bedeutung, denn hochaufgelöste numerische Simulationen der atmosphärischen Prozesse erlauben neue Einblicke in deren Dynamik. Die präsentierten Visualisierungen in Abbildung 4 zeigen atmosphärische Luftströmungen. Mit Hilfe der neuen Visualisierungstechnik [GKT16] können dichte Strömungsfelder und die Lagrange-Strukturen darin sichtbar gemacht werden. Die Methode approximiert nicht-lokale Strömungsintegrale um den Finite-Time Lyapunov Exponenten (FTLE) abzuleiten, der Regionen mit stark separierendem Verhalten hervorhebt. Dabei bezeichnet die *flow map*  $\phi_t^\tau(\mathbf{x}) = \phi(\mathbf{x}, t, \tau)$  den Ort, den ein Partikel das an  $(\mathbf{x}, t)$  gestartet wurde nach einer Zeit  $\tau$  erreicht. Der räumliche Gradient der *flow map*  $\nabla\phi(\mathbf{x}, t, \tau) = \frac{\partial}{\partial \mathbf{x}}\phi(\mathbf{x}, t, \tau)$  beschreibt das Verhalten von Partikeln die nah beinander gestartet wurden. Da wir an Separation interessiert sind, betrachten wir den rechten Cauchy-Green Deformationstensor  $\nabla^T\nabla$ . Des- sen größter positiver Eigenwert  $\lambda_{\max}$  enthält die stärkste (quadrierte) Separationsrate. Mit

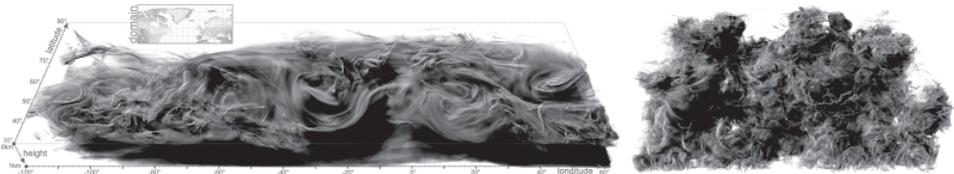


Abb. 4: Hochqualitative Visualisierungen einer Reanalyse-Simulation vom Europäischen Zentrum für Mittelfristige Wettervorhersagen (ECMWF), die die Luftströmung über der nördlichen Hemisphäre am 10. April 2010 zeigt (links). Des Weiteren ist eine Kumuluswolken-Simulation zu sehen (rechts), in der die Windbewegung zwischen Troposphäre und Stratosphäre untersucht wird.

angemessener Normierung erhalten wir:

$$\text{FTLE}(\mathbf{x}, t, \tau) = \frac{1}{|\tau|} \ln \sqrt{\lambda_{\max}(\nabla^T \nabla)}, \quad (5)$$

Die Extremalstrukturen dieses Skalarfelds agieren als Transportbarrieren, die von atmosphärischen Treibhausgasen wie Kohlenstoffdioxid nicht überwunden werden können. Die Strukturen haben damit maßgeblichen Einfluss auf die Temperaturdiffusion und die Bildung von Wolken. Die Berechnung der Visualisierung erfordert viel Sorgfalt, da die Strukturen besonders fein sind. Das in Abbildung 4 angewandte Verfahren [GKT16] nutzt eine erwartungstreue Monte Carlo Integration, die sonst in der Strahlungsphysik und der modernen Filmproduktion Verwendung findet. Im Vergleich zu bisherigen Verfahren, ist dies das erste Verfahren, das Diskretisierungsfehler in der Darstellung komplett vermeidet. Für die Berechnung werden jedoch mehrere Milliarden Differentialgleichungen integriert, bis das Bild hinreichend konvergiert und das Monte Carlo Rauschen verschwunden ist.

## 2.2 Rotations-invariante Wirbelmaße

Das folgenden Kapitel befasst sich mit Strömungen, die um eine feste und bekannte Achse rotieren [GST16]. Beispiele sind Rührwerke, Rotorblätter, Hydrozyklone, Zentrifugalpumpen und Ventilatoren. Um das Problem zu motivieren stelle man sich einen zylindrischen Behälter vor, der mit einer Flüssigkeit gefüllt ist und in dem sich ein Propeller dreht. Die Rotation des Propellers mit konstanter Winkelgeschwindigkeit induziert eine Bewegung des Fluids. Ein Beobachter könnte nun am Rand des Behälters stehen oder sich mit dem Propeller mitdrehen. Das Ergebnis der meisten Wirbelextraktionsmethoden hängt allerdings von der Rotation des Betrachters ab. Selbst die weitverbreiteten Galilei-invarianten Verfahren liefern bei rotierenden Beobachtern unterschiedliche Ergebnisse, was die Frage aufwirft: In welchem Koordinatensystem erhält man die ‐korrekten‐ Wirbel? Ausgehend von einer formalen Definition von Rotationsinvarianz, wird ein genereller Ansatz konzipiert, der es erlaubt jedes Galilei-invariante Wirbelkonzept in ein rotations-invariantes zu überführen. Da eine Rotation einer Translation in Polarkoordinaten entspricht, sind alle Galilei-invarianten Verfahren in Polarkoordinaten automatisch rotations-invariant. Dies schließt sowohl die Berechnung von Wirbelkernlinien ein, als

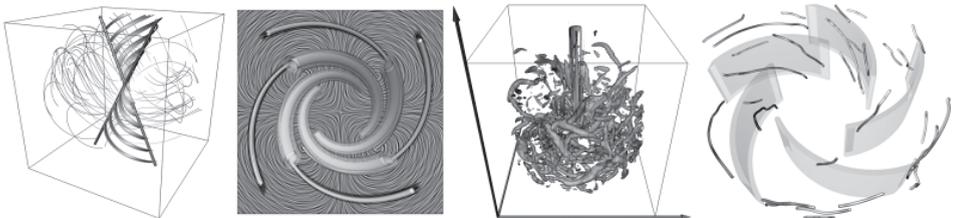


Abb. 5: Rotations-invariante Wirbelkerne in analytischen Vektorfeldern (links und mitte links), regionen-basierte Wirbelmaße in einem rotierenden Mixer (mitte rechts) und Wirbelkernlinien in einer Zentrifugalpumpe (rechts).

auch die weitverbreiteten regionen-basierten Techniken. Abb. 5 zeigt Beispiele in analytischen und numerischen Strömungen.

### 3 Masse-abhängige Partikel in Strömungen

Im Folgenden werden massebehaftete Partikel als ein neues Anwendungsfeld in der Strömungsvisualisierung eingeführt, was neue Herausforderungen und Anwendungen eröffnet. Bisherige Forschung im Bereich der Strömungsvisualisierung beschränkte sich auf die Analyse masseloser Partikel. In vielen Anwendungsgebieten spielt die Masse von Partikeln, und die daraus resultierende Trägheit, allerdings eine essentielle Rolle in der Strömungsmechanik, beispielsweise wenn Sandpartikel mit Luftfahrzeugen interagieren. Die zugrundeliegende gewöhnliche Differentialgleichung von selbst einfachen Partikelbewegungsmodellen ist bis zu sieben-dimensional, da der Partikelzustand durch Position (3D), Geschwindigkeit (3D) und Zeit (1D) charakterisiert ist.

#### 3.1 Masse-bedingte Separation von Partikeln

Die Dynamik masse-abhängiger Partikel ist abhängig von der Größe und Dichte der Partikel und ist bestimmt von Trägheit und Gravitation. Die Flugbahnen dieser Partikel werden durch gewöhnliche Differentialgleichungen zweiter Ordnung beschrieben, die als hoch-dimensionale Vektorfelder aufgefasst werden können. Nach der Erweiterung von geometrie-basierten Verfahren auf den masse-abhängigen Fall [Gü13], konzentriert sich die Arbeit auf das Separationsverhalten von masse-abhängigen Partikeln [GT15]. Man stelle sich hierfür zwei Partikel mit unterschiedlicher Masse vor, die vom gleichen Punkt starten, aber durch ihre Trägheit von der Strömung an unterschiedliche Orte transportiert werden. Um den Einfluss der Masse auf das Separationsverhalten zu analysieren wird das "Finite-Time Mass Separation"-Feld eingeführt, das an die oben genannten Finite-Time Lyapunov Exponenten angelehnt ist, d.h., es misst die Stärke der Separation. Durch progressives Abtasten des Massespektrums wird die Masse bestimmt, um die die stärkste

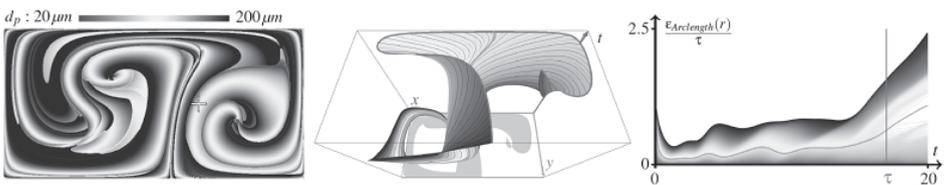


Abb. 6: Die Flugbahn von masse-abhängigen Partikeln hängt stark von deren Größe ab. Eine kleine Variation der Größe führt zu teils starken Veränderungen. Die Partikelgröße, um die die stärkste Veränderung auftritt (links) variiert dabei auch räumlich. Mit Hilfe von Raumzeit-Visualisierungen (mitte) lässt sich für einen gegebenen Startpunkt die Menge aller Orte zeigen, die Partikel unterschiedlicher Größe erreichen können. In Raumzeit entsteht dabei eine Fläche. Die relative Verteilung von Partikeln unterschiedlicher Größe entlang der Frontlinie (rosa) lässt sich dabei auch über die Zeit darstellen (rechts), was quantitative Aussagen erlaubt.

Separation auftritt, was einen Einstiegspunkt für weitere Analysen bietet. Zugehörig dazu werden zwei weitere Ansichten angeboten, welche die Bewegungsbahnen des gesamten Massespektrums in Raumzeit zeigen, sowie die Verteilung der Massen auf der Partikel-front. Abbildung 6 gibt ein Beispiel für eine einfache analytische Strömung.

### 3.2 Statische 2D Vektorfeld-Topologie von Masse-abhängigen Partikeln

Die Vektorfeld-Topologie ist ein etabliertes und mächtiges Werkzeug zur Analyse des asymptotischen Verhaltens von Partikeln. Bestandteile der Topologie sind zum einen diejenigen Strukturen, an denen sich Partikel nach endlos langer Zeit sammeln werden, zum anderen aber auch die Strukturen, die dieses Verhalten bestimmen. Da dies in der Regel wenige Strukturen sind, erlaubt die Vektorfeld-Topologie einen vereinfachten und kompakten Blick auf das Verhalten von Partikeln. Traditionsgemäß beschäftigt sich die Vektorfeld-Topologie in der Visualisierung lediglich mit der Bewegung masseloser Partikel. Die traditionelle statische 2D Vektorfeld-Topologie lässt sich auf den masse-abhängigen Fall erweitern [GT16a]. Um dies zu erreichen, wird ausgenutzt, dass masse-abhängige Partikelbewegung in einem hoch-dimensionalen Vektorfeld beschrieben werden kann. Obwohl die topologische Analyse auf dem hoch-dimensionalen Feld ausgeführt wird, stellt sich heraus, dass die Extraktion und Klassifizierung der topologischen Strukturen effizient im niedrig-dimensionalen Raum der zugrundeliegenden Strömung berechnet werden kann. Aus dieser theoretischen Analyse leiten sich interessante Beobachtungen ab, bspw. dass immer und überall anziehendes Verhalten auf die Partikel wirkt. Abbildung 7 gibt einige Beispiele in synthetischen Strömungen.

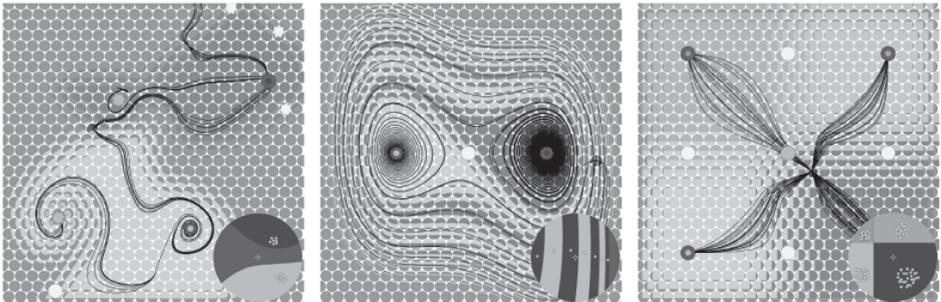


Abb. 7: Visualisierung des asymptotischen Verhaltens von masse-abhängigen Partikeln in drei synthetischen Strömungen: Magnetfeld (links), Oszillator (mitte) und ein analytisches Feld (rechts).

### 3.3 Herkunftsbestimmungen von Masse-abhängigen Partikeln

In masse-abhängigen Strömungen stellt die Rückwärtsintegration von Partikeln eine enorme Herausforderung dar [GT16b]. Eine stabile numerische Rückwärtsintegration ist in der Praxis sehr wichtig, denn sie erlaubt das Aufspüren der Herkunft von Verschmutzungen in Strömungen. Die Schwierigkeit der Rückwärtsintegration leitet sich aus der Erkenntnis des vorherigen Kapitels ab: Die immer und überall wirkenden anziehenden Kräfte werden

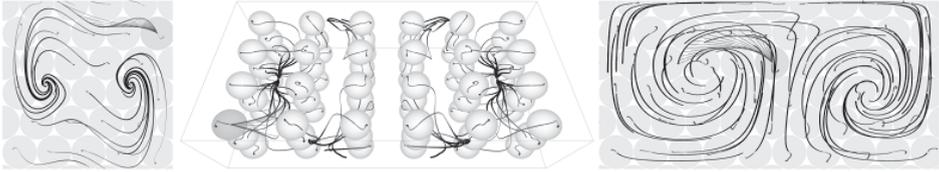


Abb. 8: Visualisierungen der möglichen Herkunftsorte (blau) von masse-abhängigen Partikeln für ausgewählte Beobachtungsorte (Zentren der grauen Kreise und Kugeln). Es stelle sich heraus, dass sich die möglichen Herkunftsorte auf Kurven beschränken. In der Arbeit wird gezeigt, wie diese Kurven als Integralkurven beschrieben und somit durch Standardmethoden extrahiert werden können.

bei der Rückwärtsintegration umgekehrt und drücken die Partikel im hoch-dimensionalen Raum auseinander. Die kleinste Änderung der Anfangskonfiguration wird dabei vervielfacht, was zu extrem ungenauen Lösungen führt. Anstatt die Anfangskonfiguration der Rückwärtsintegration vorzugeben wird die Problemstellung umformuliert. Es wird nach Partikeln gesucht, die zwar am Beobachtungsort der Verschmutzung ankommen, allerdings mit einer bestimmten Geschwindigkeit in der Strömung losgelassen wurden. Die Ankunfts geschwindigkeit am Beobachtungsort wird dabei nicht festgelegt. Die Menge an möglichen Herkunftsorten beschreibt eine Kurve, die als Integralkurve extrahiert werden kann. Für die kompakte Visualisierung wird in Abb. 8 eine Reihe von Beobachtungsorten regelmäßig im Raum platziert und mögliche Herkunftsorte und die Ankunfts geschwindigkeiten mit Hilfe von Kurven visualisiert. Das Verfahren löst die Rückwärtsintegration von masse-abhängigen Partikeln wesentlich genauer als bisherige Verfahren.

### 3.4 Wirbelkerne von Masse-abhängigen Partikeln

Wirbelstrukturen spielen in Strömungen häufig eine wichtige Rolle, da sie den Treibstoffverbrauch von Fahr- und Flugzeugen beeinflussen, die Treibstoffmischung in Verbrennungsprozessen bestimmen oder sogar Mikroorganismen über die Weltmeere transportieren. Die Verwirbelung von masse-abhängigen Partikeln wurde bislang noch nicht untersucht. Um die Wirbel in masse-abhängigen Strömungen zu extrahieren, werden zwei Methoden erweitert, die im masselosen Fall etablierte sind [GT14]. Während das Partikelverhalten im masselosen Fall nur von dem zugrundeliegenden Vektorfeld abhängt, haben masse-abhängige Partikel neben dem Ort auch eine eigene Geschwindigkeit. Der Zustand beider Variablen wird durch ein hoch-dimensionales Vektorfeld beschrieben und die direkte Extraktion von Wirbeln in diesem hoch-dimensionalen Raum geht mit einem großen Rechenaufwand einher, zumindest, wenn Standardverfahren direkt angewendet werden. Die Suche kann im niedrig-dimensionalen Raum ausgeführt werden, wenn zusätzliches Wissen mit einbezogen wird. Die Extraktion wird dadurch genauso aufwändig wie im masselosen Fall und kann sogar mit den gleichen Algorithmen durchgeführt werden. Das Verfahren lässt sich daher leicht in existierende Strömungsvisualisierungssoftware integrieren. Als alternative Strategie zum Auffinden von Wirbeln wird ein integrations-basierter Ansatz erweitert, der die Dichte von Partikeln über die Zeit beobachtet. Damit lassen sich Strukturen entdecken, die auf umgebende Partikel anziehend wirken. Tritt dabei eine Ro-

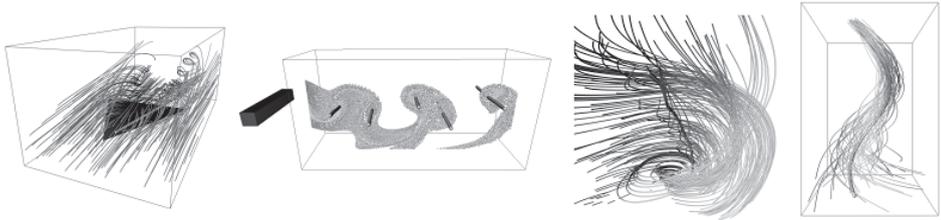


Abb. 9: Wirbelkerne in der Strömung um einen Delta-Wing (links), in einer Wirbelstraße (mitte l.), in einem Hurrikane (mitte r.) und einer analytischen Strömung (rechts).

tation auf, handelt es sich um anziehende Wirbel, sogenannte Attraktoren. Abbildung 9 zeigt die Wirbelkernlinien von masse-abhängigen Partikeln anhand einiger Beispiele.

## 4 Conclusion

Dieser Artikel fasste eine Reihe von Beiträgen in der geometrie-basierten, sowie der Merkmals- und Topologie-basierten Strömungsvisualisierung zusammen. Im ersten Teil wurde die Selektion von relevanten Linien in 3D Strömungen als Optimierungsproblem formuliert, um eine Balance zwischen der Präsentation relevanter Information und der Vermeidung von Verdeckungen zu finden. Das Verfahren wurde anschließend auf zeitabhängige Linien und statische Flächen erweitert. Bislang wählt das Verfahren Linien und Flächen von einer vorberechneten Menge an Kandidaten aus, wodurch keine neuen Details hinzukommen, wenn der Nutzer hinein zoomt. Die Skalierbarkeit ist noch verbesserbar und die Wahrnehmung der Tiefe von transparenten Strukturen könnte durch Hinzufügen von anderen visuellen Kodierungen verbessert werden.

Der zweite Teil widmete sich der Merkmalsextraktion in zeitabhängigen Strömungen. Zunächst wurde ein progressives Renderingverfahren vorgestellt, mit dem die hochfrequenten Strukturen des Finite-Time Lyapunov Exponenten frei von Diskretisierungsfehlern dargestellt werden können. In der Rendering-Literatur gibt es eine Reihe von Beschleunigungsstrategien, die in diesem Kontext ebenfalls anwendbar sind. Des Weiteren wird ein generisches Verfahren vorgestellt, mit dem Galilei-invariante Merkmalsextraktoren rotations-invariant gemacht werden können. Dies ermöglicht die Extraktion von Wirbeln, die sich auf Kreisbahnen um ein bekanntes Zentrum bewegen. Eine offene Frage ist, wie dieses Zentrum automatisch gefunden werden kann.

Der dritte Teil befasste sich mit der Bewegung von kleinen Objekten in Strömungen, wie etwa Sandpartikeln in der Luft. Im Rahmen der Arbeit wurden einige Standard-Visualisierungstechniken auf den masse-abhängigen Fall erweitert, einschließlich der Integralgeometrien, der Wirbelextraktion, dem Separationsverhalten, der statischen Vektorfeld-Topologie im 2D, sowie ein Verfahren für die stabile Rückwärtsintegration wurde vorgeschlagen. Es gibt noch viele weitere Konzepte, einschließlich der texturbasierten Visualisierung, die auf den masse-abhängigen Fall erweitert werden können.

## Literaturverzeichnis

- [GKT16] Günther, Tobias; Kuhn, Alexander; Theisel, Holger: MCFTLE: Monte Carlo Rendering of Finite-Time Lyapunov Exponent Fields. *Computer Graphics Forum (Proc. EuroVis)*, 35(3):381–390, 2016.
- [GRT13] Günther, Tobias; Rössl, Christian; Theisel, Holger: Opacity Optimization for 3D Line Fields. *ACM Transaction on Graphics (Proc. SIGGRAPH)*, 32(4):120:1–120:8, 2013.
- [GRT14] Günther, Tobias; Rössl, Christian; Theisel, Holger: Hierarchical Opacity Optimization for Sets of 3D Line Fields. *Computer Graphics Forum (Proc. Eurographics)*, 33(2):507–516, 2014.
- [GST16] Günther, Tobias; Schulze, Maik; Theisel, Holger: Rotation Invariant Vortices for Flow Visualization. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics (Proc. IEEE SciVis 2015)*, 22(1):817–826, 2016.
- [GT14] Günther, Tobias; Theisel, Holger: Vortex Cores of Inertial Particles. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics (Proc. IEEE SciVis)*, 20(12):2535–2544, 2014.
- [GT15] Günther, Tobias; Theisel, Holger: Finite-Time Mass Separation for Comparative Visualizations of Inertial Particles. *Computer Graphics Forum (Proc. EuroVis)*, 34(3):471–480, 2015.
- [GT16a] Günther, Tobias; Theisel, Holger: Inertial Steady 2D Vector Field Topology. *Computer Graphics Forum (Proc. Eurographics)*, 35(2):455–466, 2016.
- [GT16b] Günther, Tobias; Theisel, Holger: Source Inversion by Forward Integration in Inertial Flows. *Computer Graphics Forum (Proc. EuroVis)*, 35(3):371–380, 2016.
- [Gü13] Günther, Tobias; Kuhn, Alexander; Kutz, Benjamin; Theisel, Holger: Mass-Dependent Integral Curves in Unsteady Vector Fields. *Computer Graphics Forum (Proc. EuroVis)*, 32(3):211–220, 2013.
- [Gü14] Günther, Tobias; Schulze, Maik; Martinez Esturo, Janick; Rössl, Christian; Theisel, Holger: Opacity Optimization for Surfaces. *Computer Graphics Forum (Proc. EuroVis)*, 33(3):11–20, 2014.
- [Gü16] Günther, Tobias: Opacity Optimization and Inertial Particles in Flow Visualization. University of Magdeburg, June 2016.



**Tobias Günther** wurde am 26. Juni 1988 in Gardelegen geboren. Er studierte an der Otto-von-Guericke Universität in Magdeburg, von der er 2011 den B.Sc. in Computervisualistik und 2013 den M.Sc. in Informatik erhielt. Nach dem Studium ging er in die Forschung und erhielt 2016 den Dr.-Ing. von der Otto-von-Guericke Universität Magdeburg unter der Betreuung seines Doktorvaters Prof. Holger Theisel. Seit 2016 arbeitet er als Postdoc am Computer Graphics Laboratory an der ETH Zürich in der Arbeitsgruppe von Prof. Markus Gross. Er interessiert sich für die vielseitige Forschung in den Bereichen der wissenschaftlichen Visualisierung, dem progressiven Lichttransport und der Echtzeit-Computergraphik.