

**TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DRESDEN**

---

Fakultät Forst-, Geo- und Hydrowissenschaften

---

## Geometrische und stochastische Modelle zur Optimierung der Leistungsfähigkeit des Strömungs- messverfahrens 3D-PTV

Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades  
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

vorgelegt von:

**Dipl.-Ing. Torsten Putze**

Gutachter:

Prof. Dr. habil. Hans-Gerd Maas  
TU Dresden

Prof. Dr.-Ing. habil. Christoph Brücker  
TU-Bergakademie Freiberg

Dr. Werner Hentschel  
Volkswagen AG

Dresden, 02.12. 2008



## **Erklärung des Promovenden**

Die Übereinstimmung dieses Exemplars mit dem Original der Dissertation zum Thema:

„Geometrische und stochastische Modelle zur Optimierung der Leistungsfähigkeit des Strömungsmessverfahrens 3D-PTV“

wird hiermit bestätigt.

Torsten Putze

Dresden, am 02.12.2008



## Zusammenfassung

Die 3D Particle Tracking Velocimetry (3D PTV) ist eine Methode zur bildbasierten Bestimmung von Geschwindigkeitsfeldern in Gas- oder Flüssigkeitsströmungen. Dazu wird die Strömung mit Partikeln markiert und durch ein Mehrkamerasystem beobachtet. Das Ergebnis der Datenauswertung sind 3D Trajektorien einer großen Anzahl von Partikeln, die zur statistischen Analyse der Strömung genutzt werden können.

In der vorliegenden Arbeit werden verschiedene neu entwickelte Modelle gezeigt, die das Einsatzspektrum vergrößern und die Leistungsfähigkeit der 3D PTV erhöhen. Wesentliche Neuerungen sind der Einsatz eines Spiegelsystems zur Generierung eines virtuellen Kamerasystems, die Modellierung von komplex parametrisierten Trennflächen der Mehrmedienphotogrammetrie, eine wahrscheinlichkeitsbasierte Trackingmethode sowie eine neuartige Methode zur tomographischen Rekonstruktion von Rastervolumendaten. Die neuen Modelle sind an drei realen Experimentieranlagen und mit synthetischen Daten getestet worden.

Durch den Einsatz eines Strahlteilers vor dem Objektiv einer einzelnen Kamera und vier Umlenkspiegeln, positioniert im weiteren Strahlengang, werden vier virtuelle Kameras generiert. Diese Methode zeichnet sich vor allem durch die Wirtschaftlichkeit als auch durch die nicht notwendige Synchronisation aus. Vor allem für die Anwendung im Hochgeschwindigkeitsbereich sind diese beiden Faktoren entscheidend.

Bei der Beobachtung von Phänomenen in Wasser kommt es an den Trennflächen verschiedener Medien zur optischen Brechung. Diese muss für die weitere Auswertung zwingend modelliert werden. Für komplexe Trennflächen sind einfache Ansätze über zusätzliche Korrekturterme nicht praktikabel. Der entwickelte Ansatz basiert auf der mehrfachen Brechung jedes einzelnen Bildstrahls. Dazu müssen die Trennflächenparameter und die Kameraorientierungen im selben Koordinatensystem bekannt sein.

Zumeist wird die Mehrbildzuordnung von Partikeln durch die Verwendung von Kernlinien realisiert. Auf Grund von instabilen Kameraorientierungen oder bei einer sehr hohen Partikeldichte sind diese geometrischen Eigenschaften nicht mehr ausreichend, um die Mehrbildzuordnung zu lösen. Unter der Ausnutzung weiterer geometrischer, radiometrischer und physikalischer Eigenschaften kann die Bestimmung der 3D Trajektorien dennoch durchgeführt werden. Dabei werden durch die Analyse verschiedener Merkmale diejenigen ausgewählt, welche sich für die spatio-temporale Zuordnung eignen.

Die 3D PTV beruht auf der Diskretisierung der Partikelabbildungen im Bildraum und der anschließenden Objektkoordinatenbestimmung. Eine rasterbasierte Betrachtungsweise stellt die tomographische Rekonstruktion des Volumens dar. Hierbei wird die Intensitätsverteilung im Volumen rekonstruiert. Die Bewegungsinformationen werden im Anschluss aus den Veränderungen aufeinander folgender 3D-Bilder bestimmt. Durch dieses Verfahren können Strömungen mit einer höheren Partikeldichte im Volumen analysiert werden. Das entwickelte Verfahren basiert auf der schichtweisen Entzerrung und Zusammensetzung der Kamerabilder.

Die entwickelten Modelle und Ansätze sind an verschiedenen Versuchsanlagen erprobt worden. Diese unterschieden sich stark in der Größe ( $0,5 \text{ dm}^3 - 20 \text{ dm}^3 - 130 \text{ m}^3$ ) und den vorherrschenden Strömungsgeschwindigkeiten ( $0,3 \text{ m/s} - 7 \text{ m/s} - 0,5 \text{ m/s}$ ).

## Summary

3D Particle Tracking Velocimetry (3D PTV) is an image based method for flow field determination. It is based on seeding a flow with tracer particles and recording the flow with a multi camera system. The results are 3D trajectories of a large number of particles for a statistical analysis of the flow.

The thesis shows different novel models to increase the spectrum of applications and to optimize efficiency of 3D PTV. Central aspects are the use of the mirror system to generate a virtual multi camera system, the modelling of complex interfaces of multimedia photogrammetry, a probability based tracking method and a novel method for tomographic reconstruction of volume raster data. The improved models are tested in three real testing facilities and with synthetic data.

Using a beam splitter in front of the camera lens and deflecting mirrors arranged in the optical path, a four headed virtual camera system can be generated. This method is characterised by its economic efficiency and by the fact that a synchronisation is not necessary. These facts are important especially when using high speed cameras.

When observing phenomena in water, there will be refraction at the different interfaces. This has to be taken into account and modelled for each application. Approaches which use correction terms are not suitable to handle complex optical interfaces. The developed approach is based on a multiple refraction ray tracing with known interface parameters and camera orientations.

Mostly the multi image matching of particles is performed using epipolar geometry. Caused by the not stable camera orientation or a very high particle density this geometric properties are not sufficient to solve the ambiguities. Using further geometrical radiometrical and physical properties of particles, the determination of the 3D trajectories can be performed. After the analysis of different properties those of them are chosen which are suitable for spatio-temporal matching.

3D PTV bases on the discretisation of particle images in image space and the following object coordinate determination. A raster based approach is the tomographic reconstruction of the volume. Here the light intensity distribution in the volume will be reconstructed. Afterwards the flow information is determined from the differences in successive 3D images. Using tomographic reconstruction techniques a higher particle density can be analysed. The developed approach bases on a slice by slice rectification of the camera images and on a following assembly of the volume.

The developed models and approaches are tested at different testing facilities. These differ in size ( $0.5 \text{ dm}^3 - 20 \text{ dm}^3 - 130 \text{ m}^3$ ) and flow velocities ( $0.3 \text{ m/s} - 7 \text{ m/s} - 0.5 \text{ m/s}$ ).

# Inhaltsverzeichnis

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 1     | Einleitung .....   | 1  |
| 1.1   | Strömungsmessmethoden .....                                      | 1  |
| 1.1.1 | Particle Image Velocimetry .....                                 | 3  |
| 1.1.2 | Particle Tracking Velocimetry .....                              | 5  |
| 1.1.3 | Particle Streak Velocimetry und Rainbow Volume Velocimetry ..... | 7  |
| 1.1.4 | Vergleich der Methoden .....                                     | 8  |
| 1.2   | Trackingmethoden .....   | 9  |
| 1.2.1 | Auswertemethoden für PIV .....                                   | 9  |
| 1.2.2 | Super-Resolution PIV .....                                       | 10 |
| 1.2.3 | Auswertemethoden für PTV .....                                   | 11 |
| 1.3   | Ziel und Inhalt der Arbeit .....                                 | 15 |
| 2     | Hardware und Rahmenbedingungen .....                             | 17 |
| 2.1   | Hardwaregrundlagen der Aufnahmesysteme .....                     | 17 |
| 2.1.1 | Spiegelreflexkamera .....  | 17 |
| 2.1.2 | Industriekamera .....  | 18 |
| 2.1.3 | Hochgeschwindigkeitskamera .....                                 | 18 |
| 2.2   | Konfiguration des Aufnahmesystems .....                          | 19 |
| 2.3   | Spiegelsysteme .....   | 20 |
| 2.3.1 | Konfiguration eines Spiegelsystems .....                         | 21 |
| 2.3.2 | Auswerteanatz für Spiegelsysteme .....                           | 22 |
| 2.3.3 | Genauigkeitsuntersuchung des Spiegelsystems .....                | 23 |
| 2.4   | Beleuchtung .....  | 23 |
| 2.5   | Partikel zur Strömungsmarkierung .....                           | 25 |
| 3     | Photogrammetrische Grundlagen .....                              | 26 |
| 3.1   | Bildanalyse .....  | 26 |
| 3.1.1 | Berechnung des Hintergrundbildes .....                           | 26 |
| 3.1.2 | Bildpunktmessung .....   | 28 |
| 3.2   | Das zentralperspektive Abbildungsmodell .....                    | 30 |
| 3.2.1 | Kamera-Spiegelsysteme .....                                      | 31 |
| 3.2.2 | Mehrbildzuordnung .....  | 34 |
| 3.2.3 | Ausgleichungsverfahren .....                                     | 36 |
| 3.3   | Kamerakalibrierung .....   | 36 |
| 3.4   | Genauigkeitsbetrachtung bei kleinen Verschiebungen .....         | 37 |
| 3.4.1 | Theoretische Betrachtung der Korrelationen .....                 | 38 |
| 3.4.2 | Praktische Untersuchungen .....                                  | 40 |
| 3.4.3 | Ergebnisse der praktischen Untersuchungen .....                  | 41 |
| 4     | Mehrmediengeometrie .....  | 44 |
| 4.1   | Existierende Methoden der Mehrmedienphotogrammetrie .....        | 45 |
| 4.2   | Erweiterte Ansätze für komplexe Trennflächen .....               | 47 |
| 4.2.1 | Bestimmung der Modellparameter .....                             | 48 |
| 4.2.2 | Bestimmung des Brechungsindex .....                              | 48 |
| 4.2.3 | Transformation des Kamerasystems in das Modellsystem .....       | 49 |
| 4.2.4 | Raytracing und Mehrbildzuordnung .....                           | 50 |
| 4.2.5 | Objektkoordinatenbestimmung .....                                | 51 |

|       |   |     |
|-------|---|-----|
| 4.2.6 | Ansatz für die gemeinsame Ausgleichung aller Parameter.....         | 54  |
| 5     | Wahrscheinlichkeitsbasierter Trackingalgorithmus .....              | 56  |
| 5.1   | Bestimmung des Wahrscheinlichkeitsmaßes .....                       | 56  |
| 5.2   | Kombinatorische Mehrdeutigkeiten .....                              | 60  |
| 5.3   | Praktische Untersuchungen .....                                     | 63  |
| 5.3.1 | Auswahl der Merkmalsräume .....                                     | 63  |
| 5.3.2 | Ergebnisse unter realen Bedingungen .....                           | 63  |
| 6     | Resultate .....   | 67  |
| 6.1   | Erläuterung zur Ergebnisaufbereitung .....                          | 67  |
| 6.2   | Messungen im Niedergeschwindigkeitswindkanal .....                  | 69  |
| 6.2.1 | Konfiguration des Messsystems .....                                 | 69  |
| 6.2.2 | Ergebnisse der Versuche im Niedergeschwindigkeitswindkanal.....     | 71  |
| 6.3   | Messungen im Ilmenauer Fass .....                                   | 72  |
| 6.3.1 | Konfiguration des Messsystems.....                                  | 73  |
| 6.3.2 | Ergebnisse der Versuche im Ilmenauer Fass.....                      | 75  |
| 6.4   | Messungen im Wasseranalogon .....                                   | 78  |
| 6.4.1 | Konfiguration des Messsystems.....                                  | 79  |
| 6.4.2 | Ergebnisse der Versuche im Wasseranalogon .....                     | 79  |
| 6.5   | Statistik der Trajektorienlänge .....                               | 81  |
| 7     | Tomographischer Auswerteansatz.....                                 | 86  |
| 7.1   | Neues Verfahren der tomographischen Rekonstruktion .....            | 86  |
| 7.1.1 | Transformation zwischen der Bildebene und den Tiefenschichten ..... | 89  |
| 7.1.2 | Resampling der Grauwerte.....                                       | 92  |
| 7.1.3 | Genauigkeitsbetrachtung.....  | 94  |
| 7.1.4 | Rechenzeiten .....  | 98  |
| 7.2   | Zeitliche Zuordnung .....   | 99  |
| 7.2.1 | 3D-Kreuzkorrelation .....   | 99  |
| 7.2.2 | Datenerzeugung.....   | 101 |
| 7.2.3 | Ergebnisse der zeitlichen Zuordnung .....                           | 101 |
| 8     | Zusammenfassung und Ausblick.....                                   | 104 |
| 9     | Literatur .....   | 106 |
|       | Danksagung.....   | 115 |

## Abkürzungsverzeichnis

|                           |   |
|---------------------------|---|
| $\omega, \varphi, \kappa$ | Orientierungswinkel der Kamera            |
| BP                        | Bildpunkt                                 |
| c                         | Kamerakonstante                           |
| EW                        | Erwartungswert                            |
| GW                        | Grauwert                                  |
| MkQ                       | Methode der kleinsten Quadrate            |
| m,n,o / i,j,k             | räumliche Indexvariable                   |
| NWK                       | Niedergeschwindigkeitswindkanal           |
| OP                        | Objektpunkt                               |
| P                         | Punkt                                     |
| $r_{ij}$                  | Elemente der Rotationsmatrix              |
| RMS                       | root mean square                          |
| RMSE                      | root mean square error                    |
| $\mathbb{R}^n$            | euklidischer Raum n-ter Dimension         |
| SW                        | Schwellwert                               |
| t                         | zeitliche Indexvariable                   |
| $\mathbf{x}$              | Vektor                                    |
| $\mathbf{X}$              | Matrix                                    |
| $x', y'$                  | Bildkoordinaten                           |
| $x_0', y_0'$              | Koordinaten des Bildhauptpunktes          |
| X,Y,Z                     | Objektkoordinaten                         |
| $X_0, Y_0, Z_0$           | Objektkoordinaten des Projektionszentrums |



„Man muss viel gelernt haben, um über das, was man nicht weiß, fragen zu können.“

(Jean-Jacques Rousseau 1712 - 1778)

# 1 Einleitung

Bildgebende Messverfahren stellen in der Strömungsmesstechnik wichtige Analysemethoden dar. Die verschiedenen Verfahren können nach der Dimension des Beobachtungsraumes und/oder der Ergebnisse eingeordnet werden. Eine Methode zur Bestimmung von räumlichen Geschwindigkeitsfeldern ist die dreidimensionale Particle Tracking Velocimetry (3D-PTV). Dabei wird die jeweilige Strömung durch möglichst kleine, auftriebsneutrale Partikel markiert und durch ein Mehrkamerasystem beobachtet. Die Auswertung der aufgenommenen Bildsequenzen liefert die räumliche Verteilung der Partikel zu verschiedenen Zeitschritten sowie die zugehörigen Trajektorien. Damit wird es möglich, die Strömung mit Hilfe der Lagrange'schen Statistik zu analysieren.

In den letzten 15 Jahren wurde die Methode der 3D-PTV stetig weiterentwickelt und für verschiedene Anwendungen angepasst. Es sind jedoch keine allgemeingültigen Lösungen verfügbar, die den problemlosen Einsatz in verschiedenen Versuchsanlagen gewährleisten. Ziel dieser Arbeit ist es, Algorithmen zu entwickeln, die das Einsatzspektrum und die Leistungsfähigkeit des 3D-PTV-Messverfahrens erweitern.

## 1.1 Strömungsmessmethoden

Die Strömungsmechanik bedient sich einer ganzen Reihe verschiedener Techniken zur Analyse von Strömungen (Nietsche und Brunn, 2006; Oertel und Oertel, 1989; Dracos, 1996). Diese reichen von qualitativen Visualisierungen mittels Wollfaden- oder Anstrichversuchen über moderne Punktmessmethoden wie Laser-Doppler-Anemometrie (LDA) und tomographische Volumenmessmethoden (Tomo PIV) bis hin zu modernen numerischen strömungsmechanischen Simulationen. Die große Anzahl der zur quantitativen Bestimmung von Strömungen entwickelten Methoden unterscheiden sich sowohl in ihrer Funktionsweise als auch in den resultierenden Ergebnissen, die sie für bestimmte Fragestellungen auszeichnen. Dabei können die einzelnen Methoden vor allem nach der Dimension des Messvolumens und der bestimmbaren Geschwindigkeitsvektoren eingeteilt werden. Ein Verfahren, welches die Geschwindigkeitskomponenten in alle drei Raumrichtungen (3 Komponenten = 3C) erfasst und bei dem das Beobachtungsgebiet eine Ebene (2D) ist, wird als 2D3C Verfahren bezeichnet.

Zur Beschreibung und Interpretation von Strömungen sind prinzipiell zwei Möglichkeiten gegeben. Dabei impliziert die Strategie der Messtechnik die Art der Geschwindigkeitsbeschreibung.

### EULERSche Betrachtungsweise

Hierbei werden die Strömungsgrößen orts- und zeitabhängig beschrieben. Für einen gegebenen Ort  $x$  in einem festgelegten Koordinatensystem zu einem bestimmten Zeitpunkt  $t$  wird die Geschwindigkeit  $v$  dargestellt. So ergibt sich für einen festen Ort die Geschwindigkeit als Funktionen der Zeit oder für eine feste Zeit das Geschwindigkeitsfeld. Aus diesen Daten lassen sich Stromlinien integrieren.

$$v = v(x, t)$$

1.1

Punktuell messende Systeme (z.B. Laser Doppler Anemometrie) oder auf Rasterdaten basierte Auswerteverfahren (z.B. Particle Image Velocimetry) werten die Geschwindigkeitsinformationen an den Orten aus,

# 1 Einleitung

---

die durch das Messsystem bzw. den Algorithmus vorgegebenen werden. Zumeist werden an den diskreten Orten Mittelungen und statistische Auswertungen über die Zeit vorgenommen.

## LAGRANGESche Betrachtungsweise

Alternativ werden nicht die Rasterdaten im Beobachtungsvolumen analysiert, sondern die vektordatenbasierte Beschreibung einzelner Fluidteilchen. Jedes Fluidteilchen wird durch seine Position  $\xi$  zum Zeitpunkt  $t_0$  identifiziert. Für jedes  $\xi$  gibt die Gleichung 1.2 die Bahn des Teilchens an.

$$x = x(\xi, t), \quad \text{wobei} \quad x(t_0) = \xi \quad 1.2$$

Die Bewegungsbahn (Trajektorie) jedes Teilchens, die verbundenen zeitabhängigen Ortsvektoren  $\mathbf{x}_i(t)$ , gibt eine teilchengebundene Beschreibung der Geschwindigkeitsinformationen. Die Geschwindigkeit jedes Teilchens kann wie in Gleichung 1.3 angegeben werden, wobei die Ableitung bei jeweils festem  $\xi$  anzeigt, dass die Ableitung für das  $\xi$ -te Fluidteilchen bestimmt wird.

$$v(\xi, t) = \left[ \frac{\partial x}{\partial t} \right]_{\xi} \quad 1.3$$

Die Ergebnisse von Messsystemen, welche diskrete Partikel detektieren und über mehrere Epochen verfolgen, sind Trajektorien. Aus den ermittelten Trajektorien können durch statistische Analysen charakteristische Eigenschaften der Strömung bestimmt werden. Es sind Strömungsmuster oder Moden erkennbar. Des Weiteren können mit Hilfe der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion (PDF, *engl.: probability density function*) die Geschwindigkeit und die Beschleunigung der Bahnkomponenten analysiert werden. Die Abweichung der PDF von der Gaußschen Normalverteilung gibt einen Hinweis auf Intermittenz einer Strömung. Virant und Dracos (1997) und Voth et al. (2002) zeigen, welche Informationen aus langen Trajektorien durch statistische Analyse gewonnen werden können.

Mit Hilfe moderner Techniken ist es das Ziel der Entwickler, sowohl die Anzahl der zu bestimmenden Vektorkomponenten als auch die Anzahl der Dimensionen und Größe der untersuchten Volumina zu maximieren und damit eine vollständige Beschreibung realer Strömungen zu erreichen. Die existierenden punkt- oder flächenbasierten Methoden erlauben nur durch statistische Auswertungen, insbesondere durch die Beschreibung des mittleren Zustandes, Aussagen über turbulente Strömungsfelder. Die aktuellen Entwicklungen zeigen die Bestrebung zur Bestimmung von zeitaufgelösten (time resolved) Ergebnissen.

Die bildbasierten Messmethoden bilden einen Bereich, der hier im Weiteren ausführlicher dargestellt werden soll. Alle diese Methoden basieren auf der berührungslosen Beobachtung der Strömung. In den meisten Fällen sind diese Strömungen (bzw. die strömenden Medien) transparent. Deshalb werden je nach Technik verschiedenartige Teilchen (Tracer) in die Strömung eingebracht, die diese visualisieren. Demzufolge werden die strömungsmechanischen Phänomene indirekt durch die Bestimmung des Verhaltens der Tracer beschrieben. Hierbei ist offensichtlich, dass nur an den Stellen ein Ergebnis ermittelt werden kann, an denen Tracer in ausreichender Menge für die Messung vorhanden sind. Einige Verfahren nutzen die, z. B. bei Mischprozessen, natürlich vorhandenen sichtbaren Merkmale aus. Es soll hier nur

beispielhaft eine Auswahl von verschiedenen bildbasierten Messmethoden eingeteilt und vorgestellt werden.

### 1.1.1 Particle Image Velocimetry

Particle Image Velocimetry (PIV) (Adrian, 1991; Raffel et al., 2007) basiert auf der Korrelation von Partikelabbildungen in Doppelbildern. Die der Strömung zugegebenen Tracer (Partikel) werden mit Hilfe einer Laserebene eines Doppelpulslasers zweimal beleuchtet und mit einer hochauflösenden (frame transfer) CCD-Kamera aufgenommen (Willert und Gharib, 1991) (Abbildung 1.1). Hierbei ist die Synchronisation aller beteiligten Hardwarekomponenten von äußerster Bedeutung. Auf Grund des ebenen Beobachtungsgebietes kann die Schärfentiefe auf einen sehr kleinen Bereich reduziert werden. Die Ausrichtung des Schärfentiefebereichs auf die Beobachtungsebene für die zentralperspektiv abbildenden Kameras gelingt dabei unter der Ausnutzung der Scheimpflugbedingung. Mit Hilfe eines Adapters zwischen Optik und Sensor kann diese Bedingung für schräg auf die Beobachtungsebene gerichtete Kameras realisiert werden.

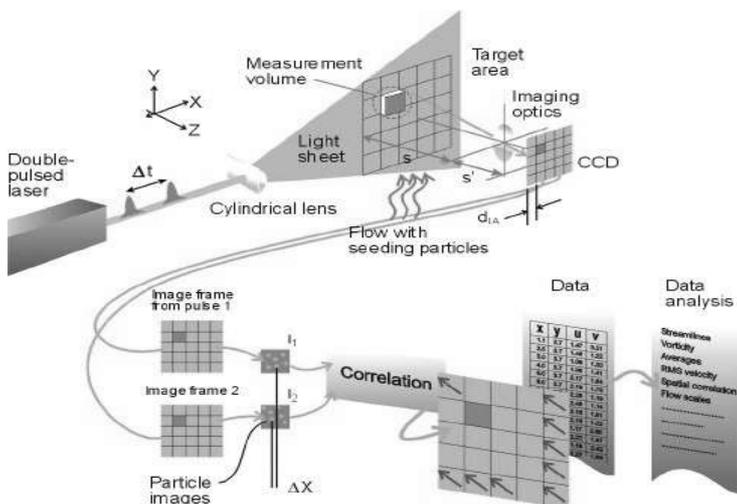


Abbildung 1.1: Prinzipskizze des PIV (Dantec Dynamics A/S, 2007)

Zur Bestimmung des Geschwindigkeitsfeldes aus PIV-Messungen werden die Verschiebungen lokaler Abfragefenster (interrogation area) zwischen den Doppelbildern im gesamten Bildraum berechnet. Dazu können flächenbasierte Zuordnungsverfahren wie Kreuzkorrelation (z.B. Scarano und Riethmüller, 2000), Affintransformation (z.B. Tianding, 2006) oder optischer Fluss (z.B. Horn und Schunk, 1981) genutzt werden. Weitere Ansätze sind in Abschnitt 1.2.1 beschrieben. Die Größe der Abfragefenster der Zuordnungsverfahren hat entscheidenden Einfluss auf die Zuverlässigkeit der Ergebnisse. Lokale Geschwindigkeitsgradienten und out-of-plane-Bewegungen, Bewegungen aus der Laserebene heraus (Yoon und Lee, 2002), verfälschen die Ergebnisse durch zu groß gewählte Abfragefenster ebenso wie eine zu geringe Partikelanzahl innerhalb dieser.

Die Erweiterung des eben vorgestellten Aufbaus um eine zweite Kamera, welche eine andere Beobachtungsrichtung zur Laserebene aufweist, erlaubt die Bestimmung der dritten Geschwindigkeitskomponente, senkrecht zur Laserebene (Arroyo und Greated, 1991). Auf Grund der Dicke der Laserlichtschicht ist die Beobachtung der Verschiebung in dieser Richtung möglich. Dazu werden neben der beschriebenen Korrelation zwischen den Doppelbildern einer Kamera auch die Verschiebungen der lokalen Partikelkonfigurationen zwischen den beiden Kameras bestimmt. Die hieraus ermittelte Parallaxenänderung entspricht der Geschwindigkeitskomponente senkrecht zur Laserebene. In der Praxis ist es von Vorteil, wenn die Geschwindigkeitskomponente normal zur Bildebene die langsamste ist.

## 1 Einleitung

Die fortschreitende technische Entwicklung bietet die Möglichkeit, Hochgeschwindigkeitskameras mit Frame Transfer-Technologie zu nutzen. Damit ist es möglich, eine schnelle Folge von Doppelbildpaaren aufzunehmen. Die Folge der einzelnen Geschwindigkeitsfelder, bestimmt aus jeweils einem Doppelbildpaar, liefert eine zeitaufgelöste Beschreibung der Strömung (time-resolved PIV).

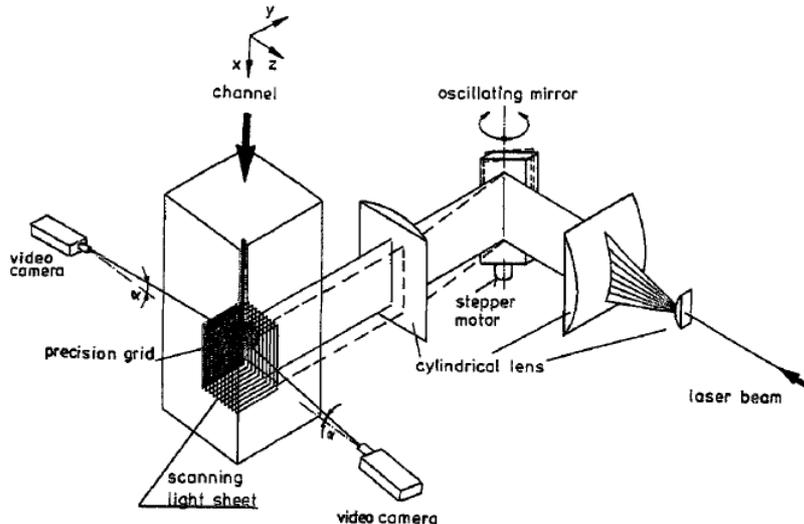


Abbildung 1.2: Prinzipskizze des Scanning PIV/PTV (Brücker, 1996b)

Der Nachteil des flächigen Beobachtungsgebietes der beiden vorgestellten Verfahren kann durch die Auswertung von Lichtschnitten in verschiedenen Tiefen zum Teil kompensiert werden. Beim so genannten scanning-PIV (Brücker, 1995) (3D2C oder 3D3C) werden analog zum time-resolved PIV / stereo-PIV Doppelbildpaare aufgenommen und ausgewertet. Nach jedem Doppelpuls wird die Laserebene in der Tiefe verändert. Durch die in der Tiefe variierende Laserschicht kann so ein Quasi Volumen aufgenommen werden. Die einzelnen Geschwindigkeitsfelder einer Tiefensequenz beschreiben das Volumen nur teilweise (in Abhängigkeit des Abstandes und der Dicke der Laserebenen) und auch nicht zu einem einzigen Zeitpunkt. Ist jedoch die Abtastrate des Volumens hoch im Gegensatz zur Geschwindigkeit der charakteristischen Strukturen der Strömung, können diese durch die Schnitte erkannt und analysiert werden.

Eine alternative Methode zur Aufnahme der verschiedenen tiefen Lichtschnitte wird als dual / multiple plane stereo PIV (Kähler und Kompenhans, 2000) bezeichnet. Dabei werden zwei parallele Laserschnitte (je 0,5 mm Schichtdicke, Abstand 0,5 mm) simultan aufgenommen. Die Trennung der Partikelbilder wird hier durch Polarisation des Laserlichtes erreicht. Eine weitere Methode zur Trennung der Lichtschnitte ist die Nutzung von farbigen Lasern und Bandpassfiltern (Brücker, 1996a). Die Separation durch Polarisation erlaubt nur die Nutzung zweier Ebenen, ist aber die in der Praxis am häufigsten genutzte Methode. Farbcodierungstechniken hingegen erlauben eine Vielzahl von verschiedenen diskreten Tiefen, die Methode des Rainbow Volume Velocimetry (siehe Abschnitt 1.1.3) erweitert die Tiefenvariation bis zu einem kontinuierlichen Spektrum. Die Geschwindigkeitsfelder der multiple plane stereo PIV sind im Gegensatz zu denen der Scanning Technik synchron bestimmt, die Tiefenausdehnung ist jedoch geringer.

Vollständige 3D Volumen können durch holographische Techniken aufgenommen werden. Das als holographische PIV (Hinsch, 2002; Meng et al., 2004) bezeichnete Verfahren zeichnet während der Messung das Interferenzmuster aus dem von den Partikeln zurück gestreuten Licht und einem Referenzstrahl auf. Wird das auf einer Fotoplatte aufgenommene Hologramm anschließend mit dem Referenzstrahl beleuchtet, so können die einzelnen Schichten des Volumens schrittweise durch einen Sensor abgetastet werden. Die Aufnahme des Hologramms auf einem CCD-Sensor ermöglicht eine numerische Lösung der Rückprojektion. Auf Grund der im Vergleich geringen Auflösung digitaler Kameras ergeben sich 2-3 Größenordnungen weniger detektierbare Partikel. Die Bestimmung der Geschwindigkeitsvektoren in den einzelnen Schichten basiert ebenso wie beim PIV auf der Kreuzkorrelation aufeinander folgender Belich-

tungen. Atkinson und Soria (2007b) zeigen einen Mehrkamera Holo-PIV-Ansatz, der es erlaubt, trotz einer erhöhten Partikeldichte eine verbesserte Partikelrekonstruktion zu erreichen. Dabei greifen sie ähnlich der tomographischen Rekonstruktion auf die Multiplikation der einzelnen rekonstruierten Volumina zurück.

Neben der holographischen Aufzeichnung der Volumendaten können Volumendaten beim tomographischen PIV (Elsinga et al., 2006b) mit Hilfe tomographischer Rekonstruktionsalgorithmen (Herman und Lent, 1976, Atkinson und Soria, 2007a, Putze, 2008b) aus 3 – 5 verschiedenen, synchronen Kamerabildern erzeugt werden. Im Gegensatz zum 3D-Particle Tracking Velocimetry (siehe Abschnitt 1.1.2) werden die Grauwertverteilungen der einzelnen Bilder genutzt, um die Intensitätsverteilung im Volumen zu rekonstruieren. Kühn et. al (2008) weisen durch einen Versuch nach, dass auch größere Volumen ( $0,69 \times 0,42 \times 0,24 \text{ m}^3$ ) zuverlässig rekonstruiert und angewertet werden können. Detaillierte Informationen zur tomographischen Rekonstruktion eines Volumens aus wenigen Kameransichten sind in Abschnitt 7.1 beschrieben. Das Ergebnis des Vorverarbeitungsschritts ist die Intensitätsverteilung der zurückstreuenden Partikel in einem Volumen. Die Geschwindigkeitsvektoren im Volumen werden mit einem 3D Kreuzkorrelationsalgorithmus bestimmt. Scarano et al. (2006) setzen diesen mit Hilfe einer 3D Erweiterung des WIDIM-Algorithmus (Scarano und Riethmuller, 2000) um.

Die Größe der Beobachtungsfläche bei allen beschriebenen PIV-Methoden ist letztlich durch das Sensorformat der Kamera(s) und die Partikelgröße beschränkt. Die Partikel müssen im Rahmen der Messstrategie im Bild noch zu erkennen sein.

Die bisherige Entwicklung lässt den Schluss zu, dass das Bestreben hin zu zeitaufgelösten 3D3C-Verfahren geht, die mit hoher Partikeldichte zu guten Ergebnissen gelangen. Der Trend zu tomographischen Verfahren wird, vom jetzigen Zeitpunkt aus gesehen, für viele Neuentwicklungen sorgen.

### 1.1.2 Particle Tracking Velocimetry

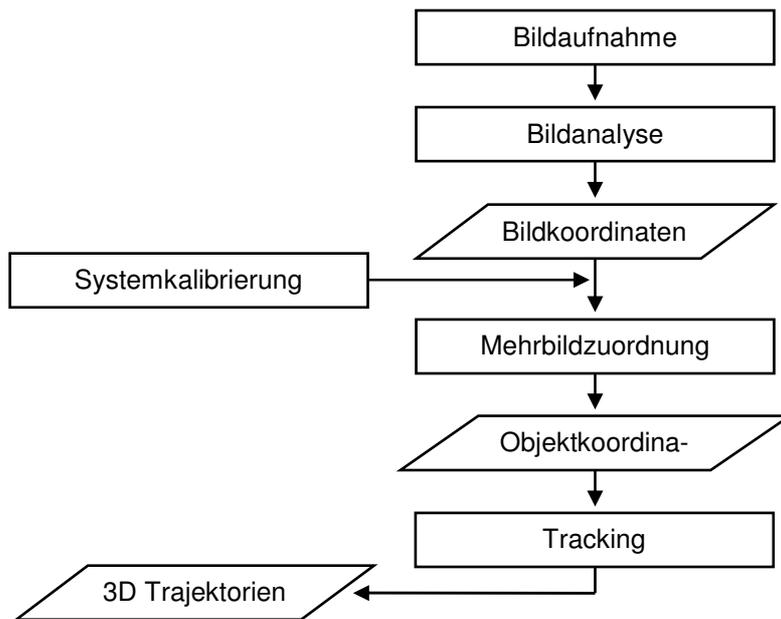
Die oben vorgestellten PIV Techniken beruhen auf Grund der hohen Seedingdichte<sup>1</sup> auf flächenbasierten Zuordnungsalgorithmen. Wird die Partikeldichte verringert, bietet sich die Möglichkeit, individuelle Partikel zu detektieren und deren Verschiebung zwischen den einzelnen Epochen zu bestimmen. Adamczyk und Rimai (1988a) wenden dieses Prinzip für eine zweidimensionale Strömung in einer dicken Schicht an. Dabei werden bis zu 30 Tracer je Epoche bestimmt. Durch Überlagerung mehrerer Epochen ergibt sich ein gemitteltes Geschwindigkeitsfeld.

Zur vollständigen Bestimmung der dreidimensionalen Informationen führen Mass et al. (1993) und Guenzenner et al. (1994) weitere Kameras und eine volumenhafte Beleuchtung ein. Aus den in einem ersten Schritt bestimmten Bildkoordinaten individueller Partikelabbilder (siehe Abschnitt 3.1) werden durch Mehrbildzuordnung (siehe Abschnitt 3.2.2) die 3D-Koordinaten dieser Partikel berechnet. Maas (1992b) stellt die zu lösenden Mehrdeutigkeiten der Mehrbildzuordnung in Abhängigkeit verschiedener Parameter (Kamerakonfiguration, Ausdehnung des Beobachtungsvolumen, Partikelanzahl oder Genauigkeit der Orientierungs- und Kalibrierungsparameter der beteiligten Kameras) dar und empfiehlt die Verwendung von mehr als zwei Kameras. Brücker und Althaus (1992) und Hoyer et al. (2005) ersetzen die Volumenbeleuchtung durch eine scannende Lichtschicht (Abbildung 1.2). Dies hat den Vorteil, dass die Seedingdichte erhöht werden kann, ohne die Zuverlässigkeit der Lösung der Mehrdeutigkeiten einzuschränken. Es muss jedoch der zeitliche Unterschied der einzelnen Schichten in der weiteren Auswertung berücksichtigt werden.

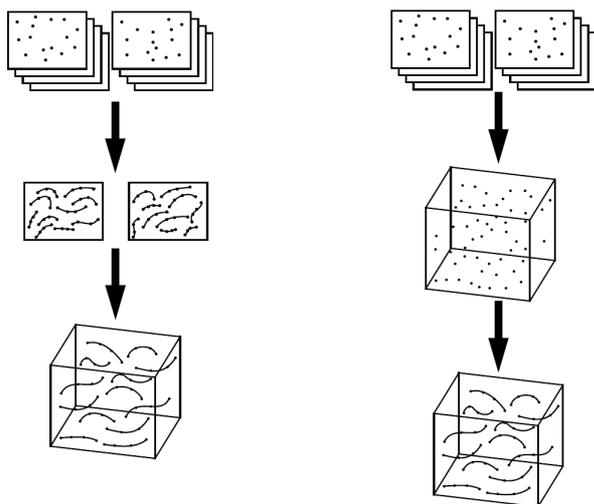
In einem nächsten Schritt werden die zeitlichen Zuordnungen, das Tracking, der diskreten Positionen gelöst. Das Ergebnis sind dreidimensionale Geschwindigkeitsvektoren und Trajektorien. In Abbildung 1.3 ist der prinzipielle Ablauf einer 3D-PTV-Auswertung dargestellt.

---

<sup>1</sup> Seeding (*seed – engl., Samen*) bezeichnet die künstlich zugeführten Partikel bzw. Tracer, um eine Strömung zu visualisieren.



**Abbildung 1.3: Ablaufschema des 3D-PTV**



**Abbildung 1.4: Bild- und objektraumbasiertes Tracking (Willneff, 2003)**

Für die Lösung der spatio-temporalen Zuordnung gibt es prinzipiell zwei Ansätze:

- Aus den diskreten Positionen der Partikel im Bildraum werden durch ein temporales Zuordnungsverfahren zweidimensionale Bahnlinien (je Bild) bestimmt. Sodann werden aus homologen Bahnlinien dreidimensionale Trajektorien berechnet (Abbildung 1.4 links).
- Zunächst werden die 3D-Partikelpositionen aller Partikel und Epochen mit Hilfe der Mehrbildzuordnung bestimmt. Im Folgenden werden durch räumliche Trackingverfahren die 3D-Trajektorien ermittelt (Abbildung 1.4 rechts).

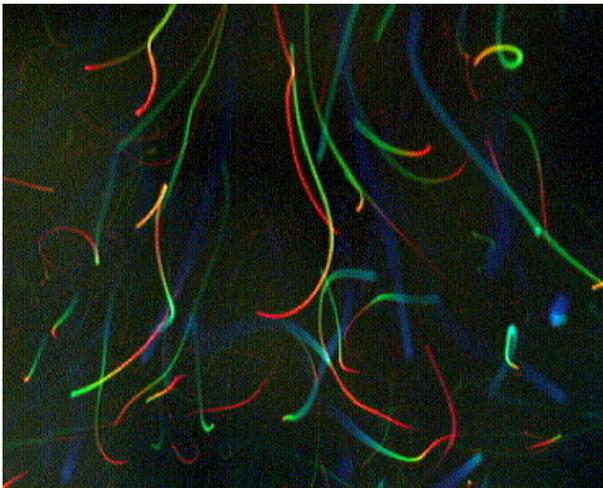
Eine Kombination der beiden Verfahren ist ebenso denkbar und wird in Willneff (2003) vorgestellt. Durch die Projektion des Beobachtungsvolumens auf jeweils die Sensorebene ist mit zunehmender Tiefenausdehnung der mittlere Abstand der zu verfolgenden Partikelabbilder zu den Nachbarn kleiner, was ein 2D-Tracking turbulenter Strömungen erschwert. Aus diesem Grund sind räumliche Zuordnungsverfahren,

eventuell unter Zuhilfenahme von bildbasiertem oder strömungsmechanischem Vorwissen, als geeigneter für große Tiefenausdehnungen einzuschätzen. Eine Auswahl an verschiedenen Trackingverfahren ist in Abschnitt 1.2 erläutert.

### 1.1.3 Particle Streak Velocimetry und Rainbow Volume Velocimetry

Im Gegensatz zur PTV werden bei der Particle Streak Velocimetry (PSV) keine zeitlichen Zuordnungen der diskreten Positionen (2D oder 3D) bestimmt, sondern es wird die beim PTV zu vermeidende Bewegungsunschärfe als Auswertemerkmal genutzt. Durch Langzeitbelichtung jeder Epoche werden die einzelnen Partikel als Streaks (*engl., Streifen, Striche*) abgebildet. Dabei beinhalten die Länge und Form der Streaks Informationen über die auf den Sensor projizierten Geschwindigkeiten der einzelnen Partikel. Leue et al. (1996) zeigen eine momentenbasierte Methode, um die Länge und Orientierung der Streaks mit Hilfe einer eingepassten Gauß-Funktion zu bestimmen.

Dimotakis et al. (1981) nutzen das 2D PSV zur qualitativen und quantitativen Auswertung von Einzelbildern einer flächig beleuchteten Strömung. Jeder Streak repräsentiert eine mittlere Geschwindigkeit; Geschwindigkeitsänderungen der Partikel innerhalb der Belichtungszeit können mit dieser Methode nicht erfasst werden. Diesen Nachteil kompensieren Wung und Tseng (1992) durch eine Farbkodierung während der Langzeitbelichtung. Die vom Framegrabber<sup>2</sup> digitalisierten Kameradaten werden mit Hilfe einer Look-up Tabelle binarisiert, farbkodiert und durch einen Maxstore-Algorithmus<sup>3</sup> in einem Einzelbild gespeichert. Die Farbe ermöglicht neben der differenzierten Auswertung der Substreaks auch die Bestimmung der Bewegungsrichtung. Die Erweiterung zur 3D PSV erreichen Sinha und Kuhlmann (1992) und Adamczyk und Rimai (1988b) durch die Einführung einer zweiten Kamera. Die 3D Geschwindigkeitsvektoren werden aus den zuvor automatisch bestimmten 2D Streaks (ähnlich Dimotakis) mittels manueller (Sinha und Kuhlmann) oder automatischer (Adamczyk und Rimai) Mehrbildzuordnung berechnet. Machacek und Rösgen (2001) zeigen, dass die zeitliche Zuordnung der einzelnen Streaks trivial wird, wenn die Kameras nicht geschüttelt werden und die Auslesezeit sehr kurz ist.



**Abbildung 1.5: Rainbow Volume Velocimetry (Prenel und Bailly, 2006)**

Eine spezielle Weiterentwicklung der 3D PSV stellt die Rainbow Volume Velocimetry (RVV) dar. Die diskreten räumlich-zeitlichen Informationen werden mit nur einer Kamera, basierend auf der Verwendung

<sup>2</sup> Der Framegrabber digitalisiert die Analogsignale der Kameras.

<sup>3</sup> In einem Ergebnisbild wird je Pixel der maximale Grauwert aus allen Bildern einer Sequenz gespeichert.

## 1 Einleitung

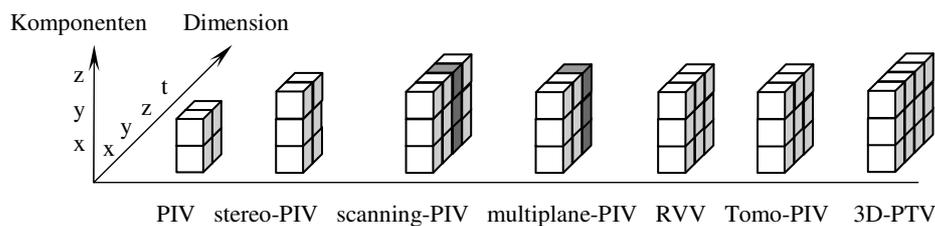
von zusätzlichen Farbinformationen, gewonnen. Dabei wird die Dunkelfeldbeleuchtung nicht mit weißem Licht, sondern durch ein kontinuierliches polychromatisches Spektrum realisiert. Das Spektrum ist dabei so ausgerichtet, dass der Gradient der Wellenlänge in die Beobachtungsrichtung zeigt. Somit kann einem Tracer anhand seiner Farbe bzw. der Wellenlänge eindeutig eine Tiefe zugeordnet werden (Abbildung 1.5). Die Lage ergibt sich, wie in den meisten 2D Verfahren, aus den Bildkoordinaten. Die maximale Tiefenausdehnung ist durch die unterscheidbaren Farben (24 bit) und der angestrebten Tiefengenauigkeit beschränkt. Bailly et al. (2003) geben diese mit 17 mm an.

Durch eine Langzeitbelichtung werden die Tracer als Streaks abgebildet. Für jeden Pixel  $(x, y)$  lassen sich anhand der normierten Farbwerte und einer Look-up-Tabelle die 3D-Koordinaten bestimmen. Durch die Nutzung eines mechanischen Shutters und einer CCD-Kamera mit Zeilensprungverfahren (Interlacing) kann der Streak diskretisiert und dessen Bewegungsrichtung bestimmt werden (Zibret et al., 2003). Neben der Bestimmung der 3D-Koordinaten der einzelnen Segmente muss auch die Zuordnung der einzelnen Abbildungen zu einem Tracer durchgeführt werden. Hierzu verwendet Zibret et al. (2003) eine spatio-colometrische Klassifikation, basierend auf farblicher Ähnlichkeit und räumlicher Nähe. Durch die Erweiterung der Einbildauswertung (zwei Halbbilder) zur Multi-Frame-Analyse gelingt es Malfara et al. (2006), lange Trajektorien zu bestimmen. Die geometrische Genauigkeit der RVV hängt vor allem von der Kalibrierung der räumlichen Farbverteilung ab. Die maximale Anzahl der auswertbaren Tracer wird entscheidend von der Zuverlässigkeit des Zuordnungsalgorithmus bestimmt. Die RVV ist ein zeitaufgelöstes 3D3C-Verfahren.

Ähnlich der Multi-Frame-Analyse gelingt es auch Hering et al. (1995a), lange Trajektorien aus Sequenzen mit streakförmigen Partikeln zu bestimmen. Sie nutzen die signifikante zeitliche Überlappung der Belichtungen zweier Halbbilder einiger Kameras (mit interlaced CCD) aus. Durch die sich berührenden Enden aufeinander folgender Streaks kann das Korrespondenzproblem gelöst werden.

### 1.1.4 Vergleich der Methoden

Die Abbildung 1.6 zeigt eine mögliche Einteilung existierender bildbasierter Strömungsmessverfahren in ihre räumlichen Bezüge. Diese unterscheiden sich vor allem in der Dimensionierung des Beobachtungsvolumen und der Anzahl der bestimmbarer Geschwindigkeitskomponenten. Die Tabelle 1.1 gibt einen Überblick über die Ausdehnung des Messvolumens, die Anzahl der bestimmbarer Geschwindigkeitskomponenten sowie den zeitlichen Zusammenhang der Messwerte.



**Abbildung 1.6: schematische Darstellung der räumlichen Bezüge einiger bildbasierter Strömungsmessmethoden**

| Messverfahren               | Dimension des Beobachtungsvolumens | Anzahl der bestimm-<br>baren Geschwindig-<br>keitskomponenten | zeitlicher Zusammenhang                                  |
|-----------------------------|------------------------------------|---|--|
| PIV                         | 2D                                 | 2C  | Einzelepoch <sup>(1)</sup>                               |
| stereo-PIV                  | 2D                                 | 3C  | Einzelepoch <sup>(1)</sup>                               |
| scanning (stereo)-<br>PIV   | Mehrfach 2D<br>Quasi 3D            | 2C (3C)   | Zeitaufgelöste, nicht simul-<br>tane Messung im Volumens |
| multiplane (stereo)-<br>PIV | 3D, geringe Tiefe                  | 2C (3C)   | Einzelepoch <sup>(1)</sup>                               |
| PSV                         | 2D oder 3D                         | 2C oder 3C  | Zeitaufgelöste Messung                                   |
| RVV                         | 3D                                 | 3C  | Zeitaufgelöste Messung                                   |
| Tomo-PIV                    | 3D                                 | 3C  | Zeitaufgelöste Messung                                   |
| 3D-PTV                      | 3D                                 | 3C + Trajektorien   | Zeitaufgelöste Messung                                   |

**Tabelle 1.1:** Übersicht über ausgewählte bildbasierte Strömungsmessmethoden (<sup>(1)</sup> zeitaufgelöste (time resolved) Messung möglich)

## 1.2 Trackingmethoden

Zu den zuvor beschriebenen Messmethoden und -ansätzen gibt es jeweils eine Vielzahl von verschiedenen Auswertemethoden. Das Tracking umfasst dabei allgemein die zeitliche Zuordnung von korrespondierenden Charakteristika (Bildpunkte, Objektpunkte, Grauwertmuster). Zumeist sind die einzelnen Methoden auf bestimmte Anwendungen zugeschnitten, was sich vor allem in den von den jeweiligen Entwicklern getätigten Annahmen und den daraus abgeleiteten Bedingungen für die Zuordnung auswirkt. Das Ziel, eine vollständige Beschreibung des Strömungsfeldes zu bestimmen, d.h. hochauflösende und hochgenaue Geschwindigkeitsinformationen im gesamten Beobachtungsbereich, ist nicht nur in der Entwicklung der Messmethoden, sondern auch der Trackingmethoden zu erkennen. Die Entwicklung von flächenhaften Zuordnungsverfahren dicht geseedeter Strömungen (PIV) und diskreter Zuordnungsverfahren einzelner Partikel in Strömungen mit moderater Partikeldichte (PTV) geht hin zu kombinierten Verfahren (Super Resolution PIV), bei denen sich die Vorteile beider Verfahren unterstützen.

### 1.2.1 Auswertemethoden für PIV

Im allgemeinen Fall der Particle Image Velocimetry liegt ein Doppelbildpaar vor, dessen Abbildungen eine hohe Partikeldichte und kleine Verschiebungsvektoren zeigen. Im einfachsten Fall werden die Verschiebungsvektoren (entsprechend den beiden Geschwindigkeitskomponenten) mit Hilfe von Kreuzkorrelationen (Keane und Adrian, 1992) bestimmt. Eine effiziente Methode zur Echtzeitverarbeitung implementierten Uemura et al. (1989), indem sie die Kreuzkorrelation auf ein zuvor binarisiertes Bild anwandten. Dabei wird vorausgesetzt, dass in den kleinen Regionen (interrogation window) eine gleichförmige Bewegung stattfindet. In der Realität finden weitere Bewegungen, wie Rotation, Scherung und Expansion, innerhalb des Auswertebereichs statt. Deshalb wurden verschiedene Ansätze entwickelt, um einen erweiterten Parametersatz oder Vorwissen in den Auswerteprozess zu integrieren. Scarano (2002) zeigt verschiedene Methoden zur Genauigkeitssteigerung durch eine iterative Deformation jedes Abfragefensters. Durch die Anpassung können mit Kreuzkorrelation trotz Geschwindigkeitsgradienten im Abfrage-

## 1 Einleitung

---

fenster sichere Ergebnisse erzielt werden. Bei der Anwendung zusätzlicher Multigridverfahren (Sacrano und Riethmuller, 1999), bei denen die Größen der Auswertefenster sukzessive verkleinert werden (Grob-zu-Fein Ansatz), kann sowohl der Dynamikumfang der Messergebnisse erweitert, als auch die räumliche Auflösung verbessert werden. Tianding (2005) nutzt statt der Kreuzkorrelation den Ansatz der Affintransformation, um neben der Translation auch Parameter für die Rotation, Dilatation, Stauchung und Scherung zu bestimmen.

Eine Erweiterung der Kreuzkorrelation vom 2D-Pixelraum auf den 3D-Voxelraum nutzen Scarano et al. (2006) zur Bestimmung der nunmehr drei Geschwindigkeitskomponenten des Tomo-PIV. Wieneke und Taylor (2006) ergänzen die Methode durch die Deformation des Abfragevolumens, analog zum 2D PIV. Maas et al. (1994) wenden auf die Volumendaten statt der Kreuzkorrelation ein 3D Least Squares Matching an und bestimmen so die 12 Parameter der 3D-Affintransformation.

Basierend auf der kontinuierlichen Veränderung der Grauwertverteilung aufeinander folgender Bildsequenzen nutzen Horn und Schunck (1981) den optischen Fluss (Jähne, 1997) aus, um das Geschwindigkeitsfeld mit einem globalen Ansatz zu lösen. Die eingeführte Bedingung fordert lediglich, die Grauwertgradienten über das gesamte Bild zu minimieren. Ruhnau und Schnörr (2007) ersetzen den Regularisierungsterm durch einen physikalischen Ansatz. Sie stellen die Nebenbedingung, dass die Stokes-Gleichung erfüllt wird. Neben dem Geschwindigkeitsfeld enthält das Ergebnis zusätzlich Informationen über die Druck- und Kraftverteilung im Beobachtungsfeld.

### 1.2.2 Super-Resolution PIV

Die Leistungsfähigkeit von PIV-Auswertesystemen definiert sich über deren räumliche Auflösung, der Auswerterate und -genauigkeit. Die räumliche Auflösung für korrelationsbasierte Methoden ergibt sich aus der Größe der Beobachtungsfläche und der Größe der Auswertefenster. Letztendlich werden die Verschiebebeträge durch Mittelung über eine Anzahl von Partikeln bestimmt. Keane et al. (1995) kombinieren erstmals eine Korrelationsmethode mit einem Partikel Tracking und bezeichnen dieses Verfahren als Super-Resolution PIV. Sie wenden nach einer ersten Näherungswertbestimmung kleine Abfragefenster direkt auf zuvor bestimmte Einzelpartikel an. Theunissen et al. (2004) verringern durch einen IPC-Algorithmus (individual particle correlation) die systematischen Fehler resultierend aus den kleinen Abfragefenstern. Damit können sie die maximale Auflösung mit dem Ansatz des Super-Resolution PIV um den Faktor  $\sqrt{N}$  ( $N$  = Bilddichte, Maß für die räumliche Dichte der abgebildeten Partikel) steigern. Takahara et al. (2000) ergänzen diesen Ansatz um einen Kalman-Tracker, um die temporale Zuordnung zuverlässiger zu gestalten. Der Kalman-Tracker wurde speziell an die Anforderung von nur zwei aufeinander folgenden Zeitschritten angepasst (Etho und Takahara, 1995). Mit diesem Zusatz konnte die räumliche Auflösung um den Faktor 3 im Vergleich zu herkömmlichen PIV-Auswertemethoden verbessert werden.

Cowen und Monismith (1997) bezeichnen einen ähnlichen Ansatz als hybride Particle Tracking Velocimetry Technik. Sie bereinigen die Ergebnisse einer PIV-Auswertung und bestimmen zusätzlich die Subpixelpositionen aller Partikel. Im Anschluss führen sie ein Tracking der diskreten Partikel durch, wobei die Ergebnisse der PIV-Auswertung als Vorwissen in die Analyse eingeführt werden.

Stellmacher und Obermayer (2000) bestimmen aus PIV-Aufnahmen in Anlehnung an Keane et al. (1995) sowohl lokale Strömungsparameter als auch Partikelkorrespondenzen. Dies geschieht simultan und iterativ. Gelöste Korrespondenzen stützen die Strömungsbestimmung, diese wiederum die Lösung der Mehrdeutigkeiten des Partikeltracking. Die Lösung der Partikelzuordnung geschieht durch die Optimierung einer Kostenfunktion unter der Prämisse der Maximierung der Entropie. Für alle Partikel innerhalb zweier korrespondierender Abfragefenster werden mittels Permutation alle theoretischen Kombinationen aufgestellt und anschließend eliminiert. Als Eliminationskriterium dient die Qualität jeder Kombination, die sich aus der Übereinstimmung mit dem lokalen Strömungsverhalten der Region, das durch eine Affintransformation approximiert wird, ergibt. Mit dieser kombinierten Methode gelingt es Stellmacher und Obermayer, auch Strömungen mit höheren Geschwindigkeitsgradienten oder geringer Partikeldichte zu-

verlässig auszuwerten. Der zweite Punkt lässt darauf schließen, dass die beiden Anteile des kombinierten Ansatzes auch einzeln robust arbeiten, sich aber idealerweise positiv ergänzen.

Wernet (2001) zeigt den Einsatz von Fuzzy-Logic-Strategien zur Lösung der kombinierten korrelationsgestützten Trackingmethoden. Zum einen ist der Ansatz ähnlich zu Stellmacher und Obermayer, indem alle Kombinationen einer Region als theoretische Lösung angesetzt und über die Annahme, dass sich Partikel in nächster Nachbarschaft gleich verhalten, falsche Zuordnungen eliminiert werden. Zusätzlich untersucht Wernet die Korrelationspeaks der Kreuzkorrelation genauer. Nicht der höchste Wert repräsentiert die gesuchte Verschiebung (dieser kann durch Rauschen oder verschiedene Partikelgrößen verfälscht sein), sondern der, der die größte Ähnlichkeit mit zuordenbaren Partikelpaaren der Region aufweist. Mit dieser Methode konnte Wernet vor allem systematische Effekte beseitigen.

### 1.2.3 Auswertemethoden für PTV

Alle Methoden der Particle Tracking Velocimetry zielen darauf ab, zuvor bestimmte diskrete Bild- oder Objektpunkte über die Zeit zu verfolgen. In den letzten Jahren wurde eine Vielzahl von Methoden entwickelt. Sie lassen sich zumeist in eine der vier folgenden Methoden unterteilen. Je nach Ansatz wird durch eine Kostenfunktion (z.B. Oullette und Xu, 2006) oder Gewichtung entschieden, welche der Trajektorien als korrekt gelten. Zusätzlich werden eine Vielzahl unterschiedlicher Nebenbedingungen und Annahmen über die Strömung, das Verhalten von benachbarten Tracern oder über die zeitliche Veränderung der Parameter jedes Partikels genutzt, um ein zuverlässiges Ergebnis des Tracking zu erzielen.

Der einfachste Ansatz ist die Zuordnung des nächsten Nachbarn, welcher aber selten zu einem verwertbaren Ergebnis führt. Die Kosten  $K$  des Vektors eines  $i$ -ten Partikels  $x^n$  der Epoche  $n$  zu einem Partikel  $x^{n+1}$  der Folgepoche bestimmen sich aus:

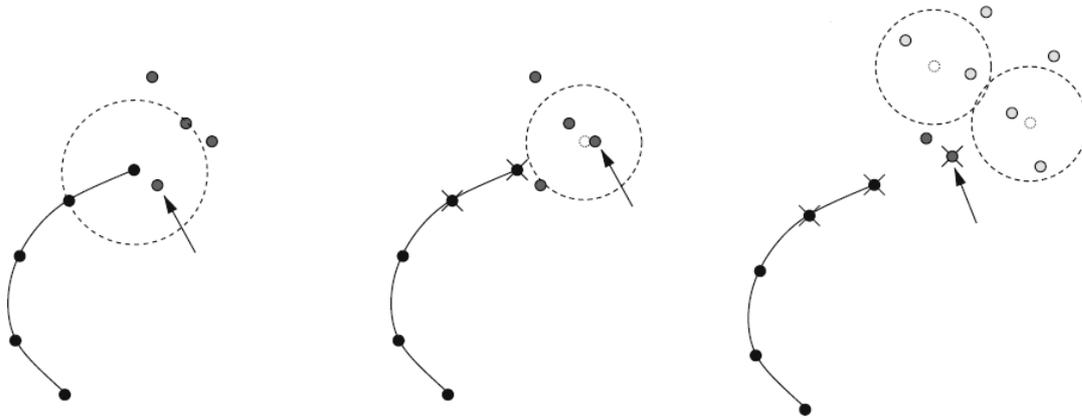
$$K_i^n = |x^{n+1} - x^n| \quad 1.4$$

Ein weiterer Ansatz setzt eine minimale Beschleunigung voraus (auch als 3-Frame-Ansatz bezeichnet). Durch lineare Prädiktion wird der wahrscheinliche Ort des Partikels in der Folgepoche  $n+1$  bestimmt. Die Kosten ergeben sich aus der Partikelbeschleunigung  $a$  (Malik et al., 1993) nach:

$$K_i^n = \frac{|x^{n+1} - 2 \cdot x^n + x^{n-1}|}{2 \cdot \Delta t^2} = a \quad 1.5$$

Häufig wird eine vierte Epoche in die Betrachtung einbezogen. Damit lässt sich die Änderung der Beschleunigung  $\Delta a$  eines Partikels bestimmen. Wird nun angenommen, dass im System die Änderung der Beschleunigung minimal ist, so bestimmen sich die Kosten nach Malik et al. (1993):

$$K_i^n = \frac{|x^{n+2} - 2 \cdot x^{n+1} + x^n| - |x^{n+1} - 2 \cdot x^n + x^{n-1}|}{2 \cdot \Delta t^2} = \Delta a \quad 1.6$$



**Abbildung 1.7:** Skizze möglicher Trackingansätze (links – nächster Nachbar, Mitte – 3-Frame-Ansatz, rechts – 4-Frame-Ansatz; schwarz: schon bestimmte Trajektorie, dunkelgrau: Epoche n+1, hellgrau: Epoche n+2, gestrichelter Kreis: Suchbereich, Kreuze: zur Prädiktion genutzte Partikel [nach Oullette, 2006]

Je nach Methode wird anhand eines Qualitätskriteriums eine mögliche Trajektorie angenommen oder abgelehnt. Mit Hilfe weiterer Entscheidungskriterien innerhalb einer sortierten Liste versuchen die verschiedenen Autoren, die verbleibenden Mehrdeutigkeiten richtig zu lösen. Nachfolgend sind verschiedene Ansätze nach ihrem Hauptentscheidungskriterium und Auswertestrategien zusammengefasst. Viele Autoren setzen dabei nicht nur auf einen Ansatz, sondern kombinieren verschiedene Ansätze.

Zur Beurteilung und zum Vergleich der Strömung in Hinblick auf die Komplexität der Auswertung wurde von verschiedenen Autoren ein Parameter eingeführt, der die Schwierigkeit des Tracking wiedergibt. Der Quotient aus dem mittleren Abstand der Partikel  $\Delta \bar{s}$  (im Objekt- oder Bildraum) und der mittleren Bewegung wird von Malik et al. (1993) genutzt, der reziproke Wert von Young und Johnson (2006).

$$p = \frac{\Delta \bar{s}}{\bar{v} \cdot \Delta t} \quad 1.7$$

Für einen Wert von  $p \gg 1$  wird das Tracking leicht und kann auch durch einen nächster Nachbar-Ansatz gelöst werden. Für  $p \ll 1$  wird das Tracking nahezu unmöglich.

Ansätze mit Betrachtung lokaler oder globaler Strömungseigenschaften

Guezennec et al. (1994) führen nach einem 3-Frame-Ansatz zusätzlich eine Prüfung auf gleichförmige Bewegung benachbarter Partikel ein. Chetverikov und Verestóy (1999) prüfen in Anlehnung an den 4-Frame-Ansatz, ob einfache Lücken geschlossen werden können. Oullette und Xu (2006) ergänzen den 4-Frame-Ansatz um eine nächster Nachbar-Prüfung nach der Prädiktion in die übernächste Epoche. Diese

Ansätze können sowohl im Zweidimensionalen als auch für eine dreidimensionale Zuordnung genutzt werden.

Mehrere Autoren beziehen in die Analyse nicht nur die einzelne Trajektorie ein, sondern betrachten die notwendige Energie im Strömungsfeld. Okamoto et al. (1995) führen ein Federmodell ein, um die notwendige Energie zur Veränderung der Partikelkonstellation zu minimieren. Benachbarte Partikel sind dabei durch virtuelle Federn miteinander verbunden. Eine Veränderung des Abstandes zwischen zwei Partikeln bewirkt dabei eine Veränderung der Energie der Feder. Ruhnau et al. (2004) bestimmen die notwendige Energie, die für die jeweilige Partikelverschiebung notwendig ist. Dieses Energiefunktional wird nun global für das gesamte Beobachtungsvolumen iterativ bestimmt und minimiert. Dies führt letztendlich dazu, dass jeder Vektor Auswirkung auf seine Umgebung hat. Dies steigert sowohl die Zuverlässigkeit als auch die Anzahl der bestimmbarer Trajektorien.

### Wahrscheinlichkeitsbasierte Auswertungsansätze

Neben der Lösung der Mehrdeutigkeiten anhand fester Kriterien nutzen einige Autoren eine statistische bzw. unscharfe Betrachtung der Eigenschaften. Zumeist werden verschiedene Kriterien festgelegt, die für eine existierende Trajektorie gelten müssen. Sodann wird eine Vorschrift bestimmt, mit der die Wahrscheinlichkeit der Richtigkeit einer zu begutachtenden Trajektorie berechnet wird.

Hassan und Canaan (1991) führen zur Bewertung Standardabweichungen für die Längen und Winkel von Trajektorienstücken ein. Unter der Prämisse, dass geringe Standardabweichungen besser als höhere sind und dass jeder Bildpunkt nur zu einer Trajektorie gehören darf, werden die „optimalen“ Ergebnisse bestimmt. Baek und Lee (1996) kombinieren zuerst in einem kleinen Bereich alle möglichen Partikel zweier aufeinander folgender Zeitschritte miteinander und vergeben für jede Kombination eine initiale Wahrscheinlichkeit. Iterativ werden die Wahrscheinlichkeiten aller Kombinationen angepasst, wobei sich die neue aus den Werten der Nachbarschaften zusammensetzt. Letztendlich führt dies dazu, dass sich die Konstellation durchsetzt, bei der alle Vektoren quasi in dieselbe Richtung zeigen. Ohmi und Hang Yu (2000) erweitern diesen Ansatz, um eine zuverlässigere Auswertung von höheren Geschwindigkeitsgradienten zu gewährleisten. Es wird nicht mehr auf eine quasi-parallele Bewegung innerhalb des Auswertebereichs optimiert. Zusätzlich führen Ohmi und Hang Yu die Möglichkeit ein, dass keine Zuordnung durchgeführt werden kann. Mit diesen Ergänzungen konnte die Zahl der fehlerhaften Verknüpfungen um etwa 5% reduziert werden. Pereira et al. (2006) zeigen, dass diese Methode gegenüber anderen gängigen Methoden zuverlässige Ergebnisse für verschiedene Strömungen liefert.

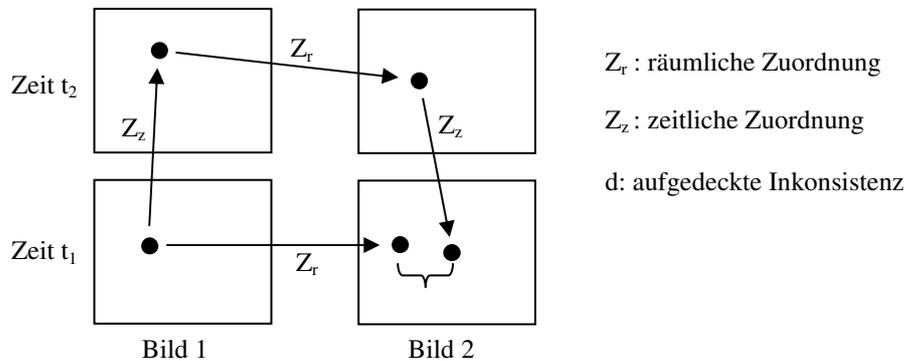
Hering (1996) wendet einen an Fuzzy Logic angelehnten Optimierungsalgorithmus an, um die Mehrdeutigkeiten zu lösen. Die Entscheidung beruht auf der Auswertung sowohl örtlicher (Position, Geschwindigkeit und Beschleunigung) als auch bildhafter (Grauwertsumme und Fläche jedes abgebildeten Partikels) Eigenschaften.

### Kombinierte Auswertung von Bild- und Objektraumeigenschaften

Die 3D-PTV-Verfahren sind darauf ausgelegt, Trajektorien im Raum zu bestimmen. Wie oben erwähnt, werden von verschiedenen Autoren verschiedene Ansätze verfolgt. Das eigentliche Tracking kann im Bild- oder Objektraum durchgeführt werden. Einige Autoren nutzen die redundanten Informationen, um das Tracking im Objektraum durch Informationen des Bildraumes zu stärken. Willneff und Gruen (2002) und Hering (1996) ergänzen zu den kinematischen Bedingungen im Objektraum noch bildbasierte Eigenschaften der Tracer. Diese beschreiben die Form und Helligkeit der einzelnen Partikel. Es besteht die Forderung, dass zeitlich homologe Punkte eine Ähnlichkeit in diesen Eigenschaften aufweisen. Maas (1992) stellt fest, dass sich diese Eigenschaften bei gleichförmigen Tracern nicht zur Unterscheidung bzw. Zuordnung eignen. Mit zunehmender Tiefenausdehnung, inhomogener Beleuchtung und verschiedenartiger Partikeln lassen sich diese Merkmale zur Trennung mit heranziehen (siehe unten).

## 1 Einleitung

Eine weitere Möglichkeit, die Redundanzen aus dem Bild- und Objektraum zu nutzen, stellen Bolles und Woodfill (1993) als „loop check“ vor. Hierbei wird die spatio-temporale Konsistenz der Mehrbilddaten geprüft (Abbildung 1.8). Hierbei sei darauf hingewiesen, dass durch die Berechnung der Objektkoordinaten die räumliche Konsistenz aller Bildpunktpaare hinreichend geprüft ist und somit die zeitliche Zuordnung in jedem Fall die Bedingung nach der spatio-temporalen Konsistenz erfüllt.



**Abbildung 1.8: spatio-temporaler „loop check“ [nach Bolles und Woodfill, 1993]**

Willneff (2003) nutzt weiterhin die Informationen des Bildraumes, um Lücken in den 3D-Daten zu schließen. Es wird angenommen, dass an der Stelle einer Lücke in einer Trajektorie die Mehrbildzuordnung nicht gelöst werden konnte. Nun werden die Teilstücke der Trajektorien im Bildraum (aller Bilder) betrachtet und diejenigen Bildpunkte gesucht, die unter der Bedingung der minimalen Beschleunigung den Lückenschluss gewährleisten. Aus diesen Bildpunkten wird der zugehörige Objektpunkt berechnet und in die Trajektorie integriert. Dieser Ansatz impliziert den Versuch, Geisterpartikel zu vermeiden. Mögliche, unsichere Lösungen werden durch einen iterativen Prozess ermittelt.

### Auswertung, basierend auf physischen Eigenschaften der Tracer

Um die bildbasierten Eigenschaften der Partikel zuverlässig zur spatio-temporalen Zuordnung nutzen zu können, variieren einige Autoren speziell die physischen Eigenschaften. Mikheev und Zubtsov (2006) nutzen Partikel verschiedener Durchmesser, die sie durch Analyse der Grauwertverteilung der Abbildungen ermitteln. Die zeitliche Zuordnung basiert in Anlehnung an die nächster Nachbar-Zuordnung, jedoch unter Verwendung des Durchmessers anstatt des Abstandes. An synthetischen Daten mit geeigneter Partikeldurchmesserverteilung konnte eine wesentliche Genauigkeitssteigerung erreicht werden. Tapie et al. (2006) setzen nicht-sphärische und nicht-gleichförmige Partikel ein und klassifizieren diese anhand ihrer abgebildeten Intensität. Sodann folgt die Zuordnung zu einer von n Gruppen anhand ihrer Intensitätseigenschaften. Das Tracking wird nun nicht mit allen gemessenen Partikeln durchgeführt, sondern innerhalb der Gruppen. Damit reduziert sich die Anzahl der möglichen Lösungen um den Faktor n der zuvor eingeteilten Gruppen.

Bordás et al. (2006) klassifizieren die Partikel nicht auf Grund der Form, sondern der Farbe. Die eingefärbten Partikel werden mit Farbkameras beobachtet und mit Hilfe eines neuronalen Netzes der jeweiligen Farbe zugeordnet (Kuhn et al., 2007). Die weitere Auswertung erfolgt analog. Diese Methode hat jedoch einige Nachteile, die den praktischen Einsatz zurzeit in Frage stellen. Wird die Farbinformation mit Hilfe eines Sensors mit Bayer-Muster gewonnen, müssen die Partikel einen wesentlich größeren Durchmesser besitzen, um die Farbinformation gewinnen zu können. Kuhn et al. (2007) zeigen, dass die Partikel einen Durchmesser größer als drei Pixel haben müssen, um die Klassifizierung durchführen zu können. Alternativ können je drei monochrome Kameras mit Filtern im Strahlengang oder 3-Chip-Kameras genutzt werden. Diese Variante ist jedoch unwirtschaftlich, vor allem, wenn auf Grund der Geschwindigkeitsanforde-

rungen Hochgeschwindigkeitskameras notwendig werden. Die Ergebnisse von Kuhn zeigen jedoch, dass mit Hilfe des neuronalen Netzwerkes etwa 89% der farbigen Tracer (aufgenommen durch einen Sensor mit Bayer-Muster) richtig klassifiziert werden konnten.

Im Allgemeinen sind die Algorithmen auf eine spezielle Anwendung optimiert. Dies führt dazu, dass bei veränderten Bedingungen der jeweilige Algorithmus schlechtere Ergebnisse liefert als ein rudimentärer Ansatz. Der in dieser Arbeit gewählte Ansatz basiert auf einem wahrscheinlichkeitsbasierten spatio-temporalen Zuordnungsalgorithmus. Es werden mehrere der hier beschriebenen Ansätze kombiniert, um so den Redundanzanteil der Auswertung zu erhöhen. Um den Algorithmus allgemein zu halten, muss gewährleistet werden, dass ein Merkmal (geometrisch, radiometrisch oder physikalisch), welches nicht zur Lösung des Tracking beitragen kann, die Auswertung nicht negativ beeinflusst. Dieser Ansatz wird in Abschnitt 5 vorgestellt.

### 1.3 Ziel und Inhalt der Arbeit

Das Ziel der Arbeit ist die Entwicklung von Algorithmen zur Optimierung der Leistungsfähigkeit der 3D-PTV. Eine Optimierung der Leistungsfähigkeit bedeutet, Ergebnisse auch unter schwierigen Messbedingungen zu erhalten. Bisher sind für verschiedene ausgewählte Messvolumina und Rahmenbedingungen Lösungen entwickelt worden. Es ergeben sich jedoch immer neue Anwendungen, die mit den existierenden Möglichkeiten nicht ohne weiteres bearbeitet werden können. Exemplarisch sind hier sehr große Volumen und Beobachtungsvolumen in Wasser mit gekrümmten Trennflächen zu nennen. Zum anderen wird durch einen neuen Ansatz die Möglichkeit eingeräumt, Strömungen volumenhaft mit höherer Partikeldichte auszuwerten. Durch eine erhöhte Partikeldichte können gleichzeitig mehr Informationen der Strömung bestimmt werden. Die volumenhafte Auswertung ermöglicht vor allem bei stark räumlich ausgeprägten Strömungen repräsentativere Aussagen gegenüber ebenenbasierten oder punktförmigen Auswerteverfahren.

Basierend auf den bisherigen Ansätzen wurden modulare Erweiterungen vorgenommen, die das Anwendungsspektrum erhöhen. Es sollen Methoden zur Analyse von Strömungen in Luft, Strömungen in Wasser mit komplex parametrisierten Trennscheiben und ein tomographischer Auswerteansatz entwickelt werden. Für drei sehr verschiedene Versuchsanlagen wurde eine optimale Konfiguration entwickelt und mit verschiedenen Hardwarebausteinen umgesetzt. Zum einen wurde ein Spiegelsystem zur Generierung eines virtuellen Mehrkamerasystems zum Einsatz gebracht. Für eine zweite Versuchsanlage mit sehr großem Volumen mussten die bestehenden photogrammetrischen Methoden modifiziert werden, um diese praktisch realisieren zu können. Eine dritte Versuchsanlage zur Analyse von Wasserströmungen zeichnet sich durch ihre komplexe Form aus. Ein erweitertes Mehrmedienmodul erlaubt hier die Beobachtung von Strömungen durch verschiedene Medien hindurch, wobei die Trennflächen beliebig parametrisiert sein können. In Anlehnung an ein neuartiges Messverfahren (Tomo PIV) wird ein neuer Ansatz zur Rekonstruktion der Volumendaten entwickelt. Dieser soll die Grundlage für spätere Arbeiten auf diesem Gebiet legen.

Primär werden in dieser Arbeit neue Methoden zur Messung von Strömungen vorgestellt. Die Einsatzbereitschaft der Methoden wurde mit Experimenten in verschiedenen Versuchsanlagen nachgewiesen. Die Methoden der tomographischen Rekonstruktion sind anhand von synthetischen Daten validiert worden. Im zweiten Abschnitt dieser Arbeit werden einzelne Hardwarekomponenten vorgestellt und deren Bedeutung für die durchgeführten Experimente gezeigt. Der dritte Abschnitt stellt die Grundlagen der eingesetzten Bildverarbeitungsmethoden und des Abbildungsmodells vor. Zusätzlich wird die erreichbare relative Punktlagegenauigkeit analysiert. Im vierten Abschnitt ist ein spezielles Verfahren vorgestellt, welches zur Lösung von Mehrmedienanwendungen genutzt werden kann. Abschnitt Fünf befasst sich mit einem wahrscheinlichkeitsbasierten Trackingalgorithmus, der unterschiedliche geometrische, radiometrische und physikalische Eigenschaften zur zeitlichen Zuordnung verwendet. Im sechsten Abschnitt sind verschiedene Versuchsanlagen beschrieben in die dort erzielten Ergebnisse vorgestellt. Einen Exkurs zur

## 1 Einleitung

---

Fragestellung, was die Verbesserung der Lösung der Mehrdeutigkeiten leistet, gibt es im siebenten Abschnitt. Im achten Abschnitt ist ein neuartiges Konzept zur tomographischen Rekonstruktion der Intensitätsverteilung im Volumen für das Tomo-PIV erläutert. Anhand von synthetischen Datensätzen sind die erreichbaren Genauigkeiten der vorgestellten Methode validiert.

## 2 Hardware und Rahmenbedingungen

Im Folgenden werden Details zu den einzelnen Hardwarekomponenten und deren Konfiguration bei den verschiedenen Anwendungen näher erläutert.

### 2.1 Hardwaregrundlagen der Aufnahmesysteme

Den wesentlichsten Punkt eines optischen Messsystems zur Strömungsmessung stellen die Kameras dar. Diese müssen so konfiguriert sein, dass die Abbildung der relevanten Partikel für die Auswertung eine ausreichende Güte besitzt. Optimiert werden müssen der Abbildungsmaßstab, die Belichtungszeit, die Bildrate und die Beleuchtung. Diese zu optimierenden Parameter müssen auf die zu beobachtenden Partikel und deren Geschwindigkeit als auch den Trackingalgorithmus abgestimmt werden. Da zumeist diese Größen in Konkurrenz zueinander stehen, orientiert man sich in der Praxis am schwächsten Glied der Kette. Diese sind zumeist die zeitliche und räumliche Auflösung der Kameras und die Beleuchtung. Es sind jedoch immer folgende Bedingungen einzuhalten:

- 1) Der Bildmaßstab muss so gewählt werden, dass die genutzten Partikel mit dem Sensor in einer ausreichenden Größe abgebildet werden (abhängig vom Auswertalgorithmus).
- 2) Die Brennweite und das Sensorformat müssen die Beobachtung des gesamten Volumens gewährleisten.
- 3) Die Bildwiederholrate der Kameras muss so hoch sein, dass der Trackingalgorithmus zeitlich homologe Partikel zuverlässig zuordnen kann (abhängig von der Geschwindigkeit).
- 4) Die Belichtungszeit ist so kurz zu wählen, dass sich auf Grund der Bewegung der Partikel keine deutliche Bewegungsunschärfe ergibt (im Gegensatz zur Particle Streak Velocimetry, Abschnitt 1.1.3). Unter bestimmten Bedingungen haben geringe Bewegungsunschärfen keinen Einfluss auf die Genauigkeit der Positionsbestimmung. Wierzimok und Hering (1993) zeigten, dass der Schwerpunkt des Abbildes eines Objektes mit Bewegungsunschärfe der mittleren Position über die Belichtungszeit entspricht.
- 5) Die Beleuchtung des Beobachtungsvolumens muss eine Abbildung gewährleisten.
- 6) Die genutzten Kameras müssen im Rahmen der Messgenauigkeit synchron betrieben werden können (abhängig von der Partikelgeschwindigkeit).

Es ist deutlich zu erkennen, dass zumeist an die Kameras hohe Anforderungen gestellt werden, denen zum jetzigen Zeitpunkt nicht allen gemeinsam durch kommerziell erhältliche Systeme entsprochen werden können. Für die verschiedenen untersuchten Einsatzgebiete (siehe auch Abschnitt 6) haben sich verschiedene Kameratypen empfohlen.

#### 2.1.1 Spiegelreflexkamera

Einige experimentelle Anlagen umfassen sehr große Beobachtungsvolumen (z.B. Ilmenauer Fass 130 m<sup>3</sup>, Abschnitt 6.3), in denen kleine Partikel (heliumgefüllte Seifenblasen, Durchmesser 4 mm) beobachtet werden sollen. Auf Grund dieser Rahmenbedingungen müssen hochauflösende Kameras ( $\approx 3500$  Pixel Bildbreite) genutzt werden. Digitale Spiegelreflexkameras bieten eine solche räumliche Auflösung, erreichen jedoch nur eine Bildwiederholrate von 5 Hz. Dies liegt zum einen an der hohen Datenmenge der einzelnen Bilder ( $\approx 3$  MB je Bild) als auch daran, dass die Bilddaten vorverarbeitet und dann auf Speicherkarten geschrieben werden. Da es sich um eine Amateurkamera handelt und hohe Datenraten nicht nachgefragt werden, gibt es keine Möglichkeit, diese Kameras zu modifizieren. Mit der kürzlich vorge-

## 2 Hardware und Rahmenbedingungen

---

stellten Kamera Casio Exilim Pro EX-F1 gibt es neue Impulse auf dem Markt, die sicher in naher Zukunft zu einer verbesserten Auswahl an schnellen, hochauflösenden Amateurkameras führen.

Die Synchronisation dieser Kameras ist wenig aufwendig. Durch eine Triggerquelle werden die einzelnen Bilder der Kameras ausgelöst. Die Synchronität der Kameras lässt sich anhand einer Stoppuhr nachweisen. Die Beleuchtung dieses Volumens ist selbst unter der Prämisse, dass kein Wärmeeintrag in das Volumen geschehen darf, weniger problematisch. Blitzlampen sind bei der Erfüllung beider Anforderungen sehr hilfreich (siehe Abschnitt 2.4).

### 2.1.2 Industriekamera

Höhere Datenraten sind mit Industriekameras zu erreichen. Diese werden direkt an einen Steuerrechner angeschlossen. Die Datenspeicherung erfolgt im Arbeitsspeicher des PC, wobei der limitierende Faktor die Datenübertragung ist. Mögliche digitale Übertragungsstandards sind Firewire IEEE 1394a (50MB/s), IEEE 1994b (100MB/s) oder Gigabit Ethernet (125 MB/s) sowie Kameralink (340MB/s – 680 MB/s).

Neben der Art der Datenleitungen von den Kameras zum PC stellt der Bus des PCs einen weiteren Flaschenhals zum Arbeitsspeicher dar. Die konsequente Nutzung des PCI-Express-Bus (sofern alle Komponenten hierfür verfügbar sind) erlaubt eine theoretische Datenrate von bis zu 250 MB/s je Lane des PCI-Express-Bus. Dennoch kommt es in der Praxis auf Grund des nicht optimalen Zusammenspiels verschiedener Hardwarekomponenten und Softwaremodulen zu Verzögerungen und somit zu geringeren effektiven Datenraten. Demnach können Industriekameras an PCs nicht gleichzeitig mit hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung betrieben werden. Leistungsfähigere Mehrkamerasysteme sind zurzeit nur durch Industrierechner bzw. integrierte Systeme zuverlässig im Sinne von kontrollierter Bildübertragung zu betreiben.

Bei Industriekameras ist zumeist die Möglichkeit gegeben, diese per Triggersignal auszulösen. Dieses Signal kann entweder durch eine ausgewählte Kamera im Aufnahmeverband oder durch eine externe Triggerquelle gesendet werden.

### 2.1.3 Hochgeschwindigkeitskamera

Sehr hohe Datenraten erfordern einen stark erhöhten Hardwareaufwand. Im Allgemeinen sind spezielle Hochgeschwindigkeitskameras notwendig, um Sequenzen mit >500 Bildern pro Sekunde aufzuzeichnen. Es gibt für solche Kameras verschiedene Konzepte, die sich vor allem an den jeweiligen Anforderungen orientieren (Doppelbildkameras, Kameras mit Ringspeicher, mehrere Kameras im optischen Weg eingekoppelt). Für lange Sequenzen mit gleichmäßiger zeitlicher Abtastung bieten sich Kameras mit Ringspeicher an. Diese sind so konzipiert, dass die Bilddaten mit einer hohen Bandbreite direkt und fortlaufend in einem ringartigen Speicher (First In – First Out) abgelegt werden. Das Triggersignal dient als Zeitstempel und Signal für einen Schreibschutz des Ringspeichers. Die Größe dieses Ringspeichers ist hier der limitierende Faktor der maximalen Sequenzlänge.

Typische Sensorgrößen betragen 1 bis 2 Megapixel bei 1000 Hertz. Durch den Einsatz von CMOS Sensoren ist es möglich, das aktive Sensorformat durch selektives Auslesen einzuschränken und gleichzeitig die Aufnahmefrequenz zu erhöhen.

Die Synchronisation mehrerer Hochgeschwindigkeitskameras, vor allem die verschiedener Hersteller, ist nicht immer einfach. Ein Versatz von 0,5 ms bedeutet bei typischen Aufnahmen einen Unterschied von  $\frac{1}{2}$  Bild und ist somit nicht tragbar. Raguse (2007) zeigt eine Möglichkeit, den systematischen Anteil (Offset und Drift) des Synchronisationsfehlers rechnerisch zu korrigieren. Alternativ kann es sich unter bestimmten Gegebenheiten anbieten, das Mehrkamerasystem virtuell mit Hilfe eines Spiegelsystems zu generieren (siehe Abschnitt 2.3).

## 2.2 Konfiguration des Aufnahmesystems

Neben der Auswahl geeigneter Kameras ist deren Anordnung von entscheidender Bedeutung für ein leistungsfähiges Messsystem. Einige Bedingungen werden selbstverständlich eingehalten, andere sind durch Simulation zu optimieren. Folgende Punkte sind bei jeder Messsystemkonfiguration zu beachten:

- Messvolumen im Sichtbereich einer ausreichenden Anzahl von Kameras
- Scharfabbildung des Messvolumens
- günstige Strahlenschnittwinkel zum Erreichen der geforderten Genauigkeit
- Möglichkeit der Orientierung und Kalibrierung der Kameras

Besonders die scharfe Abbildung der Partikel ist von entscheidender Bedeutung. Um durch eine Simulation die Konfiguration zu optimieren, muss die zugrunde liegende Strahlenoptik betrachtet werden. Das strahlenoptische Grundgesetz für scharfe Abbildungen (Gleichung 2.1) stellt den Zusammenhang zwischen der Gegenstandsweite  $g$ , der Bildweite  $b$  und der Brennweite  $f$  her.

$$\frac{1}{g} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f} \quad 2.1$$

Für ein festes optisches System mit vorgegebener Bild- und Brennweite werden nur die Gegenstände der Gegenstandsebene scharf abgebildet. Ist die optische Achse senkrecht zur Bildebene, so ist die zugehörige Gegenstandsebene parallel zur Bildebene. Gegenstände vor oder hinter der Gegenstandsebene werden unscharf, mit einem Zerstreukreis  $u$ , abgebildet. In praktischen Anwendungen werden Abbildungen auch dann noch als scharf betrachtet, wenn  $u$  weniger als 1 Pixel beträgt. Demnach sind die Bereiche (vor und hinter der Gegenstandsebene ( $g_v$  und  $g_h$ , Gleichung 2.2) ebenso als Messbereich einsetzbar.

$$g_v = \frac{g}{1 + K}$$

$$g_h = \frac{g}{1 - K} \quad 2.2$$

mit

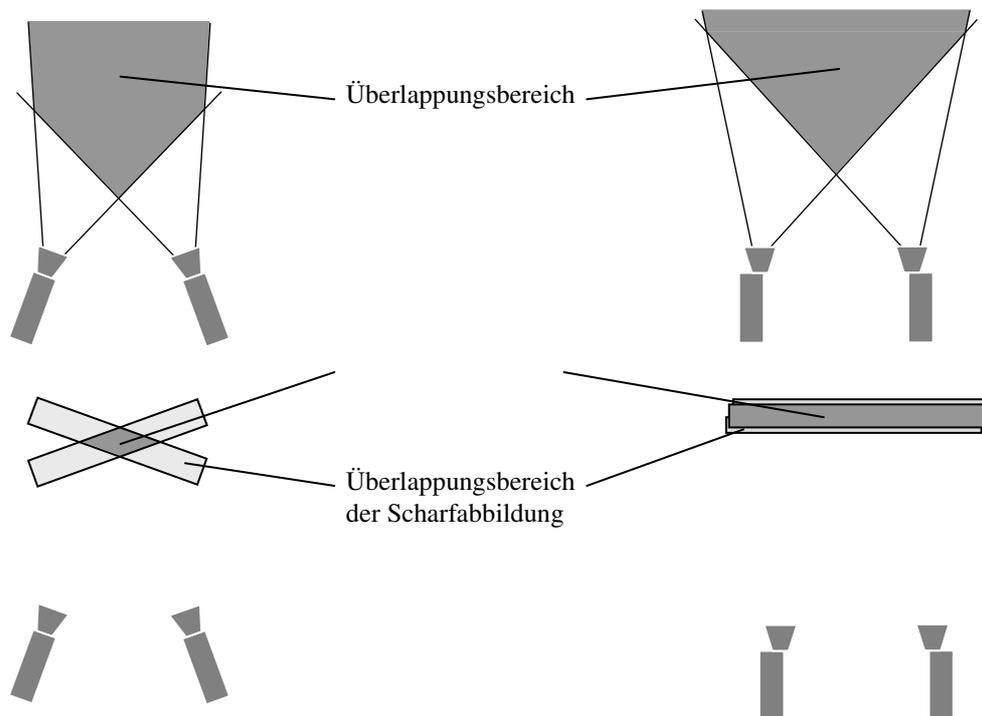
$$K = \frac{k \cdot (g - f) \cdot u}{f^2}$$

Die Ausdehnung des Schärfentiefebereiches kann demnach durch die Blendenzahl  $k$  verändert werden. Vor allem beim Einsatz von Kameras mit hoher zeitlicher Auflösung ist aber auf Grund der begrenzten Lichtmenge nur die Einstellung von kleinen Blendenzahlen möglich.

Im Allgemeinen werden die Kameras konvergent zueinander angeordnet, damit ein sehr großer Überlappungsbereich zur Bestimmung von Objektkoordinaten entsteht. Sind die Schärfentiefebereiche der Kameras gering, so ergibt sich bei konvergent angeordneten Kameras ein geringer scharf abgebildeter Überlappungsbereich (Abbildung 2.1 links). Es gibt verschiedene Methoden, um dieses Problem zu lösen. Der Überlappungsbereich von Kameras mit parallelen Aufnahmeachsen ist abhängig vom Bildmaßstab und der Aufnahmebasis. Durch die Verschiebung des Bildhauptpunktes lässt sich bei gleichem Basis-Höhen

## 2 Hardware und Rahmenbedingungen

Verhältnis die Überlappung vergrößern (Abbildung 2.1 rechts). Die Auswertung optischer Systeme mit exzentrischen Bildhauptpunkten ist unproblematisch (2.3.2).



**Abbildung 2.1:** Überlappungsbereich und Lage der Schärfentiefenbereiche konvergent angeordneter Kameras (links) und von Kameras mit exzentrischem Hauptpunkt (rechts)

Unter Berücksichtigung der Scheimpflug-Bedingung kann der scharf abgebildete Überlappungsbereich ebenso vergrößert werden. Diese Bedingung ist erfüllt, wenn sich die Bild-, Objektiv- und Gegenstandsebene in einer Schnittgeraden schneiden. Durch die gezielte Neigung des Objektivs lassen sich so spezielle Schärfereinstellungen vornehmen. Hierbei verändert sich die Abbildungsgeometrie. Dies muss für die Berechnung von Objektkoordinaten berücksichtigt werden.

### 2.3 Spiegelsysteme

Es ist möglich, Spiegelsysteme zu nutzen, um virtuelle Mehrkamerasysteme zu generieren. Dabei werden die Bildstrahlen durch einen Strahlteiler direkt vor dem Objektiv aufgeteilt. Durch Umlenkung der einzelnen Bildstrahlenbündel können Sichten aus mehreren Perspektiven auf einem Sensor abgebildet werden. Somit entspricht jedes Strahlenbündel einer virtuellen Kamera.

Neben den wirtschaftlichen Aspekten (Kosten für nur eine Kamera) bietet der Einsatz von Spiegelsystemen auch praktische Vorteile. Ein wesentlicher Vorteil ist, dass keine Bemühungen zum Synchronisieren mehrerer Kameras unternommen werden müssen. Zum Einsatz kommen solche Spiegelsysteme in verschiedenen Bereichen dynamischer Prozesse, unter anderem bei einem Stereo-PIV (Arroyo und Greated, 1991) und einem 3D-PTV-System (Putze, 2004) mit einer Kamera, bei Crashversuchen der Automobilindustrie (Putze et al., 2007), zur Analyse von Materialtests im Bauingenieurwesen (Maas und Hampel, 2006) und zur Beobachtung von biologischen Vorgängen (Forterre et al., 2005).

Sicherlich dürfen an dieser Stelle auch die Nachteile nicht außer Acht gelassen werden. Es ist offensichtlich, dass die aktive Sensorfläche jeder virtuellen Kamera verringert wird. Bei manchen Anwendungen stimmen die vorgegebenen Seitenverhältnisse des Sensorformats und des Objektes nicht überein. Vor allem bei dem Einsatz von Hochgeschwindigkeitskameras muss die Sensorfläche verringert werden, um

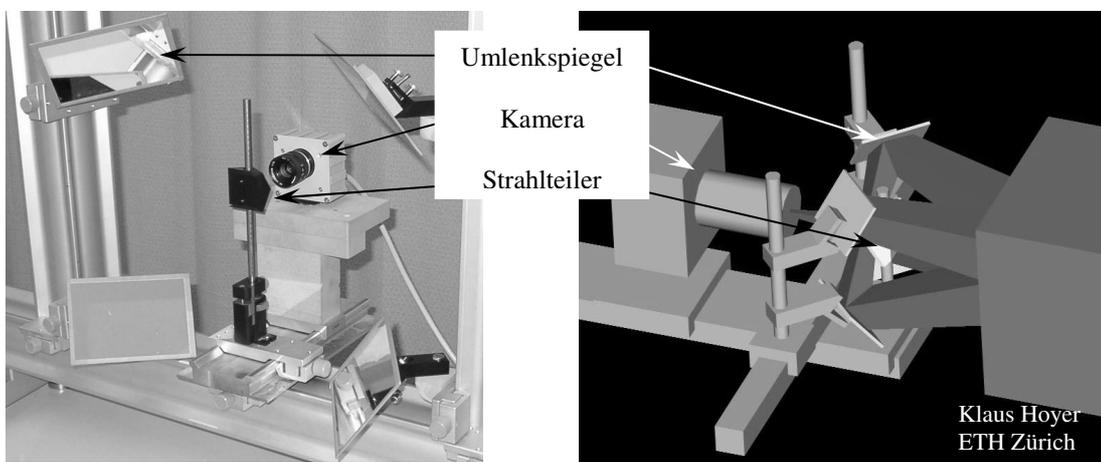
eine höhere zeitliche Auflösung zu erreichen. Hier ist es möglich, die Spiegel so zu integrieren, dass das aktive Sensorformat kaum beeinträchtigt wird (Abbildung 2.2).



**Abbildung 2.2:** links: Bild eines virtuellen Stereokamerasystems, erzeugt durch ein Spiegelvorsatz vor einer Hochgeschwindigkeitskamera mit rechteckigem Sensorformat (Putze et al., 2007); rechts: Bild eines virtuellen Stereokamerasystems zur Aufnahme einer Venusfliegenfalle (Forterre et al., 2005)

### 2.3.1 Konfiguration eines Spiegelsystems

Spiegelsysteme zur Erzeugung von Stereobildern mit einer Kamera sind schon seit vielen Jahren etabliert. Für fotografische Anwendungen mit Spiegelreflexkameras gibt es Strahlteiler mit integriertem Objektiv. Hier entspricht die Basis der virtuellen Kameras in etwa dem menschlichen Augenabstand. Damit wird das stereoskopische Betrachten der aufgenommenen Bilder möglich. Schöller (1981) beschreibt einen ersten analytischen Ansatz zur Modellierung und photogrammetrischen Auswertung der Bilder von Kameras mit Stereovorsatz. Spiegelsysteme für den messtechnischen Einsatz benötigen eine spezifischere Konfiguration als die Strahlteilerobjektive der Spiegelreflexkameras. Konvergente Anordnungen und größere Basislängen sind obligatorisch für Anwendungen mit hohen Genauigkeitsanforderungen.



**Abbildung 2.3:** schematische Darstellung eines vierfachen Strahlteilers (rechts) und eingesetzter Laboraufbau mit Hochgeschwindigkeitskamera (links)

Das Herzstück des im Rahmen dieses Projektes genutzten Systems ist ein pyramidenförmiger Strahlteiler. Dieser ist direkt vor dem Objektiv der Kamera platziert (Abbildung 2.3). Die Bildstrahlen werden in vier gleiche Bündel geteilt und rechtwinklig abgelenkt. Durch die größeren Umlenkspiegel werden die Strahlenbündel auf das Beobachtungsvolumen gelenkt (Abbildung 2.3 rechts). Die flexible Befestigung der Umlenkspiegel ermöglicht eine freie Einstellung ihrer 5 Freiheitsgrade. So lassen sich durch Variation der Abstände der Umlenkspiegel und ihre Anstellwinkel verschiedene Basis-Höhenverhältnisse realisieren und an wechselnde Anforderungen anpassen. Für definierte Aufgaben ermöglichen fest montierte Systeme

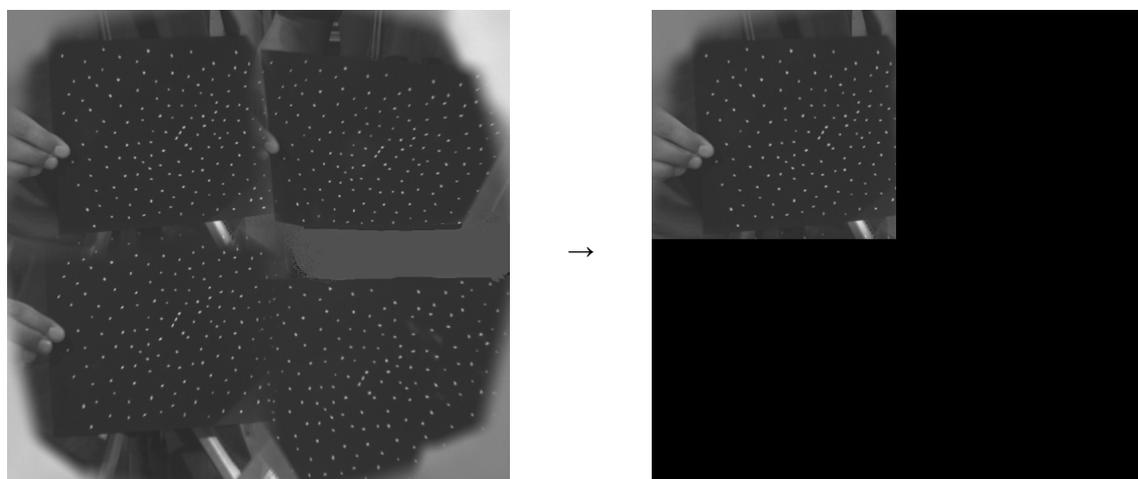
## 2 Hardware und Rahmenbedingungen

---

me (Putze et al., 2007) die Bestimmung der relativen und inneren Orientierung der virtuellen Kameras abseits des Einsatzortes und den anschließenden Transport zu diesem.

### 2.3.2 Auswerteansatz für Spiegelsysteme

Es sind verschiedene Strategien zur Handhabung und Analyse von Bildern virtueller Kameras denkbar. Zum einen kann die ursprüngliche Bildgröße erhalten bleiben. Lediglich der Bereich der relevanten Informationen reduziert sich (Abbildung 2.4 rechts). Der Bildhauptpunkt bleibt näherungsweise in der Bildmitte. Vor allem wenn die Auswertung mit kommerzieller Software durchgeführt wird, bietet sich diese Vorgehensweise an. Die Bilder der virtuellen Kameras können auf herkömmliche Weise ausgewertet werden. In diesem Fall vergrößert sich das Datenvolumen um den Faktor 4 (bei unkomprimierten Bildern). Zum anderen kann das Bildformat auf den relevanten Bereich reduziert werden. Das Datenvolumen bleibt in diesem Fall gleich. Jedoch befindet sich der Bildhauptpunkt in der entsprechenden Bildecke des jeweiligen virtuellen Bildes. Die mathematischen Bedingungen sind für beide Strategien dieselben.



**Abbildung 2.4:** Originalbild der aufnehmenden Kamera (links) und Bild einer virtuellen Kamera (rechts)

Auf Grund der Reduzierung des aktiven Sensorformates um den Faktor 4 verkleinert sich auch das Gesichtsfeld. Somit kommt es zu einer scheinbaren Verdopplung der Brennweite. Dieses muss bei der Konzeption der Aufnahmekonfiguration und der Gestaltung des Punktfeldes zur Kalibrierung berücksichtigt werden (Putze, 2005).

Die Verzeichnungsparameter der virtuellen Kameras setzen sich aus den Objektiveigenschaften, welche für alle vier virtuellen Kameras gleich sind, und den Parametern der Spiegel im Strahlengang zusammen. Es ist leicht zu sehen, dass viele Parameter korreliert (z.B.: Kamerakonstante und Bildhauptpunktlage) und einige unkorreliert sind (z.B. Einflüsse durch die Spiegel). Verwendet man einen modellbasierten Ansatz für die Verzeichnung, könnten in einer gemeinsamen Ausgleichung gemeinsame und teilbildbezogene Parameter definiert und geschätzt werden. Wie in Abschnitt 3.2.1 erläutert, sind die Einflüsse der Spiegel etwa von der gleichen Größe wie der Affinitätsparameter der Verzeichnung. Demzufolge können die Einflüsse der Spiegel nicht signifikant von der Verzeichnung getrennt werden. Andererseits können die Einflüsse der Spiegel teilweise durch den vorgestellten modellbasierten Ansatz zur Verzeichnungskorrektur kompensiert werden. Für die Auswertung der Daten dieser Arbeit ist der Ansatz unabhängiger virtueller Kameras gewählt worden.

### 2.3.3 Genauigkeitsuntersuchung des Spiegelsystems

Um das Potential des Spiegelsystems zur Objektkoordinatenmessung zu bestimmen, wurden verschiedene Tests mit denselben Konfigurationen durchgeführt. Untersucht wurden die Einflüsse von einfachen Rückflächenspiegeln und hochwertigen Oberflächenspiegeln sowie die Abhängigkeit vom Kameratyp. Zum Einsatz kamen eine Industriekamera (Sony X700) und eine Hochgeschwindigkeitskamera (FASTCAM ultima 1024).

Tabelle 2.1 zeigt die gemittelten Ergebnisse aus einer Serie von Einzelkonfigurationen. Je Messreihe wurden durch eine Bündelausgleichung die Kameraparameter sowie die Objektkoordinaten der Punkte eines Testobjektes bestimmt. Aus der Übersicht der Messungen der beiden Kameras lassen sich die nun folgende Schlussfolgerungen ziehen.

Die Genauigkeit der Bildpunktmessung ( $\sigma_{\text{BPM}}$ ) wird erwartungsgemäß nicht durch die Verwendung von Spiegeln im Strahlengang beeinflusst. Der Wert der Standardabweichung der Gewichtseinheit,  $\sigma_0$ , als Maß der Genauigkeit der gesamten Messung wird um den Faktor 3 bei der Verwendung von Vorderflächenspiegeln, bzw. um den Faktor 4,5 bei Rückflächenspiegeln, schlechter. Hier wird deutlich, dass die Verwendung von Oberflächenspiegeln die Genauigkeit weniger negativ beeinflusst. Ebenso verhält es sich mit den Standardabweichungen der Objektkoordinaten. Auch hier hat die Verwendung von Vorderflächenspiegeln einen positiven, wenn auch nicht so starken, Einfluss auf die Genauigkeit. Die Verwendung von Spiegelsystemen zur Generierung multiokularer Sichten wirkt mit einem Faktor von etwa 4 auf die Lagekomponente ( $\sigma_{\text{XY}}$ ) und mit einem Faktor 5 auf die Tiefenkomponente ( $\sigma_{\text{Z}}$ ).

Die Verschlechterung der erreichbaren Genauigkeit ist nicht allein auf die Qualität und Modellierung der Spiegel zurückzuführen. Vielmehr spielt die angesprochene Verkleinerung des Sensorformates und eine damit verbundene, scheinbare Vergrößerung der Kamerakonstante eine große Rolle. Die notwendigen Tiefeninformationen zur Orientierung von Kameras sind abhängig von deren Brennweite. Für alle Versuche wurde dieselbe Passpunkttafel genutzt. Durch die scheinbar größere Kamerakonstante bei gleicher Tiefeninformation wird die Zuverlässigkeit und Genauigkeit der Bestimmung der Orientierungselemente negativ beeinflusst.

|                       | einzeln       |        | Rückflächenspiegel |        | Oberflächenspiegel |        |
|-----------------------|---------------|--------|--------------------|--------|--------------------|--------|
|                       | $\mu\text{m}$ | Pixel  | $\mu\text{m}$      | Pixel  | $\mu\text{m}$      | Pixel  |
| $\sigma_{\text{BPM}}$ | 0,11          | $1/55$ | 0,12               | $1/50$ | 0,10               | $1/65$ |
| $\sigma_0$            | 0,12          | $1/55$ | 0,51               | $1/13$ | 0,32               | $1/20$ |
| $\sigma_{\text{XY}}$  | 6             |        | 40                 |        | 17                 |        |
| $\sigma_{\text{Z}}$   | 12            |        | 60                 |        | 60                 |        |

Tabelle 2.1: Hochgeschwindigkeitskamera in verschiedenen Konfigurationen

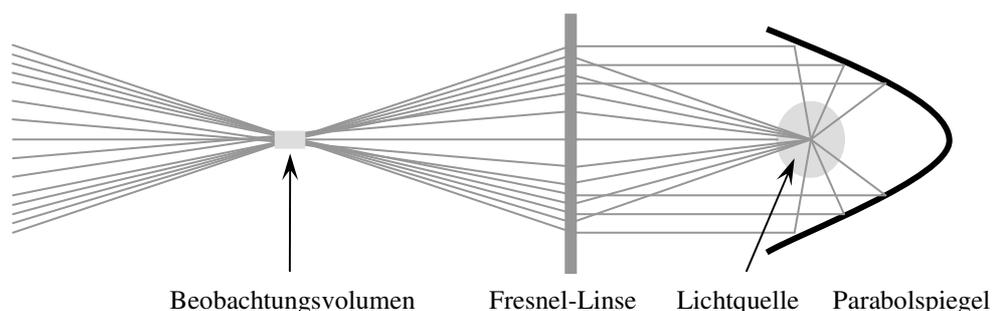
## 2.4 Beleuchtung

Der Beleuchtung kommt bei der Anwendung von bildgebenden Strömungsmesssystemen eine besondere Bedeutung zu. Nur wenn genügend reflektiertes und gestreutes Licht von den Partikeln auf den Sensor gelangt, können diese durch Bildverarbeitungsalgorithmen detektiert werden. Die hohen Anforderungen ergeben sich zum einen durch die kurzen Belichtungszeiten und zum anderen aus den kleinen Partikelgrößen. Durch größere Pixel lässt sich die Ausbeute der einfallenden Photonen auf den Sensor erhöhen. Nachteilig hierbei ist jedoch, dass die Schärfentiefe mit zunehmender Pixelgröße abnimmt.

Vielfach werden in der Strömungsmesstechnik Laser zur Beleuchtung eingesetzt. Durch optische Elemente (z.B. Zylinderlinse) lässt sich eine intensive flächenhafte Beleuchtung erreichen. Für größere Volumen ist diese Technik jedoch nicht geeignet. Für verschiedene praktische Versuche wurden Halogenstrahler

## 2 Hardware und Rahmenbedingungen

genutzt. Die Beleuchtung erfolgt etwa senkrecht zur Beobachtungsrichtung. Die so erreichte indirekte Dunkelfeldbeleuchtung beleuchtet die Partikel, der Hintergrund bleibt abgedunkelt. Um diesen Effekt zu verstärken, wurde das Licht der Halogenstrahler mit Hilfe eines Parabolspiegels und einer Fresnel-Linse gebündelt. Der Strahler und die Linse werden so positioniert, dass die Glühwendel im Beobachtungsvolumen abgebildet wird (Abbildung 2.5). Diese Methode ist sehr günstig und ermöglicht trotz des geringen Wirkungsgrades der Strahler von etwa 5% die Bereitstellung einer hohen Lichtleistung. Der Nachteil der Methode ist der starke Wärmeeintrag in das Messvolumen. Für kurzzeitige Messungen in schnellen Strömungen ist das zu tolerieren. Lange Messreihen in geschlossenen Volumina, vor allem Konvektionsversuche (Ilmenauer Fass) werden durch diese Methode sehr stark verfälscht.



**Abbildung 2.5: Schematische Darstellung der Beleuchtung des Volumens durch Bündelung der Lichtstrahlen**

Für diesen Fall eignen sich Blitzlampen als alternative Lichtquelle. Durch die recht geringe Bildwiederholrate bis zu 3 Hz ist der thermische Eintrag in das Volumen wesentlich geringer. Daneben hat die Verwendung von Blitzlampen den Vorteil, dass sie zur Synchronisation genutzt werden können. Hierzu werden die Kameras kurz vor den Blitzlampen ausgelöst und belichten den Sensor während der gesamten Beleuchtungsdauer. Somit kann zwar der Auslösezeitpunkt versetzt sein, aber der Zeitpunkt der Beleuchtung ist für alle Kameras derselbe. Zur Synchronisation der Spiegelreflexkameras bei einem Betrieb von 2 Hz wurde eine Belichtungszeit von 1/8 Sekunde gewählt. Der Blitz wird 1/16 Sekunde nach den Kameras ausgelöst. Damit ist sicher gestellt, dass die Wirkung der kamerabedingten Auslöseunterschiede eliminiert werden kann.

Die im Ilmenauer Fass eingesetzten Blitzlampen Elinchrom Style RX 600 haben eine 4-mal so große Belichtung wie Stroboskoplampen (Tabelle 2.2). Des Weiteren verfügen diese Blitzlampen über je eine integrierte Synchronisationseinheit per Infrarot.

Die Position der Blitzlampen in den Versuchsanlagen in Ilmenau wurde durch eine Simulation optimiert (Lubotova et al., 2007). Das auf eine Seifenblase treffende Licht wird zu 3% reflektiert, der Transmissionsanteil beträgt 53%. Die verbleibenden 44% werden seitlich in alle Richtungen reflektiert. Somit ergibt sich eine optimale Position der Blitzlampen unmittelbar neben den Kameras.

|                     | Elinchrom Blitzgerät<br>Style RX 600 (600 W) | integrierter Blitz der<br>EOS 20 D | Stroboskoplampe<br>(1500 W) |
|---------------------|--|------------------------------------|-----------------------------|
| Belichtung in 3,5 m | 22,0 lxs                                     | 10,0 lxs                           | 5,2 lxs                     |
| Belichtung in 7,0 m | 9,0 lxs                                      | 6,5 lxs                            | -                           |

**Tabelle 2.2: Belichtung verschiedener Blitzgeräte in 2 verschiedenen Entfernungen**

## 2.5 Partikel zur Strömungsmarkierung

Bildgebende Strömungsmessmethoden sind darauf angewiesen, dass die zu messende Strömung markiert wird. Dazu dienen zumeist künstlich zugefügte Partikel, so genannte Tracer. An diese werden verschiedene Anforderungen gestellt. Die entscheidenden Eigenschaften sind:

- kleine Größe
- auftriebsneutral
- gute Sichtbarkeit
- einfache Handhabung
- umweltverträglich

Die eingesetzten Tracer müssen für die jeweilige Aufgabe ein gutes Strömungsfolgevermögen haben. Dazu müssen die Tracer zum einen kleiner als die kleinste zu beobachtende Strömungsstruktur sein (Melting, 1997) als auch dieselbe Dichte des umgebenden Fluids haben. Zusätzlich müssen die Tracer groß genug sein, um durch die Kameras detektiert werden zu können. Zur Messung in großvolumigen Luftströmungen sind deshalb Feststoffe und Tröpfchen weniger geeignet. Alternative Tracer sind hier heliumgefüllte Seifenblasen. Auftriebsneutrale Blasen in Luft mit einer Größe von 3 mm benötigen etwa eine Seifenfilmdicke von  $3\mu\text{m}$  (Kerho und Bragg, 1994). Je nach der Zusammensetzung des Seifenfilms können die Eigenschaften (optische Eigenschaften, Lebensdauer) der Blase beeinflusst werden. Machacek und Rösgen (2002) fügen der Lösung fluoreszierendes Material hinzu. Durch die Verwendung von geeigneten Bandpassfiltern vor der Beleuchtung und den Kameras kann neben der Verstärkung des Reflektionsanteils auch das Streulicht des Hintergrundes eliminiert werden. Der Reflektionsanteil des sichtbaren Lichtes in Richtung der Beleuchtung beträgt 3% (Lobutova et al., 2007). Durch die Zugabe von Nanopartikeln zur Seifenlösung kann dieser Anteil erhöht werden. Bei all diesen Seifenlaugen ergeben sich auf Grund der auf der dünnen Seifenblasenhaut je Lampe zwei Reflektionsspot (Machacek, 2003). Bei klein abgebildeten, ev. leicht unscharfen Blasen spielt dies für die Auswertung jedoch keine große Rolle.

An die im Ilmenauer Fass eingesetzten Seifenblasen werden zusätzliche Anforderungen gestellt. Die Lebensdauer der einzelnen Blasen muss selbst bei hohen Temperaturen (bis  $60^\circ\text{C}$ ) mehrere Minuten betragen. Hierzu wurde eine neue Seifenlösung entwickelt (Lobutova et al., 2006). Die von einem Seifenblasengenerator erzeugten Blasen werden über einen Schlauch in das Volumen geleitet. Zur Verringerung der Austrittsgeschwindigkeit wurde das Ende des Schlauches aufgeweitet. Alternativ dienen heliumgefüllte Latexballons mit einem Durchmesser von etwa 10 cm als Tracer. Durch deren Größe und die sehr lange Lebensdauer sind im Sichtbereich der Kameras sehr zuverlässig ununterbrochene Trajektorien bestimmbar. Die verwendeten Latexballons können auf Grund der Größe nur großskaligen Strömungen folgen. Sie wurden deshalb nur zu Experimenten eingesetzt, bei denen großskalige Strukturen mit einer charakteristischen Länge von  $> 1$  Meter analysiert werden sollten.

Für den Einsatz im Niedergeschwindigkeitswindkanal wurden Tracer aus Schaumpolyesterol, so genanntes Styropor, verwendet. Diese sind robust und unkompliziert in der Handhabung und liefert deutlich mehr Streulicht. Da es relativ große Partikel (0,1 bis 0,3 mm) sind, weisen diese ein Eigensinken auf. Dieses kann zum Teil nicht vernachlässigt werden. Hierfür wurde ein Ansatz zur Schlupfkorrektur entwickelt (Frey et al., 2006). Die korrigierten Ergebnisse beschreiben die Strömung nicht mehr im Lagrange'schen Sinne.

Die Anforderungen an Tracer für Wasserströmungen sind wesentlich leichter zu erfüllen. Auf Grund der höheren Dichte können Feststoffe, zumeist Kunststoffe, genutzt werden. Diese sind einfach in der Handhabung und haben keine Einschränkung der Lebensdauer. Zur Verfügung standen VESTOSINT-Polymerpartikel mit verschiedenen Durchmessern.

### 3 Photogrammetrische Grundlagen

Im Folgenden werden die grundlegenden Werkzeuge der Bildverarbeitung und Bildanalyse sowie das mathematische Modell zur Bestimmung von 3D-Objektkoordinaten dargestellt. Das abweichend von der Zentralperspektive benötigte Modell für die Auswertung gebrochener Strahlen auf Grund von Brechungsindexunterschieden im Strahlengang wird separat im Abschnitt 4 betrachtet.

#### 3.1 Bildanalyse

Die Bildverarbeitung und Bildanalyse dienen der Bestimmung der Bildkoordinaten aller aufgenommenen Partikel auf der Grundlage von Rasterbilddaten. Zur Lösung dieser Aufgabe sind zum einen die Partikel als solche zu erkennen, zu segmentieren, und zum anderen die subpixelgenaue Position derer zu berechnen. Voraussetzung dafür ist, dass sich die Partikel deutlich vom Hintergrund abheben. Deutlich heißt, der Grauwertunterschied (Kontrast) zwischen Hintergrund- und Partikelintensität ist größer als das Bildrauschen und der abgebildete Durchmesser des Partikels größer als ein Pixel.

##### 3.1.1 Berechnung des Hintergrundbildes

Um die Zuverlässigkeit der Segmentierung zu erhöhen, wird durch Bildvorverarbeitung das Bild von Hintergrundinformationen und Rauschen befreit (Abbildung 3.3). Je nach Versuchskonfiguration werden Strukturen des Hintergrundes oder Objekte, die sich im Messvolumen befinden, mit unterschiedlicher Intensität aufgenommen. Dem entgegen steht, dass sich die Lichtintensität im Beobachtungsvolumen nicht gleichmäßig verteilt. Die Intensität ist abhängig von der Position (Entfernung und Richtung) vor der Lichtquelle. Somit werden identische Partikel in gleicher Entfernung von einem Sensor mit unterschiedlicher Intensität abgebildet. Ein ähnlicher Effekt wird zusätzlich durch die Vignettierung der Objektiv erzeugt. Hieraus ergibt sich, dass ein globaler Schwellwert für die Grauwerte (GW) keine Lösung darstellt, um Partikel von Hintergrundinformationen zu trennen (Abbildung 3.1). Ohmi und Hang Yu (2000) verwenden einen dynamischen Schwellwert zum Binarisieren des Originalbildes. Der globale Schwellwert wird iterativ erhöht, wobei nach jeder Erhöhung das Bild auf mögliche Partikelsegmente geprüft wird. Maas (1992a) schlägt eine Tiefpassfilterung des Originalbildes und eine anschließende Differenzbildbildung vor.

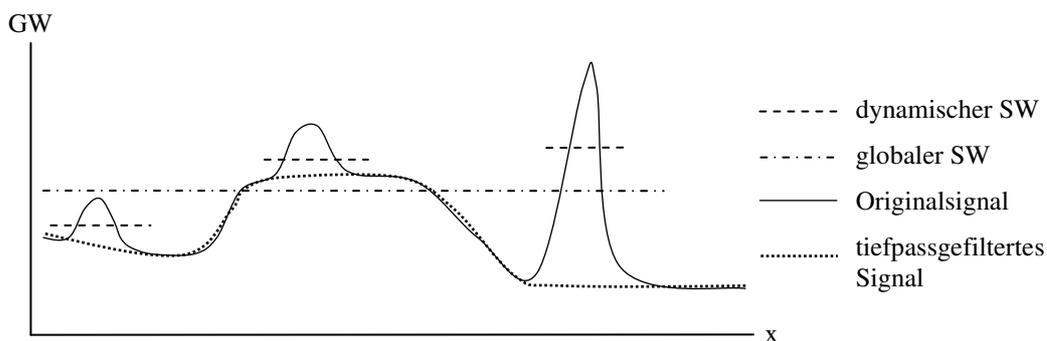


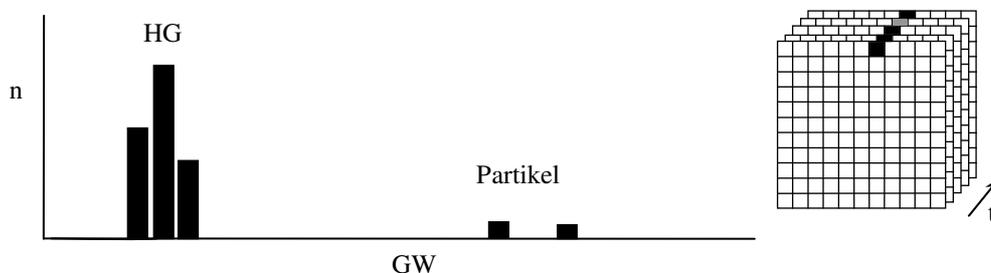
Abbildung 3.1: Schematische Darstellung des Grauwertverlaufes einer Zeile

$$GW_{Diff}(x, y) = GW(x, y) - GW_{Tiefpass}(x, y) \quad 3.1$$

Damit erreicht er eine Beseitigung großer Hintergrundstrukturen und die teilweise Beseitigung der Intensitätsunterschiede. Kleine, sich im Hintergrund befindende Objekte mit hohem Kontrast sind mit dieser Methode nicht zu entfernen. Eine andere Möglichkeit besteht darin, ein Hintergrundbild, ohne Partikel, zur Differenzbilddarstellung zu nutzen. Im einfachsten Fall wird dieses vor dem Versuch aufgenommen. Ist dies nicht möglich, besteht noch die Möglichkeit, das Hintergrundbild aus einer Sequenz mit Partikeln zu bestimmen. Dabei wird ausgenutzt, dass durch die Bewegung der Partikel jedes Pixel  $(x, y)$  während einer Sequenz auch die Intensität des Hintergrundes  $GW_{HG}(x, y)$  detektiert. Ist die Partikeldichte hoch und die Intensität der Partikel größer als die des Hintergrundes, so bestimmen Michaelis et al. (2006) den Hintergrund aus den minimalen Grauwerten aller Pixel der Sequenz:

$$GW_{HG}(x, y) = \min\{GW(x, y, i) : \forall i \in \text{Sequenz}\} \quad 3.2$$

Für Aufnahmen mit einer mäßigen Partikeldichte und einer hohen Anzahl von Bildern einer Sequenz wurde im Rahmen des DFG-Projektes eine statistische Vorgehensweise entwickelt. Diese minimiert das Rauschen des Hintergrundbildes und ist robust gegen intensitätsschwächere Erscheinungen (temporäre Schatten, Partikel vor hellem Hintergrund). Betrachtet man für jedes Pixel die Häufigkeit  $n$  des Auftretens eines Grauwertes über alle Bilder in einem temporalen Histogramm (Abbildung 3.2), so ergibt sich ein Maximum im Bereich des gesuchten Grauwertes des Hintergrundes.

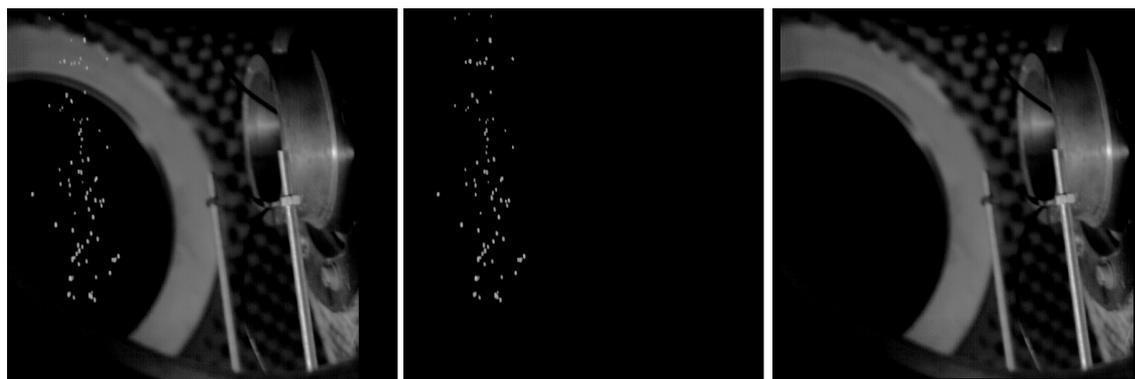


**Abbildung 3.2:** Schematische Darstellung eines temporalen Histogramms eines Pixels

Je nach Anzahl der Bilder, dem Bildrauschen und der Partikeldichte ist das Maximum mehr oder weniger stark ausgeprägt. Vor allem bei hohem Bildrauschen in kurzen Sequenzen prägt sich kein signifikantes Maximum bei einem einzelnen Grauwert aus. Diese Auswirkung des Rauschens kann durch eine Zusammenfassung der Häufigkeiten mehrerer benachbarter Grauwerte, einer Histogrammstauchung, beseitigt werden. Der Vorteil dieser Methode ist, dass das Hintergrundbild die mittlere Intensität des Hintergrundes repräsentiert, sowohl hellere als auch dunklere Partikel heben sich davon ab. Das Differenzbild wird abweichend von Gleichung 3.1 durch Schwellwertbildung bestimmt:

$$GW_{Diff}(x, y) = \begin{cases} 0 & : |GW - GW_{HG}| \leq \text{Schwellwert} \\ GW(x, y) & : |GW - GW_{HG}| > \text{Schwellwert} \end{cases} \quad 3.3$$

Der Schwellwert wird empirisch oder durch eine vorab durchgeführte Referenzmessung in Höhe des Rauschens festgelegt. Im Differenzbild bleiben demnach die Originalgrauwerte der Partikel erhalten, der Hintergrund wird eliminiert (Abbildung 3.3). Durch die oben beschriebenen Intensitätsunterschiede, hervorgerufen durch ungleichmäßige Ausleuchtung und Vignettierung, müssen die für die Segmentierung nötigen Parameter an die lokalen Helligkeiten angepasst werden.



**Abbildung 3.3: Originalbild, Differenzbild und Hintergrundbild (Verdeutlichung durch Histogrammspreizung)**

#### 3.1.2 Bildpunktmessung

Die hier verwendete Methode zur Bestimmung der subpixelgenauen Bildkoordinaten der einzelnen abgebildeten Partikel basiert auf der Berechnung des grauwertgewichteten Schwerpunktes:

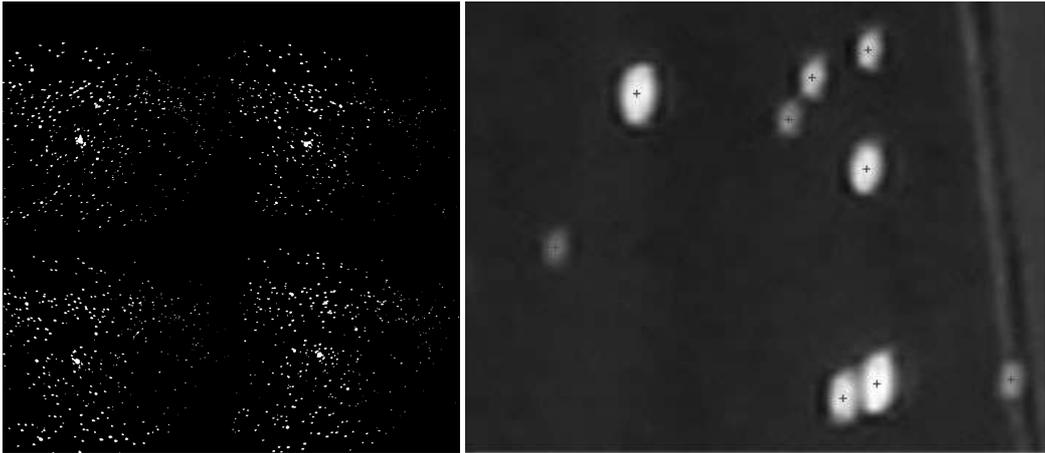
$$x_m = \frac{\sum GW_i \cdot x_i}{\sum GW_i} \quad \text{und} \quad y_m = \frac{\sum GW_i \cdot y_i}{\sum GW_i} \quad 3.4$$

Die Segmentierung des Differenzbildes (Abbildung 3.3) basiert in Anlehnung an Maas (1992a) auf der Ermittlung lokaler Maxima und einer von diesen Punkten ausgehenden region growing<sup>4</sup> (engl., *Regionenwachstum*) Methode. Die Ausprägung der jeweiligen lokalen Maxima ist vor allem abhängig von der Lichtverteilung im Volumen. Besonders deutlich ist dieser Effekt bei sehr großen Volumina (z.B. Ilmenauer Fass, siehe Abschnitt 6.3) zu beobachten. Die benötigten, empirischen Schwellwerte (Diskontinuitätskriterium, Schwellwert für Differenzbildung) können in einem solchen Fall dynamisch gestaltet werden. In den vorliegenden Anwendungen ergeben sie sich aus drei verschiedenen Look-up-Tabellen für dunkle, mittlere und helle Maxima. Hering et al. (1995b) nutzen einen dynamischen Schwellwert, der aus

---

<sup>4</sup> Für alle zum Segment gehörenden Elemente werden angrenzende Elemente (4er oder 8er Nachbarschaft) auf eine Zugehörigkeit zum Segment geprüft. Für die Segmentierung von Partikeln besteht das Prüfkriterium aus dem Vergleich des Grauwertes, welcher vom Mittelpunkt aus nicht ansteigen (bis auf das Bildrauschen) darf.

dem maximalen Grauwertunterschied für jede Partikelabbildung berechnet wird. Die Einführung eines Diskontinuitätskriteriums (Maas, 1992a) ermöglicht die Segmentierung und Auswertung von sich überlappenden Partikeln. Für die Segmente der Bildpunkte werden sowohl der Schwerpunkt als auch weitere geometrische und radiometrische Eigenschaften (Ausdehnung, Flächeninhalt, Grauwertsumme) bestimmt. Anhand von Größenbeschränkung (minimale und maximale Ausdehnung) wird eine Vorselektion der segmentierten Bereiche durchgeführt. Die zu erreichende Genauigkeit bei typischen Partikelabbildungen beträgt etwa  $1/10$  Pixel. Hering (1996) beweist, dass der Schwerpunkt eines durch Bewegung unscharf abgebildeten Punktes (Streak) gleich der über die Belichtungszeit gemittelten Position ist.



**Abbildung 3.4:** links: Kontrastverstärktes Kamerabild (virtuelles Mehrkammersystem, siehe Abschnitt 2.3); rechts: Vergrößerter Ausschnitt von segmentierten Partikeln mit markierten Mittelpunkten

Neben der genutzten Methode zur Bestimmung der Bildkoordinaten sind in der Literatur weitere Methoden beschrieben. Sehr einfache Methoden sind die Position des Pixels der höchsten Intensität oder die Mitte der bounding box (*engl., umhüllendes Rechteck*) um ein Partikel (Udrea et al., 1996). Die zu erwartenden Fehler der Bildkoordinaten sind für die weitere Auswertung nicht akzeptabel. Eine Genauigkeitssteigerung kann durch das Anpassen einer Modellfunktion an die Partikelabbildung geschehen. Guenzenec et al. (1994) werten die Kreuzkorrelationskoeffizienten eines einfachen Templates mit dem Differenzbild aus. Berücksichtigt man, dass die Abbildung eines Punktes auf der Fokalebene durch die Airy-Funktion beschrieben wird, kann ein genaueres Ergebnis erzielt werden. Die Airy-Funktion wird gut durch eine Gauß-Funktion approximiert (Adrian und Yao, 1985), so dass es sich anbietet, eine Gauß-Funktion zur Bestimmung der subpixelgenauen Bildkoordinaten zu verwenden. Die mit dieser Methode zu erreichende Genauigkeit beträgt je nach Abbildungsqualität  $1/20 - 1/50$  Pixel (Marxen et al., 2000). Dabei ist es nicht ausschlaggebend, ob der Mittelpunkt durch eine Einpassung der Gauß-Funktion in alle zugehörigen Pixel nach der Methode der kleinsten Quadrate (z.B. Marxen et al., 2000) oder zwei 1D-Schätzern (Willert und Gharib, 1991) bestimmt wird. Ouellette und Xu (2006) zeigen an synthetischen Daten (Gauß- und Airy-Intensitätsverteilung), dass das Einpassen der Gauß-Funktion genauere Ergebnisse liefert als der grauwertgewichtete Schwerpunkt oder Ansätze mit einem neuronalen Netz. Hering et al. (1997) erweitern die einzupassende Gauß-Funktion so, dass sie den Schwerpunkt und Formparameter von Streaks zuverlässig bestimmen können. Nohbach et al. (2004) weisen nach, dass vor allem bei kleinen Partikelabbildungen auf Grund der Unterabtastung nur eine begrenzte Genauigkeit durch das Einpassen einer Funktion erreicht werden kann. Dem entgegen setzen sie einen iterativen Ansatz, der a priori Informationen über den Signalcharakter des Partikelbildes ausnutzt. Die einzupassende Funktion und die anschließende Subpixelinterpolation der Kreuzkorrelationswerte werden an die jeweilige Subpixelposition angepasst.

### 3 Photogrammetrische Grundlagen

---

Alle bisher vorgestellten Verfahren ermitteln die Bildkoordinaten der Mittelpunkte von selektierten Einzelpartikeln. Die Wahrscheinlichkeit, dass sich abgebildete Partikel berühren, steigt mit der Partikeldichte im Volumen und der Partikelgröße. Maas (1992a) zeigt, dass die Anzahl der Überlappungen jeweils mit dem Quadrat beider Parameter steigt. Somit wird deutlich, dass sich scheinbar berührende Partikel nicht vermieden werden können, wenn das Messverfahren effektiv sein soll (Bestimmung einer Vielzahl von Trajektorien). Eine Möglichkeit zur Trennung sich berührend abgebildeter Partikel bietet das oben angesprochene Diskontinuitätskriterium. Die Trennung erfolgt, indem eine Bedingung für abfallende Flanken vom lokalen Maximum aufgestellt wird. Eine ansteigende Flanke (d.h. größer werdende Grauwerte) wird einer abfallenden Flanke eines anderen Partikels zugeordnet.

Als alternative Möglichkeit nutzen Carosone et al. (1995) ein neuronales Netz zur Detektion von sich überlappenden Partikelabbildungen. Basierend auf einem binarisierten Differenzbild werden die Formparameter (Rundheitsmaß, Aspektverhältnis, Konvexität) aller Segmente ermittelt. Anhand dieser werden die Segmente in zwei Klassen eingeteilt, Einzel- oder sich überlappende Partikel. Letztere werden mit morphologischen Operatoren iterativ bearbeitet, bis im gesamten Bild nur noch Einzelpartikel detektiert werden.

Marxen et al. (2000) zeigen, dass durch das Anwenden der Gauß-Einpassung über den gesamten Bildraum und die Prüfung des Bestimmtheitsmaßes  $\chi^2$  sich überlappende Partikelabbildungen sicher bestimmt werden können.

### 3.2 Das zentralperspektive Abbildungsmodell

Der optische Abbildungsvorgang eines dreidimensionalen Punktes auf einen zweidimensionalen Sensor einer Kamera entspricht im Allgemeinen einer zentralperspektiven Abbildung. Durch die Kollinearitätsgleichungen (Gleichung 3.5) wird das mathematische Modell der Abbildung beschrieben. Die Position und Orientierung des Projektionszentrums im Raum wird durch die äußeren Orientierungsparameter ( $X_0$ ,  $Y_0$ ,  $Z_0$  und  $\omega$ ,  $\varphi$ ,  $\kappa$ ), die Lage des Projektionszentrums im Bildkoordinatensystem durch die inneren Orientierungsparameter ( $c$ ,  $x'_0$ ,  $y_0$ ) beschrieben.

$$x' = x'_0 - c \cdot \frac{r_{11} \cdot (X - X_0) + r_{21} \cdot (Y - Y_0) + r_{31} \cdot (Z - Z_0)}{r_{13} \cdot (X - X_0) + r_{23} \cdot (Y - Y_0) + r_{33} \cdot (Z - Z_0)} \quad 3.5$$

$$y' = y'_0 - c \cdot \frac{r_{12} \cdot (X - X_0) + r_{22} \cdot (Y - Y_0) + r_{32} \cdot (Z - Z_0)}{r_{13} \cdot (X - X_0) + r_{23} \cdot (Y - Y_0) + r_{33} \cdot (Z - Z_0)}$$

$$\mathbf{x} = \mathbf{x}_0 + m \cdot \mathbf{R} \cdot \mathbf{x}' \quad 3.6$$

Die Bestimmung der Objektkoordinaten eines Punktes mit Hilfe eines Bildpunktes einer Kamera (Gleichung 3.6) ist nicht möglich. Der unbekannte Maßstab  $m$  führt zu einer mehrdeutigen Lösung. Durch das Einführen einer weiteren Kamera und dem Schnitt zweier Raumstrahlen (Vorwärtsschnitt) ergibt sich eine eindeutige Lösung. Basierend auf den Kollinearitätsgleichungen können z.B. mit Hilfe einer Ausgleichung nach der Methode der kleinsten Quadrate (siehe Abschnitt 3.2.3) die Objektkoordinaten des unbekanntes Punktes bestimmt werden. Es ist evident, dass sich bewegende homologe Bildpunkte zum selben Zeitpunkt aufgenommen werden müssen. Auftretende Asynchronitäten führen zu Fehlern bei der

Objektkoordinatenbestimmung, die mit einem Zweikamerasystem nicht immer aufdeckbar sind. Raguse (2007) zeigt, wie dieser Effekt innerhalb einer Bündelausgleichung mitgeschätzt werden kann.

In der Realität sind jedoch Abweichungen von der idealen zentralperspektiven Abbildung zu beobachten. Diese so genannten Abbildungsfehler werden unter anderem durch die Eigenschaften der Objektive (Verzeichnung, Anordnung der Linsen auf der optischen Achse) und des Sensors (Form der Pixel und Unebenheiten des Sensors) hervorgerufen. Es ist in der Photogrammetrie verbreitet, diese Abbildungsfehler durch Korrekturfunktionen nach Brown (Brown, 1971) und zusätzlichen Parametern für die Affinität und Scherung zu modellieren und als Zusatzparameter ( $dx'$ ,  $dy'$ ) den Kollinearitätsgleichungen hinzuzufügen (Gleichung 3.7).

Alternativ, oder wenn die zufälligen Abbildungsfehler nicht durch ein mathematisches Modell beschrieben werden können, können die Zusatzparameter durch Interpolation eines Korrekturgitters auf Basis finiter Elemente (Tecklenburg et al., 2001) bestimmt werden. Dies ist unter anderem der Fall, wenn unebene Spiegelflächen zusätzlich in den Strahlenverlauf integriert werden. Werden Spiegel hoher Qualität in das Aufnahmesystem integriert (siehe Abschnitte 2.3 und 0), können die Abweichungen von einer idealen Ebene durch die beschriebenen Verzeichnungsparameter modelliert werden (Putze, 2005).

$$\begin{aligned}x'_{korr} &= x' + dx' \\y'_{korr} &= y' + dy'\end{aligned}$$

mit

$$dx' = dx'_{rad} + dx'_{tan} + dx'_{aff} \quad \text{und} \quad dy' = dy'_{rad} + dy'_{tan}$$

$$\begin{aligned}dx'_{rad} &= x' \cdot (A_1 \cdot (r'^2 - r_0^2) + A_2 \cdot (r'^4 - r_0^4) + A_3 \cdot (r'^6 - r_0^6)) \\dx'_{tan} &= B_1 \cdot (r'^2 - 2 \cdot x'^2) + 2 \cdot B_2 \cdot x' \cdot y' \\dx'_{aff} \cdot x &= C_1 \cdot x' + C_2 \cdot y'\end{aligned} \tag{3.7}$$

$$\begin{aligned}dy'_{rad} &= y' \cdot (A_1 \cdot (r'^2 - r_0^2) + A_2 \cdot (r'^4 - r_0^4) + A_3 \cdot (r'^6 - r_0^6)) \\dy'_{tan} &= B_2 \cdot (r'^2 - 2 \cdot y'^2) + 2 \cdot B_1 \cdot x' \cdot y'\end{aligned}$$

und

$$r' = \sqrt{x'^2 + y'^2}$$

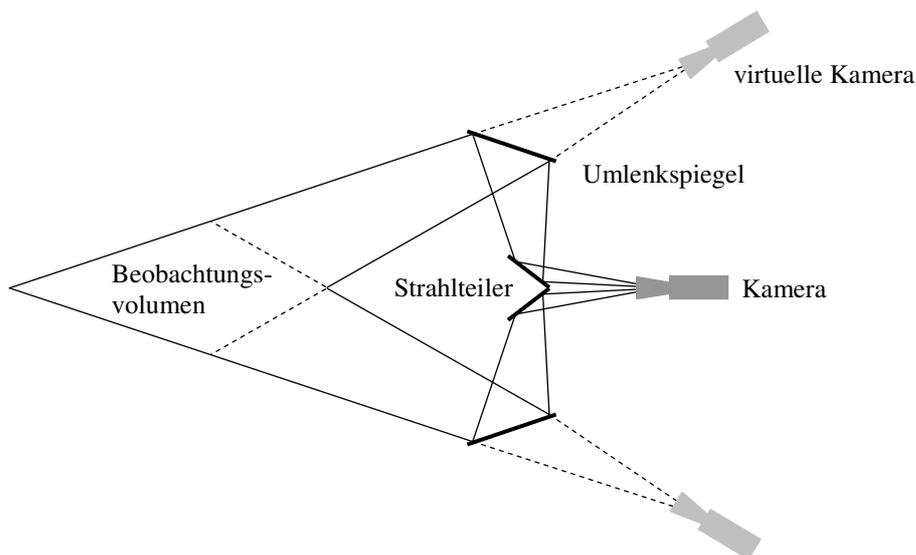
### 3.2.1 Kamera-Spiegelsysteme

Wie oben beschrieben, ist es im Allgemeinen für die Bestimmung von Objektkoordinaten notwendig, ein Mehrkamerasystem zu nutzen. Putze et al. (2007) zeigen Möglichkeiten, wie mit Hilfe eines Spiegelvorsatzes vor einer Einzelkamera ein virtuelles Mehrkamerasystem generiert werden kann. Abbildung 3.5 stellt dieses Prinzip der Strahlteilung mit Hilfe von Spiegeln dar. Forterre et al. (2005) beobachten mit

### 3 Photogrammetrische Grundlagen

einer einzelnen Hochgeschwindigkeitskamera das Verhalten der Venusfliegenfalle, Luhmann und Raguse (2005) nutzen diese Methode, um den schwer zu gewährleistenden synchronen Betrieb von Kameras verschiedener Modellreihen zu umgehen.

Vorderflächenspiegel hoher Qualität können mit einer Ebenheit von  $\lambda/10$  hergestellt werden. Dieser Wert gilt jedoch nur für lokale Unebenheiten. Das Trägermaterial solcher Spiegel ist im Allgemeinen Floatglas (Heal, 1923). Zur Herstellung wird die flüssige Glasschmelze fortlaufend in ein Bad flüssigen Zinns gegeben. Durch die geringe Dichte schwimmt es oben auf und verteilt sich gleichmäßig in alle Richtungen. Nach Herstellerangaben (PGO GmbH) ist das Glas, bedingt durch den Produktionsprozess, in Fließrichtung eben und weist quer eine wellenförmige Abweichung auf. Die Welle hat eine Wellenlänge von etwa 40 cm mit einer Amplitude von  $1/100$  mm. Bakstein und Pajdla (2000) beschreiben die Auswirkungen verschiedener ebener und gekrümmter Spiegel im Strahlengang auf die Abbildungsgeometrie und die entstehende Kaustik<sup>5</sup>.

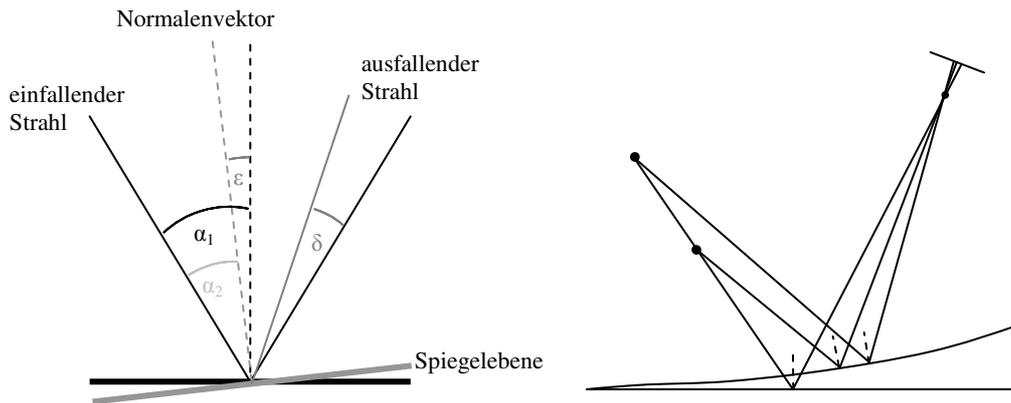


**Abbildung 3.5: Generierung eines virtuellen Mehrkameranystems auf Basis eines Spiegelsystems**

Approximiert man die Welle durch eine Sinusfunktion, ergibt sich ein minimaler Radius  $R$  an der Stelle der maximalen Krümmung  $k$  nach Gleichung 3.8 von 405 Metern.

$$R = \frac{1}{k} = \left| \frac{(1 + f'(x)^2)^{3/2}}{f''(x)} \right| \quad \text{mit} \quad f(x) = \frac{1}{100} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{200} \cdot x\right) \quad 3.8$$

<sup>5</sup> Bezeichnet bei optischen Systemen die Verbindungslinie oder -fläche der sich schneidenden Bildstrahlen eines parallel einfallenden Lichtbündels.



**Abbildung 3.6: Auswirkung variierender Normalenvektoren und gekrümmter Spiegel**

Der Winkel zwischen den ausfallenden Strahlen zweier verschieden ausgerichteter Spiegel  $\delta$  beträgt das Doppelte des Winkels zwischen den zugehörigen Normalenvektoren  $\varepsilon$  (Abbildung 3.6 links). An der Stelle der maximalen Krümmung  $k$  ist dieser Winkel  $9 \cdot 10^{-3}^\circ$ . Der Abbildungsfehler durch die Krümmung ist von der Entfernung der Objektpunkte abhängig (Abbildung 3.6 rechts). Unter der Voraussetzung, dass die Verzeichnungsparameter durch Kalibrierung in der Arbeitsentfernung bestimmt worden sind, die Tiefenausdehnung der Arbeitsvolumen gering ist und die Krümmung linear approximiert wird, sind die auftretenden Effekte mit der Affinität zu vergleichen. Ist der Spiegel dann so ausgerichtet, dass die Richtung der Welle mit einer Koordinatenachse zusammenfällt, kann der Effekt vollständig durch den Verzeichnungsparameter  $C_1$  modelliert werden. In der praktischen Anwendung werden die auftretenden Effekte durch die verschiedenen Verzeichnungsparameter modelliert. Alternativ beschreibt Luhmann (2005) die Abweichungen des gesamten optischen Systems von der Zentralperspektive mittels finiter Elemente.

Mit Hilfe einer Simulation, basierend auf den beschriebenen Annahmen und den Abständen Kamera-Spiegel = 25 cm und Spiegel-Objektpunkt = 100 cm (Versuch A), konnte der mittlere Wert des Affinitätsparameter auf  $C_1 = 5 \cdot 10^{-5}$  festgelegt werden (Berechnung über geometrische Beziehungen der Abbildung 3.6). Die Simulation kann auf eine zweidimensionale Betrachtung beschränkt werden, da der einfallende und ausfallende Strahl eine Ebene aufspannen und die Simulation für die maximal auftretende Krümmung durchgeführt wird. Die bestimmte Größenordnung von  $C_1$  ist im Vergleich zu der Affinität der verwendeten Kameras kleiner oder maximal gleich. Die Streuung des Affinitätsparameters in Abhängigkeit der Position der beobachteten Punkte (Abbildung 3.7) über die gesamte Beobachtungsfläche (simuliert  $40 \times 70 \text{ cm}^2$ ) beträgt bei genannter Konfiguration  $4 \cdot 10^{-5}$ . Alle Ergebnisse sind durch Simulation mit maximalen Einflussgrößen bestimmt worden und zeigen, dass die verbleibende Krümmung von Präzisionsspiegeln durch den Affinitätsparameter  $C_1$  modelliert werden kann. Auch die Simulationen für weitere Konfigurationen (Versuch B, C, D) zeigen, dass selbst bei ungünstiger Wirkung die Absolutbeträge  $10^{-4}$  bzw. die Streuung  $5 \cdot 10^{-5}$  nicht überschritten werden (Abbildung 3.8).

### 3 Photogrammetrische Grundlagen

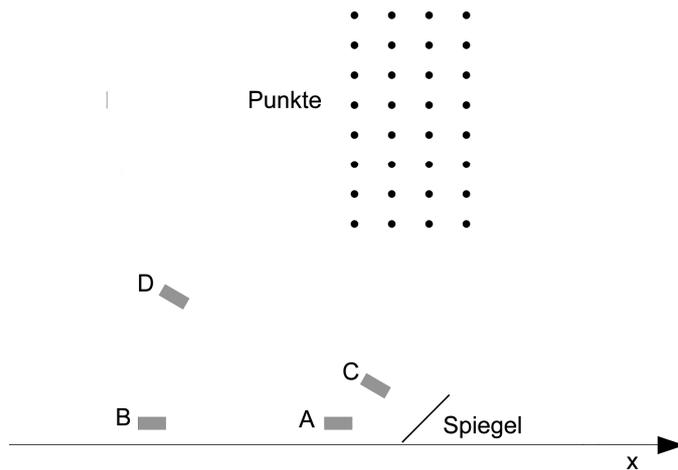


Abbildung 3.7: Konfiguration der synthetischen Versuche A, B, C, D

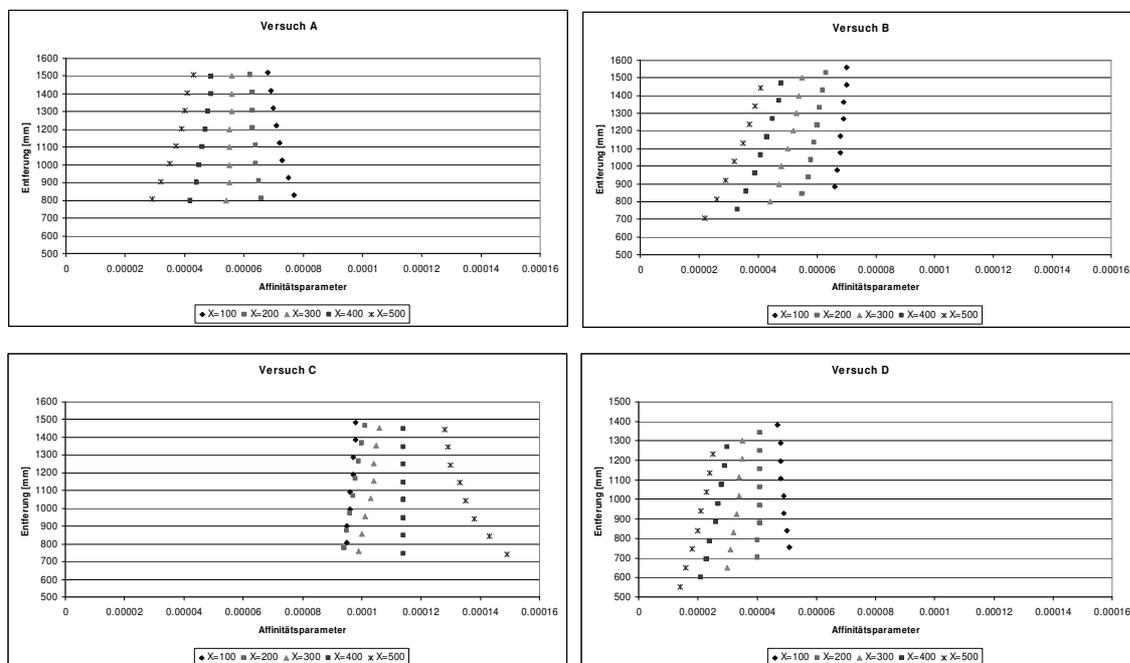


Abbildung 3.8: Abhängigkeit der Affinitätsparameter von der Aufnahmeabstand, Versuchsanordnung

#### 3.2.2 Mehrbildzuordnung

Die Mehrbildzuordnung, auch Korrespondenzanalyse genannt, bezeichnet das Verfahren, homologe Bildpunkte verschiedener Bilder eindeutig zuzuordnen, und ist die Grundvoraussetzung zur Berechnung der Objektkoordinaten von Punkten. Merkmals- und flächenbasierte Methoden beruhen auf der Zuordnung signifikanter, eindeutiger Eigenschaften der Bildregionen. Wie in Abschnitt 1.2.3 beschrieben, sind für PTV-Anwendungen die Merkmalsunterschiede schwach ausgeprägt. Eine weitere Methode nutzt die geometrischen Eigenschaften bei bekannter relativer Orientierung aus.

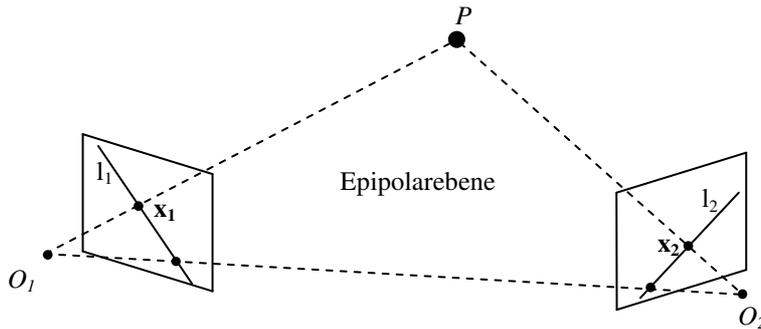


Abbildung 3.9: Epipolargeometrie

Betrachtet man eine Zweikameraanordnung, so besagt die Koplanaritätsbedingung, dass die beiden Projektionszentren  $O_1$  und  $O_2$  und der abgebildete Objekt-Punkt  $P$  in einer Ebene liegen. Die Abbildung dieser Epipolarebene in die beiden Bilder (Abbildung 3.9) ergibt die jeweilige Epipolarlinie ( $l_1$  und  $l_2$ ). Wie hieraus leicht zu erkennen ist, muss sich ein Bildpunkt  $x_2$  auf der zugehörigen Epipolarlinie in Bild 2 befinden, um das notwendige geometrische Kriterium eines homologen Bildpunktes zu Bildpunkt  $x_1$  zu erfüllen. Der mathematische Zusammenhang der Epipolargeometrie wird durch die Fundamentalmatrix  $\mathbf{F}$  (Luong, 1992; Luong und Faugeras, 1996) ausgedrückt.

$$\mathbf{x}_2^T \cdot \mathbf{F} \cdot \mathbf{x}_1 = 0 \quad 3.9$$

Die Epipolarlinie  $l_2$  im Bild 2 stellt alle möglichen Lösungen  $x_2$  der Gleichung 3.9 dar und berechnet sich nach:

$$l_2 = \mathbf{F} \cdot \mathbf{x}_1 \quad 3.10$$

Auf Grund der fehlerbehafteten Parameter der Orientierungsparameter und Bildpunktbestimmungen muss die Epipolarlinie als Band mit der Breite  $2d_1$  betrachtet werden. Die adäquate Breite bestimmt sich vor allem aus der Genauigkeit und Stabilität der Orientierungsparameter und der Genauigkeit der Bildpunkt-messung. Herrscht im Bild eine hohe Punktdichte, so sind alle Bildpunkte im Abstand von  $d_1$  mögliche homologe Bildpunkte. Vor allem, wenn die Orientierungsparameter nur mäßig gut bestimmt werden konnten und die Punktdichte sehr hoch ist, können die Mehrdeutigkeiten nicht zuverlässig gelöst werden. Der kürzeste Abstand zur Epipolarlinie ist dann kein hinreichendes Indiz für die Zuordnung.

Ergänzt man die oben beschriebene Kameraanordnung um eine dritte Kamera, so reduziert sich der Suchraum für alle verbleibenden Mehrdeutigkeiten im dritten Bild auf die Schnittpunkte (plus Toleranzbereich) von Kernlinien. Maas (1992b) zeigt, wie die Konfiguration der Kameras und die Punktdichte Einfluss auf die verbleibenden Mehrdeutigkeiten haben. Analog zu der Fundamentalmatrix  $\mathbf{F}$  kann für den Dreibildfall ein trifokaler Tensor  $\mathbf{T}$  (z. B. Hartley und Zisserman, 2000) bestimmt werden, der die geometrischen Beziehungen zwischen drei Kameras beschreibt.

Die Zuordnung, basierend auf der Epipolargeometrie, vereinfacht das dreidimensionale Problem durch Abbildung in den Bildraum. Kommt es auf Grund verschiedener optischer Dichten im Strahlengang zur Brechung (siehe Abschnitt 4), sind die abgebildeten Kernlinien gekrümmt. Zur vereinfachten Betrachtung kann in diesem Fall die Zuordnung im Objektraum durchgeführt werden. Alle ausgeführten Bedingungen gelten hierfür analog. Die ausführlichen Betrachtungen sind an der entsprechenden Stelle dargestellt.

### 3.2.3 Ausgleichungsverfahren

Die Auswertung von mehrkamerabasierten Systemen ist geprägt von Überbestimmungen. Ziel ist es, aus einer Anzahl  $n_L$  von Beobachtungen  $L$  eine Anzahl  $n_X$  von unbekanntem Parametern  $X$  zu bestimmen. Ist  $n_L > n_X$ , so existiert im Allgemeinen keine eindeutige Lösung, die Parameterbestimmung erfolgt mittels Schätzung. In dieser Arbeit beruhen alle Bestimmungen auf dem mathematischen Modell der vermittelnden Ausgleichung (Gauß-Markov-Modell) mit der Parameterschätzung durch die Minimierung der L2-Norm, auch Methode der kleinsten Quadrate (MkQ) genannt. Im Folgenden sollen die Grundlagen dafür kurz dargestellt werden, ausführlichere Betrachtungen und weitere Schätzer sind der einschlägigen Literatur zu entnehmen (z. B. Jäger et al., 2005).

Das funktionale Modell der vermittelnden Ausgleichung (Gleichung 3.11) beschreibt die wahren Beobachtungen  $L$  als eine Funktion der Unbekannten  $X$ , Beobachtungsgleichung genannt. Das stochastische Modell der Beobachtungen wird durch die Kovarianzmatrix<sup>6</sup>  $C_{ll}$  dargestellt. Sie repräsentiert die gesamten Genauigkeitsinformationen des funktionalen Modells.

$$L = \varphi(X) \tag{3.11}$$

Da der wahre Wert der Beobachtung nicht bekannt ist, wird die tatsächliche Beobachtung  $l$  um eine Verbesserung  $v$  ergänzt. Des Weiteren sind die Beobachtungen durch eine lineare Funktion der Unbekannten zu beschreiben oder entsprechend zu linearisieren. Nach Einführung einer Koeffizienten- oder Designmatrix<sup>7</sup>  $A$  können die linearisierten Verbesserungsgleichungen wie folgt dargestellt werden:

$$l + v = A \cdot x \tag{3.12}$$

Die Lösung des überbestimmten Gleichungssystems beinhaltet neben den Lösungen der Unbekannten zusätzlich Genauigkeitsangaben über die Beobachtungen und die Unbekannten. Durch Analyse der Kovarianzmatrix können somit alle Parameter sowie die Ausgleichung an sich bewertet werden.

## 3.3 Kamerakalibrierung

Bisher wurde immer vorausgesetzt, dass die Parameter der inneren und äußeren bzw. relativen Orientierung sowie die Bildkorrekturterme bekannt sind. Die Bestimmung dieser Parameter wird im Allgemeinen vor oder simultan mit der eigentlichen Messung durchgeführt. Die Parameter müssen im Rahmen der zu erzielenden Messgenauigkeit zuverlässig bestimmt werden. Die Stabilität der Parameter über die Zeit der Messung wird vorausgesetzt. Im Folgenden wird die Bestimmung der Parameter der inneren und äußeren Orientierungsparameter (inklusive aller Bildkorrekturparameter) als Kamerakalibrierung bezeichnet.

---

<sup>6</sup> Die Kovarianzmatrix enthält die Varianzen und Kovarianzen aller Beobachtungen und somit die Standardabweichungen dieser sowie die paarweisen Korrelationen der einzelnen Beobachtungen.

<sup>7</sup> Die Koeffizientenmatrix enthält zeilenweise die Ableitungen aller Beobachtungsgleichungen nach den Unbekannten an der Stelle der Näherungswerte.

Es gibt verschiedene Methoden, eine Kamerakalibrierung durchzuführen. Die meisten basieren auf der (mehrfachen) Aufnahme eines signalisierten Punktfeldes und einer anschließenden Bündelausgleichung<sup>8</sup>. Die Kamerakalibrierung im Rahmen der 3D-PTV-Messungen wird vor der eigentlichen Messung als Systemkalibrierung durchgeführt. Die Parameter aller Komponenten (Kameras, Spiegel) sind so in einem Guss bestimmt, die Fehlerfortpflanzung wird minimiert. Auf Grund der Verschiedenartigkeit der Kamera- und Messraumkonfiguration der einzelnen Versuchsanlagen sind spezielle Anpassungen und Methoden gewählt. Eine detaillierte Beschreibung wird in den Abschnitten der jeweiligen Versuche gegeben.

Wie im Abschnitt zuvor dargestellt, sind nach der Bündelausgleichung Genauigkeitsmaße für die Ausgleichung sowie für alle geschätzten Parameter bestimmt. Aus der Standardabweichung der Gewichtseinheit lässt sich das Potential der Konfiguration bestimmen. Für die im Anschluss durchzuführenden Versuche können damit die zu erwartenden Abstände homologer Bildpunkte von den zugehörigen Kernlinien bzw. die Punktlagegenauigkeiten abgeschätzt werden (Abschnitt 6.1). Es ist evident, dass unsicher bestimmte Orientierungsparameter einen größeren zulässigen Kernlinienabstand  $d_1$  (siehe Abschnitt 3.2.2) fordern.

Die Genauigkeit, vor allem aber die Zuverlässigkeit der Kamerakalibrierung sind abhängig vom Netzdesign der Aufnahmen (Fraser, 1996). Zu optimierende Parameter sind hierbei die Punktzahl im Testfeld und die Konfiguration und Anzahl der Strahlenschnitte. Eine zusätzliche Steigerung der Genauigkeit und Zuverlässigkeit kann durch die Anwendung des Konzeptes der Hyperredundanz (Fraser und Woods, 2005) erreicht werden. Dabei wird vorausgesetzt, dass alle systematischen Effekte modelliert und die Parameter zeitlich stabil sind.

#### 3.4 Genauigkeitsbetrachtung bei kleinen Verschiebungen

Die Betrachtung dynamischer Prozesse ist meist gleichbedeutend mit der Betrachtung von Differenzvektoren zwischen homologen Punkten einer Zeitreihe. Bei Anwendungen im Bereich der Messungen von Materialdeformationen (Maas und Hampel, 2006; Albert et al., 2002) oder bei der Bestimmung von Strömungsfeldern (z. B. Putze, 2006) betragen die Verschiebungen nur wenige Pixel bis hin zu Subpixelwerten (Abbildung 3.10). Im Objektraum entspricht dies, je nach Bildmaßstab, wenigen Millimetern. Auf dem Sensor betragen die Verschiebungen wenige  $\mu\text{m}$ . Mit Hilfe eines Signifikanztestes lässt sich überprüfen, ob die detektierte Verschiebung signifikant ist.

Durch Varianzfortpflanzung wird aus den Objektpunktgenauigkeiten die Güte der Differenzvektoren zwischen zwei Epochen bestimmt. Die Objektpunktgenauigkeiten wiederum sind abhängig von den Genauigkeiten der Messgrößen (Bildpunkte) und den zumeist vorab bestimmten Parametern (innere und äußere Orientierung, Verzeichnung). Die Signifikanz der Verschiebung hängt von der Lagegenauigkeit des Punktes zu den jeweiligen aufeinander folgenden Epochen und dem Freiheitsgrad des Gleichungssystems zur Bestimmung der Objektkoordinaten ab.

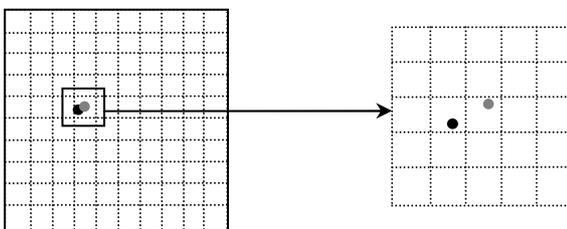


Abbildung 3.10: Darstellung einer kleinen Verschiebung auf dem Sensor

<sup>8</sup> Die Bündelausgleichung ist ein simultanes Ausgleichungsverfahren, bei dem sowohl die Parameter der inneren und äußeren Orientierung der Kamera(s) als auch die Objektkoordinaten als Unbekannte geschätzt werden.

### 3 Photogrammetrische Grundlagen

---

Mit den im Allgemeinen verwendeten Modellen können kleine Verschiebungen wegen der kalkulierten Standardabweichungen der Einzelpunkte und der geringen Redundanz statistisch nicht als solche nachgewiesen werden. In der Anwendung treten systematische Fehler auf, welche nicht durch das Abbildungsmodell erfasst werden. Die Ergebnisse des räumlichen Vorwärtsschnittes von benachbarten Bildpunkten sind hierdurch hoch korreliert. Hinterfragt man das stochastische Modell zur Fehlerberechnung und betrachtet die auftretenden Korrelationen der benachbarten Bildpunkte, so ist das Potential für höhere Genauigkeiten bei kleinen Verschiebungen gegeben, trotz der zu pessimistisch geschätzten Genauigkeiten der Ausgleichung.

#### 3.4.1 Theoretische Betrachtung der Korrelationen

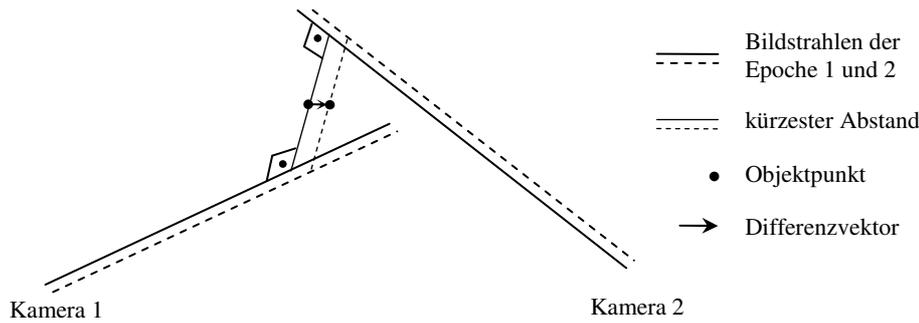
Um zu dokumentieren, dass das genutzte stochastische Modell die Genauigkeiten bei kleinen Verschiebungen zu pessimistisch bewertet, müssen alle Einflussgrößen und deren Zusammenhang näher betrachtet werden. Relevante Parameter sind die innere und äußere Orientierung, die Verzeichnung und die Bildpunktmessgenauigkeit. Zusätzlich muss das stochastische Modell auf die Eignung für diese speziellen Fälle geprüft werden.

Das Modell zur Korrektur der Bildfehler nach Brown beschreibt die globalen Eigenschaften der Abweichungen der Abbildung von der Zentralperspektive. Für deren Bestimmung ist die Qualität (Messgenauigkeit) und Quantität (Konfiguration) der genutzten Messpunkte für die Kalibrierung besonders entscheidend. Eine Veränderung der Anzahl und/oder der Konfiguration führen zu unterschiedlichen numerischen Ergebnissen, auch wenn die Unterschiede weniger als die Standardabweichungen der einzelnen Parameter betragen (bei gut konfigurierten Netzen). Eine Veränderung der Verzeichnungsparameter wiederum führt dazu, dass der korrigierte Bildstrahl für jeden Korrekturparametersatz eine andere Richtung beschreibt. Es ist jedoch leicht zu erkennen, dass diese unterschiedlichen Werte der Parameter kaum Einfluss auf die Differenz der Korrekturwerte ( $dx'$ ,  $dy'$ ) benachbarter Bildpunkte  $BP_1$  und  $BP_2$  haben. Ebenso hat fehlerhaft bestimmte innere und äußere Orientierung wenig Auswirkung auf die Differenz zweier benachbarter Bildstrahlen.

$$dx_1' - dx_2' \Big|_{Param1} \cong dx_1' - dx_2' \Big|_{Param2} \quad 3.13$$

Die Standardabweichung der Objektkoordinaten eines räumlichen Vorwärtsschnittes ist ein Maß für den kürzesten Abstand der Bildstrahlen aller Kameras. Dies ist zu erkennen, wenn man sich die Verbesserungen der Bildkoordinaten als Projektion des kürzesten Abstandes zwischen Bildstrahl und 3D-Punkt auf den Sensor betrachtet. Ändert sich die Orientierung einer Kamera, so ändert sich auch der zugehörige Raumstrahl eines Bildpunktes und somit der kürzeste Abstand. Raumstrahlen benachbarter Bildpunkte eines Bildes ändern bei einer Änderung der Orientierung ihre Richtung in nahezu identischer Weise und sind daher sehr hoch korreliert.

Ausschlaggebend bei Differenzmessungen sind weniger die kürzesten Abstände der homologen Bildstrahlen einer Epoche als vielmehr die Verschiebebeträge im Bildraum (Abbildung 3.11). Demzufolge trägt die Güte der Bildpunktmessung einen wesentlich höheren Anteil am Genauigkeitspotential als die Güter der Orientierungsparameter. Dies ist Vergleichbar mit der Analyse von 2D-Verschiebungen in lateraler Richtung, welche durch eine einzelne Kamera beobachtet wird.



**Abbildung 3.11: Räumliche Vorwärtsschnitte zweier Epochen und dazugehöriger Differenzvektor**

Eine hohe Zahl von Redundanzen ist charakteristisch für photogrammetrische Auswertungen. Ein einfacher Vorwärtsschnitt, basierend auf zwei Kameras, zeichnet sich durch eine Überbestimmung aus. Eine Bündelausgleichung, z. B. einer Simultankalibrierung, besitzt mehrere hundert oder tausend Freiheitsgrade. Die überbestimmten Gleichungssysteme werden in den meisten Fällen nach demselben Prinzip, der Methode der kleinsten Quadrate (siehe Abschnitt 3.2.3), gelöst. Die Voraussetzungen für diesen Ansatz (unendlich große Stichprobe mit normalverteilten Abweichungen) werden jedoch nur in den seltensten Fällen erfüllt. Im Fall eines einfachen Vorwärtsschnittes werden aus 4 Messwerten 3 Unbekannte geschätzt. Systematische Fehler auf Grund unzureichender Modelle für die innere und äußere Orientierung und die Verzeichnung können nicht ausgeschlossen werden. Als Maß für die Genauigkeit von Messungen werden Standardabweichungen ermittelt und angegeben. Die Standardabweichung ist per Definition ein Maß für die Streuung einer Zufallsvariable um ihren Mittelwert und gilt unter denselben Bedingungen des Gauß-Markov-Modells.

Bei der Berechnung des räumlichen Vorwärtsschnittes werden die Bildpunktmessungen als einzige Beobachtungen eingeführt. Alle weiteren Parameter gehen zumeist als fehlerfreie Konstanten in die Ausgleichung ein. Somit ergeben sich die Varianzen der Unbekannten allein aus den Gewichten der Beobachtungen, welche als unkorreliert behandelt werden. Die Varianzen der Orientierungsparameter können durch eine separate Varianzfortpflanzung (Gleichung 3.14) in das stochastische Modell einfließen.

$$\hat{C}_{xx} = F \cdot \hat{C}_{ll} \cdot F^T$$

mit

|                |  |             |
|----------------|--|-------------|
| $F$            | Funktion   | <b>3.14</b> |
| $\hat{C}_{ll}$ | Kovarianzmatrix der ursprünglichen Beobachtungen |             |
| $\hat{C}_{xx}$ | Kovarianzmatrix der Unbekannten                  |             |

Die Bildstrahlen benachbarter Punkte ( $x$  und  $x + \Delta x$ ) sind durch das gemeinsame globale funktionale Modell ( $f(x)$  und  $f(x + \Delta x)$ ) miteinander verknüpft. Dieser Zusammenhang müsste in die Kovarianzmatrix  $C_{ll}$  integriert werden. Dazu ist aber eine explizite Darstellung der Korrelation erforderlich, welche eine nicht bekannte Funktion des Abstandes der Bildpunkte ist.

In der beurteilenden Statistik werden Hypothesentests herangezogen, um die Resultate von Messverfahren bestimmter Güte zu bewerten (z. B. Ament, 2003). Dabei wird geprüft, ob ein Erwartungswert  $\mu_0$  einer Beobachtung  $x$  auf Grund deren Varianz einem bestimmten Erwartungswert  $\mu$  entspricht (Nullhypothese  $H_0$ , Gleichung 3.15).

$$H_0: \mu_0 = \mu \quad 3.15$$

Die Testgröße  $t_p$  (Gleichung 3.16) wird mit dem Quantil der t-Verteilung  $t_{f,1-\alpha/2}$  verglichen.

$$t_p = \frac{|x - \mu_0|}{\sigma_x} \quad 3.16$$

Das Quantil der t-Verteilung ist abhängig vom Freiheitsgrad  $f$  der Messreihe und dem gewählten Signifikanzniveau  $\alpha$ . Die Nullhypothese dann verworfen, wenn  $t_p > t_{f,1-\alpha/2}$  ist. Im Fall einer Verschiebung ist diese dann mit einer Sicherheitswahrscheinlichkeit  $1 - \alpha$  nachgewiesen.

Im Fall des räumlichen Vorwärtsschnittes, basierend auf zwei bzw. vier Kameras, gilt bei einem Signifikanzniveau von  $\alpha = 5\%$  ein kritischer Wert von 12,7 bzw. 2,6. Dies bedeutet, dass Deformationen bzw. Verschiebungen unter statistischer Beurteilung erst ab Beträgen über der 12,7-fachen bzw. 2,6-fachen Standardabweichung sicher festgestellt und deren Beträge nur für einen solchen Konfidenzbereich angegeben werden können.

Als Konsequenz dieser Analyse zeigt sich, dass die ermittelten Genauigkeiten auf Grund des unzureichenden stochastischen Modells zu pessimistisch geschätzt werden. Dadurch sind die statistischen Hypothesentests für bestimmte Aufgaben nicht aussagekräftig. Auf Grund der Rahmenbedingungen sind bei realen Anwendung Fehler 2. Art, d.h. die Nullhypothese wird beibehalten, obwohl diese falsch ist, unvermeidbar. Durch geeignete praktische Untersuchungen kann die Korrelation der Objektpunkte benachbarter Epochen bestimmt werden.

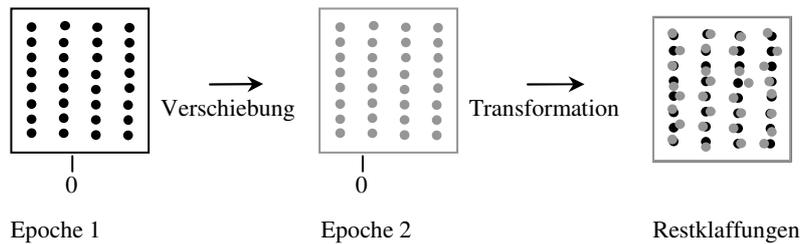
#### 3.4.2 Praktische Untersuchungen

Wie gezeigt wurde, sind für bestimmte Auswertungen die zu erwartenden Genauigkeiten auf Grund von Korrelationen der Unbekannten (Neupunkte) höher zu vermuten. Vor allem betrifft das Analysen von Verschiebungen zwischen einzelnen Epochen mit geringen Beträgen. Hierzu wurden eine Reihe praktischer Tests durchgeführt, die Aufschluss über das Potential von photogrammetrischen Messungen dieser Art geben sollen.

Das Aufnahmesystem bestand aus einer einzelnen Machine Vision Kamera mit einem 4-fach Spiegelsystem. Die Grundlagen zur Nutzung von Spiegelsystemen und deren Eigenschaften sind im Abschnitt 1.3 ausgeführt. Ein kommerzielles Softwarepaket wurde zur Bestimmung der Kalibrierungs- und Orientierungsparameter des Kamerasystems genutzt. Die damit gewonnenen Ergebnisse dienten als Grundlage für den räumlichen Vorwärtsschnitt.

Unter der Annahme, dass sich die Form eines massiven Objektes quasi nicht ändert, wurde eine Testtafel mit circa 200 Punktmarken zu verschiedenen Epochen beobachtet. Zwischen den einzelnen Epochen fand eine Verschiebung um geringe Beträge in lateraler oder Tiefenrichtung statt. Da eine Änderung der Form des Objektes ausgeschlossen wird, müssen die Punktwolken aller Epochen identisch sein. Die resultierenden Abweichungen sind durch die verbleibenden Unzulänglichkeiten des Messsystems zu begründen. Durch eine Transformation der Punktwolken zueinander können die durch Messunsicherheiten (zufällige Fehler) entstandenen Restklaffungen zwischen den einzelnen Punktwolken bestimmt werden (Abbildung

3.12). Die Entfernung zwischen dem Kamerasystem und der Tafel betrug in Anlehnung an die Strömungsversuche etwa 1 Meter.



**Abbildung 3.12: Schematische Darstellung der Versuchsdurchführung**

Aus den Untersuchungen ergeben sich je Epochenpaar folgende Informationen:

- Standardabweichungen  $\sigma_p$  der Einzelpunkte aus den Vorwärtsschnitten
- Standardabweichung  $\sigma_s$  der Strecke zwischen homologen Objektpunkten
- Restklaffungen  $r_{XYZ}$  nach der Transformation zwischen homologen Objektpunkten
- Verschiebungsbetrag in Millimeter im Objektraum und in Pixel im Bildraum

Zielgröße der Untersuchung ist der Quotient  $k$  aus der Standardabweichung der Strecke  $\sigma_s$  und der Restklaffung  $r_{XYZ}$  zwischen den homologen Punkten (Gleichung 3.17) und dessen Abhängigkeit von dem Verschiebungsbetrag auf dem Sensor.

$$k = \frac{\sigma_s}{r_{XYZ}} \tag{3.17}$$

#### 3.4.3 Ergebnisse der praktischen Untersuchungen

Es wurden drei verschiedene Versuche (V1, V2, V3) zur Untersuchung der beschriebenen Auswirkung durchgeführt. Die Rahmenbedingungen der einzelnen Versuche sind in Tabelle 3.1 dargestellt. Das Potential der Messung entspricht der Lagegenauigkeit im Objektraum, basierend auf der Standardabweichung der Gewichtseinheit der Kalibrierung. Sind die Bedingungen während des Vorwärtsschnittes ähnlich denen bei der Kalibrierung, so sind Objektkoordinatengenauigkeiten in dieser Größenordnung zu erwarten. Im Versuch V1 ist dies gelungen, die Versuche V2 und V3 konnten das Potential für einen einzelnen Vorwärtsschnitt nicht voll ausschöpfen.

|                                     | V1                 | V2                 | V3                 |
|-------------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| $\sigma_0$ Kalibrierung             | 0,51 $\mu\text{m}$ | 0,36 $\mu\text{m}$ | 0,50 $\mu\text{m}$ |
| Entfernung Kalibrierung             | 90 cm              | 65 cm              | 85 cm              |
| Entfernung Messung                  | 95 cm              | 75 cm              | 115 cm             |
| Potential Messung (lateral)         | 0,08 mm            | 0,04 mm            | 0,09 mm            |
| RMSE <sub>lat</sub> der Neupunkte   | 0,07 mm            | 0,13 mm            | 0,13 mm            |
| RMSE <sub>Tiefe</sub> der Neupunkte | 0,13 mm            | 0,20 mm            | 0,23 mm            |

**Tabelle 3.1: Rahmenbedingungen der durchgeführten Versuche**

### 3 Photogrammetrische Grundlagen

Die Eingangsvermutung wird durch den Vergleich der Standardabweichungen der Neupunkte mit den Residuen der Transformation untermauert. Abbildung 3.13 stellt den Vergleich der beiden Größen für alle drei Versuche dar. Die Daten des ersten Versuches (V1) beinhalten sowohl Verschiebung zur Seite als auch in Tiefenrichtung. Es ist hier deutlich zu sehen, dass die Standardabweichungen der Neupunkte (helle Balken) kaum mit der Position variieren. Hingegen werden Residuen der Transformation mit zunehmendem Abstand von der ersten Epoche größer. Eine Verschiebung in Tiefenrichtung bewirkt nur eine kleine Änderung der seitlichen Verschiebung auf dem Sensor. Somit sind kaum Änderungen der zugehörigen Residuen zu erwarten. Dies zeigt sich auch in Abbildung 3.13.

Wie der Tabelle 3.1 zu entnehmen ist, konnte für die Versuche V2 und V3 das Potential nicht erreicht werden. Es ist aber in Abbildung 3.13 deutlich zu sehen, dass die ermittelten Restklaffungen die Größenordnung des zuvor abgeschätzten Potentials aufweisen. Obwohl die Genauigkeit des Vorwärtsschnittes scheinbar schlecht ist, kann bei der Detektion von kleinen Verschiebungen das Potential der Konfiguration erreicht werden.

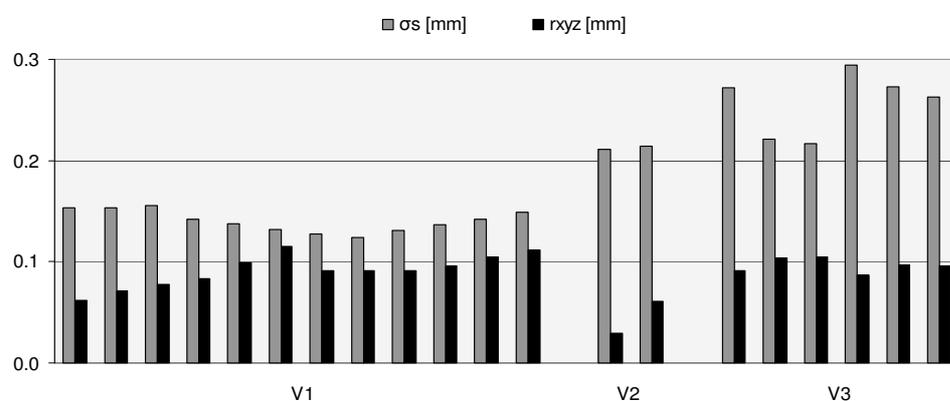


Abbildung 3.13: Vergleich der Standardabweichungen und der Restklaffungen

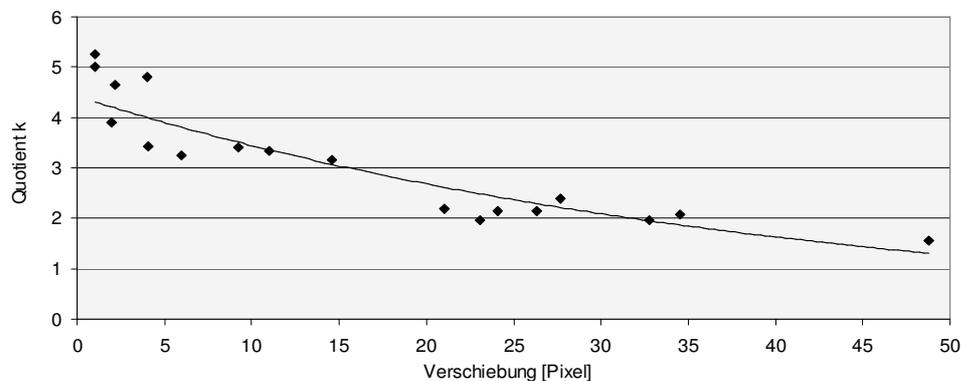


Abbildung 3.14: Abhängigkeit des Quotienten  $k$  von der Verschiebung auf dem Sensor

Aus den in Abbildung 3.13 dargestellten Größen wird mit Hilfe der Gleichung 3.17 der Quotient  $k$  berechnet. Die Eingangsvermutung beruht darauf, dass eine Abhängigkeit des Quotienten  $k$  von dem Verschiebungsbetrag auf dem Sensor besteht. In Abbildung 3.14 sind die Quotienten über dem Verschiebungsbetrag im Bildraum abgetragen. Die Quotienten basieren auf den Daten der Versuche V1 und V3. Der Versuch V2 zeichnet sich durch wesentlich größere Quotienten aus. Es ist deutlich zu erkennen, dass der Quotient mit dem Betrag der Verschiebung auf dem Sensor abnimmt. Dies ist hier angedeutet mit einer Exponentialfunktion. Diese exemplarische Funktion ist jedoch nicht für eine Extrapolation der Genauigkeit geeignet. Zu erkennen ist, dass für große Verschiebungsbeträge der Quotient gegen 1 strebt. Das bedeutet, dass zwischen den Einzelpunkten keine Korrelation mehr besteht. Es war zu erwarten, dass die Korre-

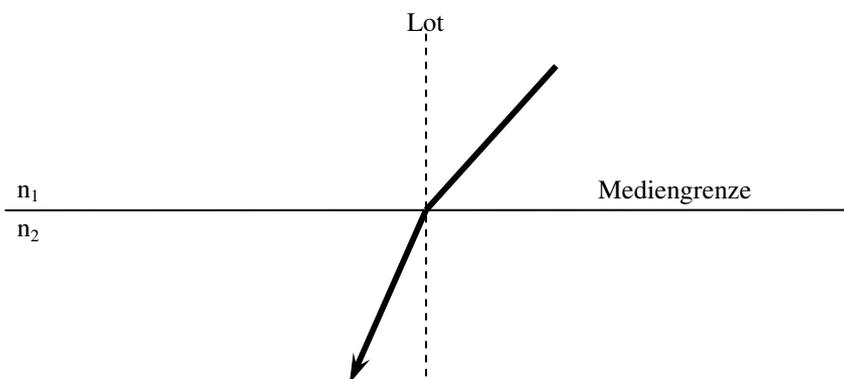
### 3.4 Genauigkeitsbetrachtung bei kleinen Verschiebungen

lationen nur lokal eine Genauigkeitssteigerung bewirkt. Dieser Ansatz minimiert lokale, nicht modellierte Sensor- und Optikeigenschaften (z.B. Sensorunebenheiten, verbleibende Verzeichnungseffekte) sowie Orientierungsfehler.

## 4 Mehrmediengeometrie

Grundvoraussetzung für eine photogrammetrische Auswertung ist der optische Zugang zu dem zu beobachtenden Objekt. Im Allgemeinen befinden sich sowohl die Kameras als auch das Objekt in Luft und werden nicht durch ein weiteres, sich im Strahlengang befindliches Objekt beeinflusst. Die Auswertung solcher Konfigurationen geschieht nach den im Abschnitt 3 beschriebenen Methoden. Bestimmte Anwendungen zeichnen sich dadurch aus, dass sich zwischen den Kameras und dem zu beobachtenden Objekt weitere transparente Schichten befinden und somit eine Beobachtung durch diese hindurch möglich ist. Beispiele für solche Anwendungen sind Beobachtung durch Glasfenster oder Flüssigkeiten hindurch. Sind die Brechungsindizes  $n_i$  unterschiedlich, so werden die Strahlen an den einzelnen Mediengrenzen gebrochen. In diesem Fall kann das Modell der Zentralperspektive nicht mehr verwendet werden. Eine Möglichkeit, die Brechung an Grenzflächen zu umgehen, ist die Anwendung von Index-Matching. Hierbei werden alle Medien so ausgewählt, dass nur ein Brechungsindex im Strahlengang vorherrscht. Dies geschieht z. B., indem das Kamerasystem in die Flüssigkeit gelegt wird, in der sich auch das zu beobachtende Objekt befindet. Zusätzlich wird das Material der Trennfläche an den Brechungsindex der Flüssigkeit angepasst. Budwig (1994) zeigt Methoden und Materialien, die sich für eine praktische Realisierung eignen.

Eine alternative Lösung ist die strenge Modellierung der gebrochenen Strahlen. Hierzu wird zum einen vorausgesetzt, dass sich das Licht in homogenen, isotropen Medien geradlinig ausbreitet. Zum anderen ändert das Licht beim Übergang zwischen zwei Medien verschiedener optischer Dichte seine Ausbreitungsgeschwindigkeit. Da das Licht dem schnellsten Weg durch die Medien folgt, ergibt sich an den Mediengrenzen ebenso eine Richtungsänderung (Abbildung 4.1).



**Abbildung 4.1: Brechung an der Mediengrenze zwischen Medien verschiedener optischer Dichte**

In der Übersetzung der Manuskripte von Willebrord Snel, in latinisierter Form Willebrordus Snellius, (Hentschel, 2001) findet sich die Beschreibung der Richtungsänderung formuliert als:

$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad 4.1$$

## 4.1 Existierende Methoden der Mehrmedienphotogrammetrie

Weiterhin gilt, dass der einfallende und gebrochene Strahl sowie der Normalenvektor der Trennfläche im Brechungspunkt in einer Ebene liegen. Mit diesen Grundlagen kann bei bekannten Trennflächenparametern jeder Strahl durch alle Medien verfolgt werden.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Wasserströmung innerhalb eines Plexiglasmodells analysiert. Dieser würfelförmige Plexiglaskörper (Kantenlänge 11,5 cm) hat mittig eine zylindrische Bohrung (Durchmesser 8 cm) (Abbildung 4.2).

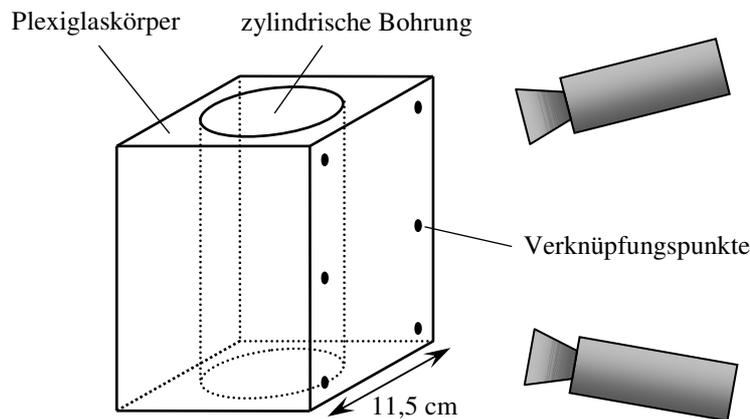


Abbildung 4.2: Darstellung des verwendeten Modells und des Kamerasystems

### 4.1 Existierende Methoden der Mehrmedienphotogrammetrie

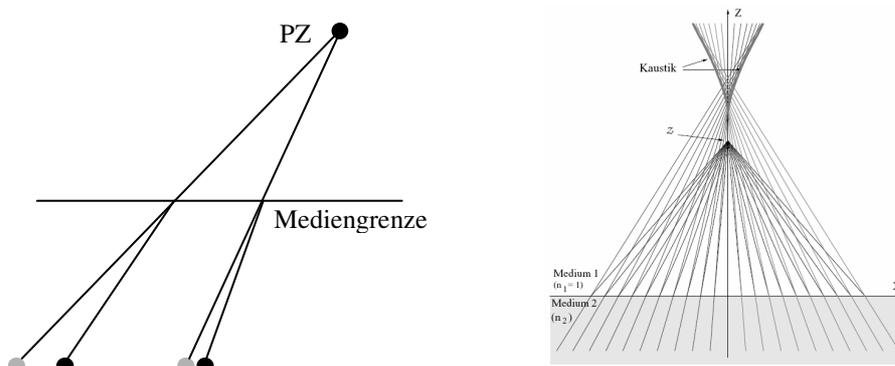
In den vergangenen Jahrzehnten befassten sich eine Vielzahl von Autoren mit der Lösung der Zwei- oder Mehrmedienphotogrammetrie. Rinner (1948 und 1969) entwickelte die ersten Module zur Lösung der relativen Orientierung und Auswertung von Zweimedienanwendungen mit Hilfe von Analoggeräten. Eine allgemeine Betrachtung der Mehrmedienphotogrammetrie führt Höhle (1971) durch und zeigt das Potential am Beispiel der Vermessung eines Schiffswracks. Kotowski (1987) stellt die Verallgemeinerung der Strahlverfolgung durch beliebig viele, parametrisierbare Trennflächen und die Möglichkeit der Integration des Moduls in ein Bündelausgleichsprogramm dar. Dies wird an einem vereinfachten Beispiel mit optimaler Konfiguration demonstriert. Die Anwendung dieses Moduls an komplexen Flächen (z. B. Abschnitt 6.4) bedarf eines erhöhten Aufwands. Okamoto (1982 und 1984) arbeitete an der Modellierung von wellenbewegten Wasseroberflächen in Luftbildern. Für hochgenaue Messungen im Nahbereich ist es zumeist günstig, eine transparente Trennscheibe in das System zu integrieren. Wolff und Förstner (2000) umgehen die Wellenbewegung durch den Einsatz einer Wanne mit transparentem Boden.

Mittlerweile gibt es eine Anzahl von Veröffentlichungen mit sehr unterschiedlichen Anwendungshintergründen für die Mehrmedienmodellierung. Przybilla et al. (1990) stellen die Vermessung von Kernbrennstäben vor, Elfick und Fryer (1984) kartieren Küstengewässer, Westaway et al. (2001) bestimmen das digitale Höhenmodell von Flussbetten. Buttler et al. (2002) verbessern das Mehrmedienmodul soweit, dass iterativ in Verbindung mit einer Vielzahl von kommerziellen Softwarepaketen die Unterwasserpunkte bestimmt werden können. In der dreidimensionalen Strömungsmesstechnik in Flüssigkeiten (z. B. Maas, 1992a) wird ebenso die Modellierung des Strahlenverlaufes genutzt.

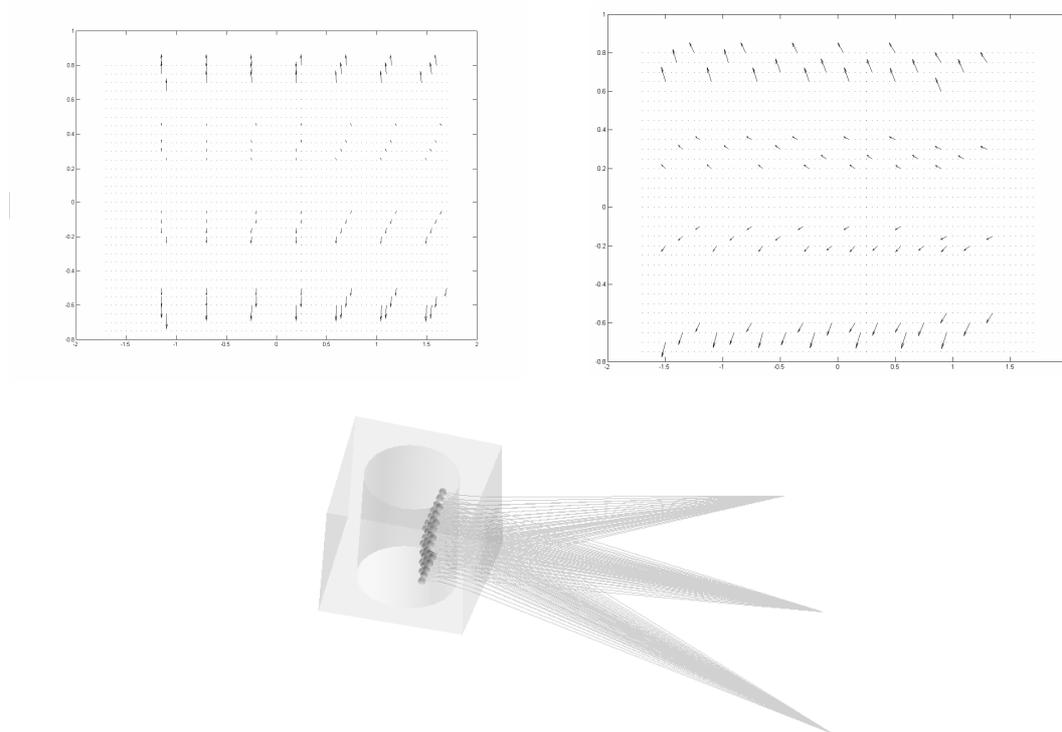
Betrachtet man die bisher angewandten Strategien, um den Einfluss der Mehrmediengeometrie zu berücksichtigen, so reduzieren sie sich auf drei Ansätze, die allesamt dasselbe Ergebnis liefern. Kotowski (1987) wählt die strenge Strahlverfolgung, die den realen Strahlengang, und damit die Abbildung beschreibt. Maas (1995) betrachtet basierend auf den Arbeiten von Phillips (1981) die scheinbaren Örter der Objektpunkte (direkte Abbildung ohne Einfluss von Brechung) und korrigiert iterativ den radialen Versatz  $\Delta R$

## 4 Mehrmediengeometrie

im Objektraum. Die zentralperspektive Abbildung durch ein festes Projektionszentrum bleibt erhalten. Wolff (2007) hingegen hält die Objektpunkte und die Strahlen im letzten Medium (Abbildung 4.3) fest und variiert die Projektionszentren. Daraus ergibt sich ein nicht punktförmiges Projektionszentrum. Die resultierende Projektionsfläche entspricht der kaustischen Fläche des Strahlenbündels. Die strenge Modellierung des Strahlenverlaufes kann in beide Ansätze (Maas und Wolff) überführt werden. Sind keine grundlegenden Vereinfachungen durchzuführen, ist die Auswertung durch die strenge Modellierung vorteilhaft.



**Abbildung 4.3:** links – scheinbare Örter (grau) der realen Punkte (schwarz), rechts – resultierende Kautik (Wolff, 2007)



**Abbildung 4.4:** oben – Differenzvektoren zwischen Abbildungen mit und ohne Brechung, unten – Skizze der Konfiguration der Kamerapositionen (frontal und seitlich) und Strahlenbündel

Um den Effekt der Brechung in diesem Körper zu verdeutlichen, wurde im Inneren des Zylinders ein in Anlehnung an reale Versuche synthetischer Datensatz von Objektpunkten generiert. Diese Objektpunkte

wurden zum einen unter Berücksichtigung der Brechung und zum anderen ohne Beachtung der Trennflächen auf den Sensor abgebildet. Abbildung 4.4 zeigt die Differenzvektoren zwischen den verschiedenen generierten Bildpunkten. Links sind die Differenzvektoren für eine frontal auf den Zylinder gerichtete Kamera, rechts für eine seitlich angeordnete Kamera zu sehen. Außerdem zeigt die Abbildung 4.4 unten ein Modell der Konfiguration.

### 4.2 Erweiterte Ansätze für komplexe Trennflächen

Die bisher genutzten Ansätze basieren entweder auf Annahmen für die Grenzflächen zwischen den Medienübergängen oder auf planparallelen Trennscheiben, welche modellierbar sind. Für das hier verwendete Versuchsobjekt sind diese Annahmen nicht möglich und eine implizite Beschreibung der komplexen Trennflächen ist nötig (Putze, 2007). In der Abbildung 4.2 ist das genutzte Versuchsobjekt, bestehend aus ebenen und zylindrischen Trennflächen, dargestellt.

Für die Modellierung des Zuganges gibt es mehrere mögliche Strategien, die von Kotowski (1987) vorgestellt worden sind. Eine weitere, hier genutzte Strategie basiert auf der sequentiellen Zusammensetzung einzelner notwendiger Teilschritte, die im Weiteren näher beschrieben sind.

- a) Bestimmung der Flächenparameter für alle Trennflächen und der Verknüpfungspunkte in einem einheitlichen Koordinatensystem (Modellsystem)
- b) Ermittlung des Brechungsindizes des Plexiglases
- c) Bestimmung der relativen Orientierungsparameter (Kamerasystem) und der inneren Orientierungen (samt zusätzlicher Parameter) des Kamerasystems
- d) Transformation des Kamerasystems in das Modellsystem unter Zuhilfenahme der Verknüpfungspunkte
- e) Bestimmung der zu den jeweiligen Bildpunkten gehörenden Raumstrecken im Beobachtungsvolumen via Raytracing
- f) Mehrbildzuordnung und Objektkoordinatenbestimmung, basierend auf den Raumstrecken (analog zu den Kernlinien im Bildraum)

Einige dieser Teilschritte (Punkte a und b) sind ohne weiteres separat durchführbar, ohne dass das Gesamtsystem an Genauigkeit verliert. Die Zusammensetzung der einzelnen Teilsysteme (Punkt d) indes beinhaltet eine ungünstige Fehlerfortpflanzung, die im Rahmen einer Bündelausgleichung mit zusätzlichen Unbekannten vermieden werden könnte. In der Praxis ergeben sich durch die Konfiguration verschiedene Problematiken. Vor allem der eingeschränkte Sichtbereich und Zugang gewährleisten eine Bestimmung aller relevanten Parameter (Kameraorientierungs- und -kalibrierungsparameter und Formparameter der Trennflächen in einem Koordinatensystem) nicht mit ausreichender Zuverlässigkeit.

Um die Sensorflächen optimal auszunutzen, umfasst das Gesichtsfeld jeder Kamera lediglich den Plexiglaswürfel und die Verknüpfungspunkte am äußeren Bildrand. Die Bestimmung der relativen Orientierungen der Kameras bedarf Beobachtungen homologer Punkte verschiedener Kameras. Das einzige zugängliche Volumen mit einem sich überlappenden Gesichtsfeld der rechtwinklig zueinander angeordneten Kameras ist im Inneren des Zylinders (Durchmesser 8 cm). Abgesehen davon, dass die Platzierung eines Kalibrierhilfsmittels im Inneren nur im „trockenen“ Zustand möglich ist, kann ein flexibel einsetzbares Hilfsmittel nur einen geringen Teil des Sensors abdecken. Eine weitere von Kotowski (1987) vorgeschlagene Strategie, eine Bewegung zwischen Kamera- und Modellsystem, lässt sich im Augenblick auf Grund der hohen Masse der Bauteile nicht realisieren. Durch einen erhöhten Hardwareaufwand wird es sicher möglich sein, die Rahmenbedingungen für eine Bündelausgleichung zu schaffen. Wie hoch die letztlich erzielbare Genauigkeitssteigerung sein kann, muss in einer separaten Betrachtung (Simulation oder realer Versuch) festgestellt werden.

### 4.2.1 Bestimmung der Modellparameter

Für alle folgenden Schritte sind Parameter aller Trennflächen in einem einheitlichen, bekannten Koordinatensystem notwendig. Die äußeren, ebenen Trennflächen sind z. B. durch die HESSEsche Normalform zu beschreiben:

$$n_x \cdot x + n_y \cdot y + n_z \cdot z - d_0 = 0 \quad 4.2$$

Die innere Trennfläche gleicht näherungsweise einem Kreiszyylinder. Dieser wird beschrieben durch die Zylinderachse ( $X = P_c + \lambda \cdot V_c$ ) und einem Radius  $R$ . Der Zylinder ist nun beschrieben durch:

$$\frac{|V_c \times (P_c - X)|}{|V_c|} - R = 0 \quad 4.3$$

Zur Formbestimmung der Trennflächen sind verschiedene taktile und berührungsfreie Oberflächenmesssysteme denkbar. Da im Anschluss eine Transformation eines optischen Messsystems in das Modellsystem stattfinden muss, wofür signalisierte Marken benötigt werden, bietet sich eine Bestimmung des gesamten Modells inklusive Verknüpfungspunkte durch ein hochgenaues optisches Messsystem an.

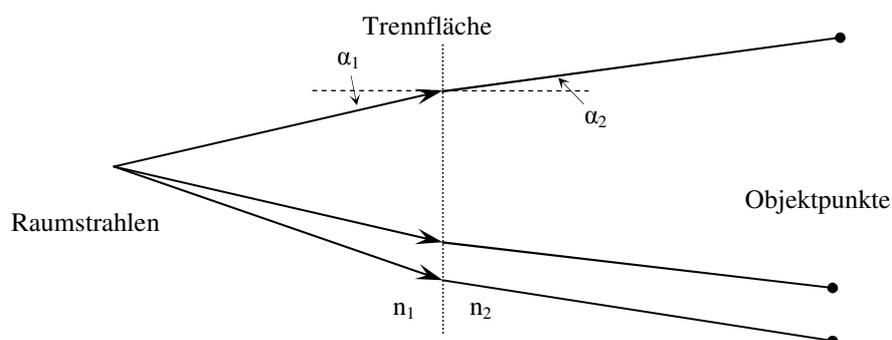
Zusätzlich zu den Markierungen der Verknüpfungspunkte wurden zahlreiche Punktmarken auf dem gesamten Messobjekt angebracht. Diese wurden mit einer Spiegelreflexkamera aufgenommen. Die Objektkoordinaten wurden mit Hilfe der Auswertung eines Mehrbildverbandes bestimmt. Die Parameter der Trennflächen sind das Ergebnis von ausgleichenden Flächen, beschrieben durch die jeweiligen Punkte. Die gewonnenen Ergebnisse liegen alle im selben Koordinatensystem vor.

Die Formparameter der Flächenelemente konnten mit einer Genauigkeit von  $10 \mu\text{m}$  für die Ebene und  $10 \mu\text{m}$  bzw.  $0,5 \text{ mrad}$  für den Zylinder bestimmt werden. Der RMSE (*engl., root mean square error*) der einzelnen Lagekomponenten der Verknüpfungspunkte beträgt je  $3 \mu\text{m}$ . Die Genauigkeiten der Messung sind hinreichend gut, um als konstante Parameter in die weitere Auswertung übernommen zu werden. Eine Veränderung im Laufe der Zeit ist nicht zu befürchten.

### 4.2.2 Bestimmung des Brechungsindex

Zur Bestimmung des Brechungsindex von transparenten Feststoffen gibt es verschiedene Möglichkeiten. Neben Tabellen mit vorgegebenen Brechungsindizes können diese experimentell durch ein Refraktometer bestimmt werden. Dazu wird mit dem Refraktometer der Winkel der einsetzenden Totalreflexion ermittelt, aus dem der zugehörige Brechungsindex abgeleitet werden kann. Dafür müssen kleine Proben des Feststoffes aufbereitet werden. Aus praktischen Gründen wurde auf diese Art der Bestimmung verzichtet und ein alternatives optisches Verfahren entwickelt. Dabei wird ausgenutzt, dass der Schnittwinkel zweier Strahlen in unterschiedlichen Medien Informationen über das Verhältnis der Brechungsindizes beider Medien enthält. Sind die in Abbildung 4.5 dargestellten Objektpunkte, Raumstrahlen und die Trennfläche bekannt, können die Winkel  $\alpha_1$  und  $\alpha_2$  und daraus folgend der Brechungsindex  $n_2$  (Gleichung 4.1) bestimmt werden. Umgesetzt wurde dieses Verfahren mit Hilfe von zusätzlichen Punkten auf der Rückseite des Plexiglaskörpers, deren Koordinaten im Zuge der Vorvermessung bestimmt worden. Aus

den Bildpunkten dieser Punkte wurde der zugehörige Raumstrahl einer Kamera berechnet und mit der Trennfläche verschnitten. Die Winkel  $\alpha_1$  und  $\alpha_2$  ergeben sich zwischen der Normalen in Durchstoßpunkt und den Vektoren Projektionszentrum-Durchstoßpunkt bzw. Durchstoßpunkt-Objektpunkt. Um den Einfluss der Fehler (Punktfehler der Objektpunkte, Fehler der Trennflächenparameter, Fehler der Orientierungsparameter der Kamera) zu minimieren, sind die Winkel, und damit die Winkeldifferenz  $\alpha_1 - \alpha_2$ , möglichst groß zu wählen. Somit konnte der Brechungsindex des Plexiglasses als Mittel aus 9 Messungen mit  $n = 1,51$  bestimmt werden.



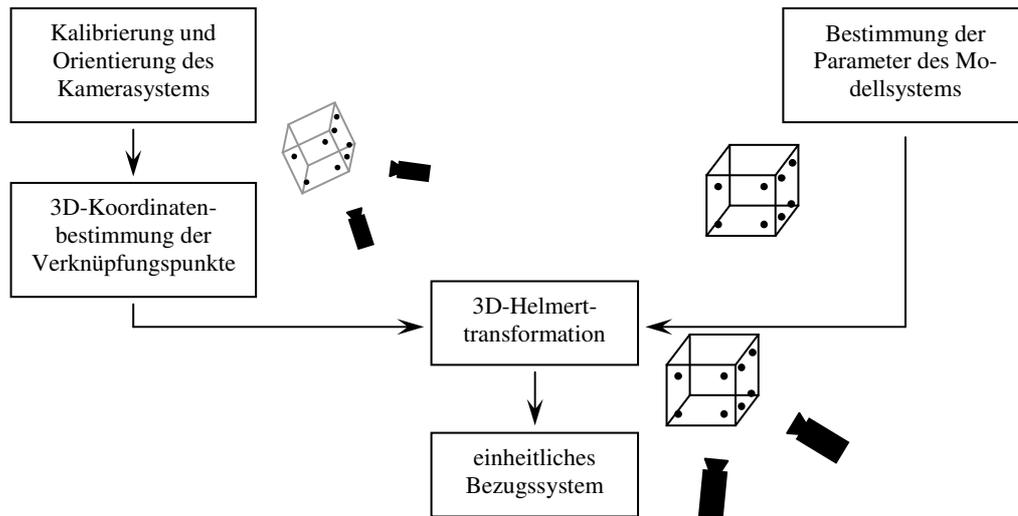
**Abbildung 4.5: Skizze zur Bestimmung des Brechungsindex**

### 4.2.3 Transformation des Kamerasystems in das Modellsystem

Auf Grund der Beschaffenheit des Plexiglasblockes werden signifikante Änderungen der oben bestimmten Parameter ausgeschlossen und gelten im Folgenden als Konstanten. Im Gegensatz dazu unterliegen die Parameter des Kamerasystems in Folge ständiger Anpassungen an das Objekt einer Veränderung. Demzufolge müssen diese vor jeder Versuchsreihe bestimmt werden. Hierzu kann das Kamerasystem abgesenkt und eine Selbstkalibrierung durchgeführt werden. Das anschließend wieder auf das Beobachtungsvolumen ausgerichtete Kamerasystem beobachtet in einem ersten Schritt die auf dem Modell angebrachten Verknüpfungspunkte. Die berechneten 3D-Koordinaten liegen im Kamerakoordinatensystem als auch im Modellkoordinatensystem vor. Mit Hilfe einer räumlichen Ähnlichkeitstransformation, der 3D-Helmerttransformation (Gleichung 4.4), können sodann die Transformationsparameter bestimmt und die äußeren Orientierungsparameter und die Kamerakonstanten (nur Maßstab) des Kamerasystems in das Modellkoordinatensystem überführt werden. Abbildung 4.6 zeigt die Abfolge der Zusammenführung der beiden Koordinatensysteme.

$$\mathbf{x}_K = \mathbf{t} + m \cdot \mathbf{R} \cdot \mathbf{x}_M \quad 4.4$$

Die durchgeführten Transformationen im Rahmen der Versuche basierten auf je 14 Verknüpfungspunkten, die auf beiden Trennflächen markiert sind. Die RMSE der Verknüpfungspunkte, bestimmt mit je zwei Kameras, betragen in X-/Y-/Z-Richtung 0,09/0,16/0,25 mm. Im Mittel konnte die 3D-Helmerttransformation mit einer Genauigkeit von  $\sigma_0 = 0,29$  mm durchgeführt werden.

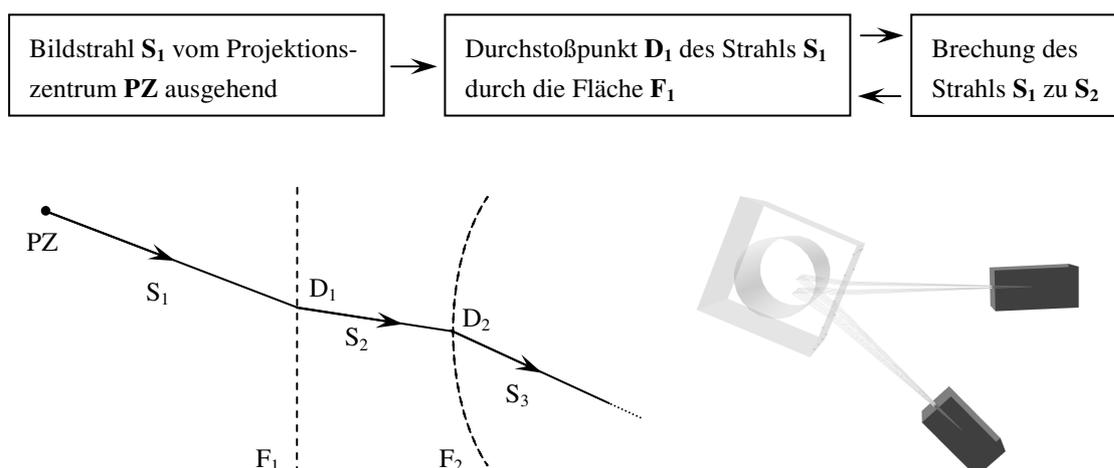


**Abbildung 4.6:** Schematische Darstellung der Verknüpfung von Kamera- und Modellkoordinatensystem

### 4.2.4 Raytracing und Mehrbildzuordnung

Die eben beschriebenen Arbeitsschritte dienen, wie eingangs erwähnt dazu, den gebrochenen Strahlengang durch die verschiedenen Medien modellieren zu können. Die Änderung der Richtung eines Lichtstrahls an bestimmten Punkten im Raum wird im Bereich der Computergraphik treffend als Raytracing (*engl., Strahlverfolgung*) bezeichnet. Diese Bezeichnung soll hier beibehalten werden.

Mit der Kenntnis der inneren und äußeren Orientierungsparameter jeder Kamera kann jeder Bildpunkt in den zugehörigen Bildstrahl überführt werden. Dies beschreibt die allgemeine Abbildungsgleichung (Gleichung 3.6) für den Einmedienfall. Ziel ist es nun, den entsprechenden Bildstrahl im relevanten Medium zu bestimmen. Dazu wird der erste Bildstrahl mit der nächstgelegenen Trennfläche verschnitten und unter Berücksichtigung des Brechungsgesetzes der folgende Bildstrahl bestimmt. Für alle folgenden Medienwechsel erfolgt dies analog (Abbildung 4.7).

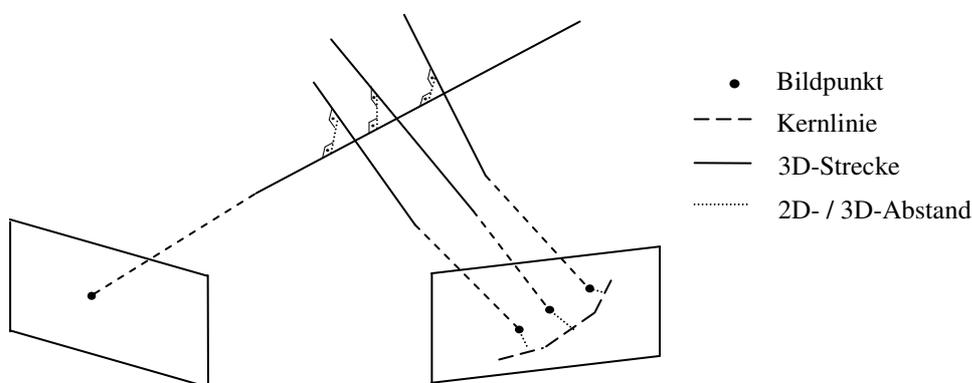


**Abbildung 4.7:** Strahlenverlauf durch verschiedene Medien

Es gilt auch hier, dass alle Punkte auf den einzelnen Bildstrecken des gebrochenen Strahls in ein und demselben Bildpunkt abgebildet werden. Für die hier genutzte Methode der Mehrbildzuordnung zwischen

zwei Bildern wird die Umkehrung dieser Abbildung ausgenutzt. Im Allgemeinen wird der Bildstrahl des ersten Bildes in das zweite Bild abgebildet (siehe Abschnitt 3.2.2). Dies kann auch für den Mehrmedienfall durchgeführt werden, doch ergeben sich hier gekrümmte Kernlinien, die durch kurze Strecken approximiert werden können (Maas, 1992a). Da die mathematische Abbildung von Objektpunkten in den Bildraum im Falle eines komplexen Mehrmedienkörpers nicht direkt möglich ist, würde dieser übliche Ansatz der Nutzung von Kernlinienstücken im Bild sehr rechenintensiv werden (siehe Abschnitt 4.2.5).

Eine Alternative ist die Betrachtung der Mehrbildzuordnung im Raum (Putze, 2007). Der kürzeste Abstand eines Bildpunktes von der Kernlinie im Bildraum ist die Abbildung des kürzesten Abstandes der jeweiligen Raumstrahlen. Abbildung 4.8 zeigt diesen Zusammenhang. Somit ist die Zuordnung durch den kürzesten Abstand zweier Geraden im Raum äquivalent zur Zuordnung durch den Abstand eines Punktes von einer Geraden in der Ebene. Im Fall der Mehrbildzuordnung ist die Kernlinie gekrümmt und muss stückweise approximiert werden. Die Bestimmung der approximierten Kernlinie ist auf Grund des inversen Raytracings (Abbildung 4.9) sehr rechenaufwendigen. Zudem gewährleistet die Zuordnung über die Abstände im Raum exakte Ergebnisse ohne Approximation der Kernlinie.



**Abbildung 4.8: Vergleich Kernlinienabstand und Abstand von Raumstrecken**

Der notwendige Rechenaufwand für beide Alternativen setzt sich entweder aus einer aufwendigen Abbildung des Bildstrahls und einer einfachen Bestimmung von 2D-Punkt-Geraden-Abständen (Gleichung 4.5) oder aus einer Bestimmung von 3D-Abständen zwischen zwei Geraden (Gleichung 4.6) zusammen.

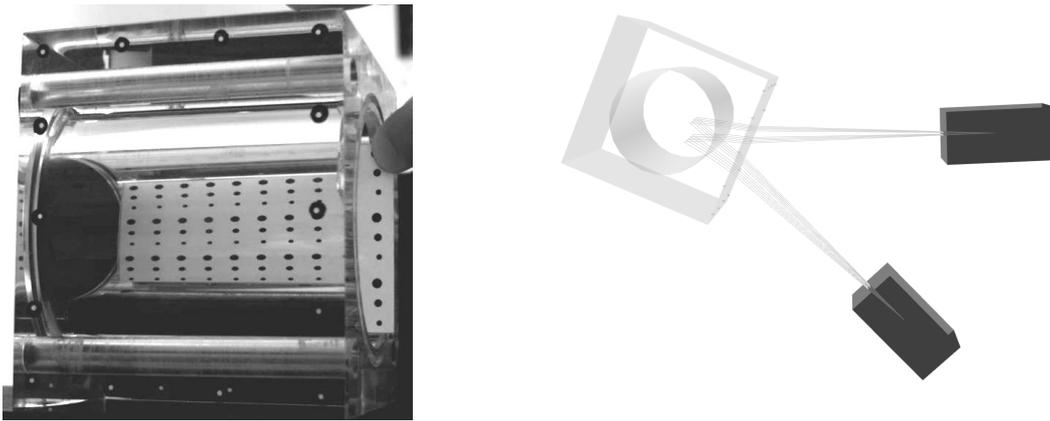
$$d = \frac{|a \cdot x_0 + b \cdot y_0 + c|}{\sqrt{a^2 + b^2}}, \quad \text{wobei } g : 0 = a \cdot x + b \cdot y + c \quad 4.5$$

$$d = \frac{|(P_{g1} - P_{g2}) \cdot (V_{g1} \times V_{g2})|}{|V_{g1} \times V_{g2}|}, \quad \text{wobei } g : X = P_g + \lambda \cdot V_g \quad 4.6$$

### 4.2.5 Objektkoordinatenbestimmung

Die Bestimmung der Objektkoordinaten kann ebenso wie im Einmedienfall durch eine MkQ-Schätzung (siehe Abschnitt 3.2.3) durchgeführt werden (Putze, 2008a). Auf Grund der vielfältigen Berechnungen (u. a. Lösung einer quadratischen Gleichung) während des Raytracing ist eine Bestimmung der direkten Abbildungsgleichung durch Substitution aller Zwischenschritte nicht praktikabel. Die notwendigen Ablei-





**Abbildung 4.10: Konfiguration des Versuchs zur Validierung**

Im Rahmen einer Testreihe wurde eine Testtafel im Inneren des luftgefüllten Zylinders durch zwei konvergent angeordnete Sony XC 55 (640 x 480 Pixel,  $\frac{1}{3}''$ ) mit 6 mm Objektiven beobachtet (Abbildung 4.10). Die Genauigkeit der Selbstkalibrierung betrug  $\sigma_0 = 0,37 \mu\text{m}$  bzw.  $\frac{1}{20}$  Pixel. Die Koordinaten der Verknüpfungspunkte konnten mit einer Lage- und Tiefengenauigkeit von  $\sigma_{\text{Lage}} = 50 \mu\text{m}$  und  $\sigma_{\text{Tiefe}} = 90 \mu\text{m}$  bestimmt werden. Die Standardabweichung der Gewichtseinheit nach der 3D-Helmerttransformation betrug  $\sigma_0 = 40 \mu\text{m}$ . Die kürzesten Abstände homologer Bildstrahlen betragen bei dieser Konfiguration  $d = 66 \mu\text{m}$ .

Zur Bestimmung der äußeren Genauigkeit des Messsystems wurde die Geometrie der im inneren des Zylinders bestimmten Testtafel mit deren Sollgeometrie verglichen. Die RMSE der 3D-Helmerttransformation betragen in x-, y- und z-Richtung 0,11, 0,11 und 0,09 mm. Wie in Abbildung 4.11 zu sehen ist, sind vor allem in der x- und y-Richtung systematische Effekte vorhanden. Je weiter sich die Punkte am Rand des Beobachtungsvolumens befinden, also je größer der Brechungswinkel ist, desto größer sind auch die Abweichungen von den Sollkoordinaten. Es lässt sich anhand der Form der Systematik darauf schließen, dass die Formparameter des Zylinders (speziell des Radius) und/oder der Brechungsindex nicht korrekt bestimmt worden sind. Da aber benachbarte Punkte denselben systematischen Effekten unterliegen, haben diese einen geringeren Einfluss auf die Genauigkeit der Trajektorien.

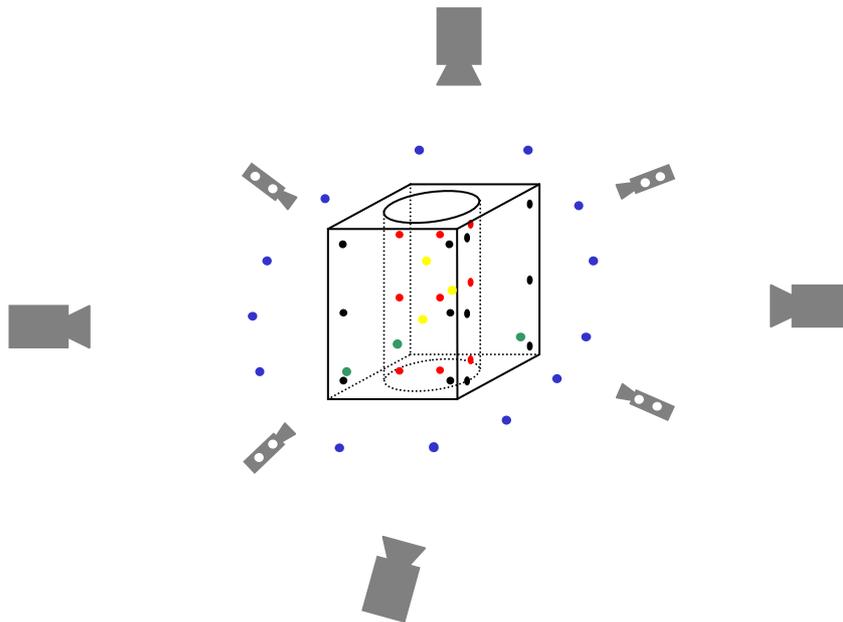


**Abbildung 4.11: Restklaffungen in x- und y-Richtung (links) und in z-Richtung (rechts) zwischen den bestimmten Objektpunkten und der Sollgeometrie nach einer 3D-Helmerttransformation**

### 4.2.6 Ansatz für die gemeinsame Ausgleichung aller Parameter

Der Versuch, den Brechungsindex des Plexiglases während des Vorwärtsschnittes mitzuschätzen, verlief auf Grund der schwachen Konfiguration ergebnislos. Um dennoch die Vorteile der Bündelausgleichung ausnutzen zu können, müssen zusätzliche Bedingungen und Beobachtungen eingeführt werden. Folgender Ansatz scheint plausibel, wenn das Design des gesamten Messsystems abgeändert wird.

Außerhalb des Plexiglaskörpers sind ausreichend signalisierte Messmarken in geeigneter Konfiguration anzubringen, dass eine Kalibrierung und Orientierung (siehe Abschnitt 3.3) des Kamerasystems nur anhand dieser zuverlässig durchgeführt werden könnte. Des Weiteren sind Markierungen auf allen relevanten Trennflächen notwendig, die wiederum eine Bestimmung dieser und zusätzlich des Brechungsindex (siehe Abschnitt 4.2.2) gewährleisten. Zusätzliche feste, signalisierte Punkte im Inneren des Zylinders vervollständigen eine optimale Konfiguration. Abbildung 4.12 zeigt eine denkbare Konfiguration. Die einzelnen Kameras sind fest zueinander zu montieren. Mit dem Kamerasystem ist nun ähnlich einer Standardkalibrierprozedur ein Bildverband des Modellsystems aufzunehmen. Ein entscheidender Nachteil dieses Ansatzes ist, dass für die eigentliche Beobachtung der Strömung lediglich ein eingeschränktes Sensorformat zur Verfügung steht. Durch kaskadierte Aufnahmesysteme<sup>9</sup> (Luhmann und Sahrhage, 2006; Putze, 2008a) ist es mit erhöhtem Hardwareaufwand möglich, diesen erheblichen Nachteil zu vermindern. Mit kaskadierten Kamerasystemen bekommt man die Möglichkeit, die Konfiguration des gesamten Systems durch zusätzliche Beobachtungen (äußere Kameragruppe) zu stärken, ohne dabei das Beobachtungsvolumen zu vernachlässigen (innere Kameragruppe).



**Abbildung 4.12: mögliche Konfiguration für eine Bündelausgleichung**

Die Auswertung in einem Guss vereint verschiedene Gruppen von Unbekannten, die jeweils zur Erhöhung des Redundanzanteils des Systems beitragen. Jeder Bildpunkt in jedem Bildes enthält zwei Beobachtungen.

---

<sup>9</sup> Ein kaskadiertes System setzt sich aus mehreren Gruppen von Kameras zusammen. Eine Gruppe beobachtet mit dem vollen Sensorformat das Interessengebiet (hier das Strömungsvolumen). Eine weitere Gruppe von Kameras beobachten die mit Messmarken ausgestatteten Kameragehäuse der ersten Gruppe sowie das zur Orientierung notwendige Passpunktfeld.

## 4.2 Erweiterte Ansätze für komplexe Trennflächen

---

- Punkte außerhalb des Plexiglasses (blau) (je 3 Unbekannte)
- Punkte außerhalb, auf den Frontflächen (schwarz) (je 3 Unbekannte + Bedingung durch Ebene (3 Unbekannte))
- Punkte auf Zylindermantel (rot) (je 3 Unbekannte + je Blickrichtung 3 Unbekannte + Bedingung durch Ebene und Zylinderfläche (9 Unbekannte))
- Punkte auf der Rückwand (grün) (je 3 Unbekannte + je Blickrichtung 3 Unbekannte + Bedingung durch Ebene (6 Unbekannte))
- Punkte im Inneren des Zylinders (gelb) (je 3 Unbekannte + je Blickrichtung 3 Unbekannte + Bedingung durch Ebene und Zylinder (9 Unbekannte))
- Punkte auf den kaskadierten Kameras (weiß) (je 3 Unbekannte)
- Orientierungs- und Kalibrierungsparameter der Kameras (je Kamera 15 Unbekannte + Bedingung durch relative Orientierung)

Die Auswertung kann entweder sequenziell oder in einem Guss ausgewertet werden. Unbekannte Parameter, die dennoch nicht zuverlässig geschätzt werden können, sind separat zu bestimmen und für die weitere Ausgleichung als konstant zu setzen.

## 5 Wahrscheinlichkeitsbasierter Trackingalgorithmus

Im Folgenden wird ein wahrscheinlichkeitsbasierter Trackingalgorithmus entwickelt, der sowohl Bild- als auch Objektrauminformationen zur spatio-temporalen Zuordnung nutzt. Aus diesen Informationen wird die Wahrscheinlichkeit der Gleichheit zweier Merkmale einer Klasse (feature based matching) bestimmt. In Abschnitt 1.2 sind verschiedene Methoden dargestellt, die einen ähnlichen Ansatz verfolgen. Die Abgrenzung gegenüber diesen geschieht durch eine Verallgemeinerung der oft sehr speziellen Methoden und über die Entscheidungsfindung basierend auf dem Ausschlussprinzip.

Auf Grund der zum Teil nicht ausreichenden Genauigkeit und Stabilität der äußeren Orientierungsparameter ist eine Lösung der Mehrdeutigkeiten auf Grund der Epipolargeometrie nicht immer möglich. Um keine Lösungen durch vorzeitige, falsche Entscheidungen zu verlieren, werden auch Geisterpartikel und -trajektorien berechnet. Die Eliminierung dieser muss dann anhand anderer Kriterien durchgeführt werden.

Anhand eines Gedankenexperimentes soll die grundlegende Idee kurz erläutert werden. Es soll der homologe Bildpunkt zu Bildpunkt 1 (klein, hell) (Abbildung 5.1, links) durch Mehrbildzuordnung ermittelt werden. Als mögliche Kandidaten kommen zwei Bildpunkte (Abbildung 5.1, rechts) in Frage. Dabei ist ein Bildpunkt (BP 2b) nahe der Kernlinie, dunkel und groß, der zweite Bildpunkt (BP 2a) weiter von der Kernlinie entfernt, hell und klein. Wird vorausgesetzt, dass die Abbildungen in beiden Bildern ähnlich sind und die Orientierungsparameter nicht zuverlässig bestimmt werden konnten, so ist der Bildpunkt 2a höchstwahrscheinlich der gesuchte homologe Punkt.



Abbildung 5.1: Zuordnung anhand mehrerer Merkmale

Für jedes Bildpunktpaar kann eine Wahrscheinlichkeit  $P$  angegeben werden, mit welcher es homologe Punkte sind. Dabei bedeutet  $P = 1$ , dass es sicher ist und  $P = 0$ , dass dies ausgeschlossen ist. Für obiges Beispiel sind in Tabelle 5.1 beispielhaft Wahrscheinlichkeiten dargestellt. Die Gesamtwahrscheinlichkeit ergibt sich als Produkt der Einzelwahrscheinlichkeiten der Merkmale. Es ist zu sehen, dass sich der Bildpunkt 2a deutlich hervorhebt.

| Parameter | Kernlinienabstand | Größe | Helligkeit | Gesamt |
|-----------|-------------------|-------|------------|--------|
| BP 2a     | 0,50              | 0,90  | 0,90       | 0,405  |
| BP 2b     | 0,90              | 0,20  | 0,30       | 0,054  |

Tabelle 5.1: Wahrscheinlichkeit der Gleichheit, basierend auf verschiedenen Merkmalen

### 5.1 Bestimmung des Wahrscheinlichkeitsmaßes

Für eine Verallgemeinerung sind einige grundlegende Vorbedingungen festzulegen. Alle geometrischen und radiometrischen Informationen sind prinzipiell zur räumlichen und zeitlichen Zuordnung verwendbar. Es gilt, das Gewicht der einzelnen Merkmale an die jeweilige Situation anzupassen. Dabei kann es vorkommen, dass ein Merkmal für die zeitliche Zuordnung optimal geeignet ist, für die räumliche jedoch nicht. Abhängig ist dies von zwei Faktoren.

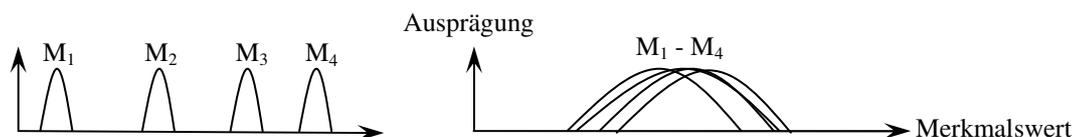
## 5.1 Bestimmung des Wahrscheinlichkeitsmaßes

Zum einen gibt die Streuung der Merkmalswerte<sup>10</sup>  $W_{Gi}$  innerhalb einer Gruppe  $G_P$  homologer Punkte Auskunft über die Gleichartigkeit der Merkmalswerte  $W_{Gi}$  in dieser Gruppe. Zum anderen zeigt die Streuung der Mittelwerte der Merkmalswerte aller Gruppen, wie sehr sich die jeweiligen Gruppen voneinander unterscheiden. Am Beispiel der zeitlichen Zuordnung im Bildraum soll dies und die daraus resultierende Einordnung dargestellt werden (ähnlich Mikheev und Zubtsov, 2006).

Abbildung 5.2 zeigt zweimal die gleiche Situation, lediglich mit veränderten Punktgrößen. Links verändern sich die Größen homologer Punkte nicht, die Punkte innerhalb eines Bildes unterscheiden sich jedoch sehr. Die Streuung innerhalb der Gruppen  $G_{Pi}$  ist gering, die Streuung der Mittelwerte der Merkmalswerte ist groß. Damit ist eine Zuordnung recht leicht möglich. Hingegen sind rechts die Punktgrößen innerhalb eines Bildes sehr ähnlich. Dazu verändern sich die Punktgrößen zwischen beiden Zuordnungsschritten soweit, dass eine eindeutige Zuordnung anhand der Größen nicht möglich ist. Die Streuung innerhalb der Gruppen  $G_{Pi}$  ist hoch, die Streuung der Mittelwerte der Merkmalswerte hingegen ist gering.



**Abbildung 5.2: Zuordnung anhand der Größe möglich (links) und nicht möglich (rechts)**



**Abbildung 5.3: Streuung (normalverteilt) eines Merkmals verschiedener Gruppen; links: signifikantes Merkmal, zur Segmentierung geeignet; rechts: nicht signifikantes Merkmal**

Die in Abbildung 5.3 angedeuteten Normalverteilungen repräsentieren die Streuung der Merkmalswerte einer Gruppe  $G_P$  und dessen Mittelwert (Gleichung 5.1 – 5.5). Wie man in Abbildung 5.3-links deutlich erkennt, ist ein Merkmal  $M$ , welches eine geringe Streuung innerhalb einer Gruppe  $G_P$ , aber eine große Streuung der Mittelwerte aller Gruppen besitzt, zuverlässig für den Zuordnungsprozess nutzbar. Ist hingegen die Streuung innerhalb einer Gruppe hoch und sind die Streuung der Mittelwerte aller Gruppen gering, ist dieses Merkmal für die Zuordnung nicht brauchbar (Abbildung 5.3, rechts). Hier sind sich alle Partikel in diesem Merkmal ähnlich.

Die Wahrscheinlichkeit  $P_M$  für die Zugehörigkeit eines Partikels zu einer Gruppe ist demnach abhängig von dem Unterschied der Merkmalswerte (der Ähnlichkeit) und den Streuungen aller Werte im jeweiligen Merkmalsraum. Je größer der Unterschied der Merkmalswerte ist, desto geringer ist die Wahrscheinlichkeit der Zugehörigkeit. Es muss jedoch gewährleistet sein, dass unsichere Merkmale nicht zum Abschluss von Lösungen führen (Fehler 1. Art).

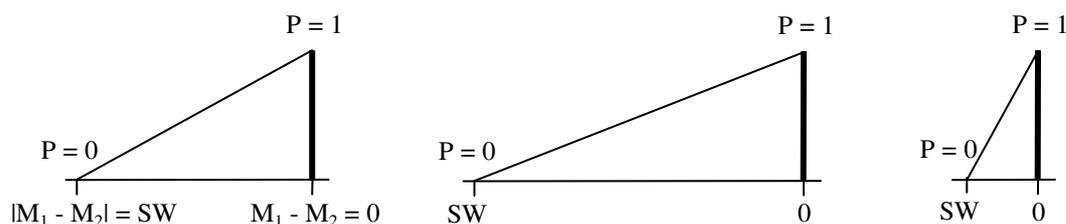
Zur Vereinfachung wird die Streuung der Merkmalswerte nicht normalverteilt, sondern linear approximiert. Weiterhin wird ein Schwellwert (SW) bestimmt, der den maximal zulässigen Unterschied zweier Merkmalswerte festlegt (Abbildung 5.4, links). Ab diesem Unterschied ist die Wahrscheinlichkeit  $P_M = 0$ . Die Wahrscheinlichkeit für einen beliebigen Merkmalswert im Merkmalsraum ergibt sich nach Gleichung

<sup>10</sup> Ein Element aus dem Wertebereich des Merkmalsraums des jeweiligen Merkmals (siehe Abschnitt 5.3.1), z.B. Kernlinienabstand, Größe, Helligkeit, Geschwindigkeit.

## 5 Wahrscheinlichkeitsbasierter Trackingalgorithmus

5.1. Zur Vermeidung von Fehlern 1. Art bei unsichern Merkmalen wird der Schwellwert sehr groß gewählt (Abbildung 5.4, Mitte).

$$P_M = \begin{cases} 1 - \frac{|M_1 - M_2|}{SW} & \text{für } |M_1 - M_2| < SW \\ 0 & \text{für } |M_1 - M_2| \geq SW \end{cases} \quad 5.1$$



**Abbildung 5.4:** Zusammenhang der Wahrscheinlichkeit und der Merkmalsdifferenz (links), Verteilung der Wahrscheinlichkeiten bei unsicheren (Mitte) und starken (rechts) Merkmalen

Eine (semi)automatische Bestimmung der Schwellwerte für die festgelegten Merkmalsräume erfolgt hier durch die Analyse zuverlässig bestimmter Zuordnungen. Die Bestimmung der Trajektorien wird mit Hilfe eines einfachen 4-Frame-Algorithmus (Abschnitt 1.2.3) (und evtl. manuell gesetzter Schwellwerte für notwendige Merkmale) durchgeführt. Eindeutig zuordenbare Trajektorien werden im Anschluss analysiert (Gleichungen 5.2 bis 5.8, Abbildung 5.5). Die Merkmale werden sowohl auf zeitliche (Tracking) als auch räumliche (Mehrbildzuordnung) Ähnlichkeit hin untersucht. Es werden je Merkmal folgende Parameter ermittelt:

- je ein Mittelwert  $M_{G_i}$  aller Merkmalswerte  $W_{G_i}$  einer Gruppe  $G_i$

$$M_{G_i} = \text{Mittelwert} \{W_{G_i}\} \quad 5.2$$

- je eine maximale Differenz  $D_{G_i}$  eines Merkmalswertes zum Mittelwert  $M_{G_i}$

$$D_{G_i} = \text{Max} \{W_{G_i} - M_{G_i}\} \quad 5.3$$

- ein Mittelwert  $M_{DG}$  aller  $D_{G_i}$

$$M_{DG} = \text{Mittelwert} \{D_{G_i}\} \quad 5.4$$

- die maximale Differenz  $D_{G-\text{Max}}$  aller  $D_{Gi}$

$$D_{G-\text{Max}} = \text{Max} \{D_{Gi}\} \quad 5.5$$

- ein Mittelwert  $M_{D-\text{Min}}$  aus den jeweils kürzesten Abständen zweier benachbarter Mittelwerte  $M_G$

$$M_{D-\text{Min}} = \text{Mittelwert} \{ \text{Min} \{ M_{Gi} - M_{Gj} \} \} \quad 5.6$$

- ein Mittelwert  $M_{D-M}$  aus den mittleren Abständen zweier benachbarter Mittelwerte  $M_G$

$$M_{D-M} = \text{Mittelwert} \{ \text{Mittelwert} \{ M_{Gi} - M_{Gj} \} \} \quad 5.7$$

- ein Mittelwert  $M_{D-\text{Max}}$  aus den jeweils maximalen Abständen zweier benachbarter Mittelwerte  $M_G$

$$M_{D-\text{Max}} = \text{Mittelwert} \{ \text{Max} \{ M_{Gi} - M_{Gj} \} \} \quad 5.8$$

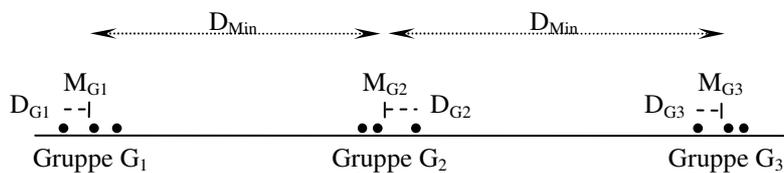
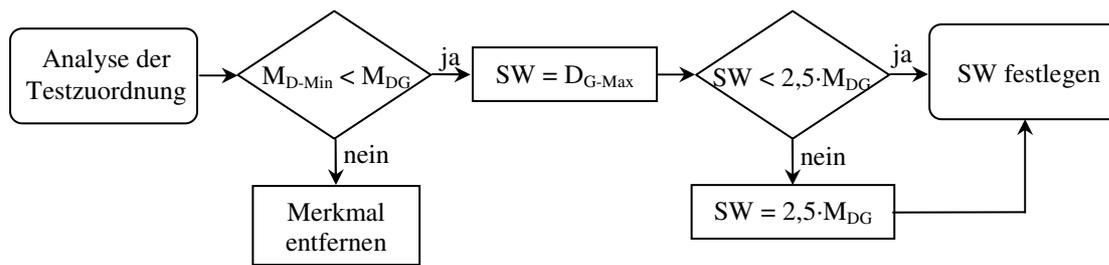


Abbildung 5.5: Parameter der Analyse der Merkmalswerte

Es muss durch den gewählten Schwellwert gewährleistet werden, dass die bereits bestimmten Lösungen erhalten bleiben. Demnach muss  $SW > D_{G-\text{Max}}$  gelten. Weiterhin wird gefordert, dass für  $M_{DG}$   $P_M = 0,6$ <sup>11</sup> gilt. Hieraus ergibt sich ein Schwellwert von  $SW = 2,5 \cdot M_{DG}$ . Weiterhin ist aus dem Vergleich der Mittelwerte  $M_{D-\text{Min}}$ ,  $M_{D-M}$  bzw.  $M_{D-\text{Max}}$  und  $M_{DG}$  ersichtlich, ob dieses Merkmal zuverlässig im Zuordnungsprozess genutzt werden kann. Falls  $M_{D-\text{Min}} < M_{DG}$  ist, so kann dieses Merkmal vernachlässigt werden. Die Realisierung erfolgt, indem diese Bedingungen nacheinander geprüft werden:

| Merkmalsausprägung          | Eignung des Merkmals zur Zuordnung |
|-----------------------------|------------------------------------|
| $M_{D-\text{Min}} > M_{DG}$ | gut                                |
| $M_{D-M} > M_{DG}$          | bedingt                            |
| $M_{D-\text{Max}} > M_{DG}$ | nicht                              |

<sup>11</sup> Dies gilt in Anlehnung an normalverteilte Zufallsgrößen. Hier liegen 68,3% der Realisierungen im Intervall von  $\pm\sigma$  um den Erwartungswert.



**Abbildung 5.6: Flussdiagramm der Schwellwertbestimmung**

Basierend auf dieser Methode kann für jedes Merkmal die Wahrscheinlichkeit der Zugehörigkeit eines Elementes zu einer Gruppe bestimmt werden. Die Gesamtwahrscheinlichkeit ergibt sich durch Multiplikation (Gleichung 5.9). Hierdurch wird gewährleistet, dass, sobald ein Merkmal die Ähnlichkeit ausschließt, alle weiteren Merkmale nicht weiter betrachtet werden müssen.

$$P_G = P_{M_1} \cdot P_{M_2} \cdot P_{M_3} \cdot \dots \cdot P_{M_n} \quad 5.9$$

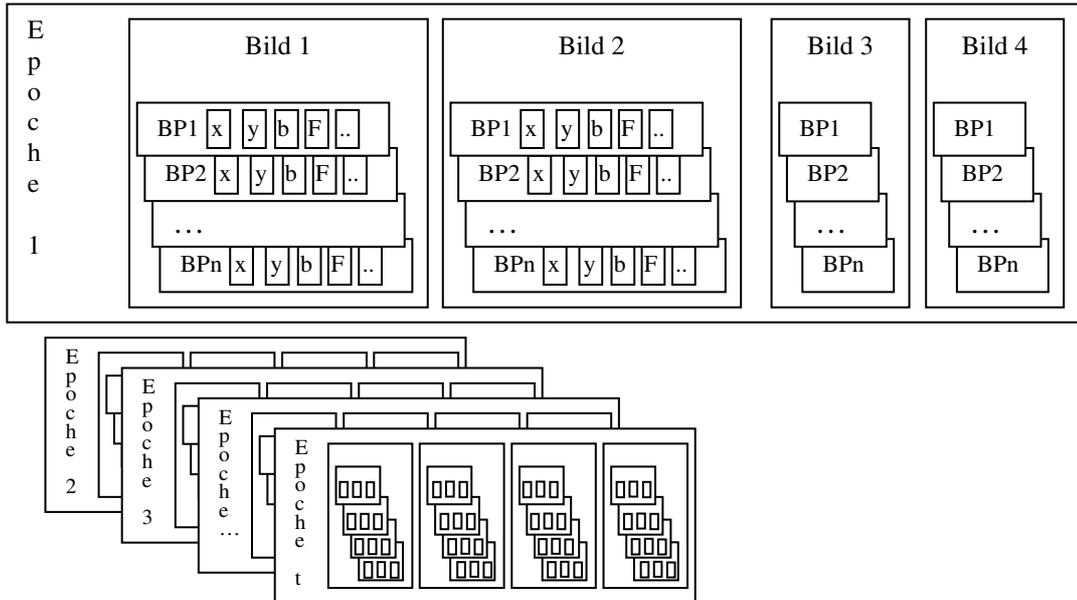
Ein vergleichbarer Ansatz zur Nutzung verschiedener Merkmale zur Bestimmung der Wahrscheinlichkeit ist durch Bienert et al. (2007) vorgestellt worden. Zur Extraktion von Baumachsen aus Laserscannerpunktewolken werden verschiedene Merkmale einzelner horizontaler Schichten zur Validierung der Extraktion herangezogen. Den Zuverlässigkeitsfaktor bzw. die Gesamtwahrscheinlichkeit ermitteln sie als arithmetisches Mittel aller Wahrscheinlichkeiten. Dies führt jedoch dazu, dass trotz des Ausschlusses eines Parameters eine Gesamtwahrscheinlichkeit  $P > 0$  erzielt werden kann.

## 5.2 Kombinatorische Mehrdeutigkeiten

Die räumliche und zeitliche Zuordnung von Bild- und Objektpunkten kann, vernachlässigt man alles Vorwissen, als kombinatorischer Ansatz betrachtet werden. Nach der Bildanalyse sind für jedes der  $b$  Bilder in  $t$  Epochen  $N$  Bildpunkte bestimmt. Jeder Bildpunkt verfügt über sowohl geometrische (Bildkoordinaten:  $x$ ,  $y$ ; Formparameter: Größe, Verhältnis der Hauptachsen<sup>12</sup>) als auch radiometrische Eigenschaften (Grauwertsumme, maximaler Grauwert, ggf. Farbe).

Die Objektkoordinaten sind das Ergebnis des räumlichen Vorwärtsschnittes eines Bildpunktquadrupels (oder -tripels). Die Anzahl der möglichen Quadrupel und Tripel  $Q$  einer Epoche bestimmt sich aus der Variation mit Wiederholung mit  $N$  Elementen zur  $b$ -ten Klasse. Näherungsweise können die Bildpunkt-tripel gemeinsam mit den Quadrupeln bestimmt werden, wenn zusätzlich für jedes Bild ein fiktiver Bildpunkt eingeführt wird. Dieser nimmt die Rolle eines Platzhalters in einem Quadrupel ein.

<sup>12</sup> bei elliptisch abgebildeten Partikeln



**Abbildung 5.7:** verfügbare Eigenschaften nach der Bildpunktmessung aller Partikel in allen Bildern jeder Epoche

$$\text{Anzahl}_Q = N^4 + 3 \cdot N^3 \approx (1 + N)^4 \approx N^4$$

5.10

Jedes Quadrupel  $Q_i$  verfügt über alle (geometrischen und radiometrischen) Merkmalsinformationen der zugehörigen Bildpunkte  $BP_{i,b}$ . Zusätzlich werden für jedes Quadrupel die zugehörigen Objektkoordinaten sowie deren Standardabweichungen und alle Kernlinienabstände berechnet. Die Kernlinienabstände geben Aufschluss über die Güte der Zuordnung bzw. des Strahlenschnittes. Für homologe Punkte ist die Größe der Kernlinienabstände bzw. der Abstand der Bildstrahlen abhängig von der Genauigkeit der Kamerakalibrierung und -orientierung sowie der Bildpunktmessung. An dieser Stelle lässt sich mit Hilfe der Kernlinien eine Vielzahl von Quadrupelkombinationen eliminieren. Die Elimination kann jedes Mal dann durchgeführt werden, wenn die Wahrscheinlichkeit für die Zusammengehörigkeit 0 beträgt. Für den Fall, dass die Abstände zur Kernlinie als Kriterium genutzt werden, können alle Bildpunkte mit einem Abstand größer dem zuvor festgelegten Schwellwert zuverlässig eliminiert werden. Auf Grund von technischen Unzulänglichkeiten einiger Versuchsanlagen kommt es aber durch instabile Orientierungsparameter zu großen Kernlinienabständen bzw. schlechten Punktlagegenauigkeiten und deshalb notwendigerweise zu hohen Schwellwerten. In diesem Fall verbleibt eine Vielzahl von Mehrdeutigkeiten bei der Objektkoordinatenbestimmung, die mit Hilfe anderer Parameter gelöst werden müssen.

Die zeitliche Verkettung aller Quadrupel aufeinander folgender Epochen ergibt die Trajektorien  $T$ . Die Anzahl der möglichen Trajektorien ist abhängig von der Anzahl der verbleibenden Quadrupel je Epoche und der Epochenanzahl  $n$ . Die einzige Bedingung ist, dass eine Trajektorie aus jeder Epoche genau ein Quadrupel zugeordnet wird, also keine Lücken oder doppelte Punkte auf einer Trajektorie existieren. Hierbei wird zur Vereinfachung wieder ein fiktives Quadrupel als Platzhalter eingeführt.

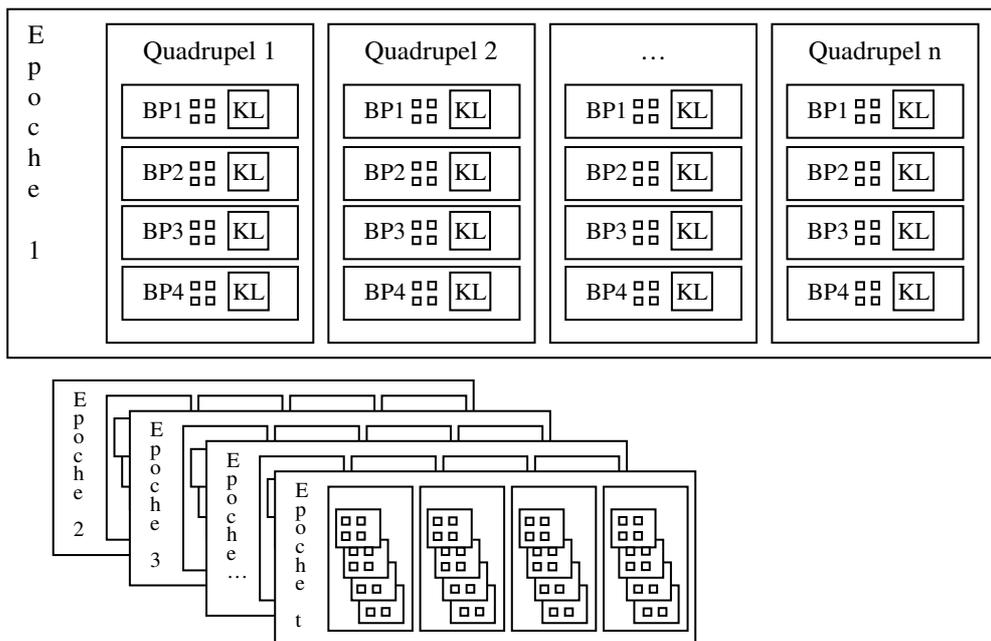


Abbildung 5.8: verfügbare Eigenschaften aller Quadrupel

$$Anzahl_T = (n - 1 + Anzahl_Q)^n$$

5.11

Jede Trajektorie  $T_j$  verfügt über die Merkmalsinformationen aller zugehörigen Quadrupel  $Q_{i,j}$  (und somit aller Bildpunkt  $BP_{i,b,j}$ ). Zusätzlich werden strömungsmechanische Eigenschaften innerhalb der Trajektorie (Geschwindigkeits- und Beschleunigungskomponenten) ermittelt. Zumeist ist hier wiederum eine Elimination einer Vielzahl von theoretischen Trajektorien möglich. Zugrunde liegt dem Tracking ein erweiterter 4-Frame-Ansatz (vgl. Abschnitt 1.2.3), der auch die Veränderungen der radiometrischen und geometrischen Eigenschaften der Partikelsegmentierung berücksichtigt.

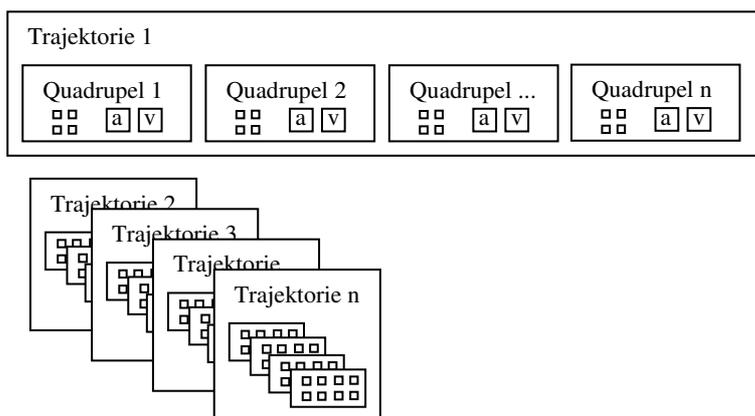


Abbildung 5.9: verfügbare Eigenschaften aller Trajektorien

Das Ergebnis dieses kombinatorischen Ansatzes ist eine hohe Anzahl an Trajektorien, die zumeist aus Geisterpartikeln bestehen. Diese gilt es nun zu eliminieren und die jeweiligen Trajektorien mit der höchsten Wahrscheinlichkeit herauszufiltern. Für jede Trajektorie ist der Zugriff auf alle räumlichen und zeitli-

chen Zusammenhänge und die Veränderungen von geometrischen, radiometrischen und strömungsmechanischen Parametern im Bild- und Objektraum möglich. Über die oben beschriebenen Schwellwerte können für alle Trajektorien und Quadrupel die Wahrscheinlichkeiten der Zugehörigkeit anhand aller Parameter nach Gleichung 5.1 und 5.9 bestimmt werden. Unter der Bedingung, dass ein Bildpunkt nur zu einem Quadrupel und ein Quadrupel nur zu einer Trajektorie gehören kann, werden die Trajektorien mit der höchsten Wahrscheinlichkeit als richtig angesehen.

### 5.3 Praktische Untersuchungen

Die Vorgehensweise bei der räumlichen und zeitlichen Zuordnung basiert auf der Mehrbildzuordnung mit Hilfe der Epipolargeometrie und eines einfachen 3D-Trackingansatzes. Hierdurch können die Mehrdeutigkeiten stark reduziert werden. Für die verbleibenden Kombinationen wird sodann anhand der zuvor ausgewählten Parameter die Wahrscheinlichkeit für die Zugehörigkeit jedes Partikels zu einer bestimmten Trajektorie berechnet.

#### 5.3.1 Auswahl der Merkmalsräume

Es ist von einer Vielzahl Faktoren abhängig, welche Merkmale sich für die Zuordnung eignen. Zum einen können durch die Auswahl der Tracer bestimmte Eigenschaften gefördert werden, wie die Größe durch Mikheev und Zubtsov (2006), die Farbe durch Kuhn et al. (2007) oder die Form durch Tapia et al. (2006). Zum anderen ist die Partikelabbildung abhängig von der Konfiguration des Aufnahmesystems. Die signifikante Veränderung des Bildmaßstabes tritt vor allem bei großen Volumen auf und führt zu unterschiedlich großen Abbildungen gleichgroßer Partikel (Abbildung 5.10). Ebenso resultieren aus einer richtungs- und ortsabhängigen Beleuchtung charakteristische Merkmale gleichförmiger Partikel.

Die radiometrischen und geometrischen Eigenschaften der abgebildeten Partikel werden auf ihre Ähnlichkeit geprüft. Die strömungsmechanischen Eigenschaften unterliegen einer Prüfung der Übereinstimmung mit den zu erwartenden physikalischen Modellen.

#### 5.3.2 Ergebnisse unter realen Bedingungen

Die beschriebene Vorgehensweise wurde bei drei unterschiedlichen Experimenten (Details im Abschnitt 6) genauer analysiert. Wie der Erläuterung oben zu entnehmen ist, kann prinzipiell jede Eigenschaft zur Zuordnung herangezogen werden. Ob diese relevant für eine korrekte Zuordnung ist, stellt sich bei der Analyse der einzelnen Parameter heraus. Als mögliche Parameter (neben dem Kernlinienabstand und den Geschwindigkeitsparametern) wurden die Summe der Grauwerte (SGW) und die Fläche (FI) der segmentierten Partikel ausgewählt. Zusätzlich wurde eine normierte Helligkeit (N), der Quotient aus der Grauwertsumme und der Fläche, analysiert. Neben den oben beschriebenen Parametern wurde in Anlehnung an Maas (1992a) zusätzlich die Korrelation der Parameter eindeutig zugeordneter Paare betrachtet. Dieses Maß sagt grundsätzlich nur aus, wie ähnlich sich die Parameter verschiedener Kameras (räumliche Zuordnung) oder verschiedener Zeitschritte (temporale Zuordnung) sind. Es ist jedoch keine Aussage möglich, ob ein Parameter geeignet ist, um eine merkmalsbasierte Zuordnung durchzuführen. Der Tabelle 5.2 ist zu entnehmen, dass trotz hoher Korrelation zwischen Parametern zugeordneter Paare diese Parameter nicht zur Zuordnung geeignet sind. Aus den in der Tabelle aufgeführten Parametern (nach Gleichung 5.2 - 5.8) wurde der zugehörige Schwellwert (Abbildung 5.6) bestimmt. Anhand der Merkmalsausprägung (Verhältnis  $M_{D-\min}$  zu  $M_{DG}$ ) wird entschieden, ob das Merkmal für die Zuordnung nutzbar ist.

## 5 Wahrscheinlichkeitsbasierter Trackingalgorithmus

|                                      | SGW    |        | Fl    |       | N     |       |
|--------------------------------------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|
|                                      | spat.  | temp.  | spat. | temp. | spat. | temp. |
| mittlere Streuung – $M_{DG}$         | 314,5  | 68,6   | 4,4   | 1,2   | 7,0   | 2,5   |
| max. Streuung – $D_{G-Max}$          | 1100,5 | 346,2  | 14,2  | 4,0   | 13,0  | 9,5   |
| nächster Nachbar – $M_{D-Min}$       | 23,4   | 62,1   | 0,5   | 1,3   | 0,8   | 2,0   |
| mittlerer Nachbar – $M_{D-M}$        | 466,9  | 517,1  | 5,5   | 5,3   | 11,2  | 14,4  |
| weitester Nachbar – $M_{D-Max}$      | 1168,7 | 1451,4 | 13,0  | 18,8  | 28,6  | 30,3  |
| Schwellwert                          | 786    | 172    | 11    | 3     | 18    | 6     |
| Korrelationskoeffizient              | 0,85   | 0,90   | 0,75  | 0,87  | 0,76  | 0,86  |
| Eignung des Parameters <sup>13</sup> | o      | +      | o     | +     | o     | +     |

**Tabelle 5.2:** räumliche (spat.) und zeitliche (temp.) Analyse der Parameter; Summe der Grauwerte (SGW), Fläche (Fl) und normierte Helligkeit (N) der segmentierten Partikel eines Versuches im Niedergeschwindigkeitswindkanal

Tabelle 5.2 zeigt die Ergebnisse eines Versuches im Niedergeschwindigkeitswindkanal (siehe Abschnitt 0). Als Tracer dienten Styroporkügelchen, die alle einen ähnlichen Durchmesser ( $\pm 20\%$ ) besaßen. Der Bildmaßstab jeder Kamera konnte durch die Konfiguration und die Größe des Beobachtungsvolumens um etwa 20% variieren. Auf Grund der Konfiguration sind ähnliche Bildmaßstäbe verschiedener Kameras auf wenige Positionen beschränkt. Dies führt dazu, dass die ausgewählten Parameter nur bedingt zur räumlichen Zuordnung genutzt werden können. Für die zeitliche Zuordnung hingegen können diese effektiver genutzt werden.

Bei den Versuchen in den großvolumigen Anlagen in Ilmenau (siehe Abschnitt 6.3) dienten heliumgefüllte Seifenblasen als Tracer. Deren Größe variiert um etwa 30%. An der Oberfläche wird das Licht nur zu einem Teil diffus reflektiert. An jeder Blase spiegeln sich die Lichtquellen in 2 Punkten. Das führt dazu, dass die radiometrischen Informationen sehr stark vom Ort der Partikel und der Richtung der Beleuchtung abhängen. Wie in Tabelle 5.3 und Tabelle 5.4 sowie in Abbildung 5.10 zu sehen ist, eignen sich hier die Parameter sehr gut zum Tracking. Die Mehrbildzuordnung hingegen kann nicht unterstützt werden.

Auf Grund der problematischen Bestimmung der Orientierungsparameter (siehe Abschnitt 6) mussten bei der Mehrbildzuordnung eine Vielzahl von Geisterpartikeln (bis zu 60%) akzeptiert werden. Die Zuordnung mit Hilfe eines einfachen 4-Frame Algorithmus konnte nicht alle Geisterpartikel eliminieren. Dadurch entstanden etwa 20% Geistertrajektorien kurzer und mittlerer Länge (bis 8 Epochen). Diese konnten jedoch erfolgreich während des Tracking eliminiert werden.

<sup>13</sup> ++ sehr gut, + gut, o bedingt, -- ungeeignet



**Abbildung 5.10: Größenverhältnisse der abgebildeten Partikel in der Ilmenauer Zelle (aufgenommen mit einem Stroboskopblitz)**

Es ist von vielen Parametern der Versuchsanlage und der eingesetzten Tracer abhängig, welches Merkmal sich gut zur Stärkung der Zuordnung eignet. Bei Versuchsanlagen mit großer Tiefenausdehnung ist die Partikelgröße auf Grund der Variation des Bildmaßstabes gut für die zeitliche Zuordnung geeignet, jedoch schlecht für die Mehrbildzuordnung. Durch gezielte Auswahl der Eigenschaften der Versuchsanlagen (z.B. verschiedenen Tracergrößen, Farbe der Tracer, Beleuchtungsvariation) können einzelne Merkmale für die Auswertung hervorgehoben werden.

|                                 | SGW    |        | Fl    |       | N     |       |
|---------------------------------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|
|                                 | spat.  | temp.  | spat. | temp. | spat. | temp. |
| mittlere Streuung – $M_{DG}$    | 508,8  | 77,9   | 9,7   | 2,4   | 11,5  | 2,4   |
| max. Streuung – $D_{G-Max}$     | 1356,5 | 650,0  | 28,5  | 23,5  | 63,7  | 33,0  |
| nächster Nachbar – $M_{D-Min}$  | 19,7   | 225,1  | 0,9   | 1,2   | 0,8   | 4,4   |
| mittlerer Nachbar – $M_{D-M}$   | 338,3  | 501,9  | 8,8   | 8,2   | 8,8   | 9,1   |
| weitester Nachbar – $M_{D-Max}$ | 1058,2 | 1268,5 | 25,8  | 29,8  | 25,9  | 42,5  |
| Schwellwert                     | 1270   | 195    | 24    | 6     | 29    | 6     |
| Korrelationskoeffizient         | 0,17   | 0,87   | 0,33  | 0,86  | 0,12  | 0,78  |
| Eignung des Parameters          | --     | ++     | --    | ++    | --    | ++    |

**Tabelle 5.3: räumliche (spat.) und zeitliche (temp.) Analyse der Parameter; Summe der Grauwerte (SGW), Fläche (Fl) und normierte Helligkeit (N) der segmentierten Partikel eines Versuches in der Vorversuchszelle Ilmenau**

## 5 Wahrscheinlichkeitsbasierter Trackingalgorithmus

|                                 | SGW     |       | Fl    |       | N     |       |
|---------------------------------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                                 | spat.   | temp. | spat. | temp. | spat. | temp. |
| mittlere Streuung – $M_{DG}$    | 1020,2  | 89,1  | 12,7  | 1,8   | 18,2  | 3,9   |
| max. Streuung – $D_{G-Max}$     | 16796,7 | 410,5 | 179,0 | 5,5   | 49,0  | 20,5  |
| nächster Nachbar – $M_{D-Min}$  | 123,2   | 116,2 | 2,1   | 2,1   | 0,9   | 3,7   |
| mittlerer Nachbar – $M_{D-M}$   | 807,3   | 146,7 | 9,7   | 2,9   | 6,6   | 15,7  |
| weitester Nachbar – $M_{D-Max}$ | 5381,9  | 505,2 | 58,6  | 9,8   | 16,0  | 31,7  |
| Schwellwert                     | 2550    | 223   | 32    | 5     | 46    | 10    |
| Korrelationskoeffizient         | 0,02    | 0,10  | 0,05  | 0,02  | -0,07 | 0,54  |
| Eignung des Parameters          | --      | ++    | --    | ++    | --    | +     |

**Tabelle 5.4:** räumliche (spat.) und zeitliche (temp.) Analyse der Parameter; Summe der Grauwerte (SGW), Fläche (Fl) und normierte Helligkeit (N) der segmentierten Partikel eines Versuches im Ilmenauer Fass

## 6 Resultate

Im Rahmen des Schwerpunktprogrammes SPP 1147 der DFG wurde eine Reihe von Experimenten an verschiedenen Versuchsanlagen durchgeführt. Die Auswertung der gewonnenen Rohdaten ist mit den vorgestellten Algorithmen durchgeführt wurden. Durch den modularen Aufbau der Auswertesoftware konnten spezielle Anforderungen (z.B. Mehrmedienauswertung) direkt integriert werden.

Zum einen wurde die 3D-PTV-Messung in einem Niedergeschwindigkeitswindkanal (NWK) durchgeführt. Bei einer mittleren Geschwindigkeit von 7 m/s wurden Styroporpartikel mit Hilfe eines Spiegelsystems beobachtet. Im Ilmenauer Fass (ca. 130 m<sup>3</sup>) dienten hochauflösende Spiegelreflexkameras (SLR-Kameras) zur Beobachtung von heliumgefüllten Seifenblasen und Latexballons. Weiterhin wurde die Wasserströmung innerhalb eines Transparentmotors, einem Wasseranalogon, mit Hilfe von Industriekameras beobachtet. Tabelle 6.1 gibt einen Überblick über die einzelnen Versuchsanordnungen.

| Parameter           | NWK   | Ilmenauer Fass          | Wasseranalogon                      |
|---------------------|---|-------------------------|-------------------------------------|
| Beobachtungsvolumen | 25 x 25 x 30 cm <sup>3</sup>                        | 3,5 m x 7 m Ø           | 10 cm x 8 cm Ø                      |
| Strömungsmedium     | Luft  | Luft                    | Wasser                              |
| Strömung            | Saugkanal   | Thermische Konvektion   | Wasserpumpe                         |
| Partikel            | Styropor  | Seifenblasen            | Vestosint                           |
| Ø Geschwindigkeit   | 7 m/s   | 0,5 m/s                 | 0,3 m/s                             |
| Aufnahmesystem      | Highspeedkamera<br>(500 – 1000 Hz)<br>Spiegelsystem | 4 SLR-Kameras<br>(5 Hz) | 4 Machine Vision<br>Kameras (20 Hz) |

**Tabelle 6.1: Parameter der verschiedenen Versuchsanordnungen**

### 6.1 Erläuterung zur Ergebnisaufbereitung

Im Folgenden werden für jede Versuchsanordnung die Rahmenbedingungen, die verwendete Hardware und die durchgeführten Versuche einzeln aufgezeigt. Zum einen sind die ermittelten Trajektorien graphisch dargestellt. Dazu wurden diese zur Anzeige mit VRML (virtual reality modelling language) aufbereitet. Zur besseren Visualisierung sind die Trajektorien zum Teil farblich geschwindigkeits- oder zeitcodiert. Für die graphische Darstellung der Ergebnisse wurde ein 4D-Anzeigewerkzeug implementiert. Die sich zeitlich verändernden Partikelpositionen auf den Trajektorien werden als Filmsequenz dargestellt. Den räumlichen Eindruck gewinnt der Betrachter durch die Änderung der Perspektive. Es ist leider nicht möglich, diese Darstellungsform für die Präsentation der Ergebnisse hier zu verwenden.

Des Weiteren wurde für alle Versuchsanordnungen das Potential für die erreichbare Genauigkeit abgeschätzt. Als Grundlage hierfür dienen zum einen die Basis-Höhen Verhältnisse der Kamerakonfigurationen als auch die Ergebnisse der Orientierungsbestimmung. Neben den Orientierungsparametern wird auch die Standardabweichung der Gewichtseinheit nach der Ausgleichung  $\sigma_0$  des Bündels bzw. des Rückwärtsschnittes bestimmt.

Die erreichbare Genauigkeit für die Lage- ( $\sigma_{lat}$ ) bzw. Tiefenkoordinaten ( $\sigma_{Tiefe}$ ) kann näherungsweise durch Gleichung 6.1 und 6.2 abgeschätzt werden. Die beiden Komponenten der Lagegenauigkeit werden

## 6 Resultate

a priori mit derselben Genauigkeit angesetzt. Die Genauigkeit hängt vor allem von der Aufnahmegeometrie (Kamerakonstante  $c$ , Tiefe, Basis  $b$ ) und der Bildpunktmessgenauigkeit ab. Da es sich aber um eine grobe Abschätzung handelt, wird anhand der Standardabweichung der Gewichtseinheit des Bündels bzw. des Rückwärtsschnittes das Potential bestimmt. Dies gilt für die aktuelle Konfiguration (einschließlich Bildpunktmessgenauigkeit). Im praktischen Einsatz wird die Bildpunktmessgenauigkeit um den Faktor 3 bis 10 schlechter sein. Dies liegt vor allem daran, dass die signalisierten Kreismarken durch einen Ellipsenoperator hochgenau gemessen werden, die realen Partikel nur mittels grauwertgewichtetem Schwerpunkt. Einflüsse durch Instabilitäten der Orientierungsparameter und asynchrone Bildaufnahmen sind ebenso nicht berücksichtigt.

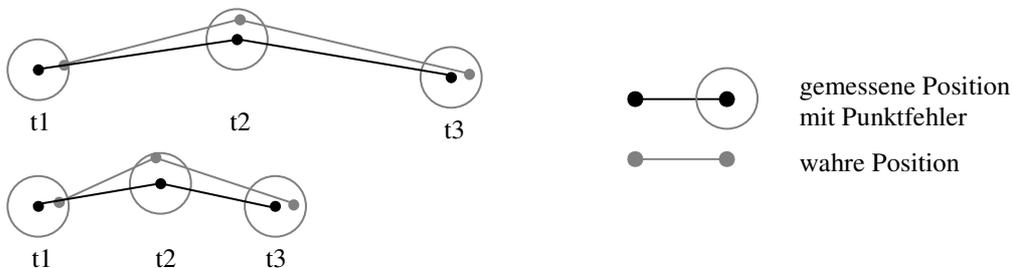
$$\sigma_{lat} = \frac{h}{c} \cdot \sigma_0 \quad 6.1$$

$$\sigma_{Tiefe} = \frac{h}{b} \cdot \frac{h}{c} \cdot \frac{\sigma_0}{\sqrt{2}} \quad 6.2$$

Die direkt aus den Beobachtungen bestimmten Unbekannten sind die Objektkoordinaten. Deren Genauigkeit ( $\sigma_p$ ) ist abhängig von der Bildpunktmessgenauigkeit und der Genauigkeit der Orientierungsparameter. Die Genauigkeit der daraus bestimmten Trajektorien kann mittels Fehlerfortpflanzung bestimmt werden. Die Standardabweichungen der Richtung ( $\sigma_r$ ) und Länge ( $\sigma_l$ ) der einzelnen Vektoren ergibt sich durch Varianzfortpflanzung aus den Punktlagegenauigkeiten ( $\sigma_{P_{i2}}$ ):

$$\sigma_l^2 = \left( \frac{\partial l}{\partial P_{t1}} \cdot \sigma_{P_{t1}} \right)^2 + \left( \frac{\partial l}{\partial P_{t2}} \cdot \sigma_{P_{t2}} \right)^2 \quad 6.3$$

$$\sigma_r^2 = \left( \frac{\partial r}{\partial P_{t1}} \cdot \sigma_{P_{t1}} \right)^2 + \left( \frac{\partial r}{\partial P_{t2}} \cdot \sigma_{P_{t2}} \right)^2$$



**Abbildung 6.1: Einfluss der Punktfehler auf die Genauigkeit der Trajektorien bei langen und kurzen Einzelvektoren.**

In Abbildung 6.1 ist zu erkennen, dass die Länge der Vektoren (Strecke zwischen 2 Punkten) einen Einfluss auf die Genauigkeit der Länge und der Richtung der Vektoren einer Trajektorie hat. Das heißt, dass Trajektorien mit langen Einzelvektoren eine höhere Relativgenauigkeit haben. Damit der Trackingalgorithmus auch bei hoher Partikeldichte zuverlässig arbeitet, sind sehr große Verschiebungen zu vermeiden.

### 6.2 Messungen im Niedergeschwindigkeitswindkanal

Das Institut für Luft- und Raumfahrttechnik der TU Dresden (ILR) verfügt über eine Reihe von experimentellen Anlagen. Für die durchgeführten Experimente diente ein Saugkanal mit einem Querschnitt von  $60 \times 60 \text{ cm}^2$  und einer mittleren Strömungsgeschwindigkeit von  $7 \text{ m/s}$  als Versuchsanlage. In dieser Anlage wurde in Anlehnung an das Leitexperiment des SPP 1147 ein Zylinder mit einseitiger Endscheibe, ein so genannter Zylinderstumpf, installiert. Das Verhältnis Durchmesser zu Länge beträgt 1:2. Auf Grund der geringeren Strömungsgeschwindigkeit im Saugkanal liegen die erreichten Re-Zahlen mit  $4 \cdot 10^4$  etwa eine Größenordnung unter den Vorgaben des Leitexperiments des Schwerpunktprogramms SPP 1147 der DFG.

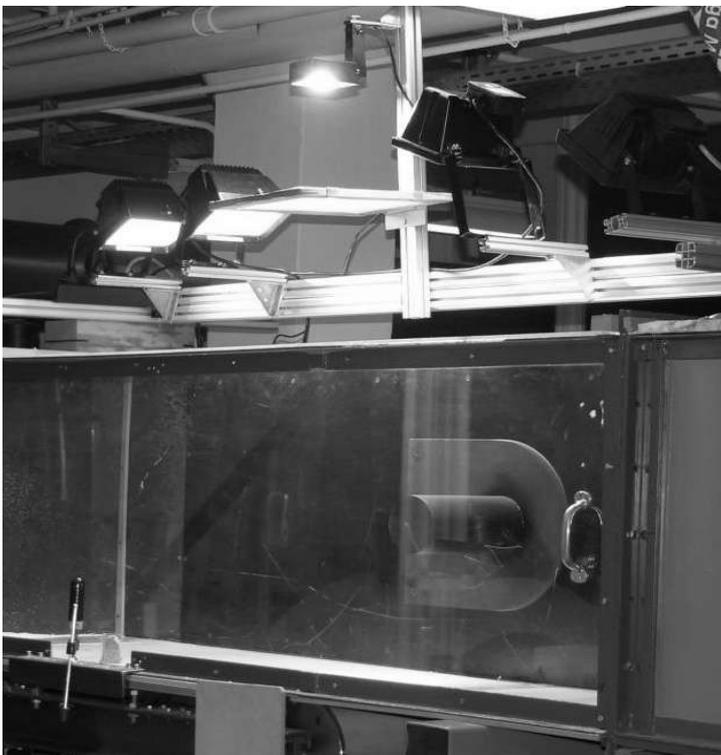


Abbildung 6.2: Saugkanal mit installiertem Zylinderstumpf und Beleuchtungsanlage

#### 6.2.1 Konfiguration des Messsystems

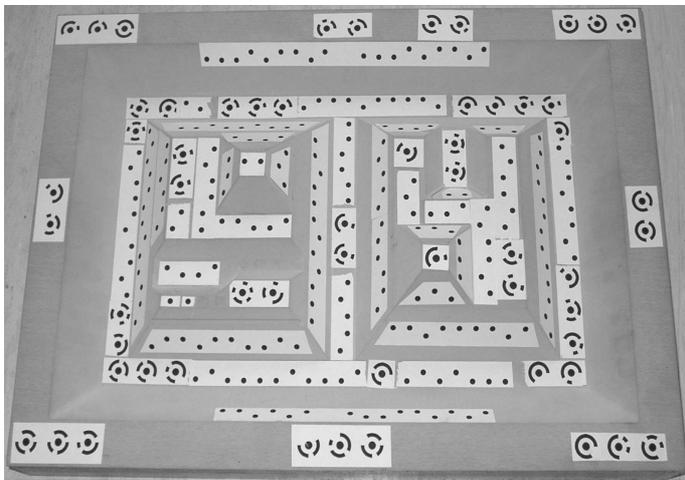
Ziel bei diesem Versuch war es, ein Volumen von etwa  $20 \text{ dm}^3$  zu beobachten und auszuwerten. Mit der in Abbildung 6.2 erkennbaren und in Abschnitt 2.4 beschriebenen Beleuchtungsanlage wurde ein Beobachtungsvolumen von  $25 \times 25 \times 30 \text{ cm}^3$  ausgeleuchtet. Auf Grund der hohen Strömungsgeschwindigkeiten wurde eine Hochgeschwindigkeitskamera eingesetzt. Durch das in Abschnitt 2.3 beschriebene vierteilige Spiegelsystem wurde ein virtuelles Mehrkamerasystem generiert. Mit der genutzten Kamera FASTCAM ultima 1024 konnten Bilder mit  $500 \text{ Hz}$  und  $1024 \times 1024 \text{ Pixel}$  oder mit  $1000 \text{ Hz}$  und  $512 \times 512 \text{ Pixel}$  aufgenommen werden. Da die aktive Sensorfläche jeder virtuellen Kamera nur  $\frac{1}{4}$  der vollen

## 6 Resultate

---

Auflösung beträgt, sind die meisten Versuche mit einer zeitlichen Auflösung von 500 Hz durchgeführt worden. Aus diesen Daten ergibt sich eine mittlere Verweildauer der Partikel im Beobachtungsvolumen von 17 Epochen. Der integrierte Ringspeicher der Kamera hat eine Größe von 1 GB. Somit können Sequenzlängen bis zu zwei Sekunden am Stück aufgenommen werden.

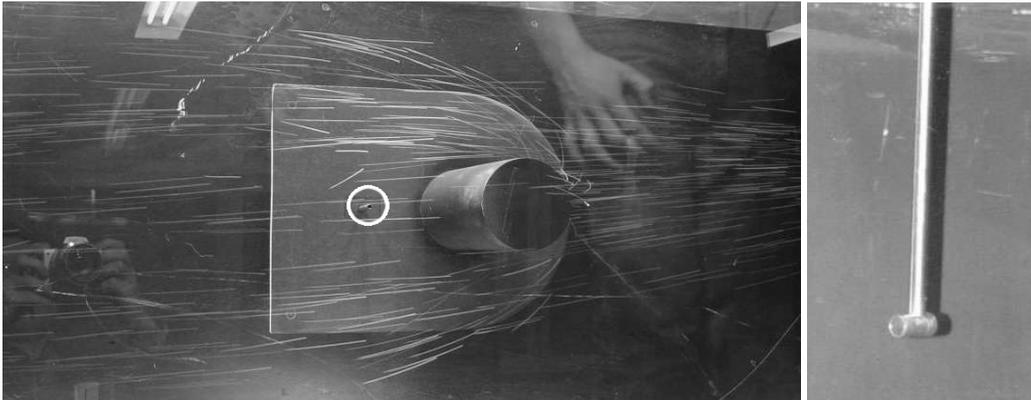
Das Kamera-Spiegel-System wurde mit einem mittleren Abstand von 1,5 m zum Beobachtungsvolumen aufgestellt. Der Abstand der virtuellen Kameras betrug etwa 45 cm. Daraus resultiert ein Basis-Höhen-Verhältnis von 1:3. Die Bestimmung der Parameter der inneren und äußeren Orientierung erfolgte mittels Bündelausgleichung. Das verwendete Punktfeld wurde für die Anwendung speziell entworfen (Abbildung 6.3). Es verfügt über genügend Tiefeninformationen, eine hohe Punktzahl und kann durch die Form von allen Kameras in allen Positionen vollständig und formatfüllend aufgenommen werden. Die mittlere Standardabweichung der Gewichtseinheit der Bündelausgleichung dieser Konfiguration beträgt etwa 0,1 Pixel. Daraus resultiert eine potentielle Genauigkeit von je 0,08 mm für die Lagekomponenten und 0,19 mm für die Tiefenkomponente.



**Abbildung 6.3: Punktfeld zur Kalibrierung und Orientierung des Kamera-Spiegel Systems**

Als Tracer werden im Saugkanal Styroporkügelchen mit einem Durchmesser von 0,1 – 0,3 mm verwendet. Diese werden etwa 0,5 Meter vor dem Messobjekt durch ein schmales Rohr der Strömung zugeführt (Abbildung 6.4 rechts). Vor allem im Bereich des Nachlaufes war die Partikeldichte auf Grund der Trägheit der verwendeten Tracer recht gering. Um dort die Partikeldichte zu erhöhen, können durch ein weiteres Rohr Partikel zugeführt werden (Abbildung 6.4 links). Die mit dieser Methode erreichte mittlere Partikeldichte liegt bei 0,004 Partikeln pro Pixel. Eine höhere Partikeldichte konnte durch die ungleichmäßige und zufällige Verteilung der Partikel im Volumen nicht erreicht werden.

Das im Kanal installierte Zylindermodell wurde mit Referenzmarken versehen, die im Koordinatensystem des Zylinders definiert sind. Damit konnte das Kamerakoordinatensystem in das Modellsystem transformiert werden. Somit sind ebenfalls die Objektkoordinaten und Trajektorien im Modellsystem bestimmt.



**Abbildung 6.4:** Langzeitbelichtung von strömenden Partikeln (links), im Nachlauf erkennbar die Möglichkeit des zusätzlichen Zuführens von Partikeln; Rohr zur Zuführung von Partikeln im Zulauf (rechts)

### 6.2.2 Ergebnisse der Versuche im Niedergeschwindigkeitswindkanal

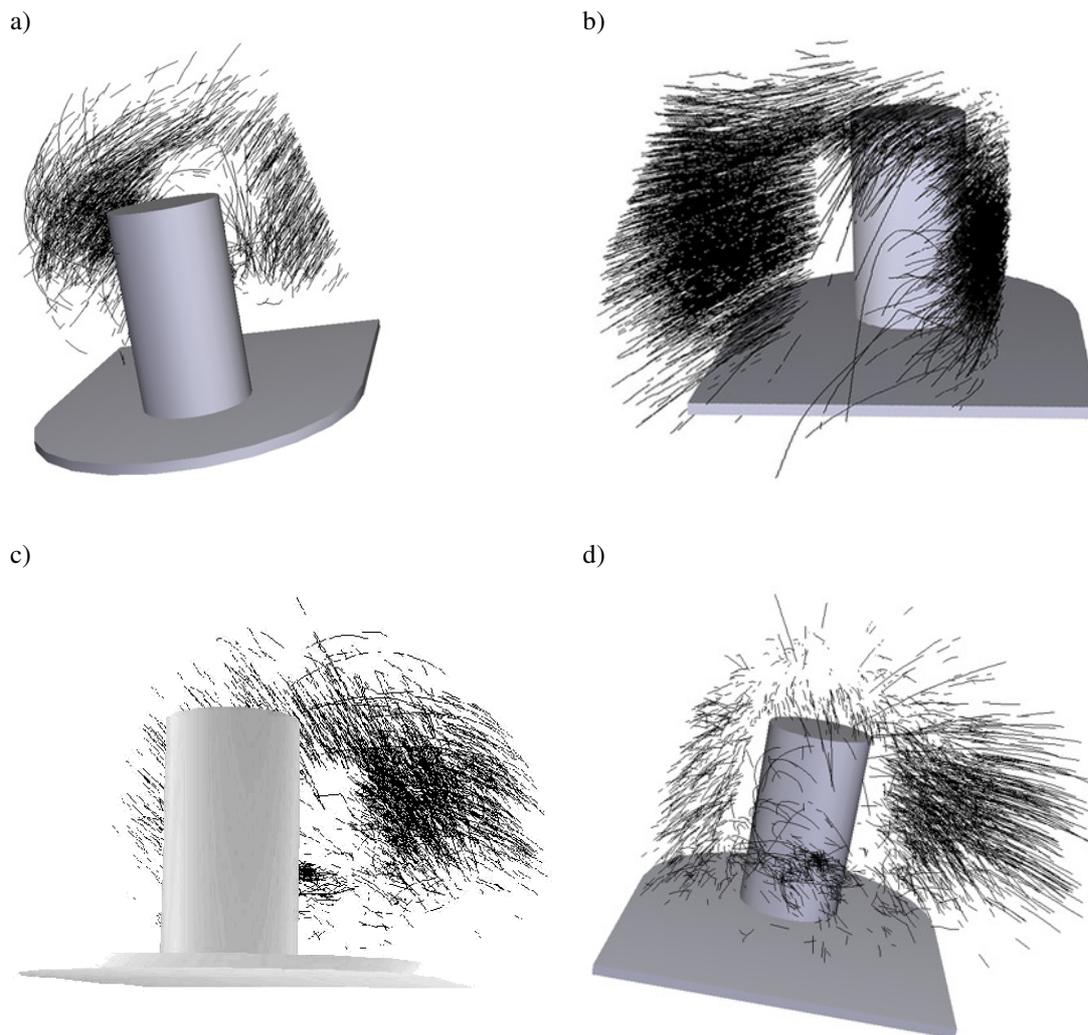
Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine Vielzahl von Versuchen im beschriebenen Saugkanal durchgeführt. Die folgenden Daten stellen Mittelwerte der einzelnen Versuche oder ausgewählte, aber allgemeingültige Einzelergebnisse dar.

Die Bestimmung der Objektkoordinaten erfolgte aus den gemessenen homologen Bildpunkten von in 3 oder 4 Kameras detektierten Partikeln durch den räumlichen Vorwärtsschnitt. Die RMSE der Partikelkoordinaten betragen in den Lagekomponenten etwa 0,13 / 0,12 mm und in der Tiefenrichtung 0,39 mm. Somit sind die Ergebnisse der Punktbestimmung um den Faktor 2 schlechter als durch das Potential der Kalibrierung vorgegeben. Dies kann maßgeblich der Tatsache zugeschrieben werden, dass die Genauigkeit der Bildpunktmessung von signalisierten Kreismarken höher ist als die Messung des Schwerpunktes kleiner, schwach abgebildeter Partikel.

Aus den Einzelpunkten werden im Nachgang die Trajektorien bestimmt, die aus den Differenzvektoren zeitlich benachbarter Objektpunkte bestehen. Die Genauigkeit der Trajektorien ist durch die günstige Wirkung der Fehlerfortpflanzung (Putze, 2006) und durch Korrelationen von Restfehlern (Abschnitt 3.4) höher. Im Mittel konnten 57% der zuvor berechneten Objektkoordinaten durch das Tracking zu Trajektorien mit einer Mindestlänge von 5 Epochen zugeordnet werden. Zum einen sind unter den bestimmten Partikeln auch verbleibende Geisterpartikel vorhanden, die erst durch das Tracking eliminiert werden konnten. Zum anderen bedeutet die Mindestlänge von 5 Epochen, dass das Partikel etwa 30% der mittleren Durchlaufzeit (17 Epochen) beobachtet werden musste. Je Epoche wurden pro Bild etwa 521 Partikel detektiert, aus denen etwa 349 3D-Punkte berechnet werden konnten. Zu jeder Epoche wurden im Mittel 291 3D-Partikel getrackt. Tabelle 6.2 zeigt die Aufteilung der Längen der Trajektorien eines Versuches. Hierbei wurde die Umströmung (ohne zusätzliches Seeding im Nachlauf) innerhalb einer Sekunde (500 Epochen) beobachtet und ausgewertet. Zu sehen ist, dass etwa 22 % der Trajektorien länger als die mittlere Durchlaufzeit verfolgt werden konnten. Durch den eingesetzten Algorithmus konnten Lücken bis zu 2 Epochen geschlossen werden. Dadurch konnten in dem gezeigten Datensatz etwa 1,4 % (53) der Trajektorien verlängert bzw. zusammengesetzt werden.

| Länge der Trajektorien | ≥ 31 | 30 – 26 | 25 – 21 | 20 – 16 | 15 – 11 | 10 – 5 |
|------------------------|------|---------|---------|---------|---------|--------|
| Anzahl                 | 5    | 4       | 75      | 749     | 1022    | 1932   |

**Tabelle 6.2:** Anzahl verschieden langer Trajektorien in einer Sequenz von 500 Epochen



**Abbildung 6.5: Trajektorien der Partikel von jeweils 100 Epochen; Seeding der Strömung (b) und zusätzlich des Nachlaufes (a, c, d)**

Abbildung 6.5 zeigt für verschiedene Versuche die Trajektorien im Beobachtungsvolumen um den Zylinder. Auf Grund der hohen Anzahl der Trajektorien sind jeweils nur die Trajektorien der ersten 100 Epochen dargestellt. Abbildung 6.5b zeigt die Ergebnisse eines Versuches, bei dem nur vor dem Zylinder Partikel der Strömung zugegeben wurden. Es ist zu sehen, dass nur wenige Partikel in den Nachlauf gelangen. Abbildung 6.5 a, c und d zeigen die Trajektorien je eines Versuches, bei denen zusätzlich Partikel hinter dem Zylinder zugegeben wurden.

### 6.3 Messungen im Ilmenauer Fass

Das Fachgebiet Thermo- und Magnetofluidynamik (TFD) der TU Ilmenau beschäftigt sich unter anderem mit der Rayleigh-Bérnard Konvektion in großen Volumen. Hierfür steht unter anderem das Ilmenauer Fass mit einem zylindrischen Volumen von bis zu  $\text{Ø}7,2 \times 6,3 \text{ m}^3$  zur Verfügung (Thess et al., 2001). Der Fußboden des Fasses kann beheizt und die Decke gekühlt werden. Es bilden die Konvektionszellen aus, durch die heiße und kalte Luft ausgetauscht werden. Die gemessenen Geschwindigkeiten mit dem verwendeten Messsystem betragen bis zu 2,3 m/s. Im Rahmen des SPP 1147 existiert eine Kooperation zwischen dem TFD der TU Ilmenau und dem Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung (IPF) der

TU Dresden. Die Aufgaben des IPF umfassen die Konzeption des Messsystems sowie die Auswertung der durchgeführten Versuche.

Das Ziel in dieser Versuchsanlage ist es, die auftretenden dreidimensionalen Strömungsstrukturen zu analysieren. Die auftretenden Phänomene sind dreidimensionaler Natur und verändern sich über lange Zeiträume (Minuten bis Stunden). Auf Grund der Zielstellung sollte ein 3D-PTV-System eingerichtet und validiert werden. Zur Konzeption eines Messsystems für dieses Volumen diente zu Beginn eine kleinere rechteckige Zelle mit den Ausmaßen von  $3,0 \times 4,2 \times 3,6 \text{ m}^3$ . Sowohl in der Zelle als auch im Ilmenauer Fass wurden systematische Untersuchungen durchgeführt, um die Einsatzbereitschaft zu überprüfen. Diese Untersuchungen teilen sich in Validierungsexperimente (Pendel- und Freifallversuche) und reale Versuche mit heliumgefüllten Seifenblasen sowie heliumgefüllten Latexballons als Tracer.

### 6.3.1 Konfiguration des Messsystems

Auf Grund der Größenverhältnisse in dem Volumen<sup>14</sup> ist der Einsatz von hochauflösenden Kameras notwendig. Zum Einsatz kommen in der Versuchsanlage 4 Spiegelreflexkameras Canon EOS 20 D mit einer Sensorgröße von  $3504 \times 2336$  Pixel. Wie in Abschnitt 2.1.1 beschrieben, ist hier nur eine maximale Bildwiederholrate von 5 Bildern pro Sekunde realisierbar. Die Bildwiederholrate von 5 Hz kann nur über 4 Sekunden realisiert werden. Das Schreiben der Bilder auf die integrierte Compact Flash-Karte (inklusive kamerainterner Bildverarbeitung und Kompression) dauert länger als der zeitliche Abstand zweier aufeinander folgender Bilder. Der interne Speicher dient als Puffer, jedoch ist dieser für lange Sequenzen zu klein. Lange Sequenzen mit bis zu 3000 Epochen wurden mit einer geringeren Datenrate, einem Bild pro Sekunde, aufgezeichnet. Zur Beleuchtung dienten entweder Halogenstrahler bei den Vorversuchen oder Blitzlampen für die thermischen Versuche (siehe Abschnitt 2.4).

Im Vorversuch wurden in der Zelle die Kameras in den Ecken einer der Stirnseiten montiert. Der mittlere Abstand zweier Kameras betrug etwa 2,0 m. Daraus ergibt sich ein Basis-Höhen Verhältnis von 1:2 oder kleiner. Die Parameter der inneren und äußeren Orientierung wurden mittels räumlichen Rückwärtsschnitts bestimmt. Dazu wurde an der gegenüberliegenden Stirnseite ein Passpunktfeld eingerichtet. Die Objektkoordinaten der etwa 100 signalisierten Punkte wurden mit übergeordneter Genauigkeit photogrammetrisch bestimmt. Die mittlere Standardabweichung der Gewichtseinheit des Rückwärtsschnitts betrug etwa 0,1 Pixel ( $\sigma_0 = 0,7 \mu\text{m}$ ). Daraus resultiert eine potentielle Genauigkeit von je 0,14 mm für die Lagekomponenten und 0,15 mm für die Tiefenkomponente. Zum einen diente diese Zelle zum Testen der eingesetzten Technik sowie zur Überprüfung und Anpassung der vorhandenen Algorithmen. Im Weiteren wurde in der Zelle das Messsystem mit Hilfe eines Pendels, eines Fallversuches sowie mit durch erzwungene Konvektion bewegten Seifenblasen validiert.

Die Versuche im Ilmenauer Fass fanden mit einem Aspektverhältnis<sup>15</sup> von  $\Gamma=2$  statt. Das daraus resultierende Volumen beträgt  $140 \text{ m}^3$ . Aus den Vorversuchen konnten die Parameter für die Konfiguration im Ilmenauer Fass abgeleitet werden. Die Kameras sind am Zylindermantel montiert, jeweils zwei unten und oben, mit einem mittleren Kameraabstand von 2,3 m. Auf Grund der Abbildungsgröße der Seifenblasen, der begrenzten Schärfentiefe der Kameras und der begrenzten Beleuchtungsintensität sind Partikel nur bis zu einem Abstand von etwa 5 Metern detektierbar. Wie in Abbildung 6.6 zu sehen ist, ergibt sich ein Überlappungsbereich aller 4 Kameras in der Mitte des Fasses. In den seitlichen Bereichen werden mögliche Partikel in nur zwei Kameras abgebildet. Das Basis-Höhen Verhältnis beträgt im Ilmenauer Fass etwa 1:2.

---

<sup>14</sup> Zur Abschätzung der notwendigen Auflösung kann man eine Ebene in der Mitte des Beobachtungsvolumens betrachten. Die Breite des Bildausschnittes beträgt etwa 7 Meter, die Partikel haben einen Durchmesser von 3 mm.

<sup>15</sup> Das Aspektverhältnis ist der Quotient aus dem Durchmesser und der Höhe des Ilmenauer Fasses.

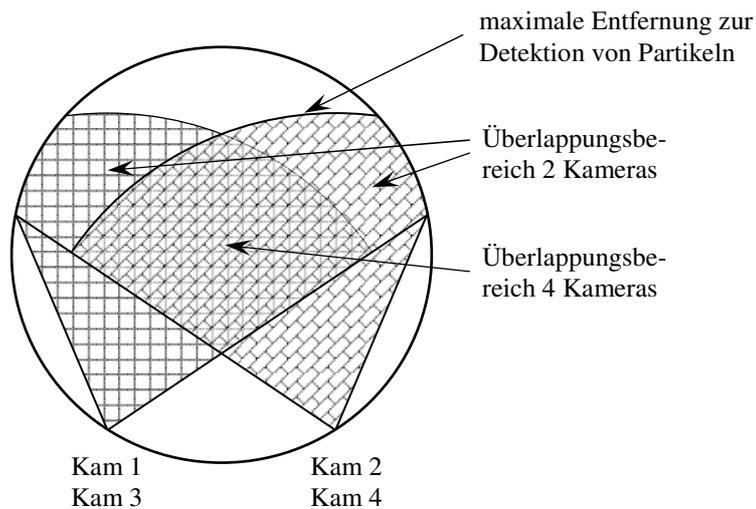


Abbildung 6.6: Skizze der Kameraanordnung und der Überdeckungsbereiche (Draufsicht)

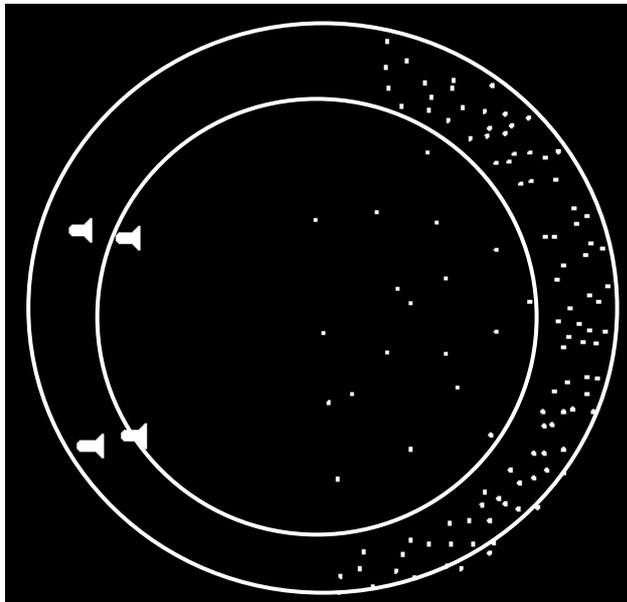


Abbildung 6.7: Konfiguration der Passpunkte und der Kameras (links im Bild)

Die Orientierungselemente werden in ähnlicher Weise durch einen kombinierten Rückwärtsschnitt auf signalisierte, bekannte Punkte bestimmt. In einem ersten Versuch wurden nur Punkte auf dem Mantel des Fasses signalisiert. Trotz der ausreichenden Anzahl und guter Punktverteilung konnte kein Ergebnis ermittelt werden. Nachdem die gesamte Konfiguration (Durchmesser des Zylinders, Brennweite, Lage der Kameras) getestet wurde, stellte sich heraus, dass die Konfiguration einen so genannten gefährlichen Zylinder bildet. Liegen die signalisierten Punkte und die Projektionszentren auf einem Zylindermantel, treten sowohl bei der Berechnung der relativen Orientierung als auch des Rückwärtsschnittes singuläre Normalgleichungssysteme auf. Um diese ungünstige Konfiguration zu vermeiden, sind auf dem Boden und an der Decke des Fasses zusätzlich Punkte markiert worden (Abbildung 6.7). Die mittlere Standardabweichung der Gewichtseinheit der Rückwärtsschnitte dieser Konfiguration beträgt etwa 0,15 Pixel. Daraus resultiert eine potentielle Genauigkeit von je 0,3 mm für die Lagekomponenten und 0,5 mm für die Tiefenkomponente. Machacek et al. (2003) zeigen, wie sich alternativ durch eine zweistufige Orientierungs- und Kalibrierungsstrategie mit Hilfe eines Referenzstabes die Orientierungsparameter in sehr großen Volumen bestimmen lassen.

Als Tracer dienten zum einen die im Abschnitt 2.5 beschriebenen heliumgefüllten Seifenblasen. Diese wurden über vier räumlich verteilte Zuleitungen in das Volumen eingeleitet. Auf Grund des Herstellungsprozesses der Blasen war es nicht einfach, die optimale Partikelanzahl gleichmäßig im Volumen zu verteilen. Zumeist konnte die maximal auswertbare Partikeldichte nicht ausgeschöpft werden. Für die Langzeitversuche dienten wenige heliumgefüllte Latexballons. Zum einen sind diese auf Grund ihrer Größe mit sehr hoher Zuverlässigkeit über alle Epochen im gesamten Volumen zu verfolgen, zum anderen haben die Latexballons quasi eine unbeschränkte Lebensdauer.

### 6.3.2 Ergebnisse der Versuche im Ilmenauer Fass

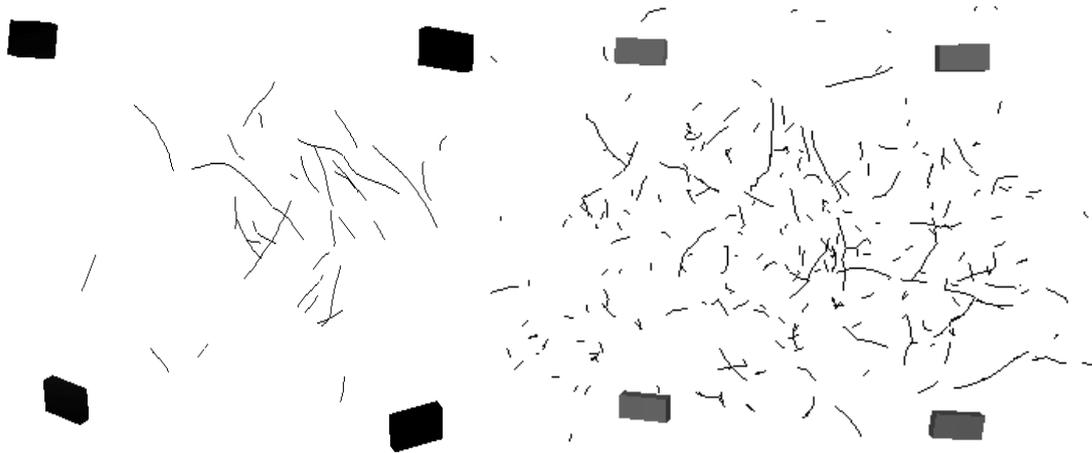
Im Rahmen der Überprüfung der einzelnen Hard- und Softwaremodule des Messsystems wurden in der Testzelle verschiedene Versuche durchgeführt. Diese umfassen die Validierung mittels Kreis- und Falltest (Lobutova et al., 2007) sowie das Tracking von Seifenblasen.

Neben der Validierung von optischen Messsystemen mit Referenzkörpern (z.B. nach VDI/VDE 2634 Blatt 1) können auch bekannte Geometrien zum Vergleich herangezogen werden. Dazu wurde ein Modellpartikel aus Glas mit einem Durchmesser von 13 mm mit einem Faden an einem horizontal rotierenden Arm befestigt. Dieser Arm wurde durch einen Schrittmotor angetrieben. Die Bahnkurve des Modellpartikels konnte mit Hilfe der Maße des Versuchsaufbaus sowie durch unabhängige Messung mit einem Maßstab bestimmt werden.

Die ersten Auswertungen des Pendelversuches in der Testzelle zeigen technische Probleme des Aufnahmesystems auf. Die RMSE der Modellpartikelkoordinaten betragen in den Lagekomponenten etwa 23 / 21 mm und 41 mm in der Tiefenrichtung. Diese Ergebnisse sind weit unter dem abgeschätzten Potential der Konfiguration. Ursächlich dafür ist die Asynchronität der Kameras. Es konnte ein Unterschied des Belichtungszeitpunktes von etwa 10 ms zwischen den Kameras festgestellt werden. Die einzelnen Triggersignale an den Kameraeingängen weisen eine Abweichung von 10  $\mu$ s auf, demzufolge sind die Auslöseunterschiede auf die kamerainterne Elektronik zurückzuführen. Die Geschwindigkeit der Kugel betrug etwa 1,2 m/s. Eine Differenz in den Aufnahmezeitpunkten von 1/100 Sekunden bedeutet, dass sich die Kugel zwischen den beiden Aufnahmezeitpunkten 12 mm im Objektraum weiter bewegt hat.

Dennoch sind die Ergebnisse zwischen den gemessenen und vorgegebenen Bahndaten zufrieden stellend, da das Hauptaugenmerk auf der Bestimmung großer Strukturen liegt. Der gemessene Bahndurchmesser ist 1 cm zu groß (0,8 % Fehler), die bestimmte Bahngeschwindigkeit stimmt mit der vorgegebenen überein (im Rahmen der Messgenauigkeit der Sollvorgaben). Die Ergebnisse der frei fallenden Partikel (Lobutova et al., 2007) zeigen eine gute Übereinstimmung (0,2 % Fehler der Positionsbestimmung, 0,9 % Fehler der Fallgeschwindigkeit) zwischen den berechneten und gemessenen Werten.

Neben den speziellen Tests zur Validierung des Messsystems wurden erste Untersuchungen mit den späteren Tracern (heliumgefüllte Seifenblasen) durchgeführt. Dies diente vor allem zur Anpassung der Bildverarbeitungs- und -analysemethoden. Hierzu wurde mit Hilfe eines Axialgebläses eine Strömung in der Testzelle erzeugt. Die mittlere Geschwindigkeit, gemessen mit einem Flügelradanemometer, betrug 20 cm vor dem Gebläse 0,7 m/s. Trotz der verbleibenden Probleme konnten hier 20 Epochen mit wenigen Partikel ausgewertet werden. Die RMSE der Partikelpositionen betragen in den Lagekomponenten 11 / 10 mm und in der Tiefenrichtung 16 mm. Die daraus rekonstruierten Trajektorien sind in Abbildung 6.8 links zu sehen.



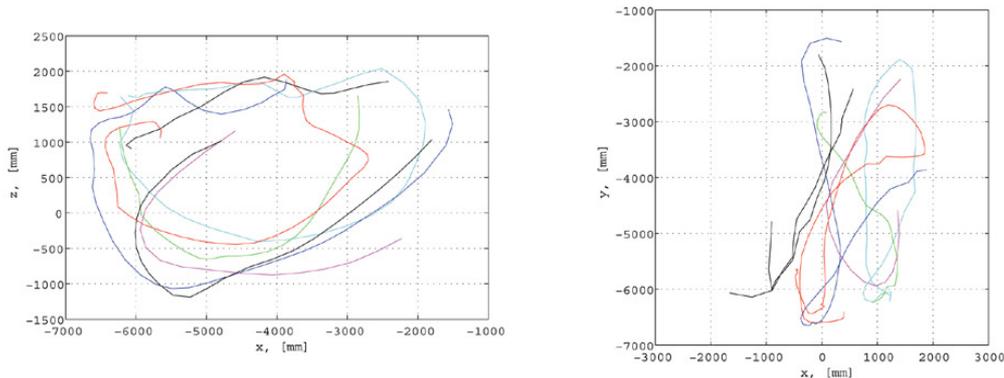
**Abbildung 6.8: Trajektorien der heliumgefüllten Seifenblasen in der Ilmenauer Testzelle (links) und im Ilmenauer Fass (rechts)**

Zum Vergleich wurden die Seifenblasen mit dem Spiegelsystem beobachtet. Trotz des ungünstigeren Basis-Höhen-Verhältnisses von 1:5 und einer geringeren potentiellen Genauigkeit (0,17 / 0,59 mm) lagen die RMSE der Partikelpositionen bei 0,7 / 0,6 mm für die Lagekomponenten und 1,9 mm für die Tiefenrichtung. Das ist um den Faktor 3 schlechter als abgeschätzt und entspricht somit den Erwartungen der realen Versuchsbedingungen. Da die erreichten Ergebnisse mit dem Spiegelsystem besser als mit vier Spiegelreflexkameras sind, ist das ein weiterer Hinweis darauf, dass die Steuertechnik der Spiegelreflexkameras überarbeitet werden muss.

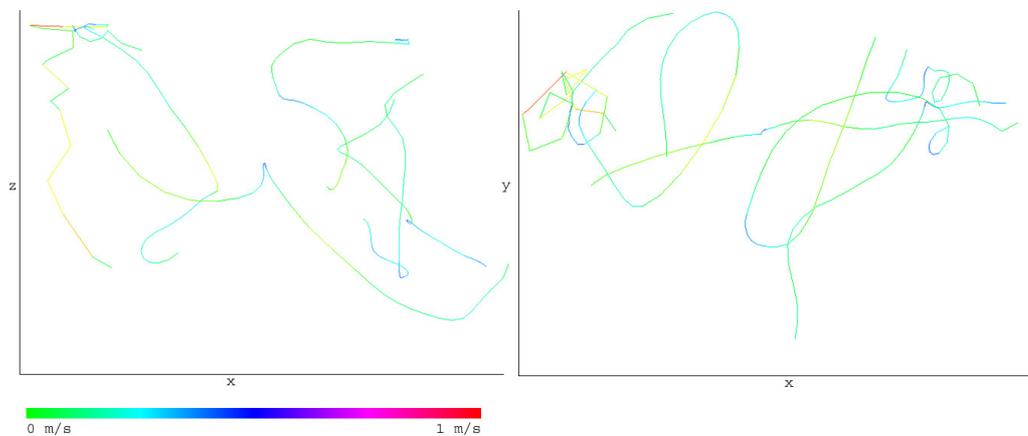
Nach der Einrichtung des Messsystems im Ilmenauer Fass wurde wieder das rotierende Pendel genutzt, um das Messsystem beurteilen zu können. Die RMSE der Modellpartikelkoordinaten betragen in den Lagekomponenten etwa 9 / 9 mm und in der Tiefenrichtung 21 mm. Die Prüfung der Ebenheit der gemessenen Kreisbahn ergab einen RMSE der Einzelpunkte von 0,1 mm. Die Abweichung von der mittleren Kreisbahn betrug 5,3 mm. Die Ergebnisse sind jedoch noch weit von dem Potential der Konfiguration entfernt. Zur Kontrolle wurde ein statisches Objekt mit signalisierten Punkten mehrfach im gesamten Beobachtungsvolumen des Fasses aufgestellt. Das Objekt ist direkt im Anschluss an die Bestimmung der Orientierungselemente aufgenommen worden. Die daraus resultierenden RMSE der Objektpunkte betragen 0,3 / 0,2 mm in lateraler Richtung und 0,7 mm in Tiefenrichtung. Somit ist nachgewiesen, dass die Geometrie gut zur genauen Bestimmung von Objektpunkten im gesamten Volumen geeignet ist. Die verbleibenden Unzulänglichkeiten des Messsystems sind zum einen die Asynchronität der Kameras, deren Effekt vor allem bei höheren Geschwindigkeiten deutlich wird. Dieses Problem wird in Zukunft durch die Belichtung mit einem kurzen Blitz gelöst (siehe Abschnitt 2.4). Erste Tests mit dieser Art der Synchronisation wurden mit heliumgefüllten Latexballons durchgeführt. Obwohl auf Grund der großen Größe der Tracer die Bildpunktmessgenauigkeit sehr gering ist, ergeben sich RMSE der Objektpunkte 1,8 / 1,8 mm in lateraler Richtung und 5,6 mm in Tiefenrichtung.

Zur Bestimmung von Strömungsstrukturen des Rayleigh-Bérnard-Experimentes wurde eine Temperaturdifferenz von 20 K im Ilmenauer Fass eingestellt. Als Tracer dienten sowohl heliumgefüllte Seifenblasen als auch Latexballons. Auf Grund von unzureichend zuverlässig bestimmten Orientierungselemente und der verbleibenden Asynchronität geben die geometrischen Eigenschaften nur unzureichend Aufschluss über homologe Bildpunkte. Mehrdeutigkeiten können nicht oder nur selten gelöst werden. Bei einer mäßigen Partikeldichte wurde eine Sequenz von 20 Epochen ausgewertet. Mit dem in Abschnitt 5 beschriebenen Ansatz konnten aus 15% der segmentierten Partikel im Bildraum sichere Trajektorien bestimmt werden (Abbildung 6.8 rechts). Ein Großteil der Mehrdeutigkeiten konnte jedoch nicht gelöst werden. Die Verwendung eines einfachen 4-Frame-Trackingalgorithmus erzeugte sehr viele Geistertrajektorien. Es war visuell nicht möglich, auch nur eine „richtige“ Trajektorie sicher aus allen vorhandenen auszuwählen.

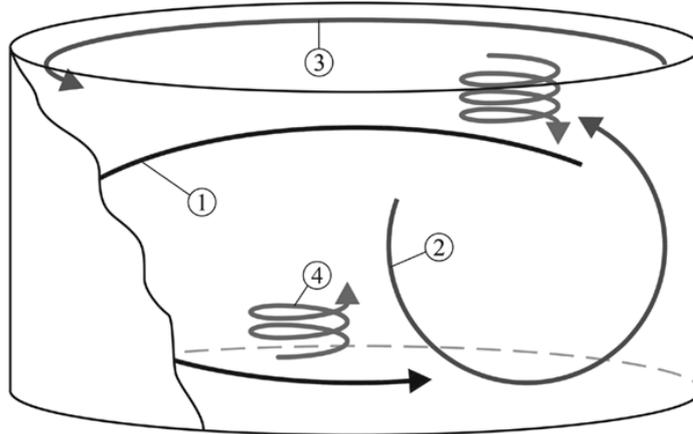
Um dennoch lange Trajektorien zu erhalten, sind einige Restriktionen einzuhalten. Die Tracer müssen in jedem Bild zuverlässig detektierbar sein. Dazu wurden größere heliumgefüllte Latexballons als Tracer genutzt. Um eine sichere Mehrbildzuordnung zu gewährleisten, wurde die Anzahl der Tracer auf 5 reduziert. Eine solche starke Reduktion ermöglichte weiterhin, die zeitlichen Abstände der einzelnen Epochen zu vergrößern ohne dabei einen Nachteil bei der zeitlichen Zuordnung zu haben. Durch die Datenrate von einem Bild pro Sekunde konnten jeweils Aufnahmen von 30 Minuten durchgeführt werden. Aus allen im Sichtbereich der Kameras befindlichen Ballons konnten Trajektorien bestimmt werden. Lobutova et al. (2008) zeigen die statistische Analyse der Daten und leiten verschiedenen Moden der kohärenten Strukturen ab (Abbildung 6.11). Abbildung 6.9 und Abbildung 6.10 zeigen Trajektorien von Einfachrollen und Wirbelstrukturen.



**Abbildung 6.9:** Große Einfachrolle im Ilmenauer Fass in der Frontansicht (links) und in der Draufsicht (rechts)



**Abbildung 6.10:** Wirbel im Ilmenauer Fass in der Frontansicht (links) und in der Draufsicht (rechts), farbcodierte Geschwindigkeiten

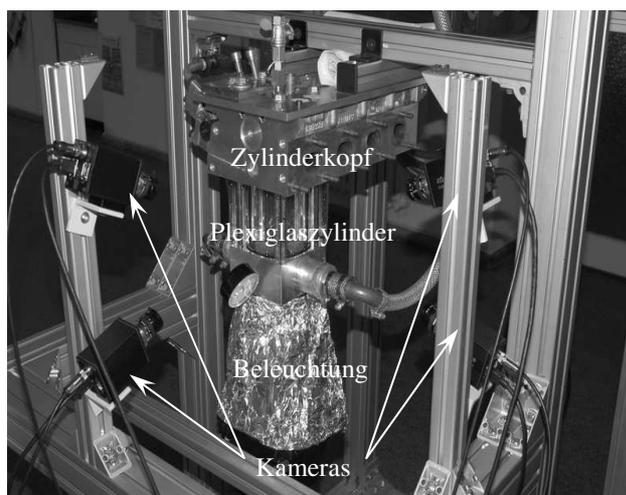


**Abbildung 6.11: Moden der kohärenten Strukturen in der Rayleigh-Bénard-Zelle „Ilmenauer Fass“, 1 – Einfachrolle, 2 – Doppelrolle, 3 – azimutale Strömung, 4 – Wirbel (Lobutova et al., 2008)**

### 6.4 Messungen im Wasseranalogon

Die Messung von Strömungen im Verbrennungsraum eines Motors wird vor allem durch den sehr beschränkten Zugang erschwert. Auf Grund der entstehenden Drücke und Temperaturen in einem befeuerten Motor haben die transparenten Bauteile nur eine geringe Größe. Zum Einsatz kommen unter anderem Glasringeinsätze (Hentschel, 2000) oder Endoskope. Für Analysen im gesamten Brennraum ist ein größerer optischer Zugang notwendig.

Im Rahmen der Arbeiten im Schwerpunktprogramm wurde ein wasserdurchströmter Motor (bereitgestellt von der Volkswagen AG), ein Wasseranalogon, mit transparentem Zylinder als weitere Versuchsanlage untersucht. Unterhalb des Zylinderkopfes ist ein Plexiglaskörper montiert. Dieser simuliert die Brennkammer und dient als optisches Interface zur Strömung. Dieser Körper besitzt außen ebene Trennflächen und innen eine zylindrische Bohrung (Abbildung 6.12). Dies stellt vor allem an die Modellierung des Strahlenganges durch verschiedene Medien erhöhte Anforderungen. Die mathematischen Hintergründe zu dieser Versuchsanlage sind ausführlich in Abschnitt 4 erläutert.



**Abbildung 6.12: Aufbau der Versuchsanlage des Wasseranalogons**

Der Plexiglaswürfel hat eine Kantenlänge von 10 cm, die innere Bohrung einen Durchmesser von etwa 8 cm. Durch eine Pumpe im Wasserkreislauf wird ein Volumenstrom von 8 Litern pro Minute erzeugt. Im Zulauf entspricht das etwa 0,45 m/s, die mittlere Geschwindigkeit im Zylinder ergibt sich zu 0,03 m/s. Die Versuche wurden mit verschiedenen Ventilöffnungen durchgeführt. Die Einströmgeschwindigkeit durch zwei Ventile bei einer Ventilsplattbreite von 3 mm beträgt 0,25 m/s. Je kleiner der Spalt ist, desto höher ist die Einströmgeschwindigkeit und desto turbulenter ist die Strömung in der Brennkammer. Bei der Einströmung durch ein EVntil mit einer Splattbreite von 1 mm beträgt die mittlere Geschwindigkeit 1,4 m/s. Als Tracer dienten 30  $\mu\text{m}$  große Vestosintpartikel.

### 6.4.1 Konfiguration des Messsystems

Zur Beobachtung des Volumens wurde ein neues Kamerasystem konzipiert und aufgebaut. Dieses besteht aus einem Verband von vier einzelnen Industriekameras (KWD LogLux i5). Durch einen speziell abgestimmten Messrechner konnten 25 Bilder pro Sekunde in voller Auflösung (1,3 MPixel) aufgenommen werden. Der optische Zugang zum Messvolumen ist vor allem durch Totalreflexion beschränkt. Die umgesetzte Kamerakonfiguration ist in Abbildung 6.12 zu sehen. Je zwei Kameras sind konvergent angeordnet und beobachten durch ein ebenes Interface. Die zwei Gruppen der Kameras sind rechtwinklig zueinander angeordnet. Beleuchtet wird das Messvolumen durch Halogenstrahler von unten.

Die Kameras sind mit einem Abstand von 30 cm vom Beobachtungsvolumen montiert. Der Abstand der einzelnen Kameras beträgt 13 cm zur nächsten und 40 cm zu den gegenüberliegenden Kameras. Auf Grund der Konfiguration ergeben sich Schnittwinkel von etwa  $90^\circ$ . Die Parameter der inneren und äußeren Orientierung wurden im Rahmen einer Selbstkalibrierung bestimmt. Das verwendete Punktfeld wurde in ähnlicher Weise entworfen wie das zur Kalibrierung des Spiegelsystems im NWK (Abbildung 6.3). Die Standardabweichung der Gewichtseinheit der Bündelausgleichung dieser Konfiguration betrug etwa 0,1 Pixel. Daraus resultiert eine potentielle Genauigkeit von je 20  $\mu\text{m}$  für die Lagekomponenten und 30  $\mu\text{m}$  für die Tiefenkomponente. Wie in Abschnitt 4.2 beschrieben, werden die Objektkoordinaten im Inneren des Plexiglaswürfels in einem mehrstufigen Verfahren bestimmt.

Die Versuche am wasserdurchströmten Zylinder wurden mit der oben beschriebenen Konfiguration durchgeführt. Die einzelnen Versuche unterschieden sich durch die Breite des Ventilspaltes und somit der Einströmgeschwindigkeit. Die mittlere Partikeldichte betrug 0,0006 Partikel pro Pixel, der mittlere Abstand im Objektraum zum nächsten Nachbarn 8,9 mm. Daraus ergibt sich der Quotient<sup>16</sup> aus dem mittlern Abstand der Partikel und der mittleren Bewegung (Gleichung 1.7) zu 0,6. Detektiert werden konnten Geschwindigkeitsspitzen von 0,5 m/s. Die mittlere Geschwindigkeit betrug 0,37 m/s. Durch die relativ hohen Strömungsgeschwindigkeiten konnten die Tracer nur für maximal 14 Epochen im Messvolumen beobachtet werden.

### 6.4.2 Ergebnisse der Versuche im Wasseranalogon

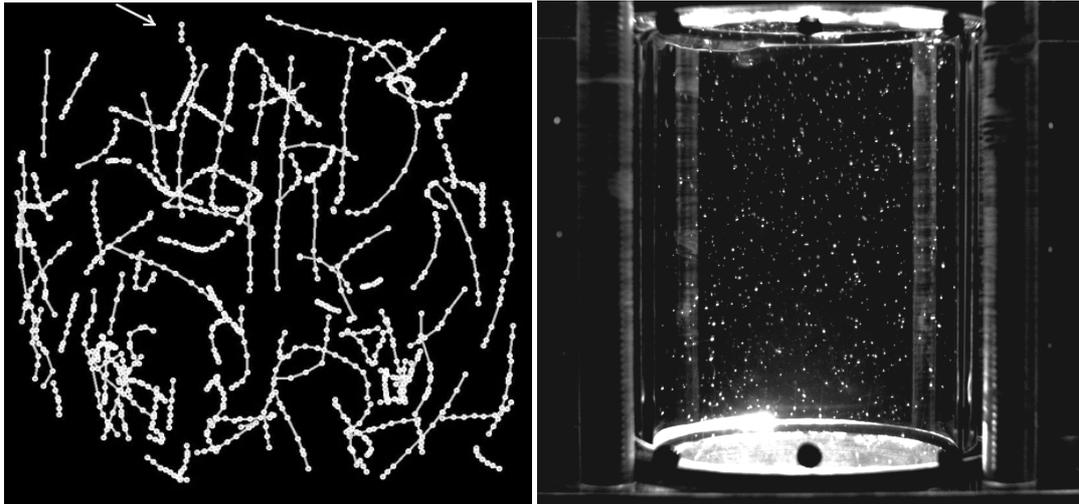
Zur Validierung des Messsystems wurden Untersuchungen im luftgefüllten Plexiglaszylinder durchgeführt (Putze, 2008c). Hierzu wurden zwei Kameras konvergent angeordnet und beobachteten durch dasselbe ebene Interface. Im Inneren wurde eine Referenztafel positioniert und deren Punkte bestimmt. Diese Punkte wurden mit den zuvor hochgenau bestimmten Punktkoordinaten verglichen. Die Ergebnisse sind in Abschnitt 4.2.5 dargestellt. Sie zeigen, dass eine absolute Genauigkeit der Objektkoordinaten von 100  $\mu\text{m}$  erreicht werden kann. Da die verbleibenden Einflüsse primär systematischer Natur sind, vor allem durch Fehler der Formparameter und des Brechungsindex, ist die innere Genauigkeit benachbarter Punkte und die Relativgenauigkeit höher. Aus der Varianzfortpflanzung ergibt sich demzufolge auch eine höhere Genauigkeit für die Trajektorien.

<sup>16</sup> Für den Fall, dass der Quotient viel größer 1 ist, wird das Tracking trivial. Wenn der Quotient gegen 0 geht, so wird das Tracking unmöglich.

## 6 Resultate

---

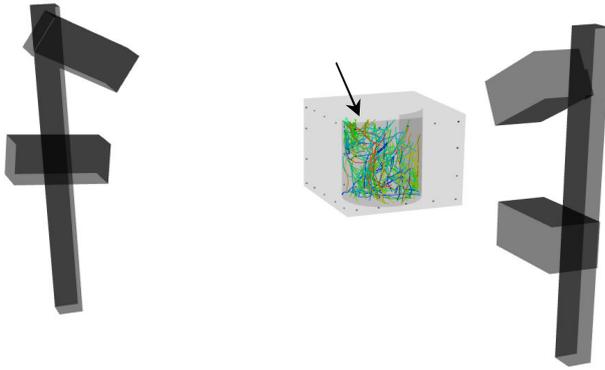
Zur Überprüfung und Anpassung der notwendigen Algorithmen wurde zu Beginn der Strömungsexperimente eine 2D-Analyse durchgeführt. Hierzu wurde eine Sequenz aus 30 Epochen aufgenommen. Die Partikeldichte wurde gering gewählt, um zuverlässige Trackingergebnisse zu erreichen. Die Bildverarbeitungsmethoden zur Partikeldetektion und das Tracking der Bildpunkte kann ohne Berücksichtigung des Mehrmedieneinflusses durchgeführt werden. Das Tracking beruht auf einem einfachen 4-Frame-Trackingalgorithmus. Abbildung 6.13 zeigt die Trajektorien ab einer Länge von 7 Epochen. Die längste Trajektorie umfasst 26 Epochen. Die Ventilöffnung ist in der oberen linken Bildecke, die Einströmrichtung ist durch den Pfeil angedeutet.



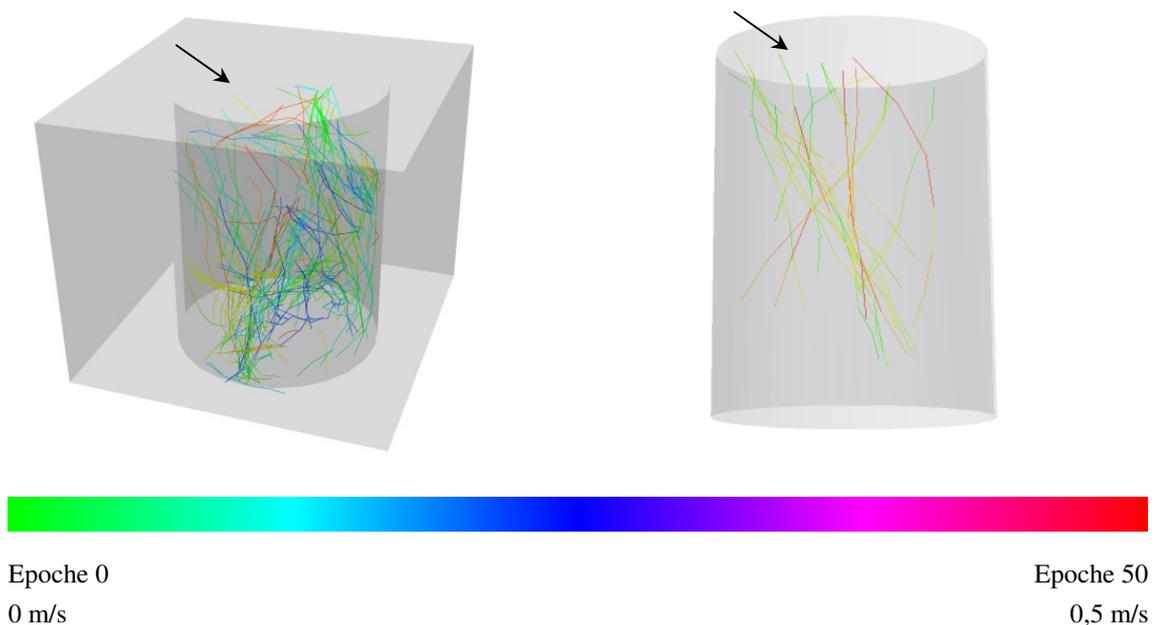
**Abbildung 6.13: Ergebnis des 2D Tracking, Einströmrichtung von oben links (links) und Originalbild (kontrastverstärkt) einer Kamera**

Zur Untersuchung realer Wasserströmungen durch den Zylinder wurde die oben beschriebene Konfiguration mit 4 Kameras genutzt. Die Ventilspaltöffnung war 3 mm breit. Die Strömung wurde 2 Sekunden bzw. 50 Epochen beobachtet.

Das Kamera- und das Modellsystem wurden mit Hilfe der 3D-Helmertransformation zusammengeführt. Die Standardabweichung der Gewichtseinheit nach der Transformation betrug  $264 \mu\text{m}$ . Im Weiteren wurden die Objektkoordinaten der Partikel aller Epochen bestimmt. Der RMSE der einzelnen 3D-Objektpunkte betrug  $144 \mu\text{m}$ . Die aus den Einzelpunkten bestimmten Trajektorien sind in Abbildung 6.14 und Abbildung 6.15 zu sehen. Die dargestellten Trajektorien sind beispielhaft für die jeweilige Situation ausgewählt. Diese sind farbkodiert und zeigen entweder die Geschwindigkeit (rechts) oder den Zeitpunkt der Messung (links) an. Es konnten insgesamt 461 Trajektorien mit einer Länge zwischen 5 und 14 Epochen bestimmt werden.



**Abbildung 6.14:** Konfiguration des Strömungsexperiments, Einströmrichtung durch den Pfeil markiert



**Abbildung 6.15:** Einige Trajektorien der Strömung (Ventilspaltöffnung 3 mm, Einströmrichtung durch die Pfeile markiert); Farbkodiert nach der Zeit (links) und nach der Geschwindigkeit (rechts)

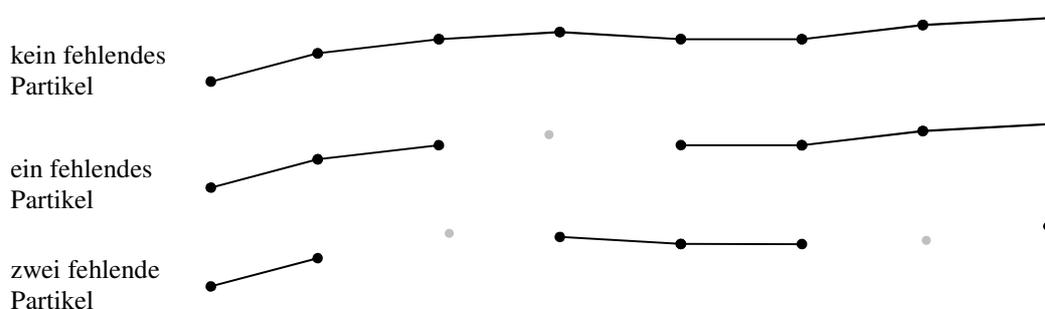
Anhand der durchgeführten Versuche konnte gezeigt werden, dass die entwickelten Algorithmen funktionstüchtig sind. Da das Messsystem indirekt die Strömung durch die eingebrachten Partikel bestimmt, sind die Ergebnisse nur zur Auswertung von Strömungsstrukturen geeignet, die durch die Partikel registriert werden können. Vor allem bei der Nutzung der heliumgefüllten Seifenblasen sind auf Grund der Größe nur Aussagen über Strukturen mit einer großen charakteristischen Länge zu treffen. Demzufolge steht hier die Funktionalität des Messsystems der Fähigkeit, Strömungen zu analysieren gegenüber. Es wird von jedem Anwender eines bildgebenden Messsystems gefordert, dass die eingesetzten Tracer der Zielstellung angepasst sind.

## 6.5 Statistik der Trajektorienlänge

Wie in der Einführung bereits beschrieben, sind lange Trajektorien für eine Lagrange'sche Betrachtung von entscheidender Bedeutung. Demnach ist es das Ziel jedes Algorithmus' zur Lösung der Mehrdeutig-

## 6 Resultate

keiten der spatio-temporalen Zuordnung, die Länge der einzelnen Trajektorien zu erhöhen, indem die Zuordnungen so gut als möglich gelöst werden. Dabei haben einzelne nicht gelöste Mehrdeutigkeiten entscheidenden Einfluss auf das Gesamtergebnis, wenn sie als Bindeglied in langen Trajektorien fehlen (siehe Abbildung 6.16). Der folgende Abschnitt veranschaulicht die Auswirkung nicht gelöster Mehrdeutigkeiten auf die Länge und die Anzahl langer Trajektorien.



**Abbildung 6.16: Auswirkung weniger nicht gelöster Mehrbildzuordnungen**

Zur Betrachtung der Auswirkung kann die Frage „Wie viel längere Trajektorien ergeben sich bei einer Steigerung der gelösten Mehrbildzuordnungen um 5% bzw. 10%?“ gestellt werden. Für eine stochastische Betrachtung wird die Fragestellung umgestellt zu „Mit welcher Wahrscheinlichkeit tritt welcher Verlust an langen Trajektorien auf, wenn 5% bzw. 10% der Mehrbildzuordnungen nicht gelöst werden können?“. Die Grundannahme geht von ununterbrochenen Trajektorien der Länge  $L$  ( $L+1$  Epochen) aus. Des Weiteren sind nicht bestimmbare Objektpunkte ( $OP_n$ ) durch nicht lösbare Mehrdeutigkeiten gleichverteilt über alle Epochen und Trajektorien. Die Wahrscheinlichkeit  $P$  des Auftretens eines nicht bestimmten Objektpunktes beträgt  $P(OP_n) = 0,05$  bzw.  $P(OP_n) = 0,1$ . Somit besteht eine beliebige Trajektorie der Länge  $L$  und der dazugehörigen Anzahl Epochen  $E$  aus einer Anzahl  $E_b$  bestimmter Objektpunkte und  $E_n$  nicht bestimmter Epochen. Beispielhaft für eine Trajektorie der Länge  $L = 9$  sind die Wahrscheinlichkeiten verschiedener Zusammensetzungen in Tabelle 6.3 aufgeführt. Hier ist zu entnehmen, dass bei  $P(OP_n) = 0,05$  eine Trajektorie der Länge  $L = 9$  mit einer Wahrscheinlichkeit von 63% nicht unterbrochen ist und mit einer Wahrscheinlichkeit von 0,2% zwei Lücken aufweist (die Position der Lücken sind nicht bestimmt).

$$L + 1 = E = E_n + E_b \quad 6.4$$

Für alle Objektpunkte einer Trajektorie gilt, dass die Ereignisse (bestimmt / nicht bestimmt) jeden Objektpunktes paarweise von einander stochastisch unabhängig sind. Nach dem Satz von Bayes ergibt sich die Wahrscheinlichkeit der Existenz einer beliebig unterbrochenen Trajektorie aus dem Produkt der Einzelwahrscheinlichkeiten:

$$P(E_n, E_b) = P(OP_n)^{E_n} \cdot P(OP_b)^{E_b} \quad 6.5$$

$$P(\Omega) = 1 = P(OP_n) + P(OP_b) \quad 6.6$$

|  |      |      |       |   |   |   |   |   |   |   |
|--|------|------|-------|---|---|---|---|---|---|---|
| $E_n$                                  | 0    | 1    | 2     | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| $E_b$                                  | 9    | 8    | 7     | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 |
| $P(E_n, E_b)$ bei<br>$P(OP_n) = 0,05$  | 0,63 | 0,03 | 0,002 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| $P(E_n, E_b)$ , bei<br>$P(OP_n) = 0,1$ | 0,38 | 0,04 | 0,005 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

**Tabelle 6.3:** Wahrscheinlichkeit für die Existenz einer  $E_n$ -mal unterbrochenen Trajektorie, am Beispiel der Länge  $L = 9$  und  $P(OP_n) = 0,05$  bzw.  $P(OP_n) = 0,1$

Aus der Kombination mit Wiederholung der  $k$ -ten Klasse (hier:  $L+1$ ) mit  $n$  Elementen (hier: 2) ergeben sich verschiedene Wahrscheinlichkeitsgruppen (verschiedene Kombinationen der Anzahlen  $E_n$  und  $E_b$ ).

$${}^w C_n^k = \binom{n-1+k}{k} = \frac{(n-1+k)!}{k!(n-1)!} \tag{6.7}$$

Für die Bestimmung der Längen der Teilstücke ist die Position der nicht bestimmten Objektpunkte relevant. Die mögliche Anzahl der verschiedenen Anordnung der zwei verschiedenen Elemente ( $OP_n, OP_b$ ) ergibt sich aus der Variation mit Wiederholung der  $k$ -ten Klasse mit  $n$  Elementen:

$${}^w V_n^k = n^k \tag{6.8}$$

Unter Einhaltung der Bedingung – ein Vektor benötigt einen gültigen Anfangs- und Endpunkt – können für alle  $n^k$  Variationen die Anzahl und Längen der Teilstücke ermittelt werden.

Eine implizite Bestimmung der Anzahl der Trajektorien kann genutzt werden, um die Anzahl der Teiltrajektorien zu bestimmen. Eine Lösung ist die Variation der Anzahl der nicht bestimmten Punkte und die Zerlegung und Rückführung auf den einfachsten Fall (ein nicht bestimmter Punkt in einer Trajektorie der Länge  $L$ ). Für diesen Fall ergeben sich am Beispiel  $L = 6$  folgende Konstellationen:

|                                  |   |   |   |   |   |
|----------------------------------|---|---|---|---|---|
| Länge möglicher Teiltrajektorien | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 |
| Anzahl der Teiltrajektorien      | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |

**Tabelle 6.4:** Anzahl der Teiltrajektorien am Beispiel  $L = 6$  und  $E_n = 1$

Im nächsten Schritt (zwei nicht bestimmte Punkte) variiert einer der Punkte  $OP_n$  über die gesamte Trajektorie (soweit möglich). Die hieraus jeweils entstehenden Teiltrajektorien ergeben sich analog aus dem Fall zuvor. Für diese resultierenden Teiltrajektorien wird wiederum eine Zerlegung durch den zweiten

## 6 Resultate

nicht bestimmten Punkt durchgeführt. Für alle weiteren Zerlegungen gilt das Prinzip in gleicher Weise. Die Wahrscheinlichkeiten  $P(E_n)$  für alle  $E_n$  ergeben sich aus Gleichung 6.5.

Diese aufwendige, wenn auch schnell zu berechnende Bestimmung kann einfacher gestaltet werden, betrachtet man sich den Zusammenhang der Ergebnisse.

| $L_t \backslash E_n$ | 0 | 1           | 2           | 3            | 4            | 5            | 6            | 7           | 8           |
|----------------------|---|-------------|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-------------|-------------|
| 9                    | 1 |             |             |              |              |              |              |             |             |
| 8                    |   | $2 \cdot 1$ |             |              |              |              |              |             |             |
| 7                    |   | $2 \cdot 1$ | $3 \cdot 1$ |              |              |              |              |             |             |
| 6                    |   | $2 \cdot 1$ | $3 \cdot 2$ | $4 \cdot 1$  |              |              |              |             |             |
| 5                    |   | $2 \cdot 1$ | $3 \cdot 3$ | $4 \cdot 3$  | $5 \cdot 1$  |              |              |             |             |
| 4                    |   | $2 \cdot 1$ | $3 \cdot 4$ | $4 \cdot 6$  | $5 \cdot 4$  | $6 \cdot 1$  |              |             |             |
| 3                    |   | $2 \cdot 1$ | $3 \cdot 5$ | $4 \cdot 10$ | $5 \cdot 10$ | $6 \cdot 5$  | $7 \cdot 1$  |             |             |
| 2                    |   | $2 \cdot 1$ | $3 \cdot 6$ | $4 \cdot 15$ | $5 \cdot 20$ | $6 \cdot 15$ | $7 \cdot 6$  | $8 \cdot 1$ |             |
| 1                    |   | $2 \cdot 1$ | $3 \cdot 7$ | $4 \cdot 21$ | $5 \cdot 35$ | $6 \cdot 35$ | $7 \cdot 21$ | $8 \cdot 7$ | $9 \cdot 1$ |

**Tabelle 6.5:** Anzahl der Teiltrajektorien für alle Kombinationen am Beispiel  $L = 9$

Wie aus Tabelle 6.5 zu entnehmen ist, unterliegt die Zerlegung einer Regelmäßigkeit. Die Anzahl der jeweiligen Längen ( $L_t$ ) ergibt sich als Produkt aus einem für jedes  $E_n$  konstanten Faktor  $F_1$  und einem systematisch variierenden Faktor  $F_2$ .

$$F_1(E_n) = E_n + 1 \quad 6.9$$

Der Faktor  $F_2$  bestimmt sich für jede Teiltrajektorienlänge  $L_t$  und jede Anzahl der nicht bestimmten Punkte  $E_n$  separat. Es gilt, dass alle  $F_2 = 1$  für  $E_n = 1$ ,  $F_2 = 0$  für alle  $L_t > L - E_n$  und  $F_2 = 1$  für  $L_t = L - E_n$ . Die weiteren  $F_2$  ergeben sich nach:

$$F_2(L_t, E_n) = F_2(L_t + 1, E_n) + F_2(L_t + 1, E_n - 1), \quad o.B.d.A. \quad 6.10$$

Die eingangs gestellte Frage beantwortet die Summe der Erwartungswerte (EW) der einzelnen Teiltrajektorien  $L_t$  (Gleichung 6.11). Die Erwartungswerte ergeben sich aus dem Produkt der Wahrscheinlichkeit des Auftretens einer unterbrochenen Trajektorie (Tabelle 6.3 Gleichung 6.5) und dessen Ausprägung (Gleichungen 6.9 und 6.10).

$$EW_{L_t} = \sum_{E_n} P(E_n) \cdot F_1(E_n) \cdot F_2(L_t, E_n) \quad 6.11$$

## 6.5 Statistik der Trajektorienlänge

| Länge $L_t$                         | 9     | 8     | 7     | 6     | 5     | 4     | 3     | 2     | 1     |
|-------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Erwartungswert für $P(OP_n) = 0,05$ | 0,630 | 0,066 | 0,072 | 0,077 | 0,083 | 0,090 | 0,096 | 0,104 | 0,112 |
| Erwartungswert für $P(OP_n) = 0,10$ | 0,387 | 0,086 | 0,100 | 0,117 | 0,136 | 0,157 | 0,182 | 0,211 | 0,243 |

**Tabelle 6.6:** Erwartungswerte für verschiedene Teiltrajektorienlängen  $L_t$  bei  $L = 9$

Anschaulich repräsentiert dies die Kombination aus Tabelle 6.3 und Tabelle 6.5. Für das hier verwendete Beispiel einer Trajektorie der Länge  $L = 9$  und der Wahrscheinlichkeit des Auftretens eines nicht bestimmten Punktes  $P(OP_n) = 0,05$  (bzw. 0,1) bedeutet dies, dass weniger als  $\frac{1}{2}$  (etwas mehr als  $\frac{1}{5}$ ) der vollständigen Trajektorien erhalten bleiben, dafür aber etwa  $\frac{1}{3}$  (60 %) der bestimmbaren Trajektorien maximal die Hälfte der Länge erreichen (siehe Tabelle 6.6).

| Länge $L_t$ für |         | $P(OP_n) = 0,05$ |        | $P(OP_n) = 0,10$ |        |
|-----------------|---------|------------------|--------|------------------|--------|
| L = 20          | L = 50  | L = 20           | L = 50 | L = 20           | L = 50 |
| 20              | 40 – 50 | 20 %             | 6 %    | 5 %              | 1 %    |
| 1 – 10          | 1 – 20  | 55 %             | 74 %   | 77 %             | 92 %   |
|                 | 1 – 10  |                  | 50 %   |                  | 71 %   |

**Tabelle 6.7:** Wahrscheinlichkeit für die Zerlegung längerer Trajektorien ( $L = 20$  und  $L = 50$ )

Für längere Trajektorien stellt sich das Ergebnis wie in Tabelle 6.7 dar. Von den ursprünglichen Trajektorien der Länge  $L = 20$  und  $P(OP_n) = 0,05$  (0,1) bleiben weniger als 20 % (5 %) vollständig erhalten, 55 % (77 %) erreichen maximal die halbe Länge. Von den ursprünglichen Trajektorien der Länge  $L = 50$  und  $P(OP_n) = 0,05$  (0,1) erreichen weniger als 6 % (1 %) eine Länge über 40 Epochen, dem gegenüber sind 74 % (92 %) maximal 20 Epochen und 50 % (71 %) maximal 10 Epochen lang.

Es ist zu erwarten gewesen, dass das „beste“ Ergebnis des Trackings dann erzielt werden kann, wenn keine nicht bestimmten Punkte vorhanden sind. Dies weisen Young und Johnson (2006) anhand vergleichender Tests verschiedener Trackingalgorithmen an synthetischen Daten nach. Dabei untersuchen sie zwei verschiedene Fälle, die so genannten particle dropout.

- a) „few to many“ – es wird die Punktwolke der ersten Epoche um 0%, 10% und 25% ausgedünnt, die Punktwolke der Epoche 2 bleibt unverändert.
- b) „many to few“ – die Zeitindizes werden getauscht, somit wird das Tracking von der vollständigen zu einer ausgedünnten Punktwolke durchgeführt.

Anhand der Ergebnisse schließen sie darauf, dass im Fall a) die Ergebnisse besser sind, das heißt eine höhere Anzahl richtiger Zuordnungen werden bestimmt. Für die Auswertung realer Versuche heißt das, Geisterpartikel auf Kosten „echter“ Punkte zu vermeiden. Wie oben gezeigt, führt das aber zu einem Zersplittern langer Trajektorien, den gesuchten Größen der Lagrange’schen Betrachtung.

## 7 Tomographischer Auswerteansatz

Das 3D-PTV kann in der vorn skizzierten Form als vektorbasiertes Auswerteverfahren bezeichnet werden. Im ersten Arbeitsschritt werden die Bildpunkte (Vektordaten) der abgebildeten Partikelbilder (Rasterdaten) bestimmt. Im Folgenden werden alle Berechnungen basierend auf Geraden und Punkten im euklidischen Raum durchgeführt. Ziel ist es, die einzelnen Partikelpositionen im 3D-Raum zu diskretisieren. Die Lösbarkeit der Aufgabe wird in erster Linie durch die verbleibenden Mehrdeutigkeiten der Detektion der Partikel und der spatio-temporalen Zuordnung begrenzt. Diese Mehrdeutigkeiten sind abhängig von der Partikeldichte im Bildraum. Maas (1992b) zeigt, dass die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Mehrdeutigkeiten mit dem Quadrat der Anzahl der verfolgten Partikel steigt. Demzufolge sind dicht markierte Strömungen mit dieser Strategie nicht zuverlässig auswertbar.

Alternativ kann dieselbe Situation rasterbasiert betrachtet werden. Dazu wird das Volumen in ein 3D-Raster unterteilt und den einzelnen Voxel werden Grauwerte zugewiesen. Hierbei bedeutet ein Grauwert von 0, dass dieses Voxel transparent ist, also kein Partikelteil enthält. Ziel ist es, die Grauwertverteilung im Volumen so zu rekonstruieren, dass die Projektionen des rekonstruierten Volumens auf die einzelnen Bilder identisch zu den ursprünglichen Aufnahmen sind. Das rekonstruierte Volumen muss photokonsistent sein.

Aus zeitlichen Mehrbildsequenzen lassen sich auf diese Weise zeitliche Volumensequenzen bestimmen. Auf diese Volumen können Auswertealgorithmen von Rasterdaten (Kreuzkorrelation, Least Squares Matching, Faltung, Segmentierung, usw.) angewandt werden. Das als Tomo-PIV bezeichnete Verfahren (vgl. Abschnitt 1.1.1) bestimmt die zeitliche Verschiebung der Voxelcluster mit Hilfe der Kreuzkorrelation.

### 7.1 Neues Verfahren der tomographischen Rekonstruktion

Die Radontransformation (Radon, 1917) beschreibt den Zusammenhang zwischen einem Signal und dessen Parallelprojektion. Die Radon-Rücktransformierte liefert aus gegebenen Projektionen das ursprüngliche Signal. Anwendung findet dieses Verfahren unter anderem bei der Röntgencomputertomographie. Diese basiert auf einer sehr hohen Anzahl von Projektionen und der vollständigen Durchdringung des Objektes durch die verwendete Strahlung. Die schichtweise Darstellung eines Volumens wird dabei aus den Absorptionsinformationen des beobachteten Objektes entnommen. Im Gegensatz zur Computertomographie wird bei dem Tomo-PIV das reflektierte Licht aus wenigen Aufnahmerichtungen (4 bis 6) detektiert.

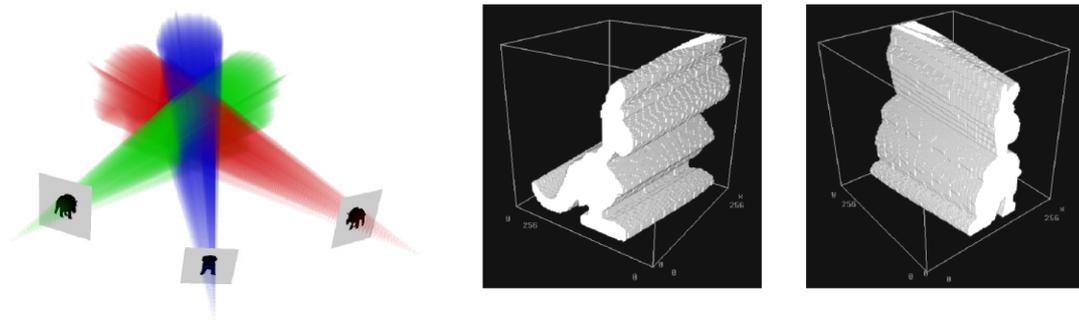
Die tomographische Rekonstruktion der Partikelkonstellation wird von Elsinga et al. (2006b) mit Hilfe des MART-Algorithmus (multiplicative algebraic reconstruction technique, Hermann und Lent, 1976) durchgeführt. Jeder diskrete Grauwert  $GW(x,y)$  im Bildraum  $\mathbb{R}^2$  ist eine Funktion der diskreten Intensitätsverteilung  $I(X,Y,Z)$  im Raum  $\mathbb{R}^3$  (Gleichung 7.1).  $N_i$  ist die Menge der durch den  $i$ -ten Bildstrahl durchstoßenen Voxel. Das Gewicht  $w_{i,j}$  beschreibt den Einfluss der Intensität des jeweiligen Voxels auf den Grauwert.

$$\sum_{j \in N_i} w_{i,j} \cdot I(X_j, Y_j, Z_j) = GW(x_i, y_i) \quad 7.1$$

## 7.1 Neues Verfahren der tomographischen Rekonstruktion

Durch den multiplikativen, iterativen Ansatz (MART) wird die Intensitätsverteilung durch Maximierung der Entropie im Raum bestimmt. Im Gegensatz zum additiven Ansatz (ART) wird durch die Multiplikation erreicht, dass sich Schnittpunkte der Bildstrahlen zweier intensitätsstarker Pixel deutlich hervorheben (siehe unten). Durch die iterative Bearbeitung des gesamten Volumens ist diese Methode sehr rechenintensiv. Atkinson und Soria (2007a) zeigen, dass unter den iterativen Verfahren zur Rekonstruktion von Intensitätsfeldern MART und AART (adaptive algebraic reconstruction technique) die höchste Qualität mit den wenigsten Iterationen erzielen.

Eine andere Betrachtungsweise bietet das als Shape from Silhouette oder Space Carving bezeichnete Verfahren (Laurentini, 1994). Ausgangspunkt hierfür sind eine Anzahl  $i$  Aufnahmen aus verschiedenen Richtungen auf das zu rekonstruierende Objekt. In allen Bildern ist durch Bildverarbeitung eine Binarisierung durchzuführen, wobei jedes Pixel entweder Hintergrund oder Silhouette indiziert. Aus jedem Bild wird die Silhouette  $C_i$  in das Volumen  $V$  rückprojiziert (Abbildung 7.1 rechts). Das Verschneiden aller erzeugten Kegel repräsentiert das aufgenommene Objekt (Abbildung 7.1 links). Realisiert wird dies, indem die Voxel der äußeren Grenzsicht iterativ abgetragen werden. Jedes Voxel wird, sofern sichtbar, in die einzelnen Kameras projiziert und nach Hintergrund (transparent) oder Silhouette (opak) klassifiziert.



**Abbildung 7.1:** Prinzipskizze des Shape from Silhouette-Verfahrens (links) [Matusik et al., 2000], rekonstruierte Silhouette einzelner Projektionen (rechts) [Kuzu, 2004]

$$V = \bigcap_{i=1}^n C_i$$

7.2

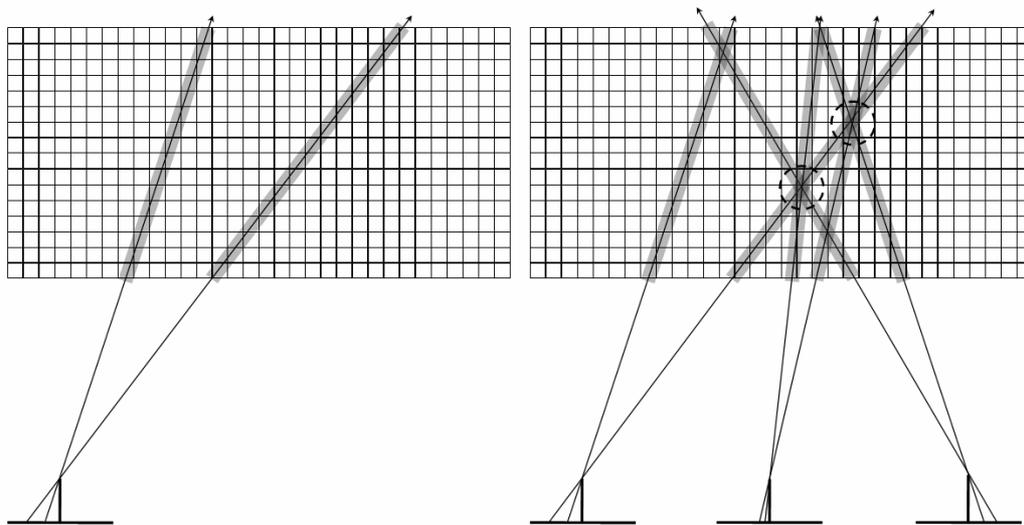
Laurentini (1994) bezeichnet die beste Approximation, bestimmt aus einer unendlichen Anzahl Abbildungen, als visual hull (*engl.*, *sichtbare Hülle*). Konkave Stellen im Objekt werden bei dieser Methode nicht rekonstruiert. Je nach Komplexität des Objektes sind verschiedene Anzahlen von Beobachtungsstandorten notwendig (Laurentini, 1997), um die visual hull zu rekonstruieren. Kutulakos und Seitz (2000) zeigen, dass unter Ausnutzung von Farbinformationen auch konkave Stellen rekonstruiert werden können. Hierbei werden von der sichtbaren Hülle weiterhin alle Voxel abgetragen, die bei der Projektion in verschiedene Kamerabilder (Sichtbarkeit vorausgesetzt) voneinander verschiedene Farbinformationen aufweisen, also nicht photokonsistent sind bzw. homologe Punkte darstellen. Die daraus rekonstruierte Form wird als photo hull (*engl.*, *Photohülle*) bezeichnet.

Auf den Fall der Partikelrekonstruktion übertragen sind lediglich die sichtbaren Hüllen vieler Kugeln notwendig. Des Weiteren ist die exakte Rekonstruktion der äußeren Form nicht notwendig. Bedingung ist lediglich, dass der grauwertgewichtete Schwerpunkt mit dem Partikelzentrum zusammenfällt und sich die

## 7 Tomographischer Auswertansatz

dreidimensionale Form (Volumen) in zwei aufeinander folgenden Zeitschritten nicht signifikant verändert. Eine Genauigkeitsbetrachtung der sichtbaren Hülle aus wenigen Projektionen zeigt Niem (1997).

In Abbildung 7.2 ist das Prinzip der tomographischen Rekonstruktion aus wenigen Projektionen dargestellt. Die Rekonstruktion von Partikelvolumen basiert nicht wie die Shape from Silhouette-Methode auf binarisierten Bildern, sondern nutzt die Grauwertinformationen der Bilder. Alle Pixel einer Kamera werden in das Volumen zurück projiziert. Jedes einzelne Voxel wird durch eine bestimmte Anzahl von Projektionsstrahlen getroffen. Die den Strahlen zugrunde liegenden Pixel ergeben nach Interpolation den Grauwert der einzelnen Voxel. Das rekonstruierte Volumen, basierend auf der Projektion einer Kamera, erzeugt ein Volumen mit kegelförmigen Schläuchen (Abbildung 7.2 links). Zur besseren Visualisierung dieses Sachverhaltes wurde die Graphik um eine Dimension reduziert (1D-Projektion / Bild des 2D-Ursprungs / Volumens). Werden die einzelnen Volumen aller Rekonstruktionen in geeigneter Weise zusammengefügt (z.B. durch Multiplikation), ergeben sich an den Stellen Cluster mit hohen Grauwerten, an denen sich Partikel befunden haben (Abbildung 7.2 rechts).



**Abbildung 7.2: Prinzip der tomographischen Rekonstruktion (Putze und Maas, 2008)**

Veranschaulichen kann man die Idee im  $\mathbb{R}^3$ , indem man zuerst die Zentralprojektion einer Kamera nicht durch Strahlen, sondern durch Pyramiden darstellt. Dabei existiert für jedes Pixel eine Pyramide, deren Spitze das Projektionszentrum ist und die Pixelkanten Elemente der Pyramide sind. Das eingeschlossene Volumen der Pyramide repräsentiert den Grauwert des zugehörigen Pixels. Das Beobachtungsvolumen ist in ein 3D-Raster unterteilt, wobei jedes Voxel eine festgelegte Größe hat. Durchstößt die Pyramide das Volumen, so wird jedem eingeschlossenen Voxel der Grauwert der Pyramide zugeordnet. Vernachlässigt man die nichtwürfelförmige Gestalt des Pyramidenstumpfes<sup>17</sup>, so kann die Schnittmenge der Volumen des Pyramidenstumpfes und der Voxel der Volumenschicht auch als Schnittmenge eines Pyramiden-schnittes und einem ebenen Raster betrachtet werden. Abbildung 7.3 skizziert diesen Zusammenhang.

Unter diesen Annahmen können die Grauwerte der Voxel durch Projektion des Kamerabildes auf die mittlere Ebene der einzelnen Volumenschicht bestimmt werden. Der hier vorgestellte Ansatz zur tomographischen Rekonstruktion des Volumens basiert folglich, im Gegensatz zu Verfahren mit iterativer voxelweisen Rekonstruktion, auf der schichtweisen Entzerrung der Kamerabilder. Dazu werden die Tiefenschichten einzeln und unabhängig voneinander bearbeitet. Die Grauwerte jeder Tiefenschicht ergeben sich aus der Entzerrung der Bilder auf die einzelnen Ebenen. Die sukzessive Projektion des Kamerabildes

<sup>17</sup> Der Pyramidenstumpf wird durch den Schnitt zweier benachbarter, paralleler Trennflächen der Voxel mit der Pyramide bestimmt.

auf Ebenen verschiedener Tiefe und anschließendes Zusammensetzen füllt vollständig das gesamte Volumen.

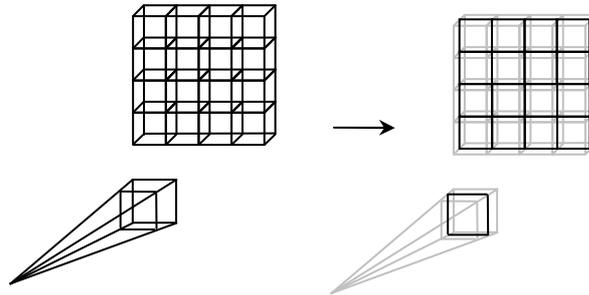


Abbildung 7.3: Projektion eines Pixels in eine Volumenschicht

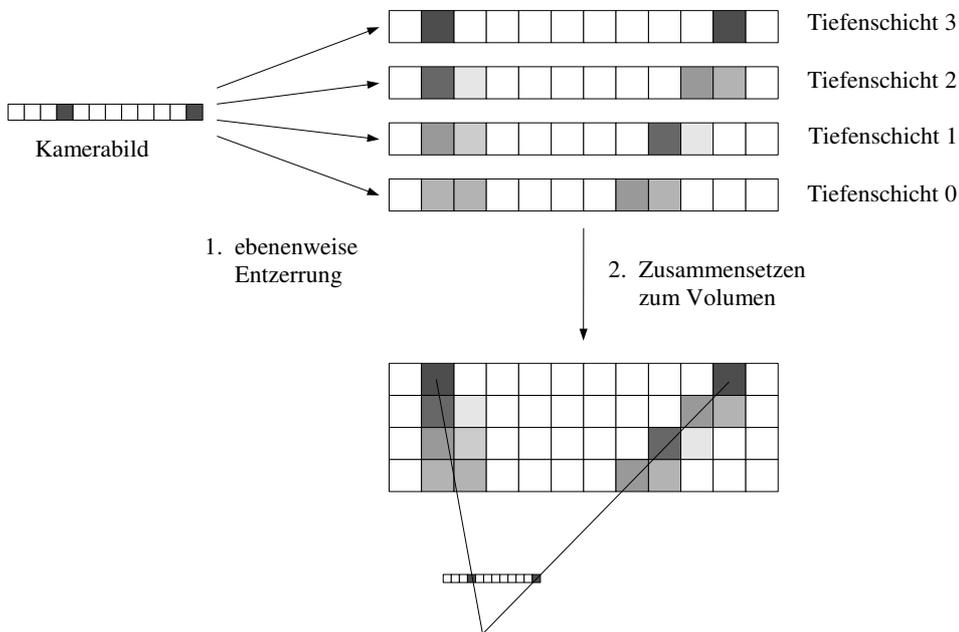


Abbildung 7.4: Entzerrung des Kamerabildes auf verschiedene Tiefenschichten und Zusammensetzung zum rekonstruierten Volumen (zur vereinfachten Darstellung je um eine Dimension reduziert)

### 7.1.1 Transformation zwischen der Bildebene und den Tiefenschichten

Die Projektion des Kamerabildes auf die jeweilige Tiefenschicht wird durch die projektive Transformation beschrieben. Ohne die Allgemeinheit einzuschränken, kann die Ebene der ersten Tiefenschicht durch  $Z = 0$  festgelegt werden. Die Kollinearitätsgleichung (Gleichung 3.5) vereinfacht sich unter dieser Annahme und ohne Berücksichtigung der Lage des Bildhauptpunktes zu:

$$\begin{aligned} x'(X, Y) \Big|_{Z=0} &= -c \cdot \frac{r_{11} \cdot (X - X_0) + r_{21} \cdot (Y - Y_0) + r_{31} \cdot (-Z_0)}{r_{13} \cdot (X - X_0) + r_{23} \cdot (Y - Y_0) + r_{33} \cdot (-Z_0)} \\ &= \frac{-c \cdot r_{11} \cdot X - c \cdot r_{21} \cdot Y - c \cdot (-r_{11} \cdot X_0 - r_{21} \cdot Y_0 - r_{31} \cdot Z_0)}{r_{13} \cdot X + r_{23} \cdot Y + (-r_{13} \cdot X_0 - r_{23} \cdot Y_0 - r_{33} \cdot Z_0)} \end{aligned}$$

7.3

$$\begin{aligned} y'(X, Y) \Big|_{Z=0} &= -c \cdot \frac{r_{12} \cdot (X - X_0) + r_{22} \cdot (Y - Y_0) + r_{32} \cdot (-Z_0)}{r_{13} \cdot (X - X_0) + r_{23} \cdot (Y - Y_0) + r_{33} \cdot (-Z_0)} \\ &= \frac{-c \cdot r_{12} \cdot X - c \cdot r_{22} \cdot Y - c \cdot (-r_{12} \cdot X_0 - r_{22} \cdot Y_0 - r_{32} \cdot Z_0)}{r_{13} \cdot X + r_{23} \cdot Y + (-r_{13} \cdot X_0 - r_{23} \cdot Y_0 - r_{33} \cdot Z_0)} \end{aligned}$$

Führt man für alle bekannten Größen 9 neue Parameter  $a_1$  bis  $c_3$  ein, so stellt sich der Zusammenhang zwischen Bildkoordinaten  $\mathbf{x}' = (x', y')^T$  und Objektkoordinaten  $\mathbf{x}_i = (X, Y, Z)^T$  wie folgt dar:

$$x'(X, Y) \Big|_{Z=0} = \frac{a_1 \cdot X + a_2 \cdot Y + a_3}{c_1 \cdot X + c_2 \cdot Y + c_3}$$

$$y'(X, Y) \Big|_{Z=0} = \frac{b_1 \cdot X + b_2 \cdot Y + b_3}{c_1 \cdot X + c_2 \cdot Y + c_3}$$

7.4

mit

$$\begin{aligned} a_1 &= -c \cdot r_{11} & a_2 &= -c \cdot r_{21} & a_3 &= c \cdot (r_{11} \cdot X_0 + r_{21} \cdot Y_0 + r_{31} \cdot Z_0) \\ b_1 &= -c \cdot r_{12} & b_2 &= -c \cdot r_{22} & b_3 &= c \cdot (r_{12} \cdot X_0 + r_{22} \cdot Y_0 + r_{32} \cdot Z_0) \\ c_1 &= r_{13} & c_2 &= r_{23} & c_3 &= (r_{13} \cdot X_0 + r_{23} \cdot Y_0 + r_{33} \cdot Z_0) \end{aligned}$$

Analog können die Parameter für jede Ebene mit einem beliebigen aber festen  $Z$  bestimmt werden. Es ergeben sich lediglich für  $a_3$ ,  $b_3$  und  $c_3$  veränderte Werte:

$$\begin{aligned} a_1 &= -c \cdot r_{11} & a_2 &= -c \cdot r_{21} & a_3 &= c \cdot (r_{11} \cdot X_0 + r_{21} \cdot Y_0 + r_{31} \cdot Z_0) - c \cdot r_{31} \cdot Z \\ b_1 &= -c \cdot r_{12} & b_2 &= -c \cdot r_{22} & b_3 &= c \cdot (r_{12} \cdot X_0 + r_{22} \cdot Y_0 + r_{32} \cdot Z_0) - c \cdot r_{32} \cdot Z \\ c_1 &= r_{13} & c_2 &= r_{23} & c_3 &= (r_{13} \cdot X_0 + r_{23} \cdot Y_0 + r_{33} \cdot Z_0) + r_{33} \cdot Z \end{aligned} \quad 7.5$$

Für die schnelle und einfache Berechnung der Entzerrung bietet sich die konsequente Nutzung homogener Koordinaten an. Diese erlauben die Darstellung von Transformationen durch einfache Multiplikation mit

einer Matrix. Inhomogene Gleichungssysteme können durch die Transformation in einen um eine Dimension höheren Raum homogenisiert werden.

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = \mathbf{R}_{(2,2)} \cdot \begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix} + \mathbf{t}_{(2)} \quad \rightarrow \quad \begin{pmatrix} u' \\ v' \\ w' \end{pmatrix} = \mathbf{H}_{(3,3)} \cdot \begin{pmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{pmatrix}$$

7.6

wobei

$$x' = \frac{u'}{w'} \quad \text{und} \quad y' = \frac{v'}{w'}$$

Enthält die Matrix  $\mathbf{H}$  der Gleichung 7.6 die 9 Parameter  $a_1$  bis  $c_3$ , so lassen sich die Gleichungen 7.4 auch wie folgt ausdrücken. Die Normierung des Parameters  $c_3$  führt zu den 8 Parametern der projektiven Transformation.

$$\begin{pmatrix} u' \\ v' \\ w' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \\ c_1 & c_2 & c_3 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_1 \cdot x + a_2 \cdot y + a_3 \\ b_1 \cdot x + b_2 \cdot y + b_3 \\ c_1 \cdot x + c_2 \cdot y + c_3 \end{pmatrix}$$

7.7

$$x' = \frac{u'}{w'} \quad \text{und} \quad y' = \frac{v'}{w'}$$

Der Zusammenhang zwischen Bildkoordinaten  $\mathbf{x}'$  und Objektkoordinaten  $\mathbf{x}_i$  jeder Tiefenschicht  $i$  ist somit durch Gleichung 7.8 beschrieben.

$$\mathbf{x}' = \mathbf{H}_i \cdot \mathbf{x}_i$$

7.8

Hierbei enthält die Matrix  $\mathbf{H}_i$  die Parameter der projektiven Transformation für die jeweilige Tiefenschicht  $i$ . Zur Reduktion des Rechenaufwandes kann die Matrix  $\mathbf{H}_i$  zerlegt werden. Die Elemente der Matrix  $\mathbf{H}_0$  (für die Ebene  $Z_i = 0$ ) sind direkt aus den Parametern der äußeren Orientierung ( $X_0, Y_0, Z_0, \omega, \varphi, \kappa$ ) und der Kamerakonstante bestimmbar. Die Transformationsmatrizen  $\mathbf{H}_i$  aller weiteren Tiefenschichten  $i$  können durch Addition von  $\mathbf{H}_0$  und dem Zuschlag  $\mathbf{h}_i$  (Gleichung 7.10) bestimmt werden.  $\mathbf{h}_i$  beschreibt die relative Transformation zwischen der Schicht  $i = 0$  und der beliebigen Schicht  $i$ . Da alle Ebenen zueinander parallel sind, vereinfacht sich die Parameterbestimmung von  $\mathbf{h}_i$  stark.

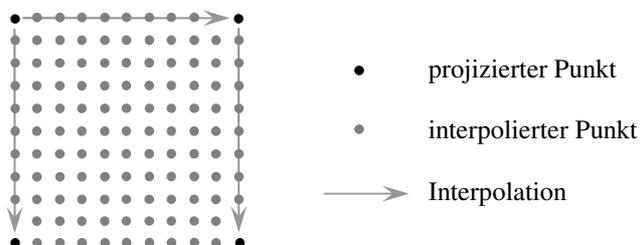
$$\mathbf{H}_0 = \begin{bmatrix} -c \cdot r_{11} & -c \cdot r_{21} & c \cdot (r_{11} \cdot X_0 + r_{21} \cdot Y_0 + r_{31} \cdot Z_0) \\ -c \cdot r_{12} & -c \cdot r_{22} & c \cdot (r_{12} \cdot X_0 + r_{22} \cdot Y_0 + r_{32} \cdot Z_0) \\ r_{13} & r_{23} & -r_{13} \cdot X_0 - r_{23} \cdot Y_0 - r_{33} \cdot Z_0 \end{bmatrix} \quad 7.9$$

$$\mathbf{h}_i = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -c \cdot r_{31} \cdot Z_i \\ 0 & 0 & -c \cdot r_{32} \cdot Z_i \\ 0 & 0 & r_{33} \cdot Z_i \end{bmatrix} \quad 7.10$$

$$\mathbf{H}_i = \mathbf{H}_0 + \mathbf{h}_i \quad 7.11$$

### 7.1.2 Resampling der Grauwerte

Zur Ermittlung der Grauwerte der einzelnen Voxel müssen jeweils die zugehörigen Subpixelkoordinaten in allen Bildern berechnet werden. Die Berechnung nach Gleichung 7.8 ist rechenintensiv, vor allem, wenn man typische Volumen von 1000 x 1000 x 1000 Voxel und Beobachtungen durch 4 Kameras in mehreren hundert Epochen ansetzt. Nutzt man die homogenen Koordinaten im Bildraum, so können die Bildkoordinaten linear zwischen bekannten Stützpunkten interpoliert werden (Abbildung 7.5). Es ist somit ausreichend, für jede Ebene die vier Eckpunkte in die jeweiligen Bilder zu projizieren. Alle weiteren Koordinaten ergeben sich aus einzelnen Additionen.

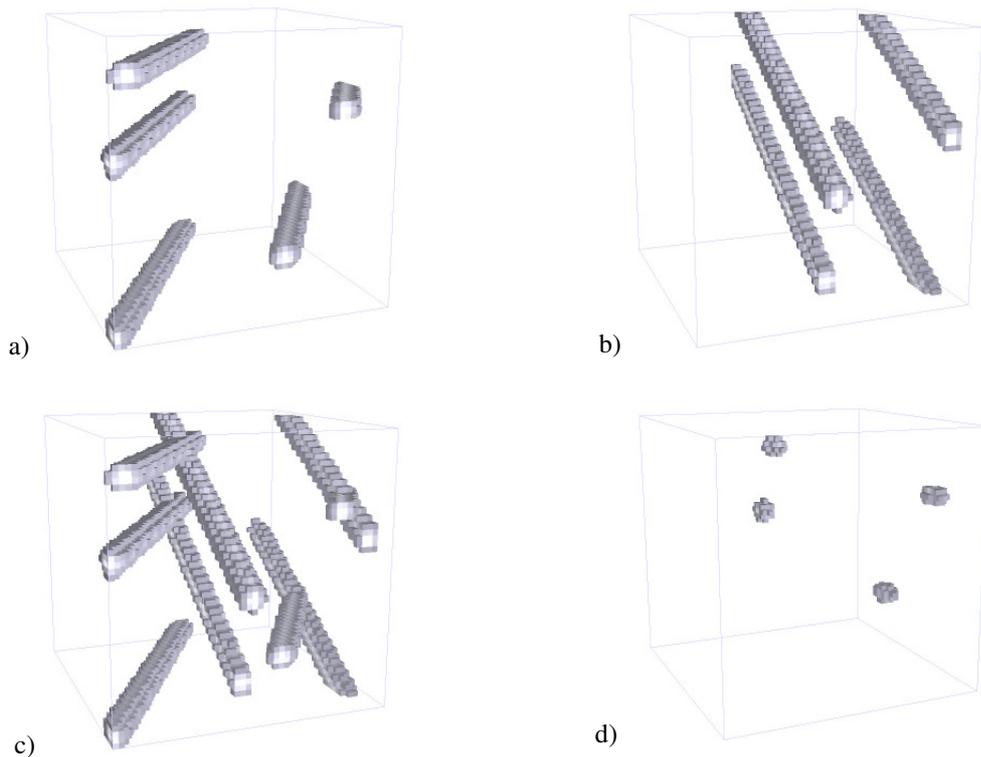


**Abbildung 7.5: Lineare Interpolation im Bildraum bei Verwendung homogener Koordinaten**

Die Methode der schichtweisen Entzerrung ist für den Fall einer nahezu senkrechten Blickrichtung auf die zu entzerrenden Voxelschichten leicht vorstellbar. Die oben dargestellten Beziehungen gelten jedoch ohne Beschränkung auch für Projektionen, deren optische Achse parallel zu den zu entzerrenden Voxelschichten angeordnet ist. Somit muss keine Unterscheidung nach Projektionsrichtung und Koordinatensystemausrichtung vorgenommen werden. Zu erklären ist dies durch die Betrachtung zweier Fakten der Rekonstruktion. Der Grauwert jedes Voxels wird durch die Projektion des Mittelpunktes des Voxels in das entsprechende Bild und anschließender Grauwertinterpolation gewonnen. Für ein einzelnes Voxel ist die Richtung der Projektion bedeutungslos. In der praktischen Umsetzung wird die Projektion punktweise durch Interpolation durchgeführt. Da die Rekonstruktion eines Einzelvolumens (je für eine Kamera) photokonsistent ist, sind beliebige Schnitte durch dieses Volumen ebenso durch Entzerrung darstellbar.

## 7.1 Neues Verfahren der tomographischen Rekonstruktion

Aus den so ermittelten Subpixelkoordinaten im Bildraum wird durch bilineare Interpolation der Grauwerte die Grauwertverteilung im Volumen rekonstruiert. Auf diese Weise lässt sich aus jeder Kameraschichtweise ein Volumen rekonstruieren (Abbildung 7.6 a und b). Überlagert man die einzelnen Volumina (Abbildung 7.6 c), so ist es offensichtlich, dass Voxel, die in einem Volumen einen geringen Grauwert (dunkel) aufweisen, in der Überlagerung keinen hohen Grauwert erzielen dürfen. Hingegen bedeutet ein hoher Grauwert in einem Volumen nicht, dass an dieser Stelle im resultierenden Volumen ein hoher Grauwert zu erwarten ist. Demzufolge ergibt sich der Grauwert jeweils als minimaler Grauwert nach Gleichung 7.12. Abbildung 7.7 zeigt die Rekonstruktion von 50 Partikeln in einem simulierten Volumen von  $50 \times 50 \times 50$  Voxel.



**Abbildung 7.6:** Rekonstruierte Volumina für jeweils eine Kamera (a und b), Zusammensetzung der beiden Volumina (c), Ergebnis nach der Selektion des minimalen Grauwertes

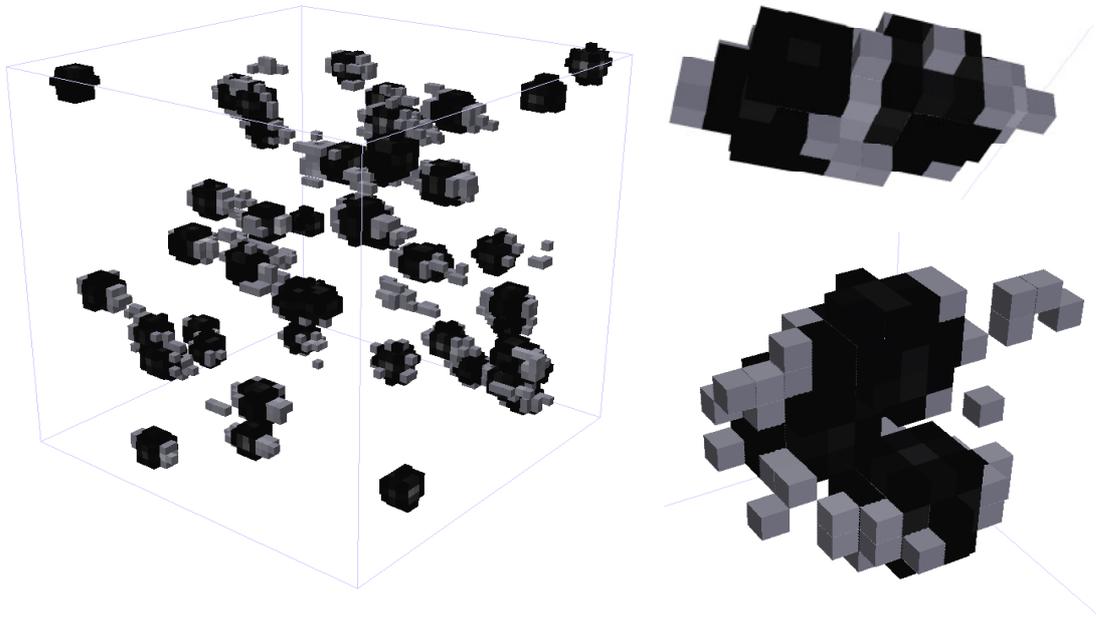
Sobald der Hintergrund nicht schwarz (Grauwert = 0) ist, z. B. durch Bildrauschen oder verbleibende Hintergrundinformationen, ist Gleichung 7.12 nur noch bedingt anwendbar. Das Rauschen verbleibt mit der vollen Signalstärke im Volumen an den Stellen, an denen keine Information (leerer Raum) vorhanden sein sollte. Alternativ kann sodann das Produkt aller Grauwerte des Voxels (Gleichung 7.13) zur Bestimmung genutzt werden. Das Rauschen kann hiermit nicht vollständig unterdrückt werden, die Anzahl der Artefakte ist größer als bei der zuvor beschriebenen Methode. Jedoch ergeben sich hohe Intensitäten sicher an Stellen, an denen sich Partikel befunden haben (analog zum MART-Algorithmus).

$$GW = \text{Min} \{GW_i\}$$

7.12

$$GW = \prod_i GW_i$$

7.13



**Abbildung 7.7:** links: Darstellung der rekonstruierten (hell dargestellt) und synthetisch erzeugten Cluster (dunkel dargestellt), rechts: Detailansicht sich berührender Partikel

Es ergeben sich für die Ergebnisse dieser Methode folgende Eigenschaften:

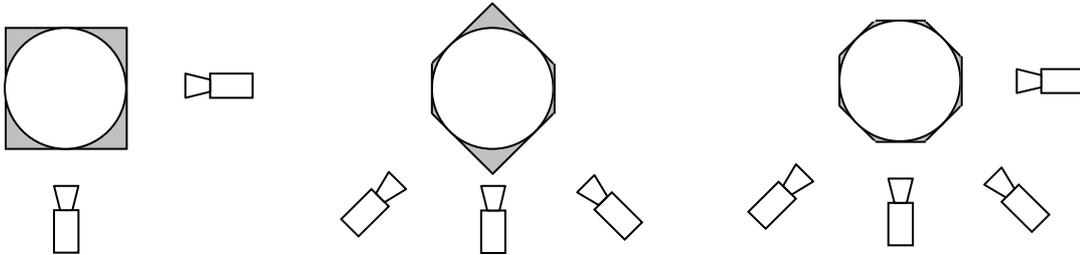
- Das Volumen ist photokonsistent, d. h. die Abbildung des rekonstruierten Volumens ist nahe der aufgenommenen Abbildung.
- Alle Partikelpositionen sind sicher als Voxelcluster im Volumen enthalten.
- Das rekonstruierte Voxelcluster beschreibt die sichtbare Hülle und kann deformiert bzw. größer sein als die Rasterdarstellung des ursprünglichen Partikels (siehe unten).
- Zusätzliche Artefakte und einzelne Fehlvoxel sind nicht auszuschließen.

### 7.1.3 Genauigkeitsbetrachtung

Im Folgenden soll anhand verschiedener Betrachtungen die Richtigkeit und Genauigkeit der oben beschriebenen Rekonstruktionsmethode nachgewiesen werden. Hierbei wird das rekonstruierte Volumen mit einem Sollvolumen verglichen. Es werden für die folgende Betrachtung sphärische Partikel mit festem Durchmesser angenommen. Die Grauwertverteilung im Volumen wird durch eine dreidimensionale Gauß-Funktion (Gleichung 7.14) approximiert.

$$GW = \frac{1}{\sigma^3 \cdot \sqrt[3]{2\pi}} \cdot e^{-\frac{d^2}{2\sigma^2}}, \text{ wobei } d = \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z-z_0)^2} \quad 7.14$$

Betrachtet man die resultierenden Flächen eines mit der Shape from Shilouette-Methode bestimmten Kreises, so stellt man fest, dass die Fläche immer zu groß geschätzt wird (Abbildung 7.8). Unter Verwendung der Guldinischen Regeln kann die Fläche in das zugehörige Rotationsvolumen überführt werden. Die in Abbildung 7.8 links dargestellte Konfiguration bestimmt die Fläche um 27 % zu groß. Nutzt man ein Drei- bzw. Vier-Kamerasystem (45° Schnittwinkel, Anordnung in einer Ebene, Abbildung 7.8 Mitte bzw. rechts), so ergibt sich eine um 16% bzw. 5% zu große Fläche. Für die hier dargestellten Konfigurationen sind die Unterschiede der resultierenden Volumina identisch mit denen der flächigen Betrachtung.



**Abbildung 7.8:** Unterschied (grau) zwischen rekonstruierter und Sollfläche; Rekonstruktion mit 2 Kameras, rechtwinklig angeordnet (links) sowie 3 und 4 Kameras, 45° angeordnet (Mitte und rechts)

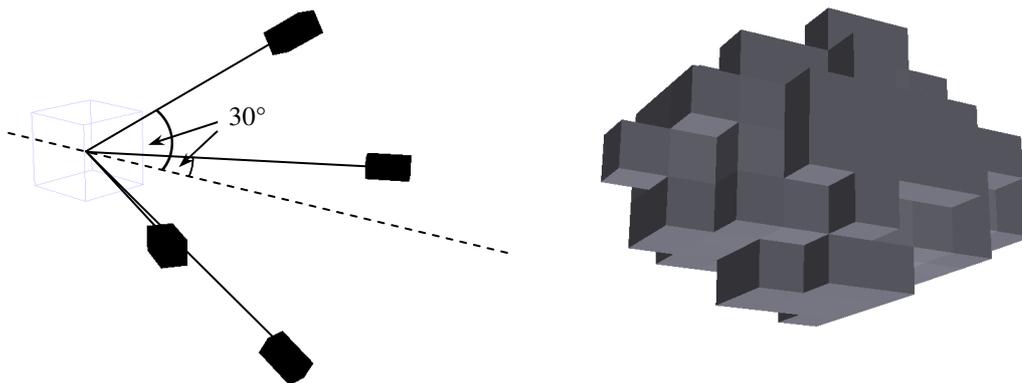
$$A_{\text{Quadrat}} = 4 \cdot r^2$$

$$A_{\text{Polygon } 3\text{Kam}} = 4 \cdot r^2 \cdot (\sqrt{2} - 0,5) \approx 3,66 \cdot r^2$$

$$A_{\text{Polygon } 4\text{Kam}} = 4 \cdot r^2 \cdot (2(\sqrt{2} - 1)) \approx 3,31 \cdot r^2$$

$$A_{\text{Kreis}} = \pi \cdot r^2 \approx 3,14 \cdot r^2$$

7.15



**Abbildung 7.9:** Setup des Aufnahmesystems (links), lang gestreckte Form des rekonstruierten Clusters (rechts)

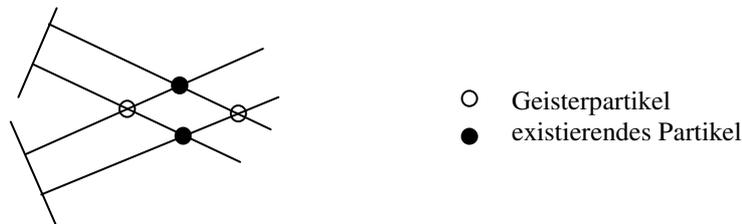
Der Schwerpunkt der resultierenden Fläche, bei Annahme paralleler Projektionsstrahlen, ist jedoch identisch zum Schwerpunkt des Kreises. In der Anwendung ist die Kamerakonfiguration an gewisse äußere Rahmenbedingungen gebunden. Das von Elsinga et al. (2006b) vorgeschlagene Setup sieht einen Schnittwinkel von 30° vor (Abbildung 7.9 links), der für alle weiteren Simulationen genutzt wurde. Die daraus resultierenden Voxelcluster besitzen eine gestreckte Form. Je geringer der Konvergenzwinkel der

## 7 Tomographischer Auswertansatz

Kameras ist, desto größer sind die sichttoten Räume vor und hinter dem Partikel (Abbildung 7.8 Mitte und Abbildung 7.9 rechts)

Für die weitere Auswertung (multi-temporales Tracking mit Matching Algorithmen) ist es nicht von Bedeutung, welche Form rekonstruiert wird, sondern wie sich die Cluster in zwei aufeinander folgenden Epochen unterscheiden. Dazu wurden die Abstände der grauwertgewichteten Schwerpunkte der resultierenden Cluster zum Mittelpunkt simulierter Partikel analysiert. Hierbei ergab sich eine mittlere Abweichung des Schwerpunktes von 0,02 Voxel lateral zur Hauptblickrichtung und 0,03 Voxel in Tiefenrichtung. Im Randbereich des Beobachtungsvolumens kann der Schwerpunkt bis zu 1 Voxel abweichen. Betrachtet man die Schwerpunkte von sich bewegenden Partikeln in aufeinander folgenden Epochen, so betragen die mittleren Differenzen der Abstände wieder 0,02 Voxel lateral und 0,03 Voxel in Tiefenrichtung. Diese Größenordnung ist vergleichbar mit der zu erreichenden Genauigkeit der Matching Algorithmen.

Neben der rekonstruierten geometrischen Form haben die verbleibenden Geistervoxel bzw. das Rauschen einen entscheidenden Einfluss auf die Ergebnisse der Zuordnungsverfahren. Schneidet ein Bildstrahl einer Kamera mehr als einmal die Bildstrahlen der anderen Kamera, so kann nicht zwischen realen und Geisterpartikeln unterschieden werden. In Abbildung 7.10 ist die Entstehung solcher Geisterpartikel für ein Zweikamerasystem schematisch dargestellt.



**Abbildung 7.10: Entstehung von Geisterpartikeln bei einer 2-Kamera-Konfiguration (nach Elsinga et al., 2006a)**

Zur Bestimmung eines Gütekriteriums für die Rekonstruktion ermitteln Elsinga et al. (2006a) das Verhältnis der existierenden Partikelanzahl  $N_p$  zu der Anzahl der Geisterpartikel  $N_g$  nach Gleichung 7.16. Die Anzahl der verbleibenden Geisterpartikel ist abhängig von der Partikeldichte ( $ppp$  – Partikel pro Pixel) und Größe ( $A$ ) der Partikel im Volumen, der Volumenausdehnung  $dz$  sowie der Anzahl  $N$  und Konfiguration der Kameras. In der praktischen Anwendung mit 4 oder mehr Kameras treten selten ganze Geisterpartikel, sondern vielmehr Teile davon, also Geistervoxel, auf.

$$\frac{N_p}{N_g} = \frac{1}{ppp^{N-1} \cdot A_p^N \cdot dz} \quad 7.16$$

Aus diesem Grund wurde die Bestimmung der Güte der Rekonstruktion durch die Betrachtung des peak signal to noise ratio (PSNR) eingeführt. Das PSNR gibt das Verhältnis der maximalen Stärke eines Signals ( $I_{\text{Max}}$ ) zu der Stärke der Störungen des Signals an (Gleichung 7.17 **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). Einsatz findet dieses Maß vor allem bei der Beurteilung komprimierter Bilder. Die Stärke der Störung des Signals ergibt sich aus der Differenz des Referenzsignals  $A$  (synthetisch erzeugtes, fehlerfreies Volumen) und des Messsignals  $B$  (rekonstruiertes Volumen).

$$PSNR = 10 \cdot \lg \cdot \frac{I_{\max}^2}{mse}$$

7.17

$$mse = \frac{1}{M \cdot N \cdot O} \sum_m \sum_n \sum_o |A_{m,n,o} - B_{m,n,o}|^2$$

Für verschiedene Konfigurationen und Rekonstruktionsalgorithmen lassen sich diese Bewertungskriterien anhand synthetischer Daten ermitteln (Details in Abschnitt 7.2.2). Exemplarisch sind für den oben beschriebenen Rekonstruktionsalgorithmus verschiedene Konfigurationen analysiert. Die Parameter der Partikelgrößen entsprechen den Größenordnungen der durchgeführten 3D-PTV-Experimente sowie den Darstellungen von Elsinga et al. (2006a).

Grundlage der Simulation ist ein 4 Kamera-System (je 50 x 50 Pixel), symmetrisch und konvergent angeordnet (Schnittwinkel 30°). Das Beobachtungsvolumen ist in 50<sup>3</sup> Voxel eingeteilt. Der Partikeldurchmesser wurde auf 3,5 Pixel bzw. Voxel festgelegt (mittlere Partikelfläche im Bildraum: A = 9 Pixel). Zur besseren Veranschaulichung sind alle Ergebnisse maßstabsunabhängig in Bild- bzw. Volumeneinheiten (Pixel bzw. Voxel) angegeben. Die resultierenden Ergebnisse sind in Tabelle 7.1 dargestellt. Analog wurde die Betrachtung mit einem Volumen von 100<sup>3</sup> Voxel durchgeführt. Hierbei ergaben sich ähnliche Ergebnisse, die in Tabelle 7.2 gezeigt sind.

Betrachtet man das Verhältnis N<sub>p</sub>/N<sub>g</sub>, so dürften die Volumen bei höherer Partikeldichte nur aus Geisterpartikeln bestehen. Bei 500 Partikeln in einem Volumen von 100<sup>3</sup> Voxeln werden je realem Partikel 100 Geisterpartikel abgeschätzt. Das PSNR zeigt jedoch, dass auch bei sehr hoher Partikelanzahl ein signifikantes Signal rekonstruiert werden kann. Mit Hilfe synthetisch erzeugter Daten kann die Differenz zwischen einer gegebenen Sollbewegung und der berechneten Istbewegung bestimmt werden. Es zeigt sich, dass durch die zeitliche Zuordnung mit Hilfe des Kreuzkorrelationsverfahren (Abschnitt 7.2.3) eine Genauigkeit von 0,16 Voxel je Koordinatenrichtung erreicht wurde.

| Partikelanzahl                       | 5     | 50   | 100   | 200   |
|--------------------------------------|-------|------|-------|-------|
| Partikel pro Pixel                   | 0,002 | 0,02 | 0,04  | 0,08  |
| mittlerer Abstand im Volumen [Voxel] | 18    | 11   | 8     | 6     |
| Anzahl Voxel Simulation              | 240   | 2300 | 3200  | 9000  |
| Anzahl Voxel Rekonstruktion          | 320   | 3100 | 11300 | 18500 |
| N <sub>p</sub> / N <sub>g</sub>      | 381   | 0,38 | 0,05  | 0,006 |
| PSNR [dB]                            | 48    | 36   | 32    | 28    |

**Tabelle 7.1:** Analyse rekonstruierter Volumen (50<sup>3</sup> Voxel) verschiedener Partikeldichte

## 7 Tomographischer Auswerteanatz

| Partikelanzahl                       | 100  | 200  | 300  | 500  |
|--------------------------------------|------|------|------|------|
| Partikel pro Pixel                   | 0,01 | 0,02 | 0,03 | 0,05 |
| mittlerer Abstand im Volumen [Voxel] | 15   | 12   | 11   | 9    |
| $N_p / N_g$                          | 1,5  | 0,19 | 0,05 | 0,01 |
| PSNR [dB]                            | 32   | 28   | 26   | 23   |

**Tabelle 7.2:** Analyse rekonstruierter Volumen ( $100^3$  Voxel) verschiedener Partikeldichte

### 7.1.4 Rechenzeiten

Die durchschnittlichen Rechenzeiten für die Rekonstruktion von verschiedenen Volumen sind in Tabelle 7.3 dargestellt. Die Zeiten umfassen die Rekonstruktion aus 4 Kamerabildern und gelten für den nicht zeitoptimierten Code eines MATLAB-Programms<sup>18</sup> auf einem PC<sup>19</sup>. Der Zugriff zu den einzelnen Grauwerten erfolgt mit MATLAB nicht durch optimierte Zeigeroperationen sondern als Listenzugriff<sup>20</sup>. Vor allem bei der Interpolation der Grauwerte besteht deshalb enormes Optimierungspotential. Auf Grund des Algorithmus steigt die Rechenzeit für die Rekonstruktion linear mit der Anzahl der Tiefenschichten. Es ist zu sehen, dass sich mit zunehmender Partikeldichte die Rechenzeit erhöht. Durch nicht belegte, „leere“ Voxel verkürzt sich der Rechenprozess. Es müssen nicht alle Bilder vollständig entzerrt werden. Da das Verfahren kein iterativer Ansatz ist, wird lediglich der Arbeitsspeicher mit den Bildern der Kameras belegt. Des Weiteren kann der Algorithmus aufgeteilt werden, so dass er auf Mehrkernprozessoren effektiv eingesetzt werden kann. Auch die Berechnungen der Entzerrungen auf der Graphikkarte des Rechners wird die Rechenzeit verkürzen.

Die Rechenzeit für 100.000 Voxel beträgt etwa 5 Sekunden. Die Rechenzeit für ein Volumen von  $500^3$  bzw.  $1000^3$  Voxeln beträgt somit etwa 104 min bzw. 14 Stunden. Der Vergleich mit den Rekonstruktionszeiten eines geringfügig leistungsstärkeren PCs<sup>21</sup> zeigt hier eine Optimierung um den Faktor 2 (2,5 Sekunden je 100.000 Voxel). Zum Vergleich wird von der Firma LaVision angegeben, dass der dort eingesetzte MART-Algorithmus etwa 0,4 Sekunden je 100.000 Voxel benötigt. Die Rekonstruktion wird dabei mit Hilfe eines zeitoptimierten Programms auf einem Vierkernprozessor durchgeführt. Schwachpunkt hierbei ist bei großen Volumen der benötigte Arbeitsspeicher.

<sup>18</sup> MATLAB ist eine mathematische Programmierumgebung der Firma The MathWorks.

<sup>19</sup> AMD Sempron 3000+ Prozessor 2,0 GHz 1,5 GB RAM; Windows XP; MATLAB 7.1

<sup>20</sup> Für jeden Grauwert wird das gesamte Bild vom oberen linken Pixel aus gelesen. Zum Lesen von 1 MPixel werden optimiert  $10^6$  Speicherzugriffe benötigt, sequentiell ergeben sich  $5 \cdot 10^{11}$  Zugriffe.

<sup>21</sup> AMD Opteron Prozessor 2,6 GHz 4 GB RAM; Windows Vista; MATLAB 2008

| Volumenausschnitt | Voxelanzahl | Partikelanzahl im gesamten Würfel | Partikel pro Pixel | Rechenzeit | Rechenzeit pro 100.000 Voxel |
|-------------------|-------------|-----------------------------------|--------------------|------------|------------------------------|
| 100 x 100 x 100   | 1.000.000   | 200                               | 0,02               | 47 s       | 4,7 s                        |
| 100 x 100 x 100   | 1.000.000   | 500                               | 0,05               | 63 s       | 6,3 s                        |
| 100 x 100 x 100   | 1.000.000   | 800                               | 0,08               | 74 s       | 7,4 s                        |
| 500 x 500 x 250   | 62.000.000  | 1000                              | 0,004              | 2240 s     | 3,6 s                        |
| 500 x 500 x 50    | 12.500.000  | 1000                              | "                  | 451 s      | 3,6 s                        |
| 500 x 500 x 50    | 12.500.000  | 2000                              | 0,008              | 481 s      | 3,8 s                        |
| 500 x 500 x 50    | 12.500.000  | 5000                              | 0,02               | 559 s      | 4,5 s                        |
| 500 x 500 x 50    | 12.500.000  | 10000                             | 0,04               | 682 s      | 5,4 s                        |

**Tabelle 7.3:** Rechenzeit für die Rekonstruktion verschiedener Volumen aus 4 Kamerabildern; die Partikelanzahl gilt für ein würfelförmiges Volumen, die Rekonstruktion umfasste zum Teil nur einen Ausschnitt des gesamten Volumens

## 7.2 Zeitliche Zuordnung

Die Bestimmung des Geschwindigkeitsfeldes aus den Unterschieden der Grauwertverteilung im 3D-Raum kann auf vielfältige Weise erfolgen. Wie bereits erwähnt, wenden Elsinga et al. (2006b) die 3D-Kreuzkorrelation an. Dieses Verfahren ist weniger rechenaufwendig, aber auch weniger robust gegenüber Geschwindigkeitsgradienten als das 3D-Least Squares Tracking (3D LST, Maas et al., 1994). Neben der Translation werden beim 3D-LST auch Deformationsparameter (Rotation und Scherung) des Abfragebereichs geschätzt. Die Kreuzkorrelation eignet sich jedoch unter bestimmten Rahmenbedingungen gut zur Bestimmung der Startwerte für das anschließende 3D LST. Hierzu kann die Subvoxelinterpolation der Kreuzkorrelationswerte ausbleiben.

### 7.2.1 3D-Kreuzkorrelation

Die Kreuzkorrelation ist eine Methode, die die Abhängigkeit zweier Datensätze A und B beschreibt. Der normierte Kreuzkorrelationskoeffizient  $\rho = 1$  weist auf eine vollständige Abhängigkeit und  $\rho = 0$  auf eine vollständige Unabhängigkeit hin. Der Korrelationskoeffizient lässt sich unabhängig von der Dimension der Datensätze bestimmen, die Gleichung 7.18 gilt für die Korrelation im 3D Raum.

$$\rho = \frac{\sum_m \sum_n \sum_o (A_{m,n,o} - \bar{A}) \cdot (B_{m,n,o} - \bar{B})}{\sqrt{\left( \sum_m \sum_n \sum_o (A_{m,n,o} - \bar{A})^2 \right) \cdot \left( \sum_m \sum_n \sum_o (B_{m,n,o} - \bar{B})^2 \right)}} \quad 7.18$$

## 7 Tomographischer Auswertansatz

Um die Verschiebungen  $v$  innerhalb von Volumendatensätzen zu bestimmen, werden aus dem Referenzdatensatz regelmäßig über das gesamte Volumen Muster (Teilvolumen) ausgeschnitten. Der Mittelpunkt dieses Musters  $A$  repräsentiert den Abtastpunkt  $P_A$ . Aus dem Zieldatensatz werden sukzessive Teilvolumen (Muster  $B$ ) der gleichen Größe ausgeschnitten. Die mit Gleichung 7.18 berechneten Korrelationskoeffizienten  $\rho(P_B)$  geben die Abhängigkeit des Musters  $B$  am Punkt  $P_B$  vom Muster  $A$  am Punkt  $P_A$  an. Die gesuchte Verschiebung  $v$  entspricht:

$$v = P_B - P_A \quad , \text{ wobei } \rho(P_B) = \max \{ \rho(P_B) : \forall P_B \} \quad 7.19$$

Eine Genauigkeitssteigerung kann durch die Subvoxelinterpolation erreicht werden. Analog zur Subpixelinterpolation im 2D-Raum sind folgende Ansätze denkbar. In Anlehnung an Cowen und Monismith (1997) werden drei 1D-Subvoxelinterpolationen durchgeführt. Diese Methode ist sehr schnell und wie sich an praktischen Tests gezeigt hat, im Rahmen der Messgenauigkeit ausreichend genau. Alternativ kann eine approximierende Funktion in die 4-dimensionalen Daten eingepasst werden. Geeignete Funktionen<sup>22</sup> sind parabolische (Gleichung 7.20) oder gaußsche Volumen (Gleichung 7.21). All diese hier gezeigten Methoden gehen davon aus, dass die Hauptachsen des Volumens parallel zu den Achsen des Koordinatensystems ( $\mathbb{R}^4$ ) ausgerichtet sind. Da die Kreuzkorrelation lediglich Translationsanteile der Bewegung bestimmen kann und Rotations- und Scherungsanteile als Rauschen bzw. Fehler betrachtet werden, spielt die Rotation der approximierenden Funktion eine untergeordnete Rolle.

$$\rho(x, y, z) = a \cdot (x - x_0)^2 + b \cdot (y - y_0)^2 + c \cdot (z - z_0)^2 \quad 7.20$$

$$\rho(x, y, z) = \frac{1}{\sigma_x \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z \cdot \sqrt[3]{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{(x-x_0)^2}{\sigma_x^2} + \frac{(y-y_0)^2}{\sigma_y^2} + \frac{(z-z_0)^2}{\sigma_z^2} \right)} \quad 7.21$$

Sind Rotations- und Scherungsanteile in der zu Grunde liegenden Bewegung zwischen beiden Epochen enthalten, verändern diese die Form des Korrelationsgebirges<sup>23</sup> der Kreuzkorrelation. Gradienten in einer Richtung führen zu einer lang gestreckten Form mit einem weniger stark ausgeprägten Korrelationspeak. Das liegt daran, dass bei der Deformierung des Abfragefensters an jeder Stelle weniger Signal mit dem Original übereinstimmt (siehe Abbildung 7.11).

In der Praxis können bei der Analyse von realen Strömungen Gradienten nicht ausgeschlossen werden. Je größer die Gradienten sind, desto weniger zuverlässig kann mit dem Verfahren der Kreuzkorrelation ein Ergebnis ermittelt werden. Eine Möglichkeit besteht darin, die Größe des Abfragefensters zu verkleinern (siehe Super-Resolution PIV Abschnitt 1.2.2). Scarano (2002) zeigt, wie mit Hilfe der iterativen Deformation der Abfragefenster das Verfahren der Kreuzkorrelation auch auf Strömungen mit Gradienten zuverlässig angewandt werden kann. Diese Methode wurde von Wienecke und Taylor (2006) zur Analyse von 3D-Daten erweitert.

<sup>22</sup> Eine geeignete Funktion stellt ein 3-dimensionales Gebilde im 4-dimensionalen Raum dar, welches das zu erwartende Verhalten der Funktionswerte repräsentiert.

<sup>23</sup> Das Korrelationsgebirge sind die Korrelationskoeffizienten in der Umgebung der mittleren Verschiebung (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** unten rechts).

Eine weitere Methode ist die simultane Schätzung der Deformations-, Rotations- und Verschiebeparameter mit Hilfe des Least Squares Matching. Maas et al. (1994) zeigen die Erweiterung des 2D-Verfahrens um eine Dimension und die Anwendung auf einen 3D-Voxeldatensatz.

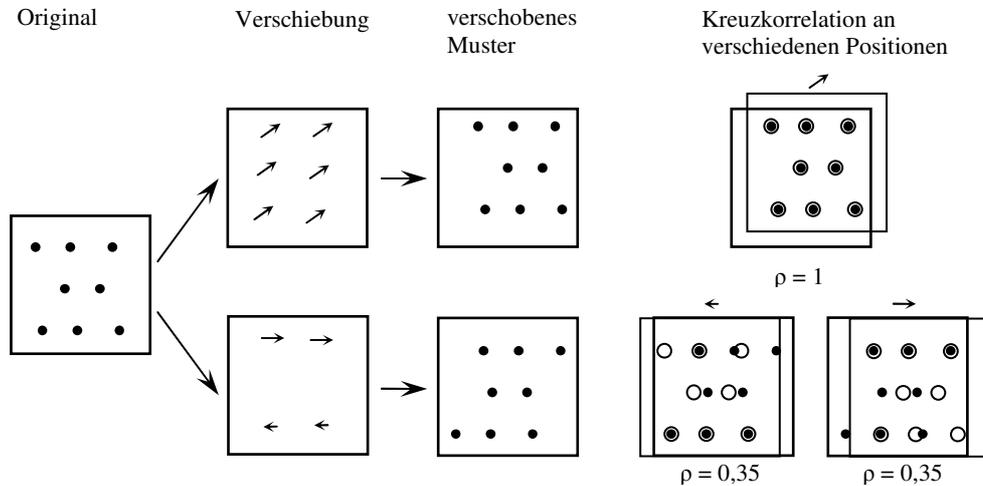


Abbildung 7.11: Wirkung der Kreuzkorrelation bei Translation (oben) und Scherungen (unten)

### 7.2.2 Datenerzeugung

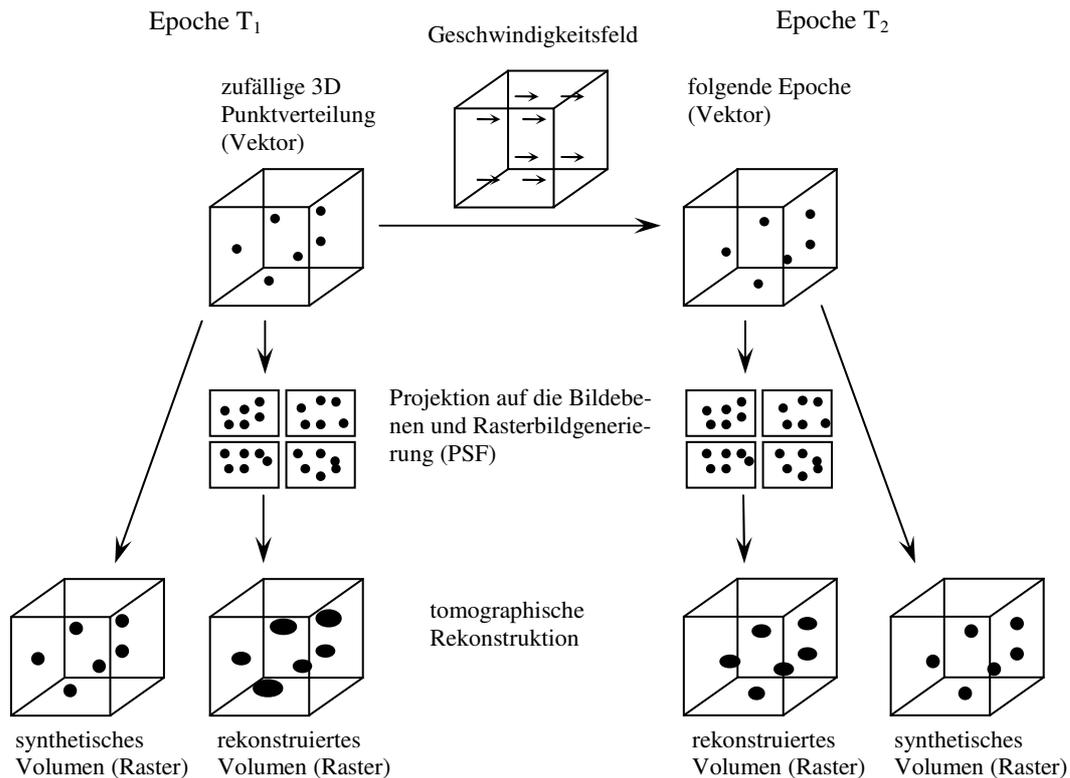
Zur Beurteilung des Potentials der entwickelten und implementierten Algorithmen wurden eine Reihe von Tests an synthetischen Daten durchgeführt. Dies hat den Vorteil, dass in allen Zwischenschritten die berechneten Ergebnisse mit Hilfe der Sollvorgaben validiert werden konnten.

In einem definierten Volumen sind zufällige 3D-Positionen (Vektordaten) von einer zuvor festgelegten Anzahl Partikel generiert worden. Die 3D-Positionen der Partikel in den Folgeepochen sind durch ein synthetisches Geschwindigkeitsfeld bestimmt. Für jede Epoche wurden die 3D-Positionen auf die Bildebenen der Kameras projiziert und so die Bildkoordinaten bestimmt (Vektordaten). Unter Einbeziehung einer point spread function wurde die 2D-Abbildung von den virtuellen Partikeln (Rasterdaten) generiert. Aus den so berechneten Abbildungen wurde im Folgenden die Grauwertverteilung im Volumen für jede Epoche mit dem oben beschriebenen Algorithmus rekonstruiert. Zusätzlich wurden unter Annahme einer Gaußschen Intensitätsverteilung aus den 3D-Positionen rasterbasierte Referenzdaten erzeugt. In diesen Daten ist kein Rauschen durch Rekonstruktionsfehler vorhanden.

### 7.2.3 Ergebnisse der zeitlichen Zuordnung

Zur Validierung der Anwendbarkeit der 3D-Kreuzkorrelation auf rekonstruierte Volumina wurden simulierte Daten, wie zuvor beschrieben, erzeugt. In einem Volumen von  $100 \times 100 \times 100$  Voxel wurden 300 Partikel zufällig verteilt. Der mittlere Abstand zweier benachbarter Partikelzentren betrug 10,6 Voxel, der Partikeldurchmesser 3,5 Voxel. Zwei verschiedene Geschwindigkeitsfelder wurden simuliert. Im ersten Fall wurde eine reine Translation mit  $v_x = 1,3$ ,  $v_y = 1,3$ ,  $v_z = 0$  angewandt. Im zweiten Fall wurde eine Scherströmung ( $4^\circ$  Scherwinkel je Komponente:  $v_x = 0,07 \cdot z$ ,  $v_y = 0,07 \cdot z$ ,  $v_z = 0$ ) simuliert.

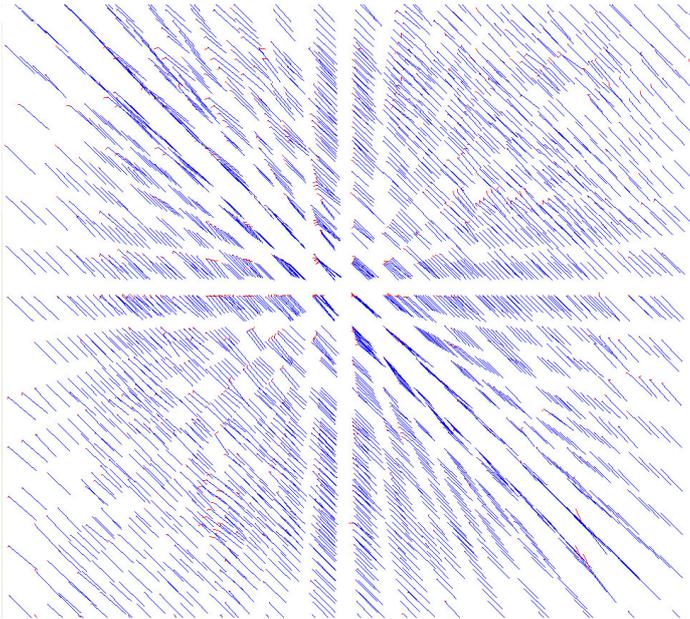
Die mittleren Verschiebevektoren zwischen den aufeinander folgenden Epochen wurden durch 3D Kreuzkorrelation mit  $15 \times 15 \times 15$  Voxel großen Interrogationskuben ermittelt. Die Würfel enthielten 2 bis 8 Partikel. In Abbildung 7.13 und Abbildung 7.14 sind die resultierenden Vektorfelder dargestellt. In Rot sind die Fehlvektoren, die Differenz zwischen der Bewegung am jeweiligen Punkt und dem bestimmten Vektor, eingetragen.



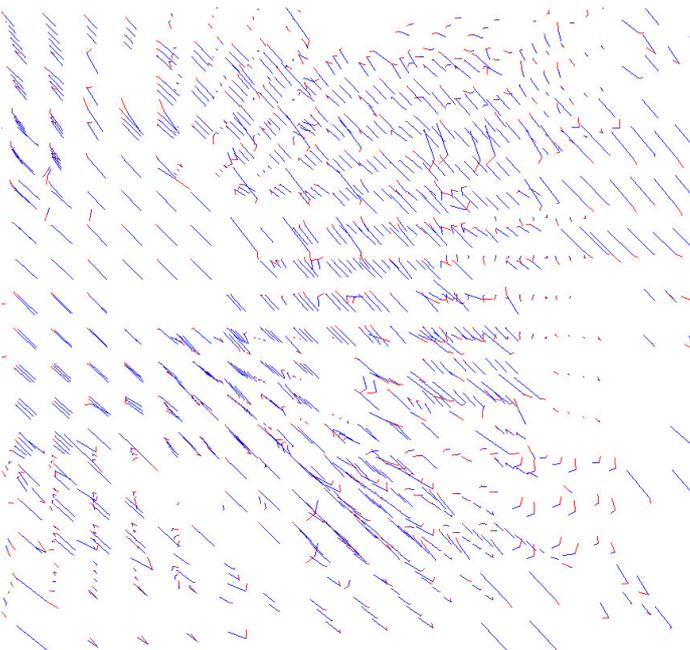
**Abbildung 7.12: Schema der Datengenerierung**

Wie zu erwarten, ergibt die 3D-Kreuzkorrelation sehr gute Ergebnisse bei reinen Translationen, hier der linearen Strömung. Die RMS (*engl., root mean square*) der Abweichungen von der Sollbewegung betragen bei der simulierten linearen Strömung 0,17/0,16/0,16 Voxel in X/Y/Z Richtung. Die Kreuzkorrelation ermittelt anhand der Ähnlichkeit zweier Muster die Verschiebung zwischen diesen. Ein Rauschen in diesen Signalen führt zu Fehlern bei der Bestimmung der Verschiebebeträge. Auf Grund dieser Eigenschaften der Kreuzkorrelation und der erreichten Ergebnisse ist nachgewiesen, dass die Rekonstruktion von Verschiebefeldern kaum zufällige Fehleranteile enthält. Die Muster der Grauwertverteilungen in aufeinander folgenden Epochen sind ähnlich. Ein systematischer Anteil der Fehler kann zwar nicht ausgeschlossen werden, aber dieser Anteil ist bei Verschiebungen lokal sehr stark korreliert und hat damit kaum Auswirkung auf die Bestimmung der Geschwindigkeitsfelder.

Die Ergebnisse der Scherströmung sind hingegen um den Faktor 3 schlechter. Die RMS der Abweichungen von der Sollbewegung betragen 0,48/0,45/0,83 Voxel in X/Y/Z Richtung. Das zeigt, dass die Kreuzkorrelation ohne Anpassung der Form des Abfragevolumens nicht geeignet für die Auswertung von Strömungen mit Geschwindigkeitsgradienten ist. Da durch die Kreuzkorrelation lediglich mittlere Bewegungen ermittelt werden können, ist diese Methode anfällig für ungleichmäßige Signalverteilung im Abfragewürfel. Bei Strömungen mit Gradienten besitzen alle Partikel im Abfragewürfel verschiedene Geschwindigkeiten. Tritt eine asymmetrische Partikelverteilung oder Leerstellen im Abfragewürfel auf, führen diese zu einer Verschiebung des Mittelwertes. Der Mittelwert repräsentiert dann aber nicht die mittlere Geschwindigkeit im Mittelpunkt des Abfragewürfels. Eine Vergrößerung des Abfragewürfels zur Vermeidung von einseitigen Signalverteilungen ist keine Möglichkeit zur Lösung des Problems. Wie oben erwähnt, ist es vor allem bei Strömungen mit Gradienten notwendig, die Größe der Abfragefenster zu minimieren.



**Abbildung 7.13: Resultierende Vektoren (blau) der Kreuzkorrelation und Differenzvektoren zu den simulierten Daten (rot) einer linearen Strömung**



**Abbildung 7.14: Resultierende Vektoren (blau) der Kreuzkorrelation und Differenzvektoren zu den simulierten Daten (rot) einer Scherströmung**

## 8 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurden neue Methoden und Algorithmen zur Optimierung und zur Erweiterung des Einsatzspektrums der 3D-PTV vorgestellt. Im Rahmen von praktischen Versuchen konnten die entwickelten Methoden verifiziert werden.

Eine Möglichkeit mit Hilfe einer einzelnen Kamera photogrammetrisch Objektkoordinaten zu bestimmen bietet die Nutzung eines Spiegelsystems. Im Rahmen dieser Arbeit wird der Strahlengang durch einen vierfachen Strahlteiler vor dem Objektiv der Kamera aufgeteilt und so ein virtuelles Vierkamarasystem generiert. Durch entsprechende Bildverarbeitungsmethoden können die Teilbilder so vorbereitet werden, dass die weitere Auswertung mit kommerzieller Software durchgeführt werden kann. Die Anwendung des Spiegelsystems bietet neben wirtschaftlichen Einsparungen auch den Vorteil, dass keine Synchronisation durchgeführt werden muss. Als Nachteil muss dennoch ein Verlust an Genauigkeit um den Faktor 3 im Objektraum genannt werden.

Es gibt verschiedene Ansätze zur photogrammetrischen Auswertung von Prozessen in Wasser. In dieser Arbeit wird ein sequentieller Ansatz mittels Raytracing vorgestellt. Hierbei können beliebig viele Trennflächen im Strahlengang berücksichtigt werden. Die Form der Trennfläche muss dabei durch eine parametrisierbare Darstellung gegeben sein. Die notwendigen Trennflächenparameter und die Kameraorientierungen werden in einem separaten Schritt vor der eigentlichen Messung bestimmt. Für die eigentliche Auswertung werden die Bildpunkte in Raumstrecken überführt, indem jeder Bildstrahl durch alle Medien hindurch verfolgt und gebrochen wird. Die notwendige Mehrbildzuordnung erfolgt zur Rechenzeitoptimierung nicht im Bild- sondern im Objektraum.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Trackingalgorithmus entwickelt, der verschiedene geometrische, radiometrische und physikalische Eigenschaften nutzt. Ausgehend davon, dass zeitlich und räumlich zusammengehörende Partikel sich ähnlich sind, werden verschiedene Merkmale analysiert. Die Ähnlichkeit wird über ein Wahrscheinlichkeitsmaß angegeben. Für jeden Objektpunkt wird die Wahrscheinlichkeit bestimmt, dass dieser zu einer bestimmten Trajektorie gehört. Damit ist es möglich, die räumliche und zeitliche Zuordnung durchzuführen, so lange mindestens ein signifikantes Merkmal existiert. Untersucht wurden geometrische (Kernlinienabstände, Partikeldurchmesser), radiometrische (Helligkeit) und physikalische Merkmale (Geschwindigkeits- und Beschleunigungskomponenten).

Ein neuartiges Konzept zur Rekonstruktion der Intensitätsverteilung im Volumen für tomographisches PIV wird in dieser Arbeit vorgestellt. Hierbei werden die einzelnen Kamerabilder schichtweise entzerrt und zu einzelnen Teilvolumen zusammengefasst. Mit Hilfe eines Minimumoperators wird anschließend die Intensitätsverteilung des Volumens bestimmt. Zur Optimierung der Rechenzeit basiert der gesamte Rekonstruktionsprozess auf der Ausnutzung einer Vielzahl von Rechenvorteilen und Vereinfachungen. Anhand von synthetischen Daten wurde dieser neue Algorithmus zur tomographischen Rekonstruktion von rasterbasierten Volumens verifiziert. Zur Validierung der Rekonstruktion wurde ein neues Qualitätskriterium (PSNR – peak signal to noise ratio) eingeführt. Der Rekonstruktionsalgorithmus wurde mit Hilfe des PSNR und der 3D Kreuzkorrelation verifiziert.

Die Einsatzbereitschaft der entwickelten Algorithmen wurde an drei verschiedenen Versuchsanlagen gezeigt. Als erste Versuchsanlage diente ein Saugkanal mit einem Querschnitt von  $60 \times 60 \text{ cm}^2$  und einer mittleren Strömungsgeschwindigkeit der Luft von  $7 \text{ m/s}$ . Hier diente eine einzelne Hochgeschwindigkeitskamera und ein Spiegelsystem zur Beobachtung eines  $20 \text{ dm}^3$  großen Volumens. An der Umströmung eines Zylinderstumpfes konnten Punktlagegenauigkeiten von  $0,13 / 0,12 \text{ mm}$  für die Lagekomponenten und  $0,39 \text{ mm}$  für die Tiefenkomponente nachgewiesen werden. Mehr als die Hälfte der bestimmten Trajektorien hatten eine Länge von mindestens der halben Länge des Beobachtungsvolumens. Insgesamt konnten  $57\%$  der zuvor berechneten Objektkoordinaten zu Trajektorien zugeordnet werden, die eine Länge von  $30\%$  der mittleren Durchlaufänge hatten. Bei der zweiten Versuchsanlage handelte es sich um

---

die Großversuchsanlage für Konvektionsströmungen „Ilmenauer Fass“ mit einem Beobachtungsvolumen von 130 m<sup>3</sup>. Hier dienten neben heliumgefüllte Seifenblasen vor allem heliumgefüllte Latexballons als Tracer. Auf Grund von Systemunzulänglichkeiten dienten zusätzliche Tracereigenschaften zur Auswertung der spatio-temporalen Zuordnung. Somit konnten sehr lange Trajektorien zuverlässig bestimmt werden. Die dritte Versuchsanlage erzeugt eine Strömung in einem Wasseranalogon unterhalb eines PKW-Motors. Zur Modellierung der Abbildung durch verschiedene, gekrümmte Trennflächen wurde der entwickelte sequentielle Algorithmus genutzt. Dieser wurde mit Hilfe einer Sollgeometrie verifiziert und zur Analyse realer Strömungen eingesetzt.

Zukünftige Arbeiten können die Idee der kaskadierten Kamerasysteme zur geschlossenen Berechnung innerhalb von Mehrmedienkörpern aufgreifen. Damit wird es zum einen möglich, die Varianzfortpflanzung zu optimieren und somit eine höhere Genauigkeit zu erreichen. Andererseits vereinfacht sich der Aufwand bei der Durchführung der Experimente.

Für die sich seit wenigen Jahren etablierende Methode des tomographischen PIV gibt es eine Reihe von weiteren Methoden, die die Leistungsfähigkeit entscheidend vorantreiben können. Zum einen kann durch den Einsatz des 3D-Least Squares Tracking (3D LST) die Genauigkeit der Vektorfeldbestimmung bei Strömungen mit Gradienten verbessert werden. Im Gegensatz zum Verfahren der 3D Kreuzkorrelation mit integrierter Deformation des Abfragekuboiden ist mit dem 3D LST eine geschlossene Lösung durch Ausgleichung zu erreichen. Für Mehrmedienanwendungen ist anzustreben, das Verfahren der ebenenweisen Entzerrung aufzuarbeiten und anzupassen. Auf Grund der Abbildungsgeometrie ist eine ebenenweise Entzerrung des gesamten Bildes mit einem Parametersatz nicht ausreichend. Hier sind erweiterte Verfahren nötig, die die Variation der Entzerrungsparameter berücksichtigen.

Die Erweiterung des tomographischen PIV zu einem tomographischen PTV kann realisiert werden, wenn innerhalb des Volumenrasterdatensatzes einzelne Partikel segmentiert werden. Ansätze zur Segmentierung von dicht angeordneten, kugelförmigen Partikeln zeigen Wirjadi et al. (2005) und Vagnona et al. (2008). Diese segmentierten Partikel können dann diskret über die Zeit verfolgt werden. Die Kombination der rasterbasierten Auswertung des Tomo-PIV und der Auswertung diskreter Partikel erlaubt eine erweiterte Analyse der Strömung.

In dieser Arbeit konnten einige Neuerungen aufgezeigt werden, die das Einsatzspektrum des 3D-PTV erhöhen und Grundbausteine für weitere Entwicklungen legen.

## 9 Literatur

1. Adamczyk, A.A. und Rimai, L., 1988a: 2-dimensional particle tracking velocimetry (PTV): Technique and image processing algorithms. *Experiments in Fluids* 6, Springer Verlag, S. 373 – 380.
2. Adamczyk, A.A. und Rimai, L., 1988b: Reconstruction of a 3-dimensional flow field from orthogonal views of seed track video images. *Experiments in Fluids* 6, Springer Verlag, S. 380 – 386.
3. Adrian, R.J., 1991: Particle-Imaging Techniques for Experimental Fluid Mechanics. *Annual Reviews Fluid Mechanics*, 23, S. 261-304.
4. Adrian, R.J. und Yao, C., 1985: Pulse laser technique application to liquid and gaseous flows and the scattering power of seed materials. *Applied Optics*, Vol. 24, Nr. 1, S. 44 – 52.
5. Albert, J., Maas, H.-G., Schade, A. und Schwarz, W., 2002: Pilot studies on photogrammetric bridge deformation measurement. 2nd IAG Com. IV Symposium on Geodesy for Geotechnical and Structural Engineering, Berlin.
6. Ament, C., 2003: Signifikanzanalyse im Rahmen der Statistischen Versuchsmethodik. Interner Bericht des SFB 570, [www.imtek.de/content/pdf/public/2003/sfb570-2003.pdf](http://www.imtek.de/content/pdf/public/2003/sfb570-2003.pdf), Zugriff: 07.12.2007.
7. Atkinson, C.H. und Soria, J., 2007a: Algebraic reconstruction techniques for tomographic particle image velocimetry. In: *Proceedings of 16th Australasian Fluid Mechanics Conference*, S. 191 – 198, 2.-7. Dezember, Crown Plaza, Gold Coast, Australien.
8. Atkinson, C.H. und Soria, J., 2007b: Multi-camera digital holographic PIV: Tomographic DHPIV. In: *Proceedings of 16th Australasian Fluid Mechanics Conference*, S. 184 – 190, 2.-7. Dezember, Crown Plaza, Gold Coast, Australien.
9. Arroyo, M.P. und Greated, C. A., 1991: Stereoscopic particle image velocimetry. *Measurement Science and Technology* 2, IOP Publishing Ltd, S. 1181 – 1186.
10. Baek, S.J. und Lee, S.J., 1996: A new two-frame algorithm using match probability. *Experiments in Fluids* 22, Springer Verlag, S. 23 – 32.
11. Bailly, Y., Zibret, D. und Prenel, J.P., 2003: 3D investigations in the sea of ice by means of rainbow volumic velocimetry (RVV). In: *Proceedings PSFVIP 4*, 3.-5. Juni, Chamonix, Frankreich.
12. Bakstein, H. und Pajdla, T., 2000: On-central cameras: A review. Technical Report CTU-CMP-1999-02, Center for Machine Perception.
13. Bienert, A., Scheller, S., Keane, E., Mohan, F. und Nugent, C., 2007: Tree detection and diameter estimations by analysis of forest terrestrial laserscanner point clouds. In: *Proceedings of ISPRS Workshop on Laserscanning 2007 and SilviLaser 2007*, 12.-14. September, Espoo, Finnland, S. 50 – 55.
14. Bolles, R. und Woodfill, J., 1993: Spatiotemporal consistency checking of passive range data. In: *Proceedings of International Symposium on Robotics Research*, Pittsburg, USA.
15. Bordás, R., Kuhn, R., Michaelis, B., Thévenin, D. und Wunderlich, B., 2006: Towards the investigation of vortex structures in gas flows with 3D-highspeed particle tracking using coloured tracers. In: *Proceedings 12th International Symposium on Flow Visualization*, 10.-14. September 2006, Göttingen, Deutschland.

- 
16. Brown, D., 1971: Close-range camera calibration. *Photogrammetric Engineering*, Vol. 37, Nr. 8, S. 855 – 866.
  17. Brücker, C. und Althaus, W., 1992: Study of vortex breakdown by particle tracking Velocimetry (PTV), Part 1: Bubble-type vortex breakdown. *Experiments in Fluids* 13, Springer Verlag, S. 339 – 349.
  18. Brücker, C., 1995: Digital-particle-image-velocimetry (DPIV) in a scanning light sheet: 3D starting flow around a short cylinder. *Experiments in Fluids* 19, Springer Verlag, S. 255 – 263.
  19. Brücker, C., 1996a: 3-D PIV via spatial correlation in a color-coded light-sheet. *Experiments in Fluids* 21, Springer Verlag, S. 312 – 314.
  20. Brücker, C. 1996b: 3-D scanning-particle-image-velocimetry: Technique and application to a spherical cap wake. *Applied Scientific Research*, Vol. 56, Nr. 2-3, Springer Verlag Niederlande, S. 157 – 179.
  21. Budwig, R., 1994: Refractive index matching methods for liquid flow investigations. *Experiments in Fluids* 17, SpringerVerlag, S. 350 – 355.
  22. Buttler, J.B., Lane, S.N. und Chandler, J.H., 2002: Through-water close range digital photogrammetry in flume and field environment. *Photogrammetric Record*, Vol. 17, Nr. 99, S.419 – 439.
  23. Caronsone, F., Cenedese, A. und Querzoli, G., 1995: Recognition of partially overlapped particle images using kohonen neural network. *Experiments in Fluids* 19, Springer Verlag, S. 225 – 232.
  24. Chetverikov, D. und Verestóy, J., 1999: Feature point tracking for incomplete trajectories. *Computing* 62, Springer Verlag, S. 321 – 338.
  25. Cowen, E.A. und Monismith, S.G., 1997: A hybrid digital particle tracking velocimetry technique. *Experiments in Fluids* 22, Springer Verlag, S. 199 – 211.
  26. Dantec Dynamics A/S, 2007, [www.dantecdynamics.com](http://www.dantecdynamics.com).
  27. Dimotakis, P.E., Debussy, F.D. und Koochesfahani, M.M., 1981: Particle streak velocimetry field measurements in a two-dimensional mixing layer. *Physics of Fluids*, Vol. 24, Nr. 6, S. 995 – 999.
  28. Dracos, T., 1996: Three-dimensional Velocity and vorticity measuring and image analysis techniques. *ERCOFTAC Series*, Vol. 4, Kluwer Academic Publishers.
  29. Elfick, M. und Fryer, J., 1984: Mapping in shallow water. In: *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 25, S. 240 – 247.
  30. Elsinga, G.E., Oudheusden, B.W. van und Scarano, F., 2006a: Experimental assessment of Tomographic-PIV accuracy. In: *Proceedings 13th International Symposium on Application of Laser Techniques to Fluid Mechanics*, 26.-29. Juni, Lissabon, Portugal.
  31. Elsinga, G.E., Scarano, F., Wieneke, B. und Oudheusden, B.W. van, 2006b: Tomographic particle image velocimetry. *Experiments in Fluids* 41, Springer Verlag, S. 933 – 947.
  32. Etho, T. und Takahara, K., 1995: Development of a new algorithm and supporting technologies for PTV. In: *Proceedings of the International Workshop on PIV*, Fukui, Japan, S. 91 – 106.
  33. Forterre, Y., Skotheim, J.M., Dumais, J. und Mahadevan, L., 2005: How the Venus flytrap snaps. *Nature*, Vol. 433, S. 421 – 425.
  34. Fraser, C.J., 1996: Network design. Kapitel 9 in *Close range photogrammetry and machine vision*, Editor K.B. Atkinson, Whittles Publishing, S. 256 – 281.
  35. Fraser, C.J. und Woods, A., 2005: Hyper redundancy for accuracy enhancement in automated close range photogrammetry. *Photogrammetric Record*, 20(111), S. 205 – 217.

36. Frey, J., Putze, T. und Grundmann, R., 2006: Räumliches PTV in Gasströmungen und Ansätze zur Korrektur des begrenzten PArtikelfolgevermögens. In: Beiträgen zur Fachtagung "Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik", 5.-7. September, Göttingen, Deutschland.
37. Guezennec, Y.C., Brodkey, R.S., Trigui, N. und Kent, J.C., 1994: Algorithms for fully automated three-dimensional particle tracking velocimetry. *Experiments in Fluids* 17, Springer Verlag, S. 209 – 219.
38. Hartley, R. und Zisserman, A., 2000: *Multiple view geometry in computer vision*. Cambridge University Press.
39. Hassan, Y.A. und Canaan, R.E., 1991: Full-field bubbly flow velocity measurements using a multi-frame particle tracking technique. *Experiments in Fluids* 12, Springer Verlag, S. 49 – 60.
40. Heal, W.E., 1923: Process of and apparatus for making sheet glass. US Patent 1,460,488.
41. Hentschel, K., 2001: Das Brechungsgesetz in der Fassung von Snellius, Rekonstruktion seines Entdeckungspfad und eine Übersetzung seines lateinischen Manuskriptes sowie ergänzender Dokumente. *Archive for History of Exact Sciences*, Vol. 55, Nr. 4. Vorgelegt von A. Shapiro.
42. Hentschel, W., 2000: Optical diagnostics for combustion process development of direct-injection gasoline engines. In: *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 28, S. 1119 – 1135.
43. Hering, F., 1996: Lagrangesche Untersuchungen des Strömungsfeldes unterhalb der wellenbewegten Wasseroberfläche mittels Bildfolgenanalyse. Ruprecht – Karls – Universität Heidelberg - Dissertation.
44. Hering, F., Merle, M., Wierzimok, D. und Jähne, B., 1995a: A robust technique for tracking particle over long image sequences. In: *Proceedings of ISPRS Intercommision workshop "from pixels to sequences"*, 22.-24. März, Zürich, Schweiz, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 30, Part 5 W1.
45. Hering, F., Merle, M., Wierzimok, D. und Jähne, B., 1995b: Particle tracking in space time sequences. In: *Proceedings 6th International Conference on Computer Analysis of Images and Patterns*, 6.-8. September, Prag, Tschechien, *Lecture Notes in Computer Science*, Vol. 970, Springer Verlag - Berlin.
46. Hering, F., Leue, C., Wierzimok, D. und Jähne, B., 1997: Particle tracking velocimetry beneath water waves. Part I: visualisation and tracking algorithms. *Experiments in Fluids* 23, Springer Verlag, S. 472 – 482.
47. Herman, G.T. und Lent, A., 1976: Iterative reconstruction algorithms. *Computers in Biology & Medicine*, Vol. 6, Pergamon Press, S. 273 – 294.
48. Hinsch, K.D., 2002: Holographic particle image velocimetry. *Measurement Science and Technology* 13, IOP Publishing Ltd, S. R61 – R72.
49. Höhle, J., 1971: Zur Theorie und Praxis der Unterwasser-Photogrammetrie. *Schriftreihe der DGK, Reihe C, Heft 163*.
50. Horn, B.K.P. und Schunk, B.G., 1981: Determining optical flow. *Artificial Intelligence* 17, S. 185 – 203.
51. Hoyer, K., Holzner, M., Lüthi, B., Guala, M., Liberzon, A. und Kinzelbach, W., 2005: 3D scanning particle tracking velocimetry. *Experiments in Fluids* 39, Springer Verlag, S. 923 – 934.
52. Jähne, B., 1997: *Digitale Bildverarbeitung*. 4. Auflage, Springer Verlag.
53. Jäger, R., Müller, T., Saler, H. und Schwäble, R., 2005: *Klassische und robuste Ausgleichungsverfahren*. Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg.

- 
54. Kähler, C.J. und Kompenhans, J., 2000: Fundamentals of multiple plane stereo particle image velocimetry. *Experiments in Fluids (Suppl.)*, Springer Verlag, S. S70 – S77.
  55. Keane, R.D. und Adrian, R.J., 1992: Theory of cross-correlation analysis of PIV images. *Applied Scientific Research* Vol. 49, Nr 3, Springer Niederlande, S.191 – 215.
  56. Keane, R.D., Adrian, R.J. und Zhang, Y., 1995: Super-resolution particle imaging velocimetry. *Measurement Science and Technology* 6, IOP Publishing Ltd, S. 754 – 768.
  57. Kerho, M.F. und Bragg, M.B., 1994: Neutrally buoyant bubbles used as flow tracers in air. *Experiments in Fluids* 16, Springer Verlag, S. 393 – 400.
  58. Kotowski, R., 1987: Zur Berücksichtigung lichtbrechender Flächen im Strahlenbündel. *Schriftreihe der DGK, Reihe C, Heft 330*.
  59. Kuhn, W.R., Bordas, R. und Wunderlich, B., 2007: Colour class identification of tracers using artificial neuronal networks. In: *Proceedings of the 10th International Conference on Engineering Applications of Neural Networks*, 29.-31. August 2007, Thessaloniki, Griechenland.
  60. Kühn, M., Ehrenfried, K., Bosbach, J. und Wagner, C., 2008: Feasibility Study of tomographic particle image velocimetry for large scale convective air flow. In: *Proceedings 14th International Symposium on Application of Laser Techniques to Fluid Mechanics*, 07.-10. Juli, Lissabon, Portugal.
  61. Kukulakos, K.N. und Seitz, S.M., 2000: A theory of shape by space carving. *International Journal of Computer Vision*, Vol. 38, Nr. 3, S. 199 – 218.
  62. Kuzu, Y., 2004: Volumetric object reconstruction by means of photogrammetry. TU Berlin, Dissertation, D 83.
  63. Laurentini, A., 1994: The visual hull concept for silhouette-based image understanding. In: *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 16, Nr. 2, S. 150 –162.
  64. Laurentini, A., 1997: How many 2D silhouettes does it takes to reconstruct a 3D object? *Computer Vision and Image Understanding*, Vol. 67, Nr. 1, S. 81 – 87.
  65. Leue, C., Geißler, P., Hering, F. und Jähne, B., 1996: Segmentierung von Partikelbildern in der Strömungsvisualisierung. In: *Proceedings 18th DAGM – Symposium Mustererkennung, Informatik Aktuell*, S. 118 – 129.
  66. Lobutova, E., Resagk, C., Rank, R., Müller, D., Putze, T. und Maas, H.-G., 2006: Visualisation of large flow structures in air convection using 3D particle tracking velocimetry technique. In: *Proceedings 12th International Symposium on Flow Visualization*, 10.-14. September 2008, Göttingen, Deutschland.
  67. Lobutova, E., Resagk, C., Rank, R., Müller, D., Putze, T. und Maas, H.-G., 2007: 3D Particle tracking velocimetry zur Untersuchung von großskaligen Strukturen in Rayleigh-Bèrnard Konvektionen. In: *Beiträgen zur Fachtagung “Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik”*, 4.-6. September, Rostock, Deutschland.
  68. Lobutova, E., Resagk, C., Rank, R., Müller, D., Putze, T. und Maas, H.-G., 2008: Flow structures in air convection using 3D particle tracking velocimetry with soap bubbles and balloons. In: *Proceedings 13th International Symposium on Flow Visualization*, 1.-4. Juli 2008, Nizza, Frankreich.
  69. Luong, Q.-T., 1992: Matrice fondamentale et auto-calibration en vision par ordinateur. Dissertation, Universite de Paris-Sud, Orsay.
  70. Luong, Q.-T. und Faugeras, O.D., 1996: The fundamental matrix: Theory, algorithms, and stability analysis. *International Journal of Computer Vision*, Vol. 17, Nr. 1, S. 43 – 75.

71. Luhmann, T., 2005: Zum photogrammetrischen Einsatz von Einzelkameras mit optischer Stereostrahlteilung. *Photogrammetrie-Fernerkundung-Geoinformation*, Heft 2.
72. Luhmann, T. und Raguse, K., 2005: Synchronous 3-D High-Speed Camera with Stereo-Beam Splitting. In: *Proceedings Sensor 2005*, 10.-12. Mai 2005, Nürnberg, Deutschland.
73. Luhmann T. und Sahrhage V., 2006: Konzepte zur optischen 3D-Navigation von Sensoren. *Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation*, Jahrgang 2006, Heft 5, S. 439 – 444.
74. Malfara, R., Bailly, Y., Cudel, C. und Prenel, J.P., 2006: Actual 3D trajectography by means of rainbow volumic velocimetry. In: *Proceedings 12th International Symposium on Flow Visualization*, 10.-14. September 2006, Göttingen, Deutschland.
75. Maas, H.-G., 1992a: *Digitale Photogrammetrie in der dreidimensionalen Strömungsmesstechnik*. ETH – Zürich, Dissertation Nr. 9665.
76. Maas, H.-G., 1992b: Complexity analysis for the establishment of image correspondences of dense spatial target fields. In: *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. XXIX, Part B5, S. 102-107.
77. Maas, H.-G., 1995: *New developments in multimedia photogrammetry. Optical 3-D Measurement Techniques III*, Wichmann Verlag, Karlsruhe.
78. Maas, H.-G., Gruen, A. und Papantoniou, D., 1993: Particle tracking velocimetry in three-dimensional flows, Part 1. Photogrammetric determination of particle coordinates. *Experiments in Fluids* 15, Springer Verlag, S. 133 – 146.
79. Maas, H.-G., Stefanidis, A. und Gruen, A., 1994: From pixels to voxels: tracking volume elements in sequences of 3-D digital images. In: *International archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 30, Part 3/2.
80. Maas, H.-G. und Hampel, U., 2006: *Photogrammetric Techniques in Civil Engineering Material Testing and Structure Monitoring*. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 72, Nr. 1, S. 39 – 45.
81. Machacek, M., 2003: *A quantitative visualization tool for large wind tunnel experiments*. ETH – Zürich, Dissertation Nr. 14957.
82. Machacek, M. und Rösgen, T., 2001: Development of a quantitative flow visualisation tool for applications in industrial wind tunnel. In: *Proceedings 19th International Congress on Instrumentation in Aerospace Simulation Facilities*, Cleveland, USA.
83. Machacek, M. und Rösgen, T., 2002: A quantitative visualization method for wind tunnel experiments based on 3D particle tracking velocimetry (3D-PTV). In: *Proceedings in Applied Mathematics and Mechanics* Vol. 1, Nr.1, S. 254 – 255.
84. Machacek, M., Sauter, M. und Rösgen, T., 2003: Two-step calibration of a stereo camera system for measurements in large volumes. *Measurement Science and Technology* 14, IOP Publishing Ltd, S. 1631 – 1639.
85. Malik, N.A., Dracos, T. und Papantoniou, D.A., 1993: Particle tracking velocimetry in three-dimensional flows, Part 2. Particle tracking. *Experiments in Fluids* 15, Springer Verlag, S. 279 – 294.
86. Matusik, W., Buehler, C., Raskar, R., Gortler, S.J. und McMillan, L., 2000: Image-based visual hulls. In: *Proceedings 27th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, S. 369 - 374.

- 
87. Marxen, M., Sullivan, M.R., Loewen, M.R. und Jähne, B., 2000: Comparison of gaussian particle tracking estimators and the achievable measurement density for particle tracking velocimetry. *Experiments in Fluids* 29, Springer Verlag, S. 145 – 153.
  88. Melling, A., 1997: Tracer particles and seeding for particle image velocimetry. *Measurement Science and Technology*, Vol. 8, S. 1406 – 1416.
  89. Meng, H., Pan, G. und Woodward, S.H., 2004: Holographic particle image velocimetry: from film to digital recording. *Measurement Science and Technology* 15, IOP Publishing Ltd, S. 673 – 685.
  90. Michaelis, D., Poelma, C. und Scarano, F., 2006: A 3D time-resolved cylinder wake survey by tomographic PIV. In: *Proceedings 12th International Symposium on Flow Visualization*, 10.-14. September 2006, Göttingen, Deutschland.
  91. Mikheev, A. und Zubtsov, V., 2006: Enhanced particle tracking velocimetry (EPTV) technique with new particle detection and pairing methods/algorithms. In: *Proceedings 12th International Symposium on Flow Visualization*, 10.-14. September 2006, Göttingen, Deutschland.
  92. Niem, W., 1997: Error Analysis for Silhouette-Based 3D Shape Estimation from Multiple Views. In: *Proceedings on International Workshop on Synthetic-Natural Hybrid Coding and Three-Dimensional Imaging (I-WSNHC3DI'97)*, Rhodos, 6–9 September 1997, S. 143 – 146.
  93. Nietsche, W. und Brunn, A., 2006: *Strömungsmeßtechnik*. 2. Auflage, Springer Verlag Berlin.
  94. Nohbach, H., Damaschke, N. und Tropea, C., 2004: High-precision sub-pixel interpolation in PIV/PTV image processing. In: *12th International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics*, 12.-15. Juli, Lissabon, Portugal.
  95. Oertel sen., H. und Oertel jun., H., 1989: *Optische Strömungsmeßtechnik*. G. Braun, Karlsruhe.
  96. Ohmi, K. und Hang, Yu, L., 2000: Particle tracking velocimetry with new algorithms. *Measurement Science and Technology* 11, IOP Publishing Ltd, S. 603 – 616.
  97. Okamoto, A., 1982: Wave Influences in two-media photogrammetry. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 48, Nr. 9, S. 1487 – 1499.
  98. Okamoto, A., 1984: Orientation problems of two-media Photographes with curved boundary surfaces. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 50, Nr. 3, S. 303 – 316.
  99. Okamoto, K., Hassan, Y.A. und Schmidl, W.D., 1995: New tracking algorithm for particle image velocimetry. *Experiments in Fluids* 19, Springer Verlag, S. 342 – 347.
  100. Ouellette, N.T. und Xu, H., 2006: A quantitative study of three-dimensional Lagrangian particle tracking algorithms. *Experiments in Fluids* 40, Springer Verlag, S. 301 – 313.
  101. Pereira, F., Stüer, H. und Graff, E.C., 2006: Two-frame 3D particle tracking. *Measurement Science and Technology* 17, IOP Publishing Ltd, S. 1680 – 1692.
  102. Philips, J., 1981: Ein photogrammetrisches Aufnahmesystem zur Untersuchung dynamischer Vorgänge im Nahbereich. Veröffentlichung des Geodätischen Instituts der RWTH Aachen, Heft 30.
  103. Prenel, J.P. und Bailly, Y., 2006: Recent evolutions of imagery in fluid mechanics: From standard tomographic visualization to 3D volumic velocimetry. *Optics & Lasers in Engeneering*, Vol. 44, Elsevier Ltd., S. 321 – 334.
  104. Przybilla, H.-J., Kotowski, R., Meid, A. Und Weber, B., 1988: Geometric quality control in nuclear power stations: an application of high precision underwater photogrammetry. *Photogrammetric Record*, 13(76), S. 577 – 588.

105. Putze, T., 2004: Einsatz einer Highspeedkamera zur Bestimmung von Geschwindigkeitsfeldern in Gasströmungen. In: Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation, Band 13, S. 325-332.
106. Putze, T., 2005: Geometric modelling and calibration of a virtual four-headed high speed camera-mirror system for 3-D motion analysis. *Optical 3-D Measurement Techniques VII. Vol. II*, S. 167 – 174.
107. Putze, T., 2006: Quality analysis of flow field data determines by 3D PTV in gas flows. In: *Proceedings 12th International Symposium on Flow Visualization*, 10.-14. September 2006, Göttingen, Deutschland.
108. Putze, T., 2007: Mehrmedienphotogrammetrie an schwer zugänglichen, komplexen Körpern. In: *Publikationen der Deutsche Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation*, Herausgeber Eckardt Seyfert, 19.-21.Juni, 2007, Basel, Schweiz.
109. Putze, T., 2008a: Erweiterte Verfahren zur Mehrmedienphotogrammetrie komplexer Körper. In: *Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2008*, Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg.
110. Putze, T., 2008b: Novel reconstruction approach for tomographic PIV. In: *Proceedings 13th International Symposium on Flow Visualization*, 1.-4. Juli 2008, Nizza, Frankreich.
111. Putze, T., 2008c: 3D flow analysis inside a plexiglass engine using 3D PTV. In: *Proceedings 13th International Symposium on Flow Visualization*, 1.-4. Juli 2008, Nizza, Frankreich.
112. Putze, T. und Hoyer, K., 2005: Modellierung und Kalibrierung eines virtuellen Vier-Kamerasystems auf Basis eines verstellbaren Spiegelsystems. In: *Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2005*, Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg.
113. Putze, T. und Maas, H.-G., 2008: 3D determination of very dense particle velocity fields by tomographic reconstruction from four camera views and voxel space tracking. In: *International archives of Photogrammetry and Remote Sensing Vol. 37, Part B5:33-38*
114. Putze, T., Raguse, K. und Maas, H.G., 2007: Configuration of multi mirror systems for single high-speed camera based 3D motion analysis. In: *Proceedings of SPIE-IS&T Electronic Imaging*, SPIE Vol. 6491, 64910L.
115. Radon, J., 1917: Über die Bestimmung von Funktionen durch ihre Integralwerte längs gewisser Mannigfaltigkeiten. *Berichte Sächsische Akademie der Wissenschaft, Math.-Phys. Kl.* 69, S. 262 – 267.
116. Raguse, K., 2007: Dreidimensionale photogrammerische Auswertung asynchron aufgenommener Bildsequenzen mittels Punktverfolgungsverfahren. *Schriftreihe der DGK, Reihe C, Heft 602*.
117. Raffel, M., Willert, C., Wereley, S. und Kompenhans. J., 2007: *Particle Image Velocimetry – a practical guide*. Second Edition, Springer Verlag.
118. Rinner, K., 1948: *Abbildungsgesetz und Orientierungsaufgaben in der Zweimedienphotogrammetrie*. Österreichische Zeitschrift für Vermessungswesen, Sonderheft 5.
119. Rinner, K., 1969: Problems of two-medium photogrammetry. *Photogrammetric Engineering*, Vol. 35, Nr. 2, S. 275 – 282.
120. Ruhnau, P. und Schnörr, C., 2007: Optical stokes flow estimation: an image-based control approach. *Experiments in Fluids* 42, Springer Verlag, S. 61 – 78.
121. Ruhnau, P., Yuan, J. und Schnörr, C., 2007: On variational methodes for fluid flow estimation. *IWCM 2004, LNCS 3417*, Springer Verlag Berlin Heidelberg, S. 124 – 145.

- 
122. Scarano, F. und Riethmuller, M.L., 1999: Iterative multigrid approach in PIV image processing with discrete window offset. *Experiments in Fluids* 26, Springer Verlag, S. 513 – 523.
  123. Scarano, F. und Riethmuller, M.L., 2000: Advances in iterative multigrid PIV image processing. *Experiments in Fluids (Suppl.)*, Springer Verlag, S. S51 – S60.
  124. Scarano, F.:2002: Iterative image deformation methods in PIV. *Measurement Science and Technology* 13, IOP Publishing Ltd, S. R1 – R19.
  125. Scarano, F., Elsinga, G.E., Bocci, E. und Oudheusden, B.W. van, 2006: Investigation on 3-D coherent structures in the turbulent cylinder wake using Tomo-PIV. In: *Proceedings 13th International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid mechanics*, 26.-29. Juni, Lissabon, Portugal.
  126. Schöler, H., 1981: Production of photogrammetric stereo pairs by beam division in single-lens cameras. *Kompodium Photogrammetrie Vol. XV*, Akademische Verlagsgesellschaft, Leipzig, S. 77 – 86.
  127. Sinha, S.K. und Kuhlmann, P.S., 1992: Investigating the use of stereoscopic particle streak velocimetry for estimating the three-dimensional vorticity field. *Experiments in Fluids* 12, Springer Verlag, S. 377 – 384.
  128. Stellmacher, M. und Obermayer, K., 2000: A new particle algorithm based on deterministic annealing and alternative distance measures. *Experiments in Fluids* 28, Springer Verlag, S. 508 – 518.
  129. Takahara, K., Adrian, R.J., Etho, G.T. und Christensen, K.T., 2000: A kalman tracker for super-resolution PIV. *Experiments in Fluids (Suppl.)*, Springer Verlag, S. S34 – S41.
  130. Tapia, H.S., Aragón, J.A.G., Hernández, D.M. und Garcia, B.B., 2006: Particle tracking velocimetry (PTV) algorithm for non-uniform and non-spherical particles. In: *Proceedings of the Electronics, Robotics and Automotive Mechanics Conference*, S. 325 – 330.
  131. Tecklenburg, W., Luhmann, T. und Hastedt, H., 2001: Camera modelling with image-variant parameters and finite elements. *Optical 3-D Measurement Techniques V*, Wichmann Verlag, Heidelberg, S. 328 – 335.
  132. Thess, A., Busse, F., Du Puits, R., Resagk, C. und Tilgner, A., 2001: The Barrel of Ilmenau: a Novel Facility for Experiments on High Rayleigh Number Convection. In: *Beiträgen der American Physical Society, 54th Annual Meeting of the Division of Fluid Dynamics*, 18.-20. November, San Diego, USA.
  133. Tianding, C., 2006: An affine-model-based technique for fast DPIV computation. *Image and Computer Vision*, Vol. 24, S. 407 – 410.
  134. Theunissen, R., Stitou, A. und Riethmuller, M.L., 2004: A novel approach to improve the accuracy of PTV methods. In: *12th International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics*, 12.-15. Juli, Lissabon, Portugal.
  135. Udrea, D.D., Bryanston-Cross, P.J., Klee, W.K. und Funes-Gallanzi, M., 1996: Two sub-pixel processing algorithms for high accuracy particle centre estimation in low seeding density particle image velocimetry. *Optics & Laser Technology*, Vol. 28, Nr. 5, Elsevier Science Ltd., S. 389 – 396.
  136. Uemura, T., Yamamoto, F. und Ohmi, K., 1989: A high speed algorithm of image analysis for real time measurement of two dimensional velocity distributions. *American Society of Mechanical Engineers, Fluids Engineering Division Vol. 85*, S. 129 – 133.

137. Vagnona, A., Rivièrea, J.P., Missiaena, J.M., Belleta, D., Di Michielb, M., Josseronda, C. und Bouvarda, D., 2008: 3D statistical analysis of a copper powder sintering observed in situ by synchrotron microtomography. *Acta Materialia* Vol. 56, Nr. 5, S. 1084 – 1093.
138. Virant, M. und Dracos, T., 1997: 3D PTV and its application on lagrangian motion. *Measurement Science and Technology* 8, IOP Publishing Ltd, S. 1539 – 1552.
139. Voth, G.A., La Porta, A., Crawford, A.M., Alexander, J. und Bodenschatz, E., 2002: Measurement of particle accelerations in fully developed turbulence. *The Journal of Fluid Mechanics*, Nr. 469, S. 121 – 160.
140. Wernet, M.P., 2001: New insights into particle image velocimetry data using fuzzy-logic-based correlation/particle tracking processing. *Experiments in Fluids* 30, Springer Verlag, S. 434 – 447.
141. Westaway, R.M., Lane, S.N. und Hicks, D.M., 2001: Remote sensing of clear-water, shallow, gravel-bed rivers using digital photogrammetry. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 67, Nr. 11, S. 1271 – 1281.
142. Wieneke, B. und Taylor, S., 2006: Fat-sheet PIV with computation of full 3D-strain tensor using tomographic reconstruction. In: *Proceedings 13th International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid mechanics*, 26.-29. Juni, 2006, Lissabon, Portugal.
143. Wirjadi, O., Jablonski, A., Schladitz, K. und Nöthe, M., 2005: Volumetric Analysis of a Sinter Process in Time. In: *Pattern Recognition, Proceedings 27th DAGM Symposium, Lecture Notes in Computer Science 3663*, S. 409 – 416.
144. Willert, C.E. und Gharib, M., 1991: Digital particle image velocimetry. *Experiments in Fluids* 10, Springer Verlag, S. 181 – 193.
145. Willneff, J., 2003: A spatio-temporal matching algorithm for 3D particle tracking velocimetry. *ETH Zürich - Dissertation Nr. 15276*.
146. Willneff, J. und Gruen, A., 2002: A new spatio-temporal matching algorithm for 3D-particle tracking velocimetry. In: *Proceedings of The 9th International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery*, 10.-14. Februar, Honolulu, USA.
147. Wierzymok, D. und Hering, F., 1993: Quantitative Imaging of Transport in Fluids with Digital Image Processing. *Imaging in Transport Processes*, Bergell House, S. 297 – 308.
148. Wolff, K. und Förstner, W., 2000: Exploiting the multi view geometry for automatic surface reconstruction using feature based matching in multi media photogrammetry. In: *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 33, Part B5, S. 900 – 907.
149. Wolff, K., 2007: Zur Approximation allgemeiner optischer Abbildungsmodelle und deren Anwendung auf eine geometrisch basierte Mehrbildzuordnung am Beispiel einer Mehrmedienabbildung. *Reihnische Friedrich-Wilhelms-Universität zu Bonn, Dissertation*,
150. Wung, T.S. und Tseng, F.G., 1992: A color-coded particle tracking velocimetry with application to natural convection. *Experiments in Fluids* 13, Springer Verlag, S. 217 – 223.
151. Yoon, J.-H. und Lee, S.-J., 2002: Direct comparison of 2D PIV and stereoscopic PIV measurements. *Measurement Science and Technology* 13, IOP Publishing Ltd, S. 1631 – 1642.
152. Young, C.N. und Johnson, D.A., 2006: Enhanced particle tracking algorithm based on a modified expectation maximization algorithm. In: *Proceedings 13th International Symposium on Applications of laser techniques to fluid mechanics*, 26-29. Juni, Lisabon, Portugal.
153. Zibret, D., Bailly, Y., Cudel, C. und Prenel, J.P., 2003: Direct 3D flow investigations by means of rainbow volumic velocimetry (RVV). In: *Proceedings PSFVIP 4*, 3.-5. Juni, Chamonix, Frankreich.

## **Danksagung**

Diese Dissertation ist parallel zu meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter für das Schwerpunktprogramm 1147 „Bildgebende Messverfahren für die Strömungsanalyse“ der DFG entstanden.

Ich danke sehr Prof. Dr. Hans-Gerd Maas für die Möglichkeit, am IPF dieses interessante Projekt bearbeiten zu dürfen als auch für die fachlichen Diskussionen zur Erreichung der gesteckten Ziele.

Ein großer Dank geht an Dr. Werner Hentschel für die Anregung zur Durchführung des Mehrmedienversuches und für die Bereitstellung der Versuchsanlage des Wasseranalogons sowie für die Bereitschaft als Gutachter zu fungieren.

Ebenso danke ich Prof. Dr. Christoph Brücker für die Übernahme der Funktion eines Gutachters.

Ein großes Dankeschön geht an Dr. Christian Resagk und Elka Lobutova für die gute Zusammenarbeit in Ilmenau und an Jürgen Frey, Dr. Veit Hildbrand und Prof. Dr. Roger Grundmann für die Unterstützung der Versuche im Niedergeschwindigkeitswindkanal der TU Dresden.

Vielen Dank an alle meine Kollegen am IPF für die anregenden Diskussionen und die Hinweise zur verständlichen Formulierung schwieriger Sachverhalte.

Ich bedanke mich bei Rainer Oelsner für die vielen kleinen Spezialanfertigungen und bei Dr. Klaus Hoyer für die Anfertigung der Bauteile des Spiegelsystems.

Ein Dankeschön geht an Dr. Horst Ehrhardt, der als Lektor diese Arbeit betreut hat.

Ich danke meinen Eltern, meiner Oma und meinem Bruder für die fortwährende Unterstützung.

Danke Sandra für deine Nachsicht, für dein Verständnis für meine zahllosen Notizzettel und für alles Andere.