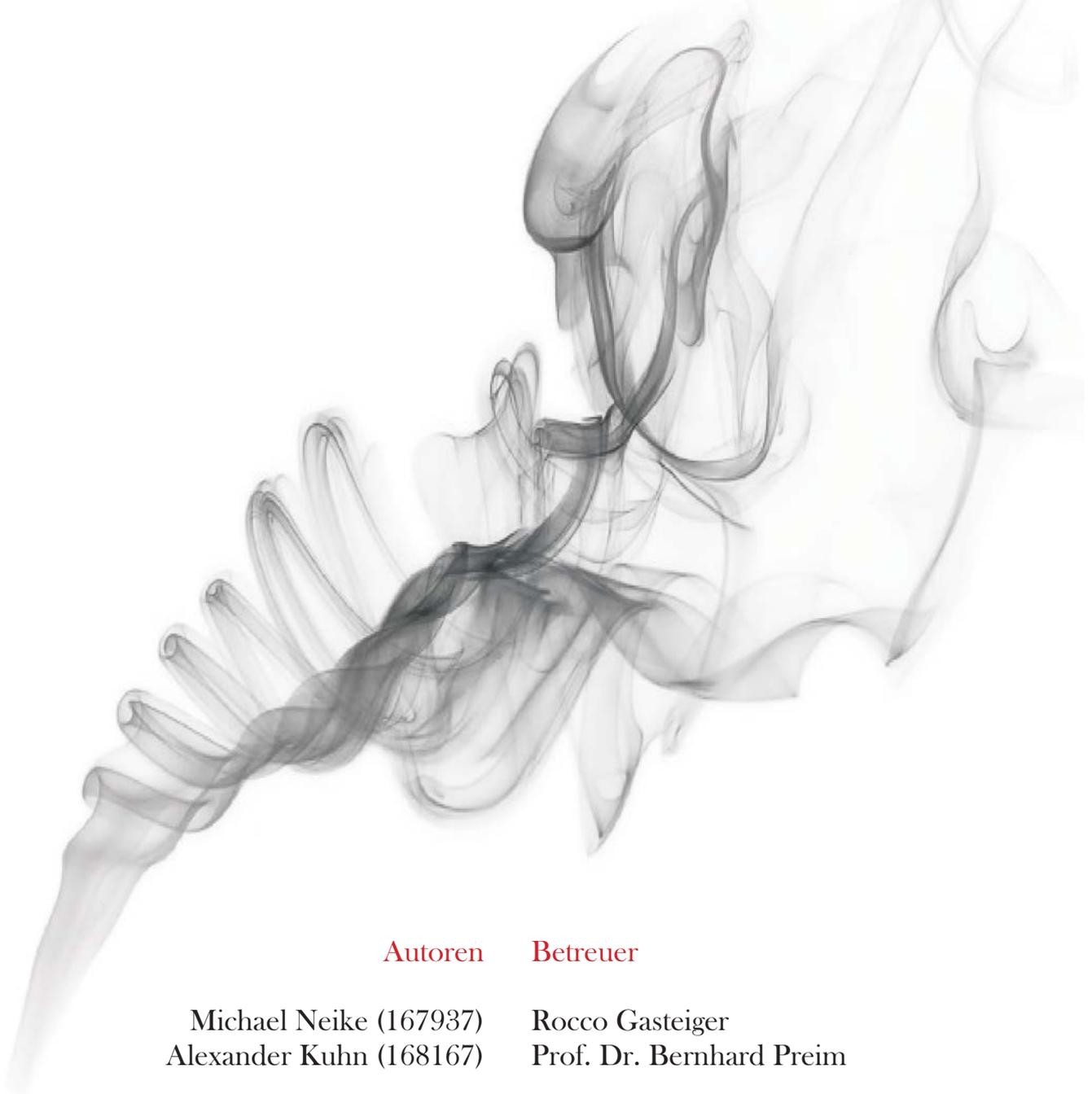




Seminar Illustrative Visualisierung
Ausarbeitung Strömungsvisualisierung



Autoren **Betreuer**

Michael Neike (167937)
Alexander Kuhn (168167)

Rocco Gasteiger
Prof. Dr. Bernhard Preim

INHALTSVERZEICHNIS

I STRÖMUNGSVISUALISIERUNG	2
1 MOTIVATION UND AUFBAU	3
2 EINFÜHRUNG IN DIE STRÖMUNGSVISUALISIERUNG	4
2.1 Strömungsvisualisierung im Allgemeinen	4
2.2 Definition	4
2.3 Sichtbarmachung von Strömungen	5
2.3.1 Kritische Bereiche in Strömungen	6
2.3.2 Praktische Verfahren zur Sichtbarmachung	7
3 STRÖMUNGSVISUALISIERUNG	10
3.1 Direkte Strömungsvisualisierung	10
3.2 Texturbasierte Strömungsvisualisierung	10
3.3 Geometrische Strömungsvisualisierung	12
3.4 Merkmalsbasierte Strömungsvisualisierung	13
3.5 Photographische Techniken	15
3.5.1 Shadowgraph	15
3.5.2 Schlieren-Photographie	15
4 ANWENDUNG	18
4.1 Anwendungsbeispiel: Motoren-Kühlsystem	18
4.1.1 Ausgangssituation	18
4.1.2 Angewandte Visualisierungstechniken	19
4.1.3 Schlußfolgerungen	23
4.2 Optimierung der Darstellung	23
4.2.1 Fokus und Kontext	23
4.2.2 Silhouetten und Begrenzungen	23
4.2.3 Da-Vinci-Zeichenstil	24
5 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	25
5.1 Zusammenfassung der Ausarbeitung	25
5.2 Ausblick	25
II QUELLENVERZEICHNIS	27
Literatur	28

Teil I

STRÖMUNGSVISUALISIERUNG

MOTIVATION UND AUFBAU

Die vorliegende Ausarbeitung beschäftigt sich mit der Thema der virtuellen Darstellung von Strömungen und wurde im Rahmen des Seminars „Illustrative Visualisierung“ an der Otto-von-Guericke Universität Magdeburg im Wintersemester 2007/2008 erstellt.

Ziel der Ausarbeitung ist die Vermittlung eines allgemeinen Überblicks über das Themengebiet der Strömungsvisualisierung, eine kurze Erläuterung der Ursprünge und Anwendungsbereiche der visuellen Strömungsanalyse, sowie die konkrete Beschreibung der Anwendung solcher Verfahren anhand eines Fallbeispiels und der Erläuterung konkreter Optimierungsmaßnahmen.

Am Ende der Ausarbeitung steht eine kurze Zusammenfassung der vorgestellten Inhalte, sowie ein Ausblick über die mögliche Weiterentwicklung der Verfahren.

EINFÜHRUNG IN DIE STRÖMUNGSVISUALISIERUNG

2.1 STRÖMUNGSVISUALISIERUNG IM ALLGEMEINEN

Die quantitative Darstellung und Analyse von physikalischen Strömungsvorgängen hat in den letzten Jahrzehnten erhebliche Fortschritte gemacht. Ob bei der Vorhersage des Wetters, der Entwicklung von Antriebstechniken oder beim Entwurf von Fluggeräten: Die verbesserte Erfassung von Daten und gezielte Analyse erlaubt eine zunehmende Verbesserung der technischen Entwicklungen in nahezu allen Gebieten in denen Strömungsvorgänge eine zentrale Rolle spielen. Zwei Beispiele ¹ für die direkte Sichtbarkeit von Strömungsvorgängen in der Praxis sind in Abbildung 2.1 dargestellt.

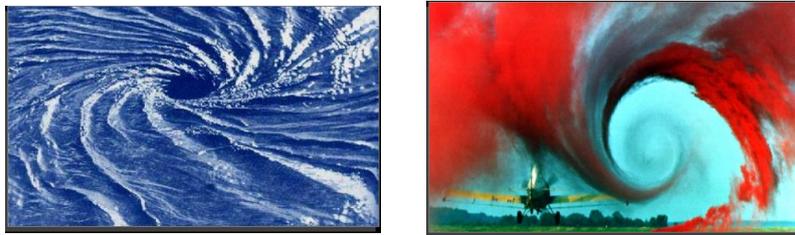


Abbildung 2.1: Beispiele zweier sichtbaren Strömungsvorgänge in der Praxis anhand des Strudels an einer Wasseroberfläche und der Wirbelschleppes eines landenden Flugzeuges

Die hohe Komplexität, Dynamik und Vielschichtigkeit solcher Prozesse erschwert dabei konkrete Vorhersage des Verhaltens, sowie die exakte Analyse. Allein die genaue Erfassung von Parametern und der Eigenschaften solcher Strömungsvorgänge in verschiedenen Medien stellt bereits hohe Ansprüche an die verwendete Messtechnik und entsprechende Auswertungsverfahren. Das Resultat sind zudem meist umfangreiche Mengen von Messdaten, aus denen dann allgemeine und vorhersagende Schlüsse gezogen werden sollen.

Der zunehmende Einsatz von computergestützten Verfahren sowie komplexer Simulationsmodelle erlaubt in vielen dieser Anwendungsgebiete eine genauere und umfassendere Untersuchung der gesammelten Informationen und bietet somit die Grundlage für die Verbesserung von Vorhersagen und konkrete Optimierungsmöglichkeiten für spezielle Anwendungsfälle wie in Kapitel 4.1 ausführlicher dargestellt.

2.2 DEFINITION

Grundlage für eine genauere Betrachtung ist dabei zunächst die allgemeine formale Erläuterung des Begriffes „Strömung“ bzw. „Strömungsvisualisierung“:

Der Begriff Strömung beschreibt die gerichtete Bewegung von Teilchen oder kontinuierlichen Medien im Raum. Je nach Auftreten von Wirbeln kann man

¹ <http://www.luftpiraten.de>, Google Bildersuche

dabei in laminare und turbulente Strömungen unterteilen, wobei in der praktischen Anwendung speziell der letztgenannten Kategorie entscheidende Bedeutung zukommt.

Weitere Möglichkeiten der Unterteilung sind:

- Nach dem umgebenden Medium (z.B. Gasströmungen, Flüssigkeitsströmungen)
- Anhand der räumliche Ausdehnung (ein-, zwei- oder dreidimensionale Strömung)
- Unter Betrachtung des Zeiteinflusses (stationäre- oder instationäre Strömung)

Das Wissenschaftsgebiet das sich mit der Analyse dieser verschiedenen Strömungsarten beschäftigt wird dabei als Strömungsmechanik bezeichnet.

Das Treffen von Aussagen im Rahmen dieser Untersuchungen umfasst dabei zum einen die quantitative Erfassung (Messung) der Strömungsparameter mit Hilfe verschiedener Messverfahren (z.B. Druck, Geschwindigkeiten und Richtung der Strömung an bestimmten Punkten im Raum), sowie die darauf aufbauende Analyse der erfassten Parameter. Die praktische Vorgehensweise bei der Erfassung von Strömungsdaten ist dabei in Kapitel 2.3.2 näher erläutert.

Diese Erfassung ermöglicht das Erkennen von strukturellen Zusammenhängen innerhalb der Strömung, z.B. zwischen Temperaturveränderungen und resultierenden Druckverhältnissen innerhalb des sich bewegenden Mediums oder der Zusammenhang zwischen Umgebungsparametern in Form einer umströmten Geometrie und dem daraus resultierenden Strömungsverhalten wie im Kapitel 4.1 am Beispiel dargestellt wird.

Das Erfassen der Strömungsdaten geschieht in der Praxis aufgrund des hohen Aufwands selten direkt in der konkreten Anwendung am Objekt, sondern erfolgt bereits vor der technischen Umsetzung an physikalischen Modellen, z.B. in Form von maßstabsgerechten Nachbauten der späteren Form oder mit Hilfe von virtuellen Simulationen der späteren Bedingungen anhand von bereits gesammelten Daten. Die Verwendung von computergestützten Simulationen gewinnt dabei zunehmend an Bedeutung, da sie eine beliebige Zahl von Wiederholungen ermöglicht, in Abhängigkeit von der Art der Simulation in wesentlich kürzerer Zeit durchführbar ist und keine zusätzlichen physikalische Ressourcen bei der Durchführung benötigt. Andererseits ist die Zuverlässigkeit der dadurch gewonnenen Daten stets stark von den getroffenen Annahmen und dem zugrunde liegenden Simulationsmodell abhängig und erlaubt nur in begrenztem Maße direkte Rückschlüsse auf das tatsächliche spätere Verhalten der Strömung.

Dennoch erleichtert und beschleunigt die Sichtbarmachung solcher Daten erheblich die quantitative Analyse der Informationen, sowie das Treffen von Entscheidungen in Bezug auf den Aufbau von verwendeten Geometrien. Zudem wird sie zur Identifikation kritischer Bereiche genutzt, die entscheidenden Einfluss auf die lokalen Eigenschaften von Strömungen haben können und im nächsten Abschnitt näher beschrieben werden.

2.3 SICHTBARMACHUNG VON STRÖMUNGEN

Zur Bestimmung kritischer Bereiche und der Sichtbarmachung der Strömungsvorgänge ist zunächst eine Entscheidung zu treffen welche Parameter der Strömung erfasst werden sollen und welche Messverfahren eingesetzt werden soll.

Die erfassbaren physikalischen Parameter einer Strömung lassen sich in einem Strömungsfeld innerhalb ihres räumlichen Kontextes bestimmen. Diese Parameter umfassen dabei unter anderem den Druck innerhalb des strömenden Mediums, die Geschwindigkeit oder die Temperatur an einem bestimmten Punkt im Raum. Aus diesen Daten können dann wiederum im weiteren Verlauf zusätzliche Eigenschaften wie resultierende Kräfte, der lokale Druck auf begrenzende Geometrien oder auftretende Reibungsenergien der Strömung ermittelt und für weitere Schritte genutzt werden.

Zudem spielen weitere thermodynamische und mechanische Randbedingungen für die Eigenschaften der Strömung eine wichtige Rolle. Diese umfassen beispielsweise sich in der Strömung bewegende Geometrien und daraus resultierende Druckunterschiede, sowie externe Temperatureinflüsse, die nicht auf strömungseigene Reibungsvorgänge zurückgehen.

2.3.1 Kritische Bereiche in Strömungen

Oftmals gibt es innerhalb der Strömung spezielle Bereiche, in denen die Parameter der Strömung lokale Extremwerte annehmen. Diese Bereiche spielen zudem für die Klassifikation und in der praktischen Anwendung eine entscheidende Rolle, da sie zum Beispiel Abschnitte der Strömung kennzeichnen, in denen lokal sehr hohe Temperaturen oder Drücke auftreten oder um die Durchmischungseigenschaften der strömenden Medien an bestimmten Stellen zu beschreiben.

Wie in [TWHSo3] dargestellt können sie zudem zur Ermittlung von topologischen Strukturen innerhalb verschiedener Strömungen genutzt werden. In Abbildung 2.2 sind einige dieser kritischen Bereiche für 2D Vektorfelder dargestellt.

Entsprechende kritische Bereiche können demnach in 3D Vektorfeldern, die aus den ermittelten Strömungsdaten abgeleitet sind, definiert werden. Deren vollständige Bestimmung bezüglich ihrer genauen Struktur und der räumlichen Ausdehnung wird durch die zusätzliche Dimension allerdings zunehmend komplexer und verlangt die Erweiterung um neue topologische Strukturen wie auch im Kapitel 4.1.2 aufgeführt und in [TWHSo3] beschrieben. Beispiele für solche Strukturen in einem dreidimensionalen Vektorfeld (bzw. vierdimensional, sofern die zeitliche Veränderung mit einbezogen wird) sind Wirbelkerne, in denen die Eigenrotation eines Partikels in der Strömung den Wert 0 annimmt oder Grenzschichten, in denen lokal die Geschwindigkeiten der angrenzenden Strömungsbereiche von teilweise stark voneinander abweichen. Die praktische Anwendung von Erkenntnissen die aus solchen Strukturen gewonnen werden können, ist zudem im Abschnitt 3.4 beschrieben.

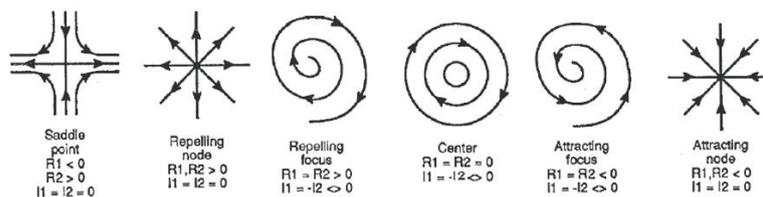


Abbildung 2.2: Topologische Strukturen in einem 2D Vektorfeld.

2.3.2 Praktische Verfahren zur Sichtbarmachung

Viele der aktuellen digitalen Darstellungstechniken für Strömungen haben ihren Ursprung in praktischen Verfahren die auch heute noch zum Einsatz kommen. Gemäß [NB06] umfassen diese Verfahren unter anderem:

- *Wollfäden (Tufts)*

Diese Technik dient zur Betrachtung von Luftströmungen und ist in Abbildung 2.3 dargestellt. Es werden dabei kleine Textilfäden direkt auf der Oberfläche des umströmten Körpers angebracht, die sich durch ihr geringes Gewicht bei ausreichender Strömungsgeschwindigkeit an dessen Verlauf ausrichten. Starke Vibrationen und unregelmäßige Bewegungen der Fäden weisen dabei auf Verwirbelungen innerhalb der Strömung hin. Dieses Verfahren wird in heutigen Anwendungen kaum noch eingesetzt, da die Fäden üblicherweise den Strömungsverlauf selbst beeinflussen, nur auf der Objektoberfläche Aufschluss über die Strömungseigenschaften geben können und dies auch nur in sehr ungenauem Maße.

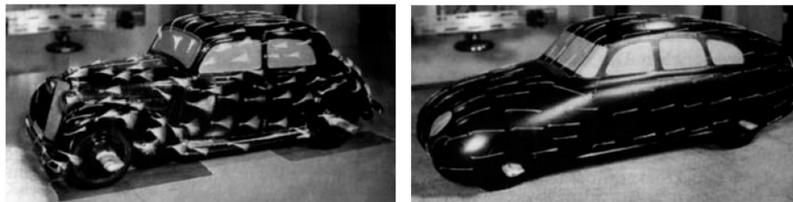


Abbildung 2.3: Die Sichtbarmachung von Luftströmungen durch Wollfäden.

- *Anstrichverfahren*

Bei diesem Ansatz zur Darstellung von Luftströmungen wird die zu betrachtende Oberfläche mit einer kontrastreichen Farbe und diese wiederum mit einem flüssigen Lösungsmittel bestrichen. Durch die Strömung trocknet das aufgebrachte Lösungsmittel und bildet verschiedene Muster auf der Objektoberfläche, die Rückschlüsse auf den Strömungsverlauf zulassen.

- *Partikelzugabe*

Die Zugabe von Partikeln dient sowohl der Sichtbarmachung von Luft- als auch Flüssigkeitsströmungen. Dabei wird eine Anzahl von Partikeln, die in etwa die gleiche Dichte wie das strömende Medium und ein geringes Eigengewicht aufweisen sollten, kontrolliert in der Strömung freigesetzt. Die Ortsänderungen der Teilchen über die Zeit erlaubt wiederum Rückschlüsse auf den Verlauf der Strömung. Zudem können die Partikel optisch erfasst und deren Bewegungsverlauf nachverfolgt werden und als Grundlage für weitere auswertende Verfahren wie Particle Image Velocimetry (PIV) genutzt werden. In der praktischen Anwendung werden für Luftströmungen üblicherweise gefärbte Rauchpartikel und für Flüssigkeitsströmungen ölartige Lösungen eingesetzt wie in Darstellung 2.4 abgebildet.

- *Laserschnittverfahren*

Dieses Verfahren dient der Sichtbarmachung von Strömungsquerschnitten an bestimmten Punkten der Strömung. Dazu wird üblicherweise gebündeltes Laserlicht genutzt um anhand von Lichtreflektionen der



Abbildung 2.4: Die Zugabe von Rauchpartikeln erlaubt Rückschlüsse auf den Strömungsverlauf.

Strömung zugesetzte Partikel schichtweise sichtbar zu machen. Es dient vor allem der lokalen Darstellung von Verwirbelungen an umströmten Geometrien, die durch die bisher genannten Verfahren nur bedingt erfasst werden können.

- *Elektrochemische Verfahren*

Bei diesen Darstellungsansätzen werden zusätzliche Substanzen mit Hilfe von elektrochemischen Prozessen gezielt in der Strömung freigesetzt und deren Bewegung über einen längeren Zeitraum verfolgt. Die Erzeugung verschiedener Ausgangsmuster und deren Störung im Strömungsverlauf führt auch hier zur direkten Sichtbarkeit von Strömungsvorgängen wie in Abbildung 2.5 dargestellt.

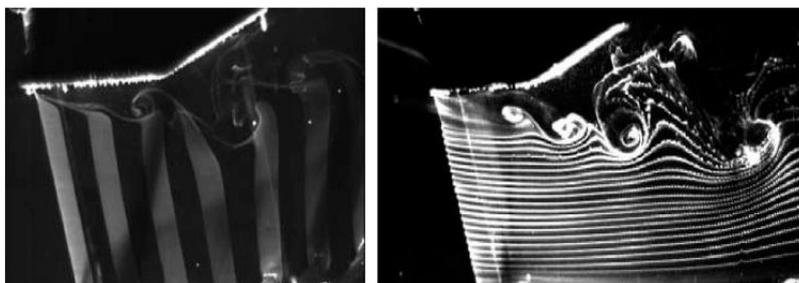


Abbildung 2.5: Die Anwendung der Wasserstoffblasentechnik als elektrochemisches Verfahren. Bild 1) zeigt den Verlauf von gepulsten Strömungsmustern und Bild 2) die Sichtbarkeit von Verwirbelungsvorgängen bei ungepulster Abgabe.

- *Optische Verfahren*

Die lokalen Druckunterschiede, wie sie bei turbulenten Strömungen häufig auftreten, beeinflussen zudem direkt die lokale Dichte in dem strömenden Medium. Da Licht, welches dieses Medium durchstrahlt, aufgrund dieser Druckunterschiede verschieden stark abgelenkt wird, lassen sich somit indirekt Strömungsvorgänge darstellen. Zwei dieser Verfahren sind im Kapitel 3.5 abgebildet und näher erläutert.

Viele Erkenntnisse aus diesen praktischen Verfahren fließen auch in die virtuelle Darstellung von Strömungsvorgängen mit ein. Zudem sind viele der im folgenden vorgestellten Techniken in ihrem visuellen Erscheinungsbild an den physikalischen Vorbildern orientiert.

STRÖMUNGSVISUALISIERUNG

Strömungen lassen sich auf unterschiedliche Weise virtuell sichtbar machen, wobei sich viele Verfahren an experimentelle Strömungsvisualisierungen anlehnen. Ähnlich wie ihre realen Vorbilder lassen sie sich in verschiedene Kategorien unterteilen.

3.1 DIREKTE STRÖMUNGSVISUALISIERUNG

Bei der direkten Strömungsvisualisierung werden die Strömungsdaten in ihrer Rohform visualisiert, also ohne vorher bearbeitet zu werden. Dabei werden die Strömungsparameter durch Farben, Pfeile oder Glyphen erkennbar gemacht. Abbildung 3.1 zeigt die Kodierung der Strömungsgeschwindigkeit durch die Farbe (Blau = hohe Geschwindigkeit, Rot = niedrige Geschwindigkeit). Die Kodierung durch Farben hat den Vorteil, dass sie sehr schnell zu berechnen ist. Jedoch geht hierbei die Information über die Richtung verloren, da nur skalare Daten abgebildet werden.

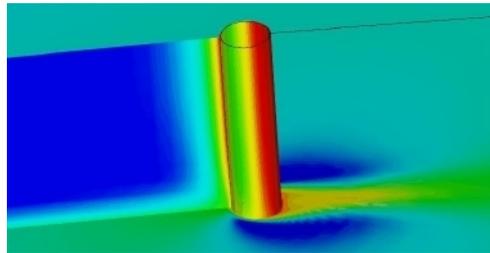


Abbildung 3.1: Farbkodierung der Strömungsgeschwindigkeit [Pre07]

In Abbildung 3.2 ist die Richtung der Strömung durch Pfeile repräsentiert, womit die Beschränkung der Farbkodierung umgangen wird. Die Strömungsgeschwindigkeit ist gleichzeitig an der Länge der Pfeile zu erkennen. Bei der Verwendung von Pfeilen ist darauf zu achten, dass die Darstellung bei ungeeigneter Wahl der Anzahl und Positionen der Pfeile sehr unübersichtlich werden kann.

3.2 TEXTURBASIERTE STRÖMUNGSVISUALISIERUNG

Texturbasierte Visualisierungstechniken wenden die gerichtete Strukturen von Fluss-Feldern auf Zufallstexturen, wie sie bspw. bei statistischem Rauschen vorzufinden ist, an. Dies sorgt für eine Verzerrung der Textur entlang der Strömungsrichtung. Diese Technik lässt sich auch auf Volumentexturen anwenden, jedoch wird in diesem Fall die Darstellung häufig zu komplex, so dass die wesentlichen Informationen nicht mehr effizient wahrgenommen werden können. Zudem steigt der Rechenaufwand stark an. Daher werden texturba-

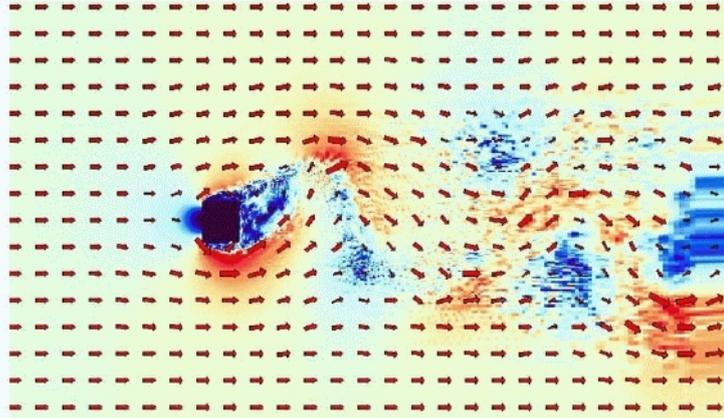


Abbildung 3.2: Arrowplot einer Strömung [Pre07]

sierte Ansätze hauptsächlich auf Objektflächen angewandt. Abbildung 3.3 (rechts) zeigt die Verzerrung einer Zufallstextur entlang der Strömungsrichtung auf der Oberfläche. Links ist das selbe Objekt ohne Textur zu sehen. In beiden Fällen wurde zusätzlich die Strömungsgeschwindigkeit farbkodiert.



Abbildung 3.3: Kodierung von Strömungsdaten in Texturen

Im Allgemeinen haben texturbasierte Ansätze gegenüber Pfeildarstellungen den Vorteil, dass sie die gesamte Oberfläche einbeziehen und so zu einem kontinuierlichen Bild führen, wohingegen Pfeile nur an bestimmten Punkten der Oberfläche zu finden sind.

Im Folgenden werden zwei Verfahren zur Verzerrung einer Textur entlang einer Strömung vorgestellt.

LINE INTEGRAL CONVOLUTION Bei der Line Integral Convolution (LIC) wird eine Zufallstextur entlang der Stromlinien des Vektorfelds verschmiert. Dabei wird für jedes Pixel P_0 der Textur eine Stromlinie betrachtet, die durch dieses Pixel P_0 verläuft. Von P_0 ausgehend werden alle Pixel innerhalb eines Abstands l entlang der Stromlinie gemittelt. Das Prinzip dieses Algorithmus wird in Abbildung 3.4 deutlich: Die oberste Ebene zeigt den Richtungsvektor in dem Pixel, für das der LIC-Algorithmus durchgeführt wird. In der zweiten Ebene ist der Abschnitt der Stromlinie zu erkennen, der für die Berechnung herangezogen wird. Die Pixel, durch die das Stromliniensegment verläuft und

deren Werte damit berücksichtigt werden müssen sind in der dritten Ebene zu sehen. In der untersten Ebene wird der Ergebniswert in das Ausgangspixel geschrieben. Das Ergebnis einer LIC für eine zirkuläre Strömung ist in Abbildung 3.5 zu sehen.

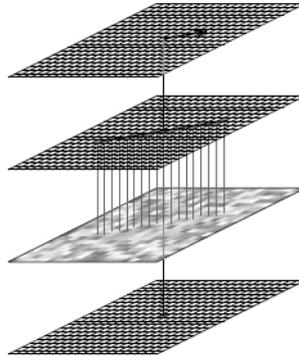


Abbildung 3.4: Schematische Darstellung des LIC-Algorithmus [Pre07]

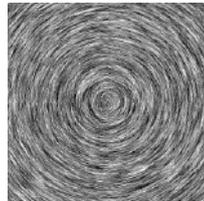


Abbildung 3.5: Zirkuläre Strömung mit LIC [Pre07]

Die Vorzüge dieses Verfahrens sind eine hohe Partikeldichte und eine intuitive Verständlichkeit. Die Nachteile liegen neben dem hohen Rechenaufwand darin, dass Geschwindigkeitsbeträge nicht erkennbar sind. Diese lassen sich jedoch durch eine Überlagerung mit Farbkodierungen zusätzlich einfügen.

TEXTURE ADVECTION Die Texture Advection (engl. „Textur-Heranführung“) bedient sich eines bildbasierten Ansatzes. Bei diesem Verfahren wird eine vorgegebene Textur schrittweise entlang den Strömungslinien verzerrt. In der Implementierung wird dabei die Textur in Polygone zerlegt, deren Vertices iterativ über mehrere Zeitschritte dem Vektorfeld folgen, wie in Abbildung 3.6 beispielhaft ersichtlich wird.

3.3 GEOMETRISCHE STRÖMUNGSVISUALISIERUNG

Bei der geometrischen Strömungsvisualisierung werden aus den Strömungsdaten geometrische Objekte generiert und für die Veranschaulichung verwendet, wobei diese Objekte einen direkten Bezug zu den Daten haben. Beispiele für solche Objekte bilden die Streamtubes und die Streamribbons. In Abbildung 3.7 sind beide Formen gegenübergestellt. Es ist erkennbar, dass sich der Streamtube entlang der rechten Kante des Streamribbons erstreckt.

Streamtubes entstehen durch Verschieben einer einfachen Form, bspw. ein Dreieck oder ein Kreis, entlang einer Stromlinie. Streamribbons werden durch Verbindung zweier benachbarter Stromlinien zu einer Fläche gebildet. Dies

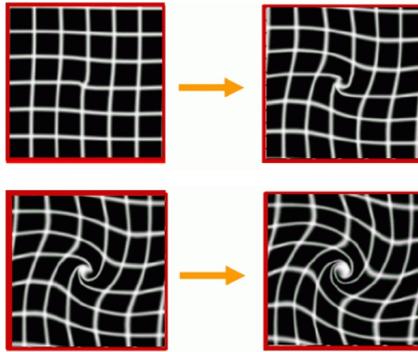


Abbildung 3.6: Bildliche Darstellung der Texture Advection

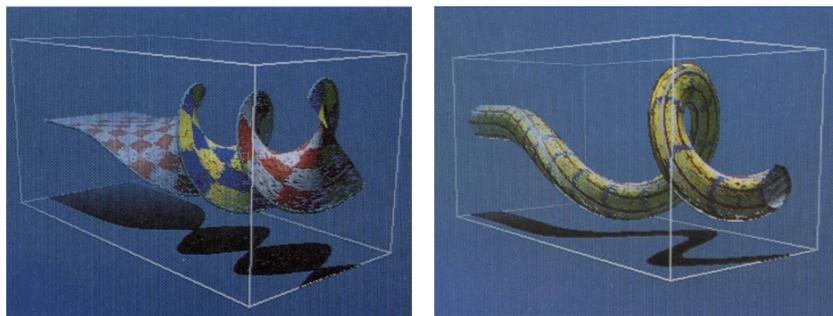


Abbildung 3.7: Streamribbons (links) und Streamtubes (rechts) [Pre07]

liefert den Vorteil, dass die Verdrehung dieser beiden Stromlinien zueinander erkennbar wird.

Beide Formen, Streamtubes und Streamribbons, erlauben die 3-dimensionale, ansichtsunabhängige Visualisierung von Strömungen.

3.4 MERKMALSBASIERTE STRÖMUNGSVISUALISIERUNG

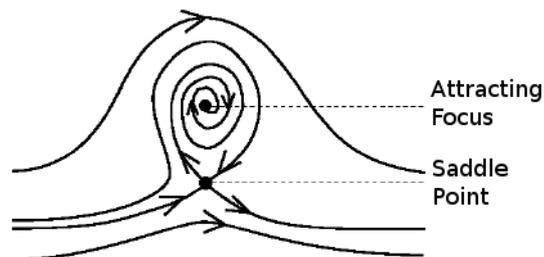


Abbildung 3.8: Topologie eines Strudels [Pre07]

Die topologischen Strukturen eines Vektorfeldes erkennbar zu machen ist der Kern der merkmalsbasierten Visualisierung. Damit kann das Abbild eines Strömungsfeldes auf wichtige Elemente wie Quelle und Senken, Wirbel und Sattelpunkte reduziert oder an diesen Stellen hervorgehoben werden. Für diese Technik ist es von grundlegender Wichtigkeit, diese Merkmale zu erkennen.

Hierzu wird die Vektortopologie untersucht, die es möglich macht, die Nähe eines Anziehungspunktes (Attracting Focus) zu einem Sattelpunkt als Wirbel zu erkennen, wie in Abbildung 3.8 dargestellt ist.

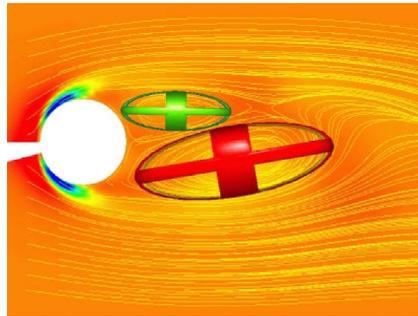


Abbildung 3.9: Strudel hinter einem Zylinder [PVH⁺03]

Neuere Entwicklungen erlauben darüber hinaus die Ermittlung und Visualisierung der Ausmaße eines Wirbels, wie in Abbildung 3.9 erkennbar ist. Der Wirbel wird durch ein Ellipsoid umschlossen, der die gleichen Abmessungen hat. Die Drehrichtung des Wirbels ist an der Farbe, Rot oder Grün, erkennbar. Sind 3-dimensionale Abbildungen gefordert, so eignet sich die Generierung von Skeletten, welche mit den Wirbelkernen korrespondieren. Die Visualisierung durch Ellipsoide und mittels Skeletten ist in Abbildung 3.10 gegenübergestellt. Der selbe Wirbelkern wird einmal durch ein Ellipsoid und einmal durch ein Skelett repräsentiert.

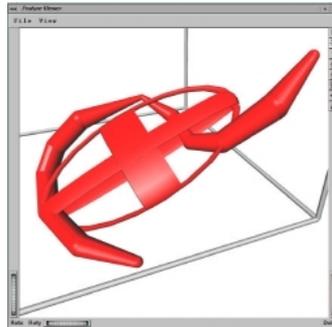


Abbildung 3.10: Darstellung von Strudelkernen [PVH⁺03]

3.5 PHOTOGRAPHISCHE TECHNIKEN

Die folgenden Techniken sind stark an reale, photographische Techniken angelehnt und sind — zumindest für Fachleute — schnell und intuitiv zu verstehen. Sie basieren auf dem Ansatz, dass Licht, welches durch das zu untersuchende, lichtdurchlässige Medium geschickt wird, auf eine bestimmte, von der Dichte abhängige Weise abgelenkt wird, da eine Dichteänderung einen von 1 verschiedenen Brechungsindex zur Folge hat. Dies macht sich durch hellere und dunklere Stellen auf einem Schirm wahrnehmbar.

3.5.1 Shadowgraph

Die einfachere der beiden Techniken, der Schattengraph, ist zugleich die ältere. Der Aufbau der Schattengraph-Apparatur ist schematisch in Abbildung 3.11 zu sehen: Das Licht einer Punktlichtquelle wird mittels einer Linse so abgelenkt, dass es parallel auf das zu untersuchende Medium trifft. In diesem wird es auf seinem Weg durch die Änderung der Dichte des Mediums abgelenkt. Auf diese Weise repräsentiert das resultierende Bild auf dem Schirm die 2. Ableitung des Dichtegradienten.

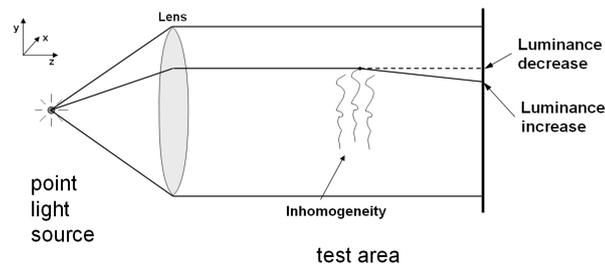


Abbildung 3.11: Schema der Shadowgraph-Apparatur [SJEG05]

Das Beispiel eines durch eine reale Versuchsanordnung erzeugten Schattengraphen ist in Abbildung 3.12 zu erkennen, welches ein feuerndes AK-47-Gewehr zeigt. Die Stoßwelle, die sich von der Mündung des Gewehrs kreisförmig ausbreitet, ist tatsächlich eine Front verdichteter Luft. Der Rand dieser Front ist durch einen dunklen Kreis erkennbar, an dem innen ein heller Kreis angrenzt. Durch die größere Dichte der Front wird das Licht nach (vom Bild gesehen) innen abgelenkt und erklärt damit sowohl den äußeren dunklen Kreis, wie auch den inneren hellen.

In der Gegenüberstellung in Abbildung 3.16a ist ein synthetischer Schattengraph für die Strömungsdaten eines Düsenstrahls zu sehen.

3.5.2 Schlieren-Photographie

Die Schlierenphotographie ist dem Schattengraphen ähnlich, jedoch ist der Aufbau der Apparatur etwas abgewandelt, was es erlaubt, die 1. Ableitung des Dichtegradienten zu registrieren, anstelle der 2. Ableitung beim Schattengraphen. Der Apparatur wird hinter dem beobachteten Medium eine Linse hinzugefügt, um das Licht eine Blende (knife edge) passieren zu lassen, wie aus Abbildung 3.13 ersichtlich ist. Diese Blende sorgt dafür, dass auf dem Schirm die Ablenkung des Lichtes in einer bestimmten, durch die Ausrichtung der Blende definierte Richtung sichtbar wird.

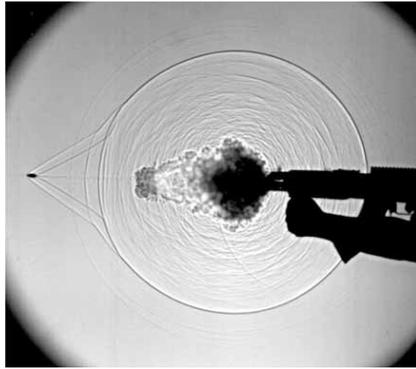


Abbildung 3.12: Schattengraph eines feuerenden AK-47-Gewehrs [Wiko8]

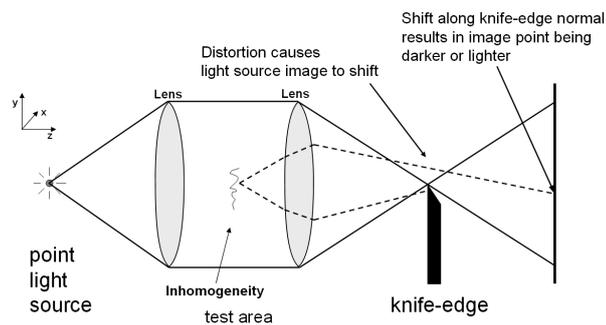


Abbildung 3.13: Schema der Schlieren-Apparatur [SJEGo5]

Abbildung 3.14 zeigt eine reale Schlierenphotographie von aufsteigender warmer bzw. absinkender kalter Luft aus einem Weinkelch. Bei diesen Aufnahmen war die Blende vertikal ausgerichtet, womit die Ablenkung des Lichts in horizontaler Richtung registriert wurde.

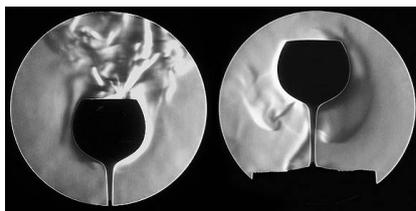


Abbildung 3.14: Schlieren-Photographie aufsteigender warmer Luft (links) bzw. herabsinkender kalter Luft (rechts) [Dav]

In Abbildung 3.15 sind das Standard Volumenrendering und das Schlierenrendering mit dem Wolkendatensatz gegenübergestellt. Hier wurde die Blende horizontal ausgerichtet, um die vertikale Ablenkung des Lichts aufnehmen zu können.

Abbildung 3.16 stellt den Schattengraphen und das Schlierenrendering anhand des Düsenstrahls gegenüber. Dabei sind die Unterschiede in der Darstellung von Dichteänderungen zu erkennen. In Abbildungen 3.17c und 3.17b wurde zusätzlich der Betrag der Verschiebung des Lichts dargestellt.

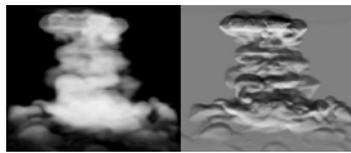
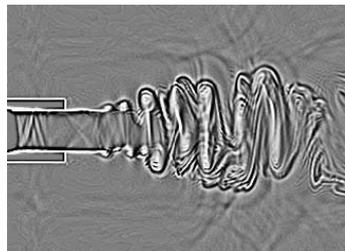
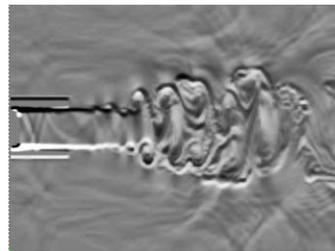


Abbildung 3.15: Gegenüberstellung des Volumenrenderings (links) und des Schlierenrenderings (rechts) [SJEG05]



(a) Schattengraph

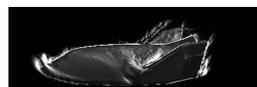


(b) Schlierenphotographie

Abbildung 3.16: Düsenstrahl mit photographischen Techniken [SJEG05]



(a) Schattengraph



(b) Absolutbetrag beim Schattengraph



(c) Absolutbetrag bei der Schlierenphotographie

Abbildung 3.17: Luftströmung um das X-38-Shuttle mit photographischen Techniken [SJEG05]

4

ANWENDUNG

4.1 ANWENDUNGSBEISPIEL: MOTOREN-KÜHLSYSTEM

Die Betrachtungen in diesem Kapitel beschäftigen sich mit der Anwendung von virtuellen Visualisierungstechniken anhand einer praktischen Aufgabenstellung, wie sie in [LGD⁺05] vorgestellt wird. Dabei geht es vor allem um den Vergleich verschiedener Visualisierungstechniken und deren Anwendbarkeit in Bezug auf spezifische Problemstellungen.

4.1.1 Ausgangssituation

Die praktische Aufgabenstellung der Strömungsanalyse besteht in diesem Fall in der Optimierung der Geometrie eines Kühlgehäuses. Dieses Gehäuse umschließt einen Motorblock und wird dabei von einer Kühlflüssigkeit durchströmt. Die Eigenschaften der Strömungsvorgänge in dem Gehäuse beeinflussen dabei in starkem Maße zum einen die Kühlwirkung und damit indirekt die Laufleistung des Motors und zum anderen auch die Lebensdauer des gesamten Systems.

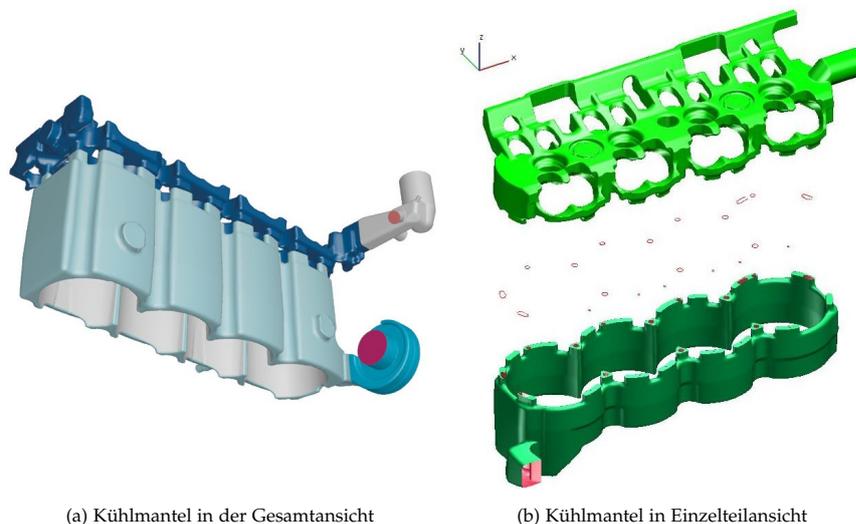


Abbildung 4.1: Darstellung der Geometrie des Kühlmantels um den Motorblock als Gesamtdarstellung und in der Einzelteilansicht nach [LGD⁺05].

Das Kühlgehäuse besteht dabei, wie in Abbildung 4.1 dargestellt, aus drei Teilen: dem Zylinderblock (Abbildung 4.1b unten), an dem die Zuflußpumpe

für die Kühlflüssigkeit angeschlossen ist, dem Zylinderkopf (Abbildung 4.1b oben), der an der gegenüberliegenden Seite eine Abflussöffnung aufweist und den Dichtungsringen (Abbildung 4.1b mittig) als Verbindungsgeometrie zwischen diesen beiden Elementen.

Die Anordnung von Kühlmittelzu- und abfluss garantiert dabei, dass die Kühlflüssigkeit das gesamte System durchströmt, die Geometrie der einzelnen Teile, insbesondere der Dichtungsringe entscheidet aber über den Verlauf und die Eigenschaften dieser Strömung und soll möglichst optimal gestaltet werden. Ziel ist dabei eine möglichst gleichförmiger Strömungsverlauf, der sowohl eine nahezu gleichmäßige Strömungsgeschwindigkeit, als auch eine stetige Zirkulation der Kühlflüssigkeit und ein möglichst konstante Druckverteilung innerhalb der Zylindergeometrie aufweist.

Die Strömungsdaten und die Geometrie des Zylindergehäuses wurden dazu digital erfasst und bilden die Grundlage für die visuelle und quantitative Exploration der Daten.

4.1.2 Angewandte Visualisierungstechniken

Zur visuellen Analyse als Grundlage einer weiterführenden Optimierung der Gehäusegeometrie wurden verschiedene Techniken angewandt und auf ihre Eigenschaften und Anwendbarkeit hin untersucht.

Die angewendeten Techniken waren dabei:

- *Direkte Visualisierung*

Als erstes Verfahren wurde eine direkte Darstellung der Strömungsparameter gewählt. Dabei werden die ausgewählten Informationen, wie zum Beispiel die Temperatur direkt auf eine Farbe in Form einer Oberflächen-textur abgebildet und anschließend dargestellt wie in Abbildung 4.2 zu sehen ist und wird näher in Kapitel 3.1 beschrieben.

Der größte Vorteil dieser Methode besteht dabei vor allem in der einfachen Berechnung der Farbwerte durch die direkte Auswertung der Strömungsdaten. Andererseits werden interne Strömungsvorgänge und Bereiche lokaler Extrema (z.B. Abschnitte mit sehr hohen Temperaturen) nur unzureichend abgebildet und können daher leicht übersehen werden.

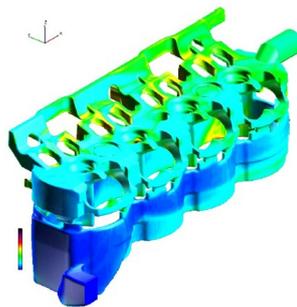


Abbildung 4.2: Die direkte Abbildung der Temperatur auf Farbwerte auf der Strömungsoberfläche.

- *Texturbasierte Darstellung*

Weiterhin wurden zur Darstellung, wie in Abbildung dargestellt, interaktive texturbasierte Verfahren eingesetzt. Zum einen die Line Integral Convolution (LIC, beschrieben in Abschnitt 3.2) und zum Anderen eine

Farbinjektionsmethode, bei der interaktiv Ausgangspunkte für eine lokale Einfärbung des Strömungsverlaufs angegeben und nachverfolgt werden können.

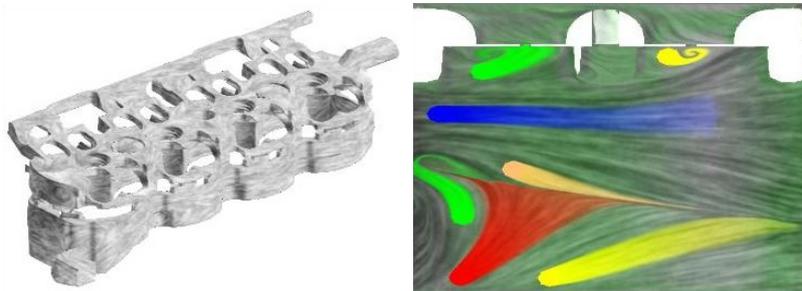


Abbildung 4.3: Anwendung von texturbasierten Verfahren auf den Datensatz. Zum einen das Line Integral Convolution Verfahren und zum anderen eine Farbinjektionsmethode

Bei beiden Verfahren werden Strömungsstrukturen auf der Grenzschicht zwischen Gehäusegeometrie und Kühlflüssigkeit schnell erkennbar und die interaktive Auswahl vereinfacht die Steuerung der Visualisierung. Nachteilig wirkt sich dabei die teilweise nur unvollständig erfassbaren räumlichen Zusammenhänge zwischen Strömung und Geometrie, sowie die Unvollständigkeit der Darstellung von Strömungsbesonderheiten aus.

- *Partikeldarstellung*

Die stark an den praktischen Verfahren (Abschnitt 2.3.2) angelehnte Methode der Partikeldarstellung, hat sich auch bei der virtuellen Darstellung als sinnvoll herausgestellt und ist in Grafik 4.4 abgebildet. Dabei werden Partikel repräsentiert durch einfache Geometrien nahe der Zuflußpumpe platziert und folgen dann dem Strömungsverlauf. Die zeitliche Änderung der Position der einzelnen Partikel in Form einer Animation gibt einen guten Einblick in den Verlauf der Strömung und erlaubt zudem die schnelle Erfassung von kritischen Punkten in denen z.B. die Partikel zu stark beschleunigt werden oder an bestimmten Stellen der Geometrie hängen bleiben.

Vorteilhaft ist hierbei die gute Erfassbarkeit der räumlichen Zusammenhänge und die relative einfache Berechnung des Verfahrens. Schwachpunkt ist dahingegen die unvollständige Darstellung globaler Strömungsstrukturen, da nicht alle Bereiche der Strömung durch die Partikel abgedeckt werden können und eine zu große Partikelanzahl die effiziente Wahrnehmbarkeit der Vorgänge beeinflusst.

- *Streamsurfaces und Streamlines*

Die Abstraktion gleichartiger Strömungsgebiete zu komplexeren geometrischen Strukturen stellt die Grundlage bei diesem Verfahren dar und ist in Kapitel 3.3 näher beschrieben. In diesem Fall wurden dazu zum einen Streamlines, durch Kreisförmige Extrusion repräsentiert als Streamtubes und zum anderen Streamsurfaces ausgewählt, die jeweils Strömungsabschnitte anhand ihres Startpunktes zusammenfassen.

Die abstrakte Darstellung durch geometrisch Strukturen erlaubt dabei eine effektive visuelle Analyse des Strömungsverlaufs in seinem räumlichen Zusammenhang. Entgegen den bisherigen Darstellungen wird

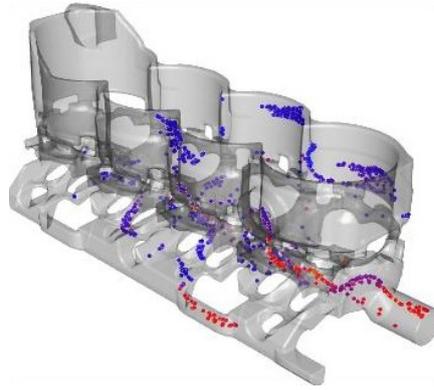


Abbildung 4.4: Abbildung des Strömungsverlaufs auf die Partikelbewegung. Die Farbe codiert zudem die Geschwindigkeit der Partikel (rot = hohe Geschwindigkeit, blau = niedrige Geschwindigkeit)

z.B. in Darstellung 4.5a der signifikante Druckabfall in der Strömung im Bereich der Dichtungsringe sichtbar, sowie in 4.5b die fortlaufend komplexer werdende Struktur der Strömung mit zunehmenden Strömungsverlauf. Zur optimalen Erfassung ist eine gezielte Auswahl der Startpunkte der Strömungsgeometrien entscheidend, die allerdings einen hohen Berechnungsaufwand mit sich bringt, da globale Strukturen und deren Interaktion mit den Geometrien bereits im Vorraus berechnet werden müssen.

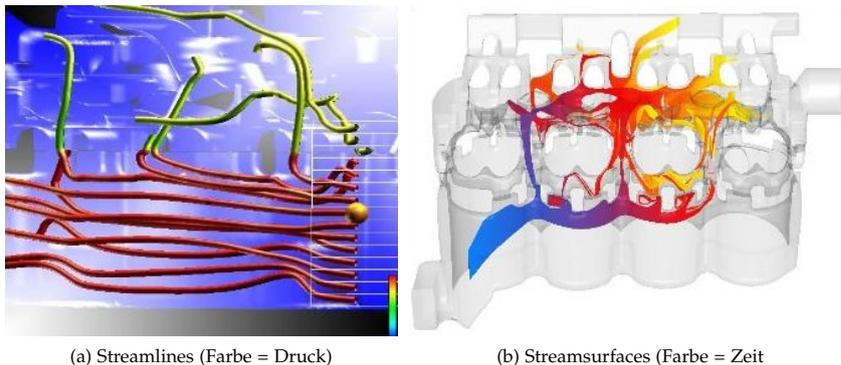


Abbildung 4.5: Die Darstellung der Strömung mit Hilfe geometrische Strukturen erleichtert deren räumliche Wahrnehmung.

- *Merkmalsbasierte Methoden*

Die direkte Erfassung und Abbildung von besonderen Strömungsgebieten, beschreiben in Kapitel 3.4 wurde auch in diesem Fall zur Visualisierung genutzt. Dazu wurden die kritischen Punkte zunächst schichtweise mit Hilfe von 2D Verfahren detektiert und danach zu dreidimensionalen Strukturen zusammengefasst. Diese Verfahren erlauben eine erhebliche Reduktion der visuellen Komplexität des Datensatzes, sofern die Schwellwerte für die Erkennung topologischer Strukturen in geeigneter Weise ausgewählt wurden. Allerdings kann durch die angewendeten Verfahren nicht die Erfassung aller kritischen Bereich garantiert werden, da z.B.

Strukturen die parallel zwischen den Schnittebenen liegen nicht korrekt berechnet werden können.

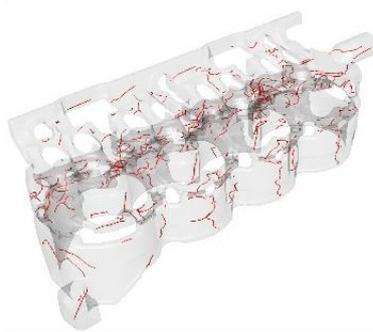
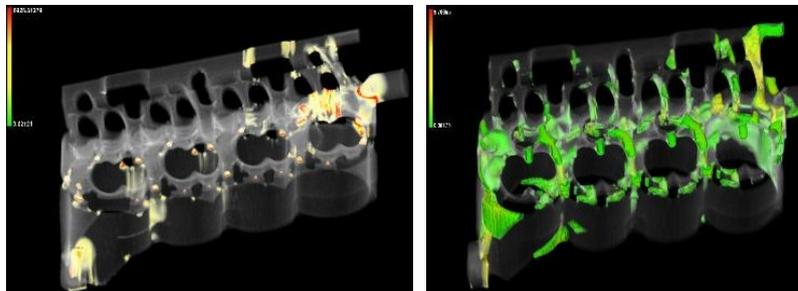


Abbildung 4.6: Hier dargestellt sind die extrahierten Wirbelkernstrukturen abgebildet auf rote 3D Linien im Kühlmantel. Eine hohe Dichte dieser Strukturen weist auf einen starke Durchmischung, sowie einen unregelmäßigen Strömungsverlauf hin.

- *Fokus- und Kontextbasierte Methoden*

Die weitere Abstraktion der Daten und deren Einbettung in ihren geometrische Kontext kann zudem weitere Vorteile bei der visuellen Analyse bieten und ermöglicht die visuelle Darstellung komplexerer Zusammenhänge. Beispiele dafür sind die Darstellung des Druckgradienten, also die Stärke der Änderung des Druckes im Strömungsverlauf, mit Hilfe Volumetrischer Verfahren in Grafik 4.7a oder der Anteil rückwärtsgerichteter Fließbewegungen in Bild 4.7b, welcher in den meisten Fällen minimiert werden sollte.



(a) Darstellung des Druckgradienten

(b) Anteil des inversen Längsflusses

Abbildung 4.7: Veranschaulichung abstrakter und struktureller Strömungsparameter im geometrischen Kontext.

Die Anwendung verschiedener Verfahren in diesem Fall deutet bereits auf die Vielzahl verschiedener Techniken, sowie deren Stärken und Schwächen hin. Der Ansatz welcher in [LGD⁺05] vorgestellt wurde, ermöglicht den interaktiven Wechsel zwischen verschiedensten Techniken zur effizienten Exploration mit Hinblick auf eine möglichst vollständige visuelle Analyse der Strömungseigenschaften.

4.1.3 Schlussfolgerungen

Wie bereits im vorangegangenen Abschnitt dargestellt, bieten alle Darstellungstechniken verschiedenste Vor- und Nachteile und die vollständige Erfassung aller kritischer Bereiche und Eigenschaften der Strömung in diesem speziellen Anwendungsfall, war nur durch deren Kombination möglich.

Daraus wird bereits ersichtlich, dass zukünftige Visualisierungstechniken für diese Art von Aufgaben, verschiedene Techniken sinnvoll miteinander kombinieren und ein hohes Maß an Flexibilität hinsichtlich der Erfassung topologischer Besonderheiten bieten sollten. Aktuelle Ansätze beschäftigen sich aufgrund dessen nicht zuletzt mit der effizienteren Erfassung und Darstellung struktureller Eigenschaften in höherdimensionalen Räumen, z.B. in Form von erweiterten Strömungstopologien dargestellt in [TWHSo3].

4.2 OPTIMIERUNG DER DARSTELLUNG

In diesem Abschnitt werden einige Möglichkeiten zur Verbesserung der Darstellung geliefert, um wichtige Informationen hervorzuheben und unwichtige auszublenden.

4.2.1 Fokus und Kontext

Meist ist man nur an bestimmten Daten einer Visualisierung interessiert. Dabei wird jedoch die Aufmerksamkeit des Betrachters durch uninteressante Stellen, die in der gleichen Intensität dargestellt werden, abgelenkt. Die interessanten Gebiete, der Fokus, können zum ersten manuell durch Markierung oder automatisch hervorgehoben werden. Für die automatische Hervorhebung können bestimmte Strömungsdaten herangezogen werden. In Abbildung 4.8a wurden die Konturen hoher Luftdichten in der Umgebung des Bugs des Shuttles intensiver abgebildet, wohingegen geringere Luftdichten weiter hinten ausgeblendet wurden. Die Verwirbelungen an den hinteren Tragflächen des Shuttles waren in Abbildung 4.8b interessant und wurden anhand der Topologie herausgefiltert.



(a) Schockwelle am Bug



(b) Verwirbelungen hinter den Tragflächen

Abbildung 4.8: Hervorhebung von Fokus und Kontext am Beispiel der Luftströmung um das X-38-Shuttle [SJEGo5]

4.2.2 Erweiterte Datenbereiche zur Hervorhebung von Silhouetten und Begrenzungen

Ähnlich den Fokus-und-Kontext-Techniken werden bei diesem Verfahren zusätzliche Daten herangezogen, um interessante Bereiche in einer Abbildung hervorzuheben. So können bspw. Dichtekonturen mit bestimmten Geschwindigkeiten dargestellt werden. Abbildung 4.9a zeigt die Temperaturkonturen

des Konvektionsdatensatzes. In Abbildung 4.9b wurden nur Gebiete mit starken Temperaturänderungen dargestellt. Im Gegensatz dazu wurde die Strömungsgeschwindigkeit zur Hervorhebung in Abbildung 4.9c verwendet. Abbildung 4.9d bildet die Zonen starker Verwirbelung ab.

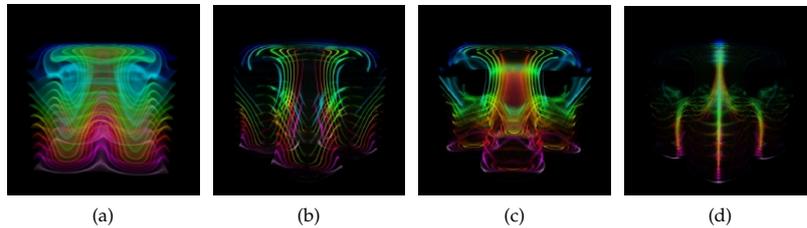


Abbildung 4.9: Gegenüberstellung von Volumenrenderings des Konvektionsdatensatzes mit verschiedenen Hervorhebungen [SJEG05]

4.2.3 Da-Vinci-Zeichenstil

Die Illustrationen des italienischen Universalgenies Leonardo da Vinci werden als äußerst erfolgreich gewertet. Daher wurde versucht, seine Farbpalette mit Braun- und Beigetönen nachzuahmen. Abbildung 4.10a zeigt eine Zeichnung des Malers, die er zur Untersuchung von Wasserströmungen anfertigte. Dagegen wurden in Abbildung 4.10b seine Farbpalette zur Illustration des Konvektionsdatensatzes verwendet — links als Standard Volumenrendering, rechts das Konturenrendering.



(a) Wasserumflossener Zylinder — Zeichnung von Leonardo da Vinci



(b) Konvektionsdatensatz mit da-Vinci-Farbpalette

Abbildung 4.10: Verwendung der da-Vinci-Farbpalette [SJEG05]

5

ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

5.1 ZUSAMMENFASSUNG DER AUSARBEITUNG

Inhalt dieser Ausarbeitung war die Erarbeitung eines Überblickes über das Thema der Strömungsvisualisierung mit Hinblick auf die Anwendung illustrativer Informationsvisualisierung auf diesem Gebiet.

Dazu wird in Kapitel 2.1 zunächst eine kurze Einführung in das Thema vorgestellt und grundlegende Begrifflichkeiten des Themengebietes geklärt. Daraufhin folgt ein kurzer Einblick in die praktische Umsetzung und Anwendung der Sichtbarmachung von Strömungsvorgängen, die Grundlage und Voraussetzung für die digitale Visualisierung sind.

Aus dieser Übersicht heraus wird in Kapitel 3 eine Klassifikation über virtuelle Darstellungstechniken herausgestellt und diese näher erläutert. Diese Klassifikation deutet dabei bereits an, dass bereits eine hohe Anzahl verschiedenster Darstellungstechniken für spezielle Anwendungsgebiete entwickelt worden ist und deren Merkmale über ihre Einsetzbarkeit für den jeweiligen Fall entscheiden.

Die praktische Nutzung dieser Verfahren wurde anhand des Beispiels der Strömung einer Kühlflüssigkeit in einem Kühlgehäuse im Kapitel 4.1 näher dargestellt. Dabei wird betont, dass eine effektive visuelle Erfassung aller Strömungseigenschaften nur unter Zuhilfenahme verschiedener Techniken erreichbar ist. Die Anwendung und Bewertung der aufgeführten Visualisierungstechniken wurde dann wiederum als Grundlage für die Diskussion konkreter Optimierungsmöglichkeiten genutzt. Nicht zuletzt die ansprechendere Darstellung der Strömungsvorgänge, sowie die Nutzung spezieller Fokus- und Kontext Methoden, führen dabei zu einer verbesserten Wahrnehmbarkeit der quantitativen Strömungseigenschaften in ihrem räumlichen Umfeld. Daraus lassen sich im Folgenden auch Hinweise auf zukünftige Entwicklungen auf diesem Themengebiet ableiten.

5.2 AUSBLICK

In Kapitel 4.1.3 und 4.2 wurde bereits auf einige konkrete Verbesserungsmöglichkeiten für bestehende Systeme hingewiesen. Da die explorative Visualisierung umfangreicher und komplexer Strömungsdaten überhaupt erst in den letzten Jahrzehnten möglich geworden ist, wird die Nutzung und effektive Darstellung solcher Daten noch intensiv erforscht.

Vielversprechende Ansätze orientieren sich dabei, wie schon vorgestellt, oft auch an künstlerischen Ausdrucksstilen um die umfangreichen Strömungsinformationen gezielt zu vermitteln. Speziell im Gebiet des Non-Photorealistic-Rendering (NPR) werden solche Darstellungsformen intensiv erforscht und es ist zu erwarten, dass spezielle Entwicklungen auf diesem Gebiet auch für die Darstellung von Strömungsdaten von Bedeutung sein können (u.a. [Tato3]). Einige Ansätze beschäftigen sich dabei mit der Darstellung von Bewegung

durch stilistische Linielemente oder die Nutzung von Bewegungs- und Tiefenschärfeneffekte zur Wahrnehmungsunterstützung.

Weiterhin ist anzunehmen das eine zunehmende Integration verschiedener Darstellungsformen den Informationsgehalt von Visualisierungen deutlich erhöhen kann und demzufolge ebenso an Bedeutung gewinnen wird. Ähnlich entscheidend ist dabei auch die Erkennung und Zuordnung topologischer Strukturen, die eine zunehmend besser Klassifikation und genauere Rückschlüsse auf das Verhalten von Strömungen erlauben wird.

Teil II

QUELLENVERZEICHNIS

LITERATURVERZEICHNIS

- [Dav] Andrew Davidhazy. Schlieren photography principles. Online source, accessed on 12/10/2007.
- [LGD⁺05] Robert S. Laramée, Christoph Garth, Helmut Doleisch, Jürgen Schneider, Helwig Hauser, and Hans Hagen. Visual analysis and exploration of fluid flow in a cooling jacket. In *IEEE Visualization*, page 79, 2005.
- [NB06] Wolfgang Nitsche and André Brunn. *Strömungsmesstechnik*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006.
- [Pre07] Prof. Bernard Preim. Visualization of vector data. In *Vorlesung: Visualization*, 2007.
- [PVH⁺03] Frits H. Post, Benjamin Vrolijk, Helwig Hauser, Robert S. Laramée, and Helmut Doleisch. The State of the Art in Flow Visualization: Feature Extraction and Tracking. In *Computer Graphics Forum*, volume 22, pages 775–792, 2003.
- [SJEG05] Nikolai A. Svakhine, Yun Jang, David S. Ebert, and Kelly Gaither. Illustration and Photography Inspired Visualization of Flows and Volumes. In Cláudio T. Silva, Eduard Gröller, and Holly Rushmeier, editors, *Proceedings of IEEE Visualization (VIS 2005, October 23–28, 2005, Minneapolis, MN, USA)*, pages 687–694, 2005.
- [Tato3] Laura Tateosian. Npr: Art enhancing computer graphics, December 2003. Preliminary PhD Report.
- [TWHS03] Holger Theisel, Tino Weinkauff, Hans-Christian Hege, and Hans-Peter Seidel. Saddle connectors - an approach to visualizing the topological skeleton of complex 3d vector fields. In *VIS '03: Proceedings of the 14th IEEE Visualization 2003 (VIS'03)*, page 30, Washington, DC, USA, 2003. IEEE Computer Society.
- [Wiko8] Wikipedia. Shadowgraph — wikipedia, the free encyclopedia, 2008. [Online; accessed 14-March-2008].