

Fakultät für Physik und Astronomie

Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg



Diplomarbeit
im Studiengang Physik

vorgelegt von

Christian Janßen
aus Berlin

Juli 2000

**Ein miniaturisiertes
Endoskop-Stereomesssystem zur
Strömungsvisualisierung in Kiesbetten**

Die Diplomarbeit wurde von Christian Janßen ausgeführt am
Interdisziplinären Zentrum für Wissenschaftliches Rechnen
unter der Betreuung von
Herrn Prof. Dr. Bernd Jähne

Zusammenfassung

Diese Arbeit stellt einen neuen Stereoaufbau zur Strömungsmessung in Kiesporen vor. Die eingesetzten Glasfaser-Endoskope sind direkt am Messvolumen positioniert und messen in einem bislang unzugänglichen Kiesbett. Die Verwendung eines Stereoaufbaus erlaubt die Rekonstruktion raum-zeitlicher Trajektorien, was die Bestimmung von Turbulenz ermöglicht. Durch Einbetten in eine künstliche Kiespore wird die Störung der Strömung bei der Messung gering gehalten. Es wird die Entwicklung, die Umsetzung und Erprobung des Messaufbaus beschrieben. Die dabei auftretenden Limitierungen der Signalstärke werden mit Methoden der digitalen Bildverarbeitung kompensiert. Der Einfluss der Glasfaserabbildung wird quantifiziert und behoben. Wie gezeigt wird, ist nach dieser Vorverarbeitung der Daten der Einsatz von Particle Tracking Velocimetry möglich. Außerdem wird ein neues Verfahren verwendet, das die geometrische Kalibrierung bei einem derart kleinen Messvolumen stark vereinfacht.

A Miniature Stereo System for 3D-Flow Visualisation in Gravel

This thesis introduces a novel stereo setup for flow measurements in gravel pores. The used glass fibre endoscopes measure directly at the pore volume. This area has been inaccessible for flow investigations so far. Using a stereo setup enables the reconstruction of spatio-temporal particle trajectories allowing the determination of turbulence. Embedded into an artificial pore the disturbance of the surrounding flow is kept at a minimum. This work describes the design, realisation and testing of the device. The resulting low signal levels are overcome by means of digital image processing. The influence of the glass fibres is accounted for. It is shown that this preprocessing enables the use of Particle Tracking Velocimetry. Furthermore, a new technique for geometrical camera calibration is applied in order to simplify the calibration procedure.

Blick in den Strom

Sahst du ein Glück vorübergehn,
Das nie sich wiederfindet,
Ists gut in einen Strom zu sehn,
Wo alles wogt und schwindet.

O! starre nur hinein, hinein,
Du wirst es leichter missen,
Was dir, und solls dein Liebstes sein,
Vom Herzen ward gerissen.

Blick unverwandt hinab zum Fluß,
Bis deine Tränen fallen,
Und sieh durch ihren warmen Guß
Die Flut hinunterwallen.

Hinträumend wird Vergessenheit
Des Herzens Wunde schließen;
Die Seele sieht mit ihrem Leid
Sich selbst vorüberfließen.

Nikolaus Lenau, 1844

Seraphine X

Das Fräulein stand am Meere
Und seufzte lang und bang,
Es rührte sie so sehre
Der Sonnenuntergang.

Mein Fräulein! sein Sie munter,
Das ist ein altes Stück;
Hier vorne geht sie unter
Und kehrt von hinten zurück.

Heinrich Heine, 1844

Lenau verfiel wenig später dem Wahnsinn.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	5
I	Theorie der Messaufgabe	7
2	Physikalische Fragestellung	9
2.1	Grundgleichungen der Strömungslehre	9
2.2	Fragestellung der Messaufgabe	10
2.3	Strömungsmessmethoden	11
2.4	Kontext der Messaufgabe	12
3	Messsystem	15
3.1	Optische Abbildung von Glasfaserendoskopen	15
3.1.1	Lichtleitung durch Glasfasern	15
3.1.2	Das übertragene Bild	17
3.2	Einfluss der Kameras und der Digitalisierung	17
3.2.1	Funktionsweise einer CCD-Kamera	18
3.2.2	Rauschen	22
3.3	Miniaturisierte Stereoskopie	25
3.3.1	Alternative 3D-Verfahren	25
3.3.2	Prinzip des Stereoaufbaus	26
3.3.3	Optimierung der Parameter	27
3.4	Beleuchtung	30

4	Kamerakalibrierung	37
4.1	Extraktion der Kalibrierpunkte	37
4.2	Geometrische Kalibrierung	38
4.2.1	Das lineare Lochkameramodell	38
4.2.2	Nichtlineare Erweiterungen	42
4.3	Kalibriermethoden	43
4.3.1	Kalibrierung einer 2D-Messebene	44
4.3.2	3D-Kalibrierung	44
5	Vorverarbeitung der Rohdaten	47
5.1	Extraktion des Hintergrunds	47
5.2	Isotrope Glättungsverfahren	48
5.2.1	Fouriertransformation, Faltung und Powerspektrum	48
5.2.2	Bandpass im Fourierspektrum	50
5.2.3	Gausspyramide	52
5.3	Zweidimensionale anisotrope Diffusion	53
5.4	Dreidimensionale anisotrope Diffusion	54
6	Particle Tracking Velocimetry	57
6.1	Segmentierung und morphologische Nachbearbeitung	58
6.2	2D-PTV	60
6.3	3D-PTV	61
II	Versuchsaufbau und Ergebnisse	65
7	Experimenteller Aufbau	67
7.1	Wahl des Tracers	67
7.1.1	Streuquerschnitt	68

7.2	Kalibriertargets	68
7.3	Realisierung des Stereoaufbaus	69
7.4	Einbringen des Aufbaus in den Kies	72
7.5	Signalkomponenten	73
7.5.1	Endoskope	73
7.5.2	Lichtleiter	74
7.5.3	Kameras	74
7.5.4	Framegrabber und Computer	75
7.6	Beschreibung der Messungen	76
8	Ergebnisse	79
8.1	Berücksichtigen der Betriebsart	79
8.2	Vorverarbeitung der Kalibrierbilder	80
8.3	Lokalisieren der Kalibriermarken	80
8.4	Ergebnis der Kalibrierung	81
8.5	Ergebnis der Messungen	82
9	Resumee und Ausblick	95

Kapitel 1

Einleitung

Die theoretische und technische Erweiterung der Signalverarbeitung auf Bildfolgen eröffnet zunehmend den Anwendungsbereich raum-zeitlich aufgelöster Messungen. Solche Daten fallen in vielen Disziplinen an, und die digitale Bildverarbeitung ermöglicht die Untersuchung von vielfältigen Prozessen. Die Messung besteht dabei im wesentlichen in einer Detektion von Photonen – eine bei mechanischen Phänomenen störungsfreie Methode. Insbesondere sind Visualisierungen möglich, die sich der direkten Beobachtung entziehen, sei es durch Beschränkungen des Zugangs, der zu hohen oder auch zu geringen Geschwindigkeiten von Objekten oder nicht sichtbaren Lichts im ultravioletten oder infraroten Teil des Spektrums.

Eines der Phänomene, die aufgrund ihrer Größe einfach messbar erscheinen und dennoch nicht weitgehend erforscht sind, ist die Strömung im Flussbett.

Flussläufe entstehen durch Umlagerungen des Bodens aufgrund der angreifenden Kräfte des diesen über- und durchströmenden Wassers. Sie sind ein Produkt der chaotischen Wechselwirkung von Wasser, Boden und Luft und ständigen Änderungen unterworfen. Dabei sind die Zeitskalen der makroskopischen Bewegung zu groß, als dass die morphodynamische Entwicklung von Flussläufen unmittelbar wahrnehmbar wäre. Schon sehr kleine Kräfte können über solche Zeiträume von enormer Wirkung sein.

Da die Ufer im allgemeinen festgelegt sind, finden die meisten Bewegungen an der Sohle statt. Diese schneller fortschreitende Bewegung des Flussbodens ist dem Menschen direkt nur in seichten und schnellen Gewässern einsehbar. Die Veränderung der Sohle ist jedoch von besonderem Interesse bei wasserbaulichen Maßnahmen. Ein Problem besteht dabei in der Unterstützung des Flussbetts. Insbesondere sollte die Schiffbahrkeit zu jeder Zeit gewährleistet sein. Die damit verbundenen Sanierungen sind äußerst aufwändig und kostenintensiv. Die Wirksamkeit und Nachhaltigkeit großer Flussbauwerke ist von der Dynamik des Bodens stark abhängig.

Es besteht aus wirtschaftlichen und ökologischen Gründen ein reges Interesse an der Beschreibung der auftretenden Stömungen.

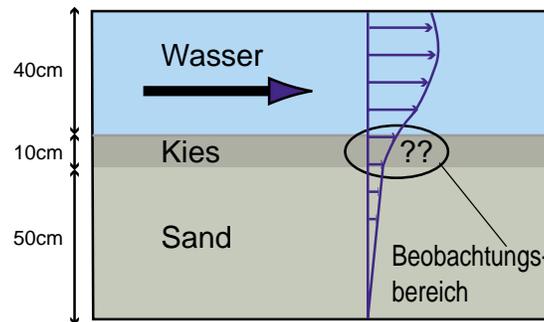


Abbildung 1.1: Skizze der zu untersuchenden Strömungssituation. Bei einer vorgegebenen Hauptströmung ist das vertikale Strömungsprofil in der Kiesschicht von Interesse. Bisher erschien eine Untersuchung in diesem Bereich nicht möglich.

Zur Unterstützung des Flussbodens verwendet man sog. Geofilter. Diese bestehen aus einer Abfolge von Sedimentschichten gewisser Korngrößen, die man bislang heuristisch festlegt. Wegen der Dimension ihres Einsatzes und der Dicke von bis zu 30 cm wirken sie sich stark auf die Kosten aus. Ihre Optimierung bildet das konkrete Ziel der hier vorgestellten Untersuchungen.

Teil I

Theorie der Messaufgabe

Kapitel 2

Physikalische Fragestellung

Die Messaufgabe besteht in der Visualisierung der Strömung in einer Kiespore. Zunächst wird vorgestellt, wie Strömung mathematisch repräsentiert werden kann und grundlegende Gleichungen vorgestellt. Im Anschluss wird der Hintergrund des Problems beschrieben und Methoden der Strömungsmessung verglichen. Es folgt ein Überblick über die in der Bundesanstalt für Wasserbau vorgesehenen Messungen.

2.1 Grundgleichungen der Strömungslehre

Die Bewegungsbeschreibung von Kontinuen, die neben Flüssigkeiten auch Gase umfassen, ist Gegenstand der Hydrodynamik. Eine Strömung wird darin durch ein Geschwindigkeitsvektorfeld im kontinuierlichen Raum $\vec{V}(\vec{U}, t)$ beschrieben.¹ Dabei sind zwei Arten der Darstellung möglich: An einem festen Raumpunkt \vec{U}_k verfolgt man in der *eulerschen Darstellung* die zeitliche Entwicklung der lokalen Geschwindigkeit $\vec{V}(\vec{U}_k, t)$. In der *lagrangeschen Darstellung* wird der Ort eines (punktförmigen) Massenelements m_k über die Zeit angegeben. Die Geschwindigkeit errechnet sich dann aus der zeitlichen Ableitung:

$$\vec{V}_k = \partial_t \vec{U}(m_k, t) . \quad (2.1)$$

Grundsätzlich wird ständige Kontinuität des Mediums vorausgesetzt, d.h. Quellen und Senken der Massendichte $\rho(\vec{U}, t)$ sind eindeutig Ursache der Massenstromdichte $\vec{j}(\vec{U}, t) = \rho(\vec{U}, t) \cdot \vec{V}(\vec{U}, t)$. Mathematisch wird dies in der *Kontinuitätsgleichung*

¹Die Bezeichnung des Ortes durch \vec{U} geschieht zur Konsistenz zu Kapitel 4.

formuliert:

$$\partial_t \rho(\vec{U}, t) + \vec{\nabla} \cdot \vec{j}(\vec{U}, t) = 0. \quad (2.2)$$

Die Beschreibung von Strömungen innerhalb eines Mediums ist schon seit längerem recht gut bekannt. Aus der Impulserhaltung ergibt sich unter Berücksichtigung der Druckkraft $-\vec{\nabla} p$, der äußeren Kräfte \vec{F}_a und der inneren Reibung aufgrund der Viskosität $\eta \Delta \vec{V}$ aus der *newtonschen Grundgleichung* der Mechanik $\frac{d\vec{U}}{dt} = \frac{1}{m} \sum_i \vec{F}_i$ die *Navier-Stokes-Gleichung*:

$$\partial_t \vec{V} + (\vec{V} \cdot \vec{\nabla}) \vec{V} = \vec{F}_a - \frac{1}{\rho} \vec{\nabla} p + \eta \Delta \vec{V}. \quad (2.3)$$

Unter idealisierten Bedingungen kann eine analytische Beschreibung des Randes einfach angegeben werden. Im Fall laminarer Strömung und eines starren, ruhenden Randes folgt die Geschwindigkeit einem parabolischen Profil. In einer unendlich langen zylindrischen Röhre mit Radius R lautet die Lösung in Zylinderkoordinaten (*Hagen-Poiseuille-Gesetz*):

$$V_z = -\frac{dp}{dz} \frac{R^2 - r^2}{4\eta}. \quad (2.4)$$

2.2 Fragestellung der Messaufgabe

Ob ein überströmtes Sandteilchen entlang der Hauptströmungsrichtung abgetragen wird, hängt von dem Zusammenspiel zweier unabhängiger Kräfte ab: einer Scherkraft entlang der Strömung und einer Auftriebskraft, die von der Umströmung des Bodens herrührt.

Im wassernahen Sediment und direkt an der Grenzschicht befindet sich der Bereich, an dem die größte Wechselwirkung der Strömung mit dem Boden stattfindet. Eine grob idealisierte Beschreibung wie die in Gleichung (2.4) gegebene Parabelform des Strömungsprofils findet hier keine Anwendung. Zudem gestaltet das vorhandene poröse Medium eine physikalische Beschreibung der Prozesse sehr schwierig: Neben den festen Sandpartikeln und der umgebenden Flüssigkeit befindet sich zusätzlich eine gasförmige Phase in Form von eingeschlossener Luft mit einem variablen Anteil im Promillebereich. Trotz des geringen Anteils beeinflussen die Luftbläschen den Boden erheblich: Sie dämpfen die Ausbreitung von Druckänderungen, die sich in homogenen Medien mit Schallgeschwindigkeit ausbreiten. Dadurch entsteht bei Druckabfall ein tiefenabhängiger Überdruck im Sediment. Er wird *instationärer Porenwasserüberdruck* genannt und in [KÖHLER 1993] beschrieben. Nach Eintreffen einer Druckwelle bewirkt er eine deren Richtung entgegengesetzte,

kleine Strömung bis sich stationäre Druckverhältnisse einstellen. Diese Strömung bewirkt eine Auftriebskraft an darüber liegenden Kiesteilchen.

Die angesprochene Scherkraft hängt von der Strömungsgeschwindigkeit direkt an der Grenzschicht ab. Diese Geschwindigkeit entbehrt bislang einer adäquaten Beschreibung und Messung.

Eine Vorhersage des Geschwindigkeitsprofils an der Grenzschicht wird in [KOENDERS 2000] unternommen. Folgende Situation wird behandelt (vgl. Abb. 2.1): Eine feine Grundsicht wird von einer gröberen Schutzschicht überdeckt, welche turbulent durchströmt wird. Entgegen einer eindimensionalen Betrachtung von [J. SHIMIZU 1990], die einen vertikalen Schnitt modellieren, werden höherdimensionale Effekte berücksichtigt. Alle Gleichungen werden von der Kontinuitätsgleichung und der sog. *Forcheimer-Relation* gegeben. Diese setzt die zeitgemittelte Filtergeschwindigkeit \vec{v} und den turbulenz erzeugten Druckgradienten $\vec{\nabla}p$ in Abhängigkeit der (positiven) laminaren und turbulenten Permeabilitäten C_l und C_t in Beziehung:

$$\vec{\nabla}p = -(C_l\vec{v} + C_t|\vec{v}|\vec{v}) . \quad (2.5)$$

Bei Erfüllung der Randbedingungen sind die Gleichungen in linearisierter Form lösbar. Damit lässt sich eine Transferfunktion² bestimmen, die den Quotienten aus Geschwindigkeit an der Sedimentobergrenze und der Druckschwankung über dem Kies beschreibt. In dieser Arbeit soll eine Messapparatur entwickelt werden, die eine experimentelle Bestimmung dieser Transferfunktion ermöglicht.

2.3 Strömungsmessmethoden

Die Messung einer raumzeitlich variierenden Vektorgröße ist allgemein ein schwieriges Problem. Gerade bei der Untersuchung von Strömungen sind Störungen durch Invasion des Mediums mit der Messapparatur schwierig zu vermeiden. Eine strömungsinduzierte Kraftmessung an einem Punkt kann also nur indirekt gemessen werden. Man behilft sich meist mit der Zugabe lokalisierter etwa punktförmiger Teilchen, die man außerhalb des Messvolumens zufügt. Dies können Luftbläschen oder Tracerteilchen sein, die der Strömung folgen (vgl. Abschn. 7.1). Eine theoretische Untersuchung dazu findet sich in [WIERZIMOK 1991].

Häufig eingesetzte Verfahren sind:

²Die Begriffe „Transferfunktion“ und „Filter“ sind nicht mit denen in Kapitel 5 zu verwechseln.

Laser Doppler Anemometrie (LDA)

Dieses Verfahren macht sich den Doppler-Effekt eines bewegten Teilchens zunutze, wonach die Frequenz einer abgestrahlten Welle von der Geschwindigkeit der (Streu-)Quelle abhängt. Zwei Laserstrahlen werden dazu im Messbereich zur Deckung gebracht. Ihr Interferenzmuster wird von einem bewegten Teilchen durchlaufen, dessen Streuintensität dabei variiert. Ein Photodetektor benutzt dieses Signal zur Berechnung der Partikelgeschwindigkeit. Dieses Prinzip benutzt die Welleneigenschaften des Lichts und kann auch mit akustischen Wellen umgesetzt werden. Die Messung ist dabei auf den Kreuzbereich der Strahlen beschränkt und hat punktförmigen und zeitlichen Charakter, wobei die Abtastrate 100kHz erreichen kann.

Particle Imaging Velocimetry (PIV)

Bei dieser Messmethode wird mit einer Kamera eine Bildfolge von dichten Tracern aufgenommen. Durch Kreuzkorrelation mit dem zeitlich folgendem Bild wird ein Verschiebungsvektorfeld ermittelt. Wie auch beim LDA entspricht dies einer eulerschen Darstellung der Strömung. Besonders gut geeignet ist diese Methode beispielsweise zur Beobachtung an der Wasseroberfläche, die eine Beobachtungsebene definiert. Tiefeninformation kann dabei durch Verändern des Messbereichs beispielsweise beim Durchfahren eines Volumens mit einem Lichtschnitt rekonstruiert werden (s. auch S. 25).

Particle Tracking Velocimetry (PTV)

Entsprechend der lagrangeschen Darstellung werden einzelne Teilchen verfolgt und zu Trajektorien zusammengesetzt. Ein dichtes Strömungsfeld wird dabei erst durch eine ausreichende Anzahl von Spuren erzeugt. In einer Bildfolge ist diese auf etwa 1000 Spuren begrenzt. Der Vorteil dieses Ansatzes ist die bei relativ einfacher Messapparatur mögliche 3D-Rekonstruktion mittels Stereoskopie. Turbulenzen werden dabei gut erfasst. Das Vorgehen wird in Kapitel 6 erläutert.

2.4 Kontext der Messaufgabe

Die Abteilungen Geotechnik und Wasserbau der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) in Karlsruhe haben ein Forschungsvorhaben zur Klärung der Strömungs- und Transportprozesse im Interstitial und deren Interaktion mit der Hauptströmung begründet.

In der international besetzten Forschungskoooperation FERC (*Filter and Erosion Research Club*) arbeiten mehrere Partnergruppen der BAW an der Fortentwicklung

der theoretischen Grundlagen, an Laboruntersuchungen für den sohnahen Bereich und des Porenraumes sowie der Entwicklung und Validierung von Software zur 3D-Modellierung von Strömung und Transport.

Zur Strömungsmessung werden mehrere Verfahren kombiniert (vgl. Abb. 2.1). Dazu ist eine bestehende Wasserrinne an der BAW vorbereitet worden. Ihre Länge

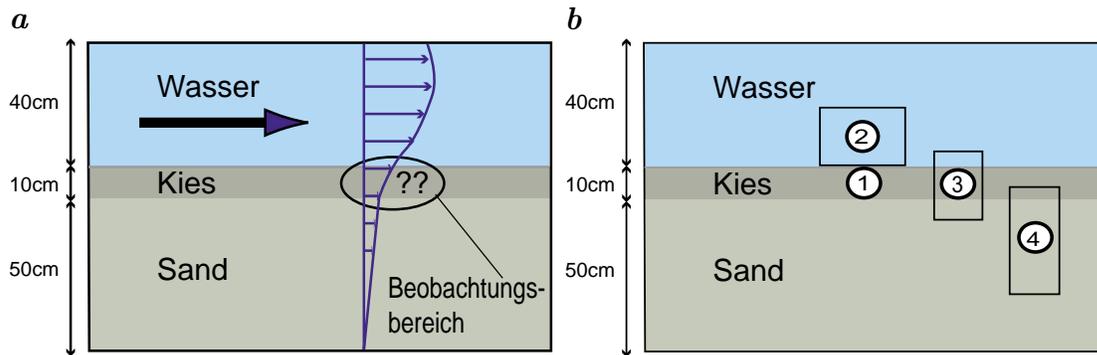


Abbildung 2.1: **a** Seitenansicht der geplanten Messungen an der BAW-Wasserrinne. Die Hauptströmung ist nach rechts gerichtet. Nähere Erläuterungen im Text. **b** Orte der Messungen.

beträgt 60 m. Für die Messungen wurde ihre Breite durch eine Trennwand auf 0,9 m verkleinert. Folgende Messungen sind vorgesehen:

1. Der hier beschriebene miniaturisierte Aufbau im Kiesbett.
2. Untersuchungen der Strömungsgeschwindigkeit an der Grenzschicht mittels LDA und PTV
3. Verlagerungen des Bodens werden mit einem Periskop beobachtet.
4. Eine Untersuchung der Lage der Kies-Sand-Grenzschicht mittels eines Periskops.

Außerdem soll der vertikale Druckverlauf an mehreren Orten simultan zur Strömungsmessung erfasst werden. Der Beginn der eigentlichen Messphase ist für Mitte Juli 2000 angesetzt.



Abbildung 2.2: Foto der Versuchsrinne an der BAW.

Kapitel 3

Messsystem

Die gewählten Aufnahmekomponenten vor der Digitalisierung wirken sich auf die Qualität und Charakteristik der Bilddaten aus. Besonderen Einfluss haben bei dieser Arbeit die Endoskope und Kameras, auf die nun etwas genauer eingegangen werden soll. Um das Prinzip der 3D-Rekonstruktion zu erläutern, folgt ein Abschnitt über Stereoskopie.

3.1 Optische Abbildung von Glasfaserendoskopen

Meist werden zur Abbildung auf eine lichtempfindliche Fläche Linsensysteme eingesetzt. Das Licht wird dabei strahlförmig durch Luft oder Glas übertragen und durch Brechung umgelenkt. Bei den in diesem Aufbau verwendeten Glasfaserendoskopen geschieht die Übertragung folgendermaßen: Eine Linsenoptik sorgt für das Einkoppeln des Lichts in die distale Endoskopöffnung. Es wird durch ein Glasfaserbündel geleitet und trifft am anderen Ende wieder auf ein herkömmliches Linsensystem, welches das Bündel auf den Kamera-Chip abbildet (vgl. Abschnitt [3.1.2](#)).

3.1.1 Lichtleitung durch Glasfasern

Soll Licht durch eine flexible Verbindung geleitet werden, bevor man es mit einer Kamera ausliest, so ist man auf die Übertragung durch Glasfasern angewiesen. Dieses Problem ist von Beobachtungen an unzugänglichen Stellen, wie sie in der Medizin oder bei Materialprüfungen auftreten, bekannt. Dort sind Glasfasermedien zur Bildübertragung schon seit längerem gebräuchlich. Bei Bildleitern, die

alle Bildpunkte simultan übertragen, ist darauf zu achten, dass die Anordnung der vielen tausend Fasern an beiden Enden identisch ist. Aus diesem Grund eignen sich die in vielen Beleuchtungen benutzten Flüssiglichtleiter nicht zur Bildübertragung. Die serielle Übermittlung von bereits digitalisierten Signalen betrifft diese Einschränkung freilich nicht. Damit eignen sich Glasfasern auch für die digitale Telekommunikation.

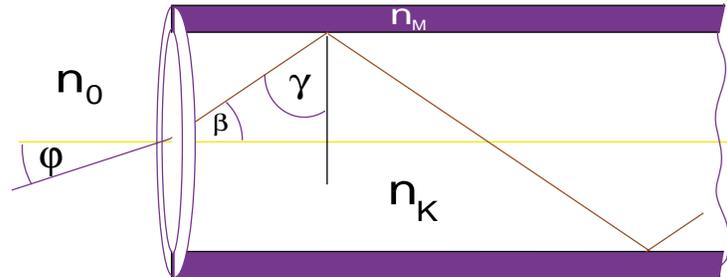


Abbildung 3.1: Skizze des Lichtwegs in einer Glasfaser

Die Faserkerne bestehen aus Glas, Quarz oder Kunststoff mit einem Brechungsindex n_K und sind von einem dünnen Mantel mit Brechungsindex $n_M < n_K$ umhüllt. Der Brechungsindex des umgebenden Mediums sei n_0 . Das Licht wird bei ständiger Totalreflexion im Kern gehalten (vgl. Abb. 3.1). Totalreflexion setzt jedoch zur Normalen des Mantels erst bei einem Grenzwinkel $\gamma_G = \arcsin\left(\frac{n_M}{n_K}\right)$ ein, womit nur Licht in der Faser übertragen wird, das in einem Winkel zu ihrer Achse

$$\varphi \leq \varphi_G = \arcsin\left(\frac{n_K}{n_0} \cos \gamma_G\right) = \arcsin\left(\frac{\sqrt{n_K^2 - n_M^2}}{n_0}\right) \quad (3.1)$$

einfällt. Beim Austritt gilt eine analoge Betrachtung, wodurch der Austrittswinkel vom umgebenden Medium abhängt.

Ein Nachteil der Glasfaserleitung gegenüber reinen Linsensystemen besteht in der schwachen Transmissivität, die bei nur etwa 30-50% liegt. Zum einen wird nicht die volle Fläche zur Übertragung genutzt, da die Mantelflächen die Fasern ausdehnen und außerdem die Packungsdichte der kreisförmigen Leiter selbst bei dichtester Dreieckspackung auf 90,7% beschränkt ist [EHRBÄCHER 1999]. Zum anderen treten Verluste innerhalb der Faser auf: Auf 1 m Länge sind $N_R = \text{einige } 10^4$ Totalreflexionen möglich, die nicht ganz störungsfrei vonstatten gehen. Die Weglänge des Lichts ist dadurch ebenfalls gegenüber der Länge der Faser l auf $L_{Weg} = N_R \frac{l}{\cos(\beta)}$ erhöht, womit die Absorption nach dem Lambert-Beer-Gesetz entsprechend ansteigt. Eine vertiefende Betrachtung zur Lichtleitung in Glasfasern findet sich bei [YOUNG 1997].

3.1.2 Das übertragene Bild

Das Licht fällt nach Austritt auf eine Linsenoptik, die mit einem C-Mount-Standardanschluss auf die Kamera montierbar ist. Man erhält eine Abbildung eines Faserbündels, dessen Auflösung durch die Anzahl der Fasern und deren Packungsdichte bestimmt ist (vgl. Tab. 7.4). Bei den Aufnahmen wurde eine Größe von 664×544 Pixel¹ gewählt, um den abgebildeten Bildkreis möglichst vollständig aufzunehmen. Während innerhalb dieses Kreises etwa $N_p = 240.000$ Pixel liegen, ist die Anzahl der Bildfasern auf der gleichen Fläche lediglich $N_I = 10.000$ oder $N_{II} = 30.000$. Man führt ein Überabtasten der Bildinformation durch, indem man auf ein feineres Pixelraster Bildpunkte abbildet. Dadurch werden die einzelnen Glasfasern als Wabenstruktur sichtbar, welche weitaus gröber als die Pixelauflösung ist (s. Abb. 8.2a). Sichtbar ist die Struktur nur in Bereichen, in denen die Grauwerte über der Rauschgrenze liegen.

Seien n_I und n_{II} die Verhältnisse der Bildpunkte im Bildkreis zu denen der Glasfasern,

$$n_{I,II} = \frac{N_p}{N_{I,II}} \quad (3.2)$$

so beträgt wegen des quadratischen Zusammenhangs der Fläche zum Radius die Ausdehnung in jede Richtung

$$d_{Wabe_{I,II}} = d_{Pixel} \sqrt{n_{I,II}} \quad (3.3)$$

und damit $d_{Wabe_I} \simeq 5$ Pixel und $d_{Wabe_{II}} \simeq 3$ Pixel.

In Kapitel 5 werden einige Algorithmen vorgestellt, die diese Strukturen reduzieren.

3.2 Einfluss der Kameras und der Digitalisierung

Um die raumzeitliche Beziehung zwischen der Beleuchtung des CCD²-Chips und der Grauwertfunktion $g(\vec{u}, t)$ eines Pixels zu verstehen, wird zunächst ein Exkurs über die Funktionsweise einer CCD-Kamera unternommen. Dabei sollen insbesondere die Betriebsarten der Video-Norm und das Rauschen betrachtet werden.

¹picture element

²charged coupled device

3.2.1 Funktionsweise einer CCD-Kamera

Um ein Bildaufnahmesystem mit mehreren kommunizierenden Komponenten in Betrieb nehmen zu können, muss man sich auf eine Übertragungsnorm einigen. Man bedient sich der verbreiteten Video-Normen, die auch zur Übertragung von Fernsehbildern benutzt werden: Die europäische CCIR-Norm, die Halbbilder mit der Frequenz von 50 Hz abtastet, und die US-amerikanische Norm (als RS170 oder EIA bezeichnete 60 Hz-Norm).³

Ladungstransport auf dem CCD-Chip

CCD-Chips sind seit 1969/1970 erhältlich und haben sich als wichtige optoelektronische Bildwandler etabliert [STRÜDER 1998]. Der Chip besteht aus einer Matrix von Grundelementen konstanter Größe (s. Abb. 3.2a). Die Flächen der Grundelemente unterteilen sich bei einem Sensor des Zeilentransfer-Typs in einen Belichtungs- und einen Speicherbereich.⁴ Nur der Belichtungsbereich ist für Photonen sensitiv. Eine kurze Beschreibung liefert beispielsweise [WUETSCHNER 1997].

Die Sensoren im Belichtungsbereich bestehen aus Silizium-Feldeffekt-Transistoren, in deren Raumladungszone mittels Photoeffekt Ladungspaare erzeugt und durch die Raumladung getrennt werden. Im Bändermodell beschrieben heben die einfallenden Photonen durch ihre Energie Elektronen in das Silizium-Leitungsband. Die getrennten Ladungen werden eine Belichtungszeit t_e lang akkumuliert (s. Tabellen 3.1–3.2), wobei pro μm^2 einige 10^3 Photonen gesammelt werden können, bevor die Kapazität der Zelle erreicht ist und sog. *blooming* auftritt. Das Potenzial der Zelle erstreckt sich beim blooming auf benachbarte Zellen, die dadurch ebenfalls Ladung tragen, was einen Messfehler darstellt [SEITZ 1999]. Die Ladungspakete stellen den eigentlichen physikalischen Messwert dar; er ist bis zum Analog-Digital-Wandler (ADC) im Computer analog. Um dorthin zu gelangen, muss die Ladung abtransportiert werden, was in sog. Schieberegistern vonstatten geht (vgl. Abb. 3.3). Das Prinzip des Ladungstransports entspricht dem einer Eimerkette. Jedes der Schieberegister besteht aus drei bis vier einzeln ansteuerbaren Phasenelementen, die eine Ladungsbarriere oder eine Senke darstellen. Durch elektronisches Verschieben der Barrieren wird das Ladungspaket dann in eine Richtung transportiert und innerhalb von ca. $2,5 \mu\text{s}$ in den angrenzenden Speicherbereich geschoben. Die Ladungen aller Pixel werden vertikal in ein Ausleseregister geschoben und von dort horizontal als Zeile pixelweise ausgegeben. (s. Abb. 3.4).

³ Da für diese Arbeit CCIR-Kameras benutzt wurden, beziehen sich die folgenden Angaben nur auf diese Norm.

⁴ Auf die Eigenschaften der Sensoren des Bildtransfer-Typs soll hier nicht eingegangen werden.

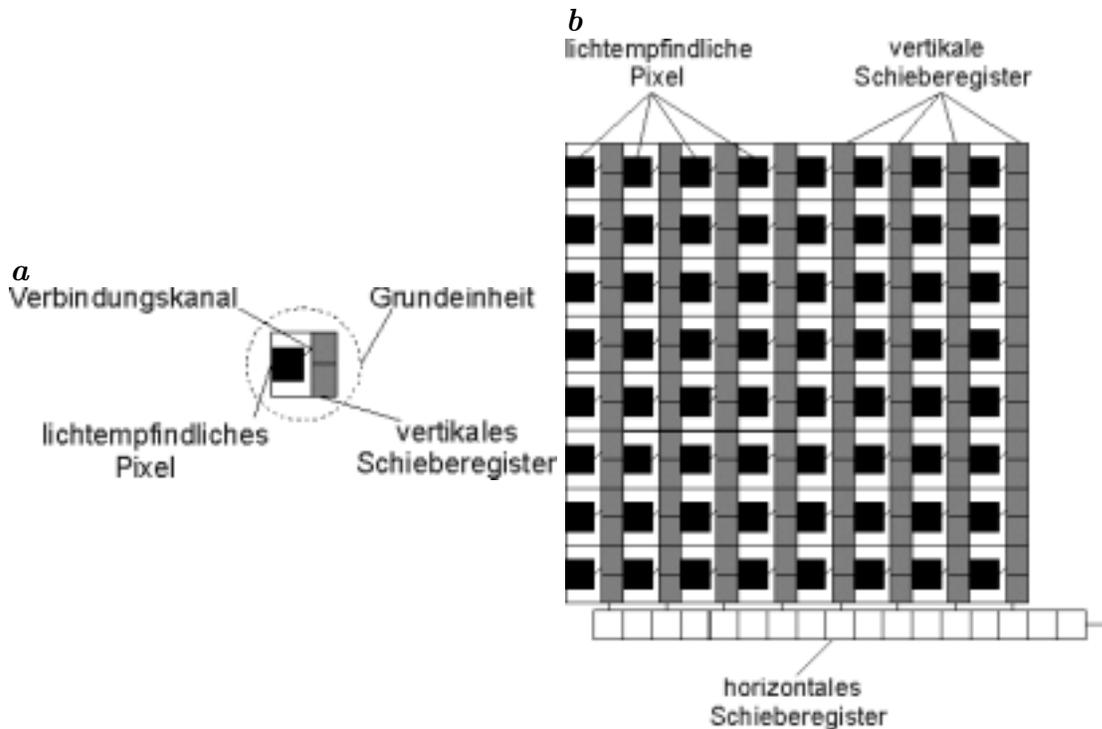


Abbildung 3.2: Aufbau eines Zeilentransfer CCD-Sensors. **a** Grundelement des Chips. Die einzelne Zelle besteht aus einem lichtempfindlichen Bereich und einem Register, das dem Speichern dient. **b** Gesamte Chipfläche, zusammen gesetzt aus Grundelementen. Direkt verbunden sind die vertikalen Ausleseregister, die alle in ein horizontales Register münden.

Eine Zeile wird in $64 \mu\text{s}$ zuzüglich einer Austastlücke von $11,52 \mu\text{s}$ übertragen. Dieser Vorgang wiederholt sich für maximal 312 Zeilen eines Halbbildes.

Betriebsarten der Bildübertragung: interlaced und non-interlaced

Bei herkömmlichen Bildschirmen wie Monitoren und Fernsehern handelt es sich um Kathodenstrahlröhren (*cathode ray tube, CRT*), bei denen ein Elektronenstrahl von Ablenkungsmagneten in horizontaler und vertikaler Richtung auf den Bildschirm positioniert wird, der an dieser Stelle nachleuchtet.

Um ein Bild darzustellen, werden zwei Bewegungen überlagert: Die Zeilen werden relativ schnell nacheinander durchlaufen, während sich ihre vertikale Position bei jedem Rücklauf verschiebt, bis das untere Ende erreicht ist. Die Zeilen werden bei der Video-Norm nicht weiter diskretisiert, sondern als ein analoges Signal mit

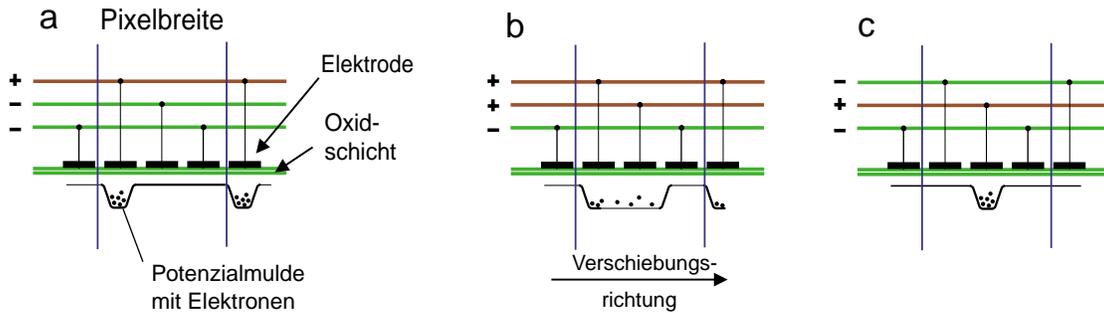


Abbildung 3.3: Verschieben von Ladungen aus den CCD-Sensoren im Eimerkettenprinzip. In a,b,c sind zeitlich aufeinander folgende Stadien dargestellt. (nach [SEITZ 1999])

$f_z = 15,625$ kHz gesendet.⁵ Dadurch kann das Ende der Zeile etwas variieren (sog. *line jitter*), was bei der Kalibrierung berücksichtigt werden muss (s. Kap. 4). Bei den verwendeten Kameras liegt die *jitter* $\delta t_j < 50$ ns. Ein Zeile kann somit bei einer Zeilenlänge von $S_z \simeq 750$ Pixel um

$$\delta S_z = \pm S_z f_z \delta t_j \simeq \pm 0,6 \text{ Pixel} \quad (3.4)$$

variieren.

Bei jedem horizontalen und vertikalen Rücklauf entstehen Austastlücken, in denen auch Synchronisationssignale gesendet werden, womit man eine theoretisch übertragene Bildgröße von dem effektiv sichtbaren Bild unterscheiden muss. Nachdem der Kathodenstrahl das Bild durchlaufen hat, folgt eine vertikale Austastlücke, deren Dauer der Übertragung von 25 Zeilen entspricht. Fünf solcher leeren Zeilen werden zur Synchronisation genutzt.⁶

Mit der bei Festlegung der Fernsehnorm verfügbaren Übertragungsbandbreite von 5 MHz stößt man bei der erreichbaren Bildauflösung schnell an Grenzen. Um die Auflösung zu erhöhen, bedient man sich der *interlaced*- oder Halbbildtechnik, bei der ein Vollbild (*frame*) in zwei Halbbilder (*fields*) unterteilt wird.⁷ Das beschriebene Abtasten des Bildes wird nur für jede zweite Zeile vorgenommen; danach

⁵ Alternativ kann man ein zusätzliches „pixel clock“-Synchronisationssignal senden.

⁶ Diese Lücke ist übrigens groß genug, um weitere Signale wie Videotext zu übertragen.

⁷ Die interlaced-Technik ist grundsätzlich auch für Teilbilder mit größerem, ganzzahligem Verhältnis der fields:frame als 2:1 möglich.

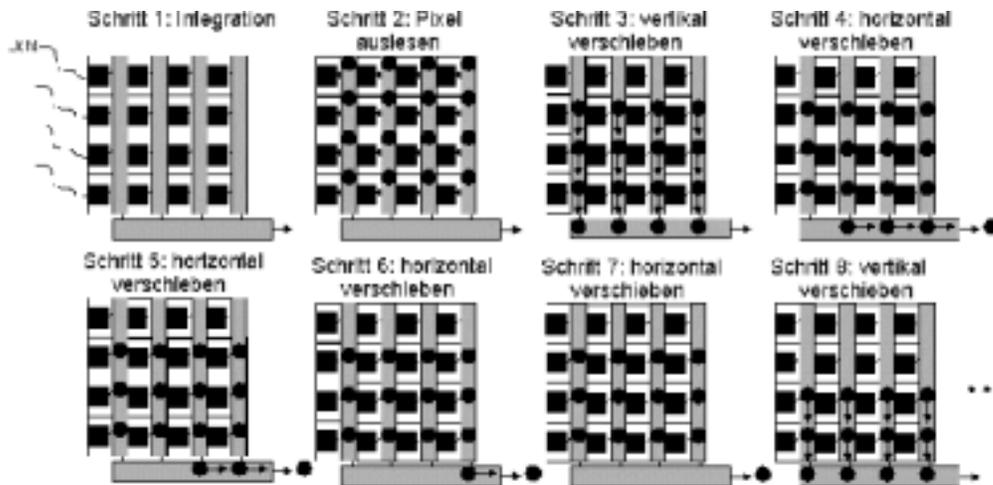


Abbildung 3.4: Ausleseprozess in einem Belichtungszyklus. Die Integrationsdauer (Schritt 1) entspricht der Belichtungszeit, die weiteren Schritte erfolgen in jeweils ca. $2,5 \mu\text{s}$ parallel zur nächsten Belichtung.

wiederholt es sich mit dem versetzten, zweiten Halbbild. Dies bedeutet, dass die vollen Bilder eigentlich mit 25 Hz dargestellt werden, was vom menschlichen Auge jedoch nicht als störend empfunden wird [PRATT 1991]. Auf diese Weise werden 625 Zeilen interlaced übertragen, von denen 576 sichtbar sind. Wenn man von quadratischen Pixeln ausgeht, entsprächen ihnen 768 Pixel pro Zeile. Das Verhältnis von horizontaler und vertikaler Seitenlänge wurde auf 4:3 festgelegt.

Heutzutage sind größere Bandbreiten verfügbar, jedoch wird die etablierte Fernsehnorm bei CCD-Kameras weiterhin genutzt. Die neuere HDTV-Norm verwendet beispielsweise eine Bandbreite von 75 MHz und eine Auflösung von 1868×1050 Pixel bei 60 Hz, wiederum interlaced.⁸ Computermonitore werden intensiver als Fernseher betrachtet. Um die Ergonomie zu verbessern werden sie im non-interlaced Modus betrieben. Die immer etwas getrennten Linien aus zwei Halbbildern treten dann nicht auf.

Bei den CCD-Kameras werden diskrete Bildelemente ausgelesen, wovon bei den verwendeten Kameras 752×582 rechteckig angeordnet sind. Von diesen kann ein Teilfeld über Software-Ansteuerung ausgewählt werden. Ein weiterer, wichtiger Unterschied zur Fernsehnorm besteht bei CCD-Kameras darin, dass man sie auch non-interlaced betreiben kann. Man verliert dann die halbe vertikale Auflösung, was jedoch wegen der Größe der Waben (s. Gl. (3.3)) keinen Informationsverlust darstellt. Die Unterschiede der Betriebsarten sind in Tabellen 3.1–3.2 zusammengefasst. Neben dem benutzten *frame integration*-Modus wird noch ein *field*

⁸Das Verhältnis der Seitenlängen ist dabei 16:9.

Tabelle 3.1: Vergleich *interlaced/non-interlaced* im *frame integration* Modus der *Sony XC-73 CE*

Betriebsart:	interlaced	non-interlaced
Effektive Zeilen	582	291
Belichtungszeit	40 ms	20 ms
	überlappend	getrennt
ausgelesene Sensorzeilen	wechselnd getrennt	konstant
field1	1 3 5 ...	2 4 6 ...
field2	2 4 6 ...	2 4 6 ...

integration-Modus von der Kamera unterstützt, bei dem die Ladungen aus zwei benachbarten Zeilen addiert werden. Dies erhöht die Helligkeit der Bilder und sollte bei Messungen wegen des besseren Signal-zu-Rausch-Verhältnisses gewählt werden. Im non-interlaced Modus werden fortwährend die gleichen Sensorzeilen ausgelesen, was eine Kalibrierung vereinfacht. Die interlaced Betriebsart ist sowohl im field integration als auch im frame integration Modus ungeeignet: Entweder überlappt in den Bildfolgen der abgetastete Ort oder die Integrationszeit.

3.2.2 Rauschen

Insbesondere die Messaufnahmen weisen ein kleines Signal-zu-Rausch-Verhältnis (SNR) auf. Das Gesamtrauschen setzt sich aus mehreren Anteilen zusammen. Betrachtungen dazu bieten [STRÜDER 1998] und [HEALEY und KONDEPUDY 1994].

Dunkelstromrauschen: Die Besetzungszahl $n(E, T)$ der Elektronen mit Energie E in einem Festkörper der Temperatur T folgt der *Boltzmannverteilung*:

$$n(E, T) \propto \exp\left(-\frac{E}{k_B T}\right) \quad (3.5)$$

mit der Boltzmannkonstanten k_B . Es sind demnach einige der Elektronen so energiereich, dass sie die Bandlücke überwinden können und die gleiche Wirkung wie ein detektiertes Photon haben. Die so erzeugte Dunkelladung ist bei gegebener Dichte der Elektron-Loch-Paare nur von der Auslesezeit und von der Temperatur abhängig, nicht jedoch von der Signalstärke. Ein Absenken der Temperatur um 6-8° C halbiert die Dunkelladung. Der Fehler hängt

Tabelle 3.2: Vergleich interlaced/non-interlaced im field integration Modus der Sony XC-73 CE

Betriebsart:	interlaced	non-interlaced
Effektive Zeilen	410	291
Belichtungszeit	20 ms	20 ms
	getrennt	getrennt
ausgelesene Sensorzeilen	wechselnd	konstant
	überlappend	
	field1	1+2 3+4 5+6 ...
field2	2+3 4+5 6+7 ...	1+2 3+4 5+6 ...

von der Quadratwurzel dieser Ladung ab. Bei dem gewählten Aufbau erscheint ein signifikantes Absenken dieser Rauschquelle durch Abkühlen nicht praktikabel.

Quantisierungsrauschen: Beim Abbilden eines analogen Messwerts auf eine Zahl ergibt sich ein Rundungsfehler, der als Rauschen bezeichnet werden kann. Unter der Annahme, dass die Quantisierungsstufen g_q den gleichen Abstand δg haben und alle Grauwerte gleich wahrscheinlich sind, beträgt die Varianz [JÄHNE 1997]

$$\sigma_q^2 = \frac{1}{\delta g} \int_{g_q - \delta g/2}^{g_q + \delta g/2} dg (g - g_q)^2 = \frac{(\delta g)^2}{12}. \quad (3.6)$$

Die Standardabweichung σ_q beträgt demnach etwa $0,3 \delta g$. Das bedeutet, dass die Diskretisierung bei sehr niedrigen Grauwerten einen markanten relativen Fehler erzeugt. Durch den Einsatz von Verstärkern in den Analog-Digitalwandlern sind die Quantisierungsstufen allerdings nicht mehr äquidistant. Das Quantisierungsrauschen wird dadurch signalabhängig. Da mehrere Verstärker in Serie benutzt werden, ist eine genauere Bestimmung des Quantisierungsrauschens nicht trivial.

Quanten- oder Schrotrauschen: Das Aussenden von Photonen aus einer Streuquelle geschieht nach der Quantentheorie nichtdeterministisch mit einer Wahrscheinlichkeit p . Selbst bei vollständig bekannten Parametern unterliegt die Spannung, die durch die Zahl der eintreffenden Photonen $N(p)$ erzeugt wird, Schwankungen. $N(p)$ folgt der Poisson-Statistik mit der Schwankung \sqrt{N} . Pro Auslesezyklus werden einige 10^3 Photonen gesammelt, so dass

sich ein Fehler von etwa 0,3% ergibt. Schrotrauschbegrenzte Messungen werden bei hochpräzisen Untersuchungen mit gekühlten Kameras erreicht.

Verstärkerrauschen: Ein idealer Verstärker lässt das Signal-zu-Rausch-Verhältnis unverändert, da er beide Anteile gleichermaßen anhebt. Je nach Bauweise reduziert sich allerdings das SNR verstärkungsabhängig durch einen Rauschanteil der Baugruppen. Sowohl in der Kamera als auch im ADC des Framegrabbers tritt diese Art des Rauschens auf. Die beste Möglichkeit, diese Rauschquelle zu reduzieren, ist das Erhöhen des Helligkeitsniveaus, was eine schwächere Einstellung des Verstärkers erlaubt.

Die größten Rauschanteile bilden das Dunkelrauschen und das Verstärkerrauschen.

Es ist weiterhin von Interesse, ob sich das Rauschen auf ein Pixel beschränkt oder ausgedehnt auftritt und dem Rauschen die Form einer ausgedehnten Struktur gibt. Dies muss bei der Segmentierung zur Erkennung von Teilchenspuren beachtet werden. Ein Maß für die Korrelation der Rauschpunkte bietet die *Autokovarianz* C_{ak} eines Bildes der Größe $M \times N$:

$$C_{ak}(k, l) = \frac{1}{MN} \sum_{m,n} (H_{m,n} - \langle H_{m,n} \rangle) (H_{m+k,n+l} - \langle H_{m+k,n+l} \rangle) \quad (3.7)$$

Diese wurde für eine CCD-Kamera von [SPIES 1998] aus gemessenen Daten be-

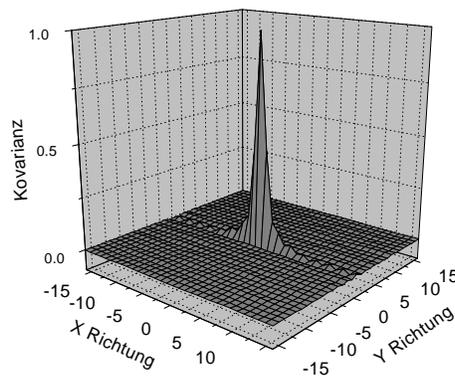


Abbildung 3.5: Autokovarianz des Rauschens einer CCD-Kamera. Quelle: [SPIES 1998]

rechnet (s. Abb. 3.5). Die Arbeitsweise des CCD-Chips führt lediglich zu einer horizontal ausgedehnten Autokorrelation durch das zeilenweise Auslesen. Jedoch sind die Ausdehnung und die Häufigkeit für eine Segmentierung irrelevant.

3.3 Miniaturisierte Stereoskopie

Das Kernstück der Messsystems besteht aus einem Stereoaufbau, auf dessen Prinzip im folgenden eingegangen wird. Wichtig dabei ist die Optimierung der stereoskopischen Basis, da sich diese auf die Grenzen der Messung auswirken.

3.3.1 Alternative 3D-Verfahren

Da für die Messungen im Porenraum teure, sonderangefertigte Endoskope erforderlich sind, lohnt sich die Untersuchung anderer Verfahren, die mit einer Kamera auskommen.

Ein Bild bildet raum-zeitlich gesammelte Information auf eine Fläche ab. Bei einer Bildaufnahme geht also grundsätzlich eine Dimension verloren. Ist man an einer raumzeitlichen Information mittels Bildfolgenanalyse interessiert, so muss die Tiefeninformation rekonstruiert werden. Dafür bieten sich grundsätzlich eine Vielzahl von Verfahren an. Einige davon können jedoch nur auf statische Objekte angewandt werden. Dazu zählen Tomografien, Tiefenbildserien (*Depth from focus*) oder Serien von Bildern einer bewegten Kamera aus verschiedenen Positionen (*Depth from motion*). Letzteres Verfahren unterscheidet sich von einem Stereoaufbau dadurch, dass aus den verschiedenen Perspektiven nicht simultan aufgenommen werden kann. Ein Aufbau, der das Bewegen der Kamera vorsieht, ist ebenfalls ausgeschlossen. Fotogrammetrische Verfahren, wie die *Streifenlichtprojektion*, bei der durch Beleuchtung mit kodierten Streifenmustern ein Objekt vermessen wird, können nur auf statische Objekte angewandt werden.

Bei sich schnell bewegenden Objekten ist man darauf angewiesen, zu jedem Zeitpunkt Daten erfassen zu können, die auf die Tiefe schließen lassen. Ein Ansatz besteht darin, von vorneherein nur einen begrenzten Tiefenbereich auszuleuchten und damit die detektierbaren Objektbewegungen auf zwei Dimensionen zu beschränken (*Lichtschnitt*, s. z.B. bei [HERING 1996]). Diese Aufnahmetechnik ist bereits für die vorliegende Anwendung in [EHRBÄCHER 1999] untersucht worden. Dabei gehen Bewegungen quer zu dieser Ebene verloren, weil sie den Bereich schnell wieder verlassen. Bei der Untersuchung einer Strömung ist dies sehr einschränkend und ineffizient. Die exakte Positionierung ist in der gewünschten Größenordnung aufwändig.

Desweiteren besteht die Möglichkeit, die Tiefeninformation aus der Schärfe und Helligkeit der Partikel abzuschätzen (*Depth from (de)focus*), s. [EHRBÄCHER 1999]. Dabei ist man auf eine gute Formanalyse und Segmentierung angewiesen. Es hat sich gezeigt, dass ein solches Vorgehen nicht die geforderte Genauigkeit erreichen kann.

3.3.2 Prinzip des Stereoaufbaus

Um die Einschränkungen der eben genannten Verfahren zu vermeiden, wurde hier der Stereoaufbau gewählt. Dabei nehmen mindestens zwei Kameras einen überlappenden Bildbereich⁹ aus verschiedenen Perspektiven auf.¹⁰ Diese Lösung entspricht prinzipiell dem Stereosehen des Menschen und des Großteils der Fauna. Möglich ist diese Tiefenrekonstruktion aufgrund der Differenz der Positionen auf den Bildebenen, der sog. Disparität oder Parallaxe p .

Wenn ein Objekt im Überlappbereich eindeutig in beiden Bildern identifiziert wird, kann aus den jeweilig zweidimensional bekannten Positionen per Triangulation die dritte Dimension bestimmt werden. Bei ununterscheidbaren Teilchen setzt dies eine bekannte relative Lage der Kameras voraus¹¹, was durch eine 3D-Kalibrierung erreicht wird.

Die wichtigen Parameter des Stereoaufbaus sind der Abstand der Kameras voneinander – die stereoskopische Basis \vec{b} – und der Konvergenzwinkel α des Systems (vgl. Abb. 3.6). Die (halben) Öffnungswinkel der Endoskope ζ_1, ζ_2 und deren Brennweiten seien bekannt und fest; der Kreuzungspunkt \vec{K} soll im Raum die Halbierende des Abstands der optischen Achsen markieren. In der Darstellung ist dies der Schnittpunkt K . Δs bezeichnet den unterschiedlichen Abstand der Kameras vom Schnittpunkt der optischen Achsen und soll verdeutlichen, dass der Aufbau nicht vollkommen symmetrisch angeordnet ist.

Verlaufen die optischen Achsen parallel, so überlappen die Bildbereiche nur schwach, jedoch ist die Bildgeometrie recht einfach. In diesem Fall hat der Parallaxenvektor \vec{p} die gleiche Orientierung wie \vec{b} . Sein Betrag p ist umgekehrt proportional zur Tiefe, womit die Sensitivität für die Tiefenschätzung mit dem Quadrat der Entfernung abnimmt:

$$p = d \frac{b}{X_3} \Rightarrow \frac{\partial p}{\partial X_3} = -d \frac{b}{X_3^2} \quad , \quad (3.8)$$

d entspricht etwa der Brennweite und interessiert hier nur als Proportionalitätskonstante. Mit der Stereobasis vergrößert sich die Disparität.

Wie unten erläutert wird, sind die Achsen zueinander geneigt anzuordnen. Dann tritt zusätzlich eine Parallaxe senkrecht zur Stereobasis auf; beide sind von der

⁹Im folgenden Stereo- oder Überlappbereich genannt oder mit SS bezeichnet.

¹⁰Obwohl ein solcher Aufbau auch mit mehreren Kameras möglich ist, soll im folgenden von einem echten Stereoaufbau mit genau zwei Kameras die Rede sein.

¹¹Statt der Lage der Kameras geht bei geometrischen Betrachtungen der Ausrichtung der Endoskopspitzen ein. Im folgenden wird etwas ungenau weiterhin von „Kameras“ gesprochen.

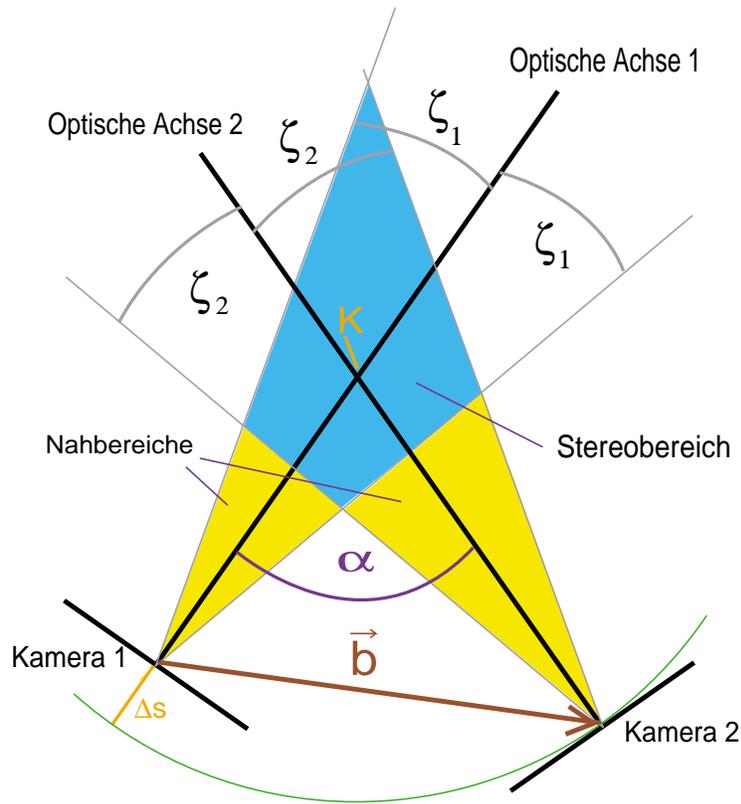


Abbildung 3.6: Parameter des Stereoaufbaus mit geneigten optischen Achsen (X - Z -Ebene).

Position im Bild abhängig. Eine Rechnung hierzu liefert [SCHMUNDT 1995]. Da die optischen Achsen sogar etwas windschief verlaufen und die Parallaxe nur von qualitativem Interesse ist, soll statt einer genauen Rechnung lediglich auf [LUHMANN 2000] verwiesen werden, wo das in der Nahbereichsfotogrammetrie ebenfalls auftretene Problem behandelt wird.

3.3.3 Optimierung der Parameter

Um ein genaues Messergebnis zu erhalten, gilt es, zwischen folgenden, zum Teil konträren Anforderungen abzuwägen:

Miniaturisierung Ein wesentlicher Unterschied der hier behandelten Messaufgabe von bisherigen 3D-PTV-Messungen (s. Kap. 6) besteht in der geringen Größe. Außerdem ist durch die Beschaffenheit des Kiesbetts nur eine invasive

Beobachtung möglich, wobei die Apparatur die Strömung und deren Turbulenzgrad geringfügig beeinträchtigen soll. Je näher der Stereobereich an den Endoskopenden liegen und miniaturisiert werden soll, desto kleiner muss die stereoskopische Basis gewählt werden. Auch muss der Winkel α möglichst senkrecht gewählt werden, um die Nahbereiche klein zu halten.

Beschränkungen des Beobachtungsbereiches Mit der Miniaturisierung des Aufbaus eng verknüpft ist die Nähe der angrenzenden Kiesel.¹² Der Überlappbereich sollte dem eingeschränkten Sichtbereich angepasst sein. Dieser wird durch das umgebende Kiesbett, also in dem Aufbau durch den künstlichen Porenraum (s. Abschn. 7.4), in erster Linie in der Tiefe begrenzt. Der maximale Abstand von den Endoskopspitzen ist in Tab. 7.3 auf S. 73 aufgeführt und liegt bei den Messungen bei etwa 14 mm.

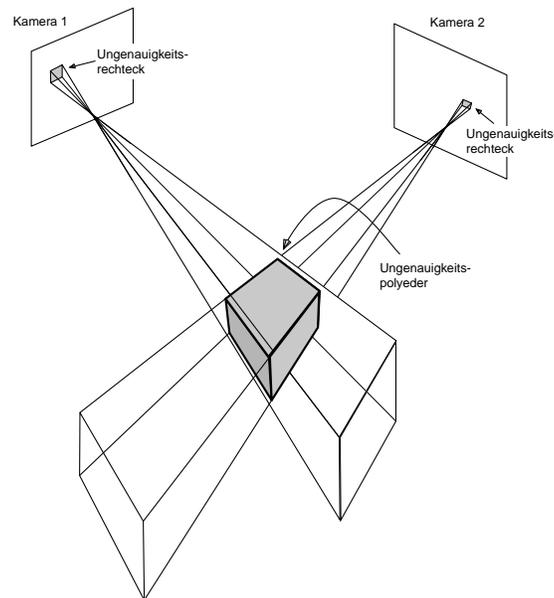


Abbildung 3.7: Die Ungenauigkeitsrechtecke entsprechen im Objektraum rechteckigen Pyramiden, die sich in einem i.a. ungleichmäßigen Polyeder schneiden (Quelle: [GARBE 1998]).

Auflösungsvermögen Die eingangs erwähnte Parallaxe ermöglicht die Positionsbestimmung und sollte durch geschickte Wahl der Parameter maximiert werden. Sie wächst bei geeigneten optischen Achsen schwach nichtlinear mit der stereoskopischen Basis b .

¹²Dieser Gesichtspunkt soll von dem vorigen getrennt aufgeführt werden, da die Porenraumgröße an die festen Messanforderungen gekoppelt ist.

Einschränkend auf die Miniaturisierung wirkt sich außerdem aus, dass der Fokalbereich erst einige Millimeter von den Endoskopen entfernt einsetzt (vgl. Tab. 7.4 auf S. 75).

Die Grenze des Auflösungsvermögens hängt ebenfalls vom Stereoaufbau ab und ist als Projektion der Ungenauigkeitspixelgröße in den Objektraum zu sog. Voxeln zu verstehen. Die Größe der Ungenauigkeitsvoxel sollte minimiert werden. Diese hängt von der Größe der CCD-Chips und dem Winkel zwischen ihren optischen Achsen α ab. Aus den Ungenauigkeitsrechtecken auf den Bildern ergibt sich in Weltkoordinaten durch Überschneidung ein Polyeder (s. Abb. 3.7). Dessen Berechnung gestaltet sich ohne vereinfachende Annahmen sehr schwierig. Dennoch ist qualitativ der Einfluss des Konvergenzwinkels auf die Auflösung von Interesse. Bei der Wahl gleicher Kameras kann der Bildfehler $dx \cdot dy$ in beiden Kameras als gleich angenommen werden. Desweiteren wird der Fehler dy auf dem Bild aus der Fehlerabschätzung angenommen, womit sich das Ungenauigkeitspolyeder auf die Deckfläche reduziert. Diese Fläche wird durch die grobe Annahme großer Objektweiten an ein Parallelogramm genähert. Wie groß ist nun diese Fehlerfläche?

Wie in Abb. 3.8 deutlich wird, schneiden sich die Halbgeraden von der Kamera durch den Punkt \vec{X} unter einem Winkel β , der abhängig vom Blickwinkel $\xi_{1,2}$ ist. Im Zentrum um K ist $\beta \simeq \alpha$. Der Fehler in den Weltkoordinaten pflanzt sich aus der Ungenauigkeit dx der Bildkoordinaten wie folgt fort:

$$dX = \frac{dx}{\cos \frac{\beta}{2}}, \quad dZ = \frac{dx}{\sin \frac{\beta}{2}} \quad (3.9)$$

Man kann aus dem Plot (Abb. 3.9) folgendes ablesen:

Eine optimale Auflösung wird bei $\beta = 90^\circ$ erreicht. Man muss also α nahe dem Rechten Winkel wählen, um eine optimale Tiefenauflösung und Auflösungs-genauigkeit im gesamten Stereobereich zu gewährleisten.

Großer Stereobereich Das Volumen des Bereiches, der von beiden Kameras beobachtet wird, sollte maximiert werden, da nur er den Messbereich darstellt. Dieser Forderung kommt ein großes Gewicht zu, da dadurch wesentlich die maximal messbare Strömungsgeschwindigkeit begrenzt wird; sie ist konträr zur Miniaturisierung. Anstatt das Volumen zweier sich schneidender Kegel mathematisch zu bestimmen, kann man es auch dadurch begutachten, dass man es mit Hilfe eines 3D-Renderingprogramms¹³ visualisiert. Da sich die Wahl der Aufbauparameter nicht auf diesen Aspekt beschränkt, soll diese qualitative Bestimmung genügen. Große Stereobereiche werden bei 45° - 60° erzielt. Beispiele verschiedener Überlappbereiche sind in Abb. 3.10 gezeigt.

¹³3DStudio Max

Es soll dabei erwähnt werden, dass sich die in Tabelle 7.4 (S. 75) angegebenen Öffnungswinkel auf Luft als umgebendes Medium beziehen. In [EHRBÄCHER 1999] wurde gezeigt, dass sich diese in Wasser auf $22,4^\circ$ reduzieren (vgl. Formel (3.1)).

Ausleuchtung Dieser Aspekt wird in Abschnitt 3.4 genauer dargestellt. Zur Wahl der Stereobasis ist dabei wichtig, dass der Überlappbereich komplett und möglichst homogen ausgeleuchtet wird, wobei der Öffnungswinkel der Beleuchtung nicht (direkt) geändert werden kann. Bei Benutzung des Kugelaufbaus muss vermieden werden, dass die Kugeln Schatten in den Stereobereich werfen. Außerdem sollte die Halterung der Beleuchtung möglichst ohne Zwischenstücke, die den Aufbau fragiler machen, angebracht werden können (vgl. Abschnitt 7.3).

Zusammenfassend lässt sich feststellen: Für eine gute Ortsbestimmung sollte α nahe 90° gewählt werden, für Messungen schneller Strömungen empfiehlt sich eine Maximierung des Stereobereichs mit α um 45° - 60° . Sinnvoll erscheint, je nach zu erwartender Strömungsgeschwindigkeit optimierte Stereoaufbauten zu wählen.

3.4 Beleuchtung

Die Beleuchtung stellt die größte Herausforderung der Messungen dar, wie auch die Voruntersuchungen von [EHRBÄCHER 1999] gezeigt haben.

Einerseits beleuchtet man in dem sandhaltigen Wasser in einem trüben Medium, andererseits ist der physische Zugang und die Größe der Lichtquelle stark beschränkt. Wie bereits erwähnt, ist auf Okklusionsfreiheit zu achten, was ein Fixieren der Beleuchtung an den Stereoaufbau bedingt (s. Abschnitt 7.3). Betont werden sollte, dass neben der korrekten Geometrie für eine ausreichende Intensität des Lichts zu sorgen ist.

Ausrichten der Beleuchtung

Je nach Winkel zwischen Lichtquelle und Kamera γ (vgl. Abb. 3.11) unterscheidet man die Beleuchtung nach Auflicht (sehr spitzer Winkel), Streiflicht und Gegenlicht (sehr stumpfer Winkel).

Die Lichtquelle sollte nicht direkt einstrahlen, da andernfalls in solch einem Bildbereich der Sensor übersteuert und dort für Messsignale nicht sensibel ist. Zudem

kann das auf S. 18 erwähnte *blooming* auftreten. Die Lichtquelle muss also außerhalb des Öffnungswinkels ζ liegen. Diese hat jedoch auch eine Strahldivergenz, so dass der Streuwinkel bei $\vartheta \simeq 2\zeta_{1,2} = 60^\circ$ nach unten beschränkt ist.

Die Endoskope bieten alle die Möglichkeit einer internen Beleuchtung, wie sie üblicherweise auch in medizinischen, invasiven Untersuchungen Anwendung findet. Vorteile dieser Methode sind ihre Kompaktheit und die einfache Benutzbarkeit, da ein Justieren entfällt. Bei Probeaufnahmen stellte sich einerseits heraus, dass die zur Verfügung stehenden Lichtquellen in ihrer Intensität nicht für Messungen ausreichen. Andererseits stößt man bei der Ausleuchtung mit Auflicht auf generelle Probleme: Störende Reflexionen sind bei nahezu senkrechter Bestrahlung der Porenwände besonders hell und großflächig. Außerdem ist die Intensität entlang der optischen Achse sehr inhomogen, da sie dem r^{-2} -Gesetz folgt. Hier würde der jeweilige Nahbereich, der für die Messung jedoch unbrauchbar ist, am stärksten beleuchtet. Man verliere somit viel Licht und segmentierte einen Großteil an Teilchen, die keine Korrespondenz im anderen Bild aufweisen (s. dazu Kap. 6.3).

Die Aufnahmen können also dadurch wesentlich verbessert werden, dass man eine externe Beleuchtung wählt und idealerweise nur die streuenden Tracer aufnimmt.

Da die Intensität des Streulichts der Tracer auch vom Streuwinkel abhängt, gehen die Betrachtungen aus Abschnitt 7.1.1 ebenfalls in die Wahl der Beleuchtung ein. Daraus geht hervor, dass das Verhältnis der Streuintensitäten bei den Winkeln $\vartheta = 60^\circ$ und 140° etwa bei 2:1 liegt. Damit kann bei kleinem Streuwinkel das Signal zu Rausch Verhältnis bemerkbar erhöht werden.

Der in Abb. 7.1 benutzte Streuwinkel ϑ weicht bei einem dreidimensionalen Aufbau etwas von dem tatsächlichen Streuwinkel zu den Kameras $\vartheta_{1,2}$ ab (s. Abb. 3.11). Bezüglich der den Winkel α halbierenden Gerade besteht dabei Symmetrie, so dass $\vartheta_1 = \vartheta_2$. Nach kurzer Rechnung ergibt sich

$$\vartheta_1(\vartheta, \alpha) = \arccos \left(-\cos(\vartheta) \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) \right). \quad (3.10)$$

In Abb. 3.12 ist die Funktion aufgetragen. Erstrebte Werte für α liegen im Bereich von 40° - 90° . Der Aufbau erlaubt die Wahl von ϑ innerhalb eines gewissen Intervalls. Eine Aussage über das Streuverhalten gemäß Abb. 7.1 muss für ein festes α korrigiert werden. Eine genauere Lösung ist durch eine zu Kapitel 3.3.3 analoge Betrachtung unter Benutzung von β statt α zu erreichen, also eine lokale Betrachtung der Blickwinkel für den gesamten Bildbereich. Die Helligkeit der Partikel hängt jedoch auch von anderen Faktoren ab (s.u.) Damit erscheint eine genauere Rechnung nicht sinnvoll.

Beleuchtungsinhomogenität

Da die Intensität mit r^{-2} abfällt, erscheinen Teilchen nahe der Beleuchtung heller. Grundsätzlich ließe sich damit eine Tiefenabschätzung vornehmen. Die Helligkeit eines Teilchens ist jedoch auch von der Position auf der Glasfaserstruktur abhängig. Zwischenräume, in denen kein Faserkern abgetastet wird, dunkeln umgebene Strukturen ab. Desweiteren wird sich eine Subtraktion des Mittelwertes als nötig erweisen (s. Abschn. 5.1). Das erzeugt eine Abhängigkeit des Grauwerts vom Hintergrund. Eine Tiefenabschätzung aus der Grauwertfunktion sollte aus diesen Gründen nicht unternommen werden.

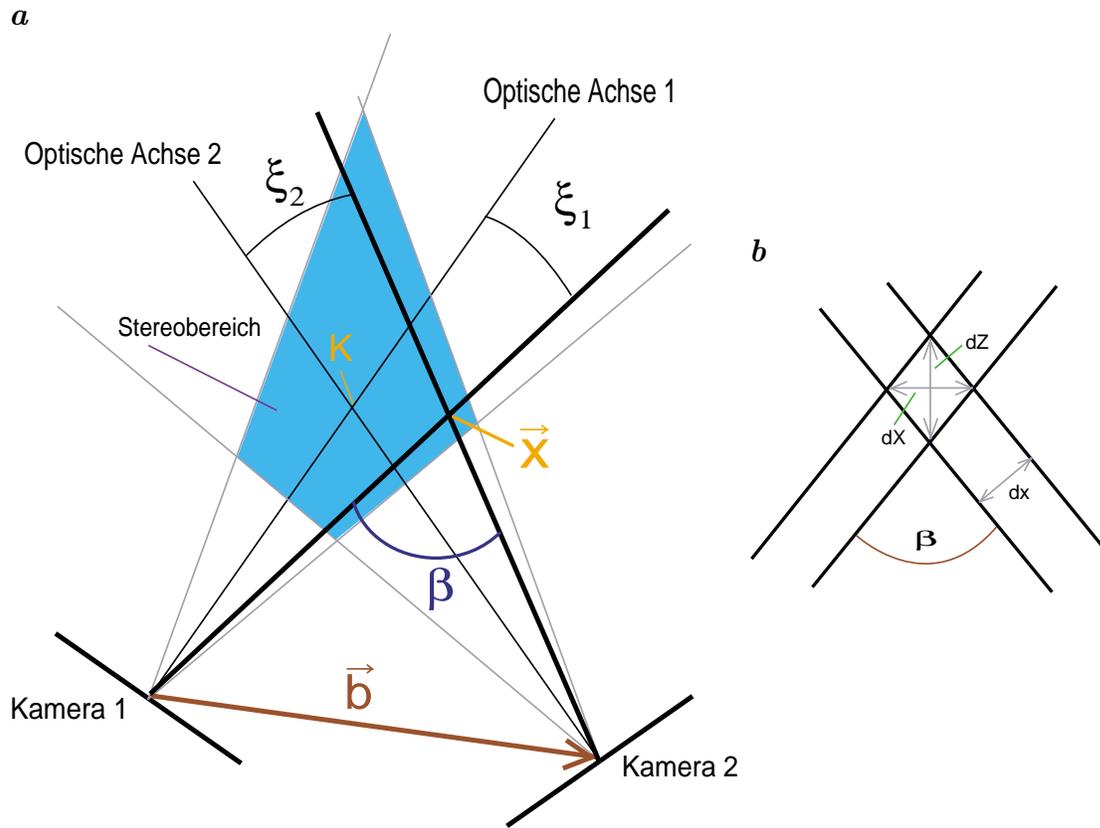


Abbildung 3.8: Zum Tiefenaufklärungsvermögen (X - Z -Ebene): **a** Winkel der Sehstrahlen zur optischen Achse ($\xi_{1,2}$) und zueinander (β). **b** Vergrößerung am Weltpunkt $\vec{X} = (X, Y, Z)^T$: Ungenauigkeit der Weltkoordinaten in Abhängigkeit von β und der Ungenauigkeit der Bildkoordinaten dx .

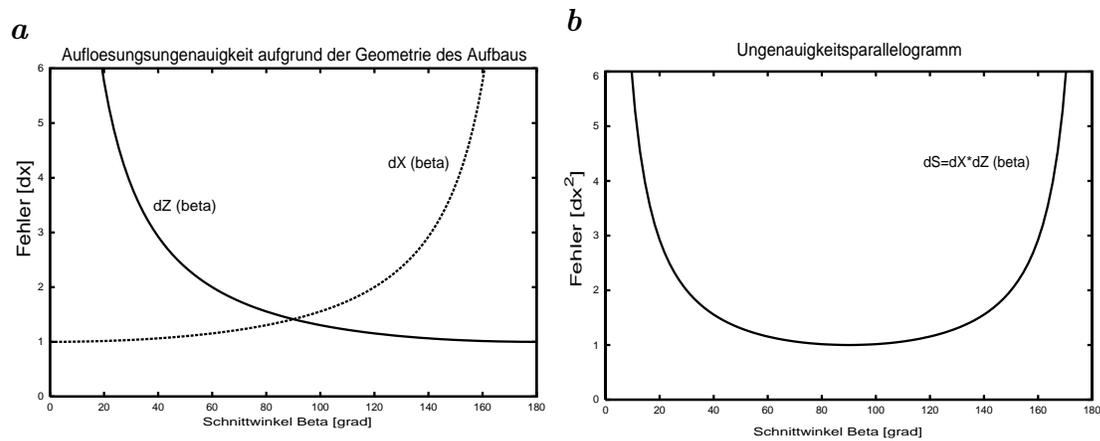


Abbildung 3.9: **a** Plot von $dX(\beta)$ und $dZ(\beta)$, **b** zeigt die Fläche des Ungenauigkeitsparallelogramms $dS(\beta)$.

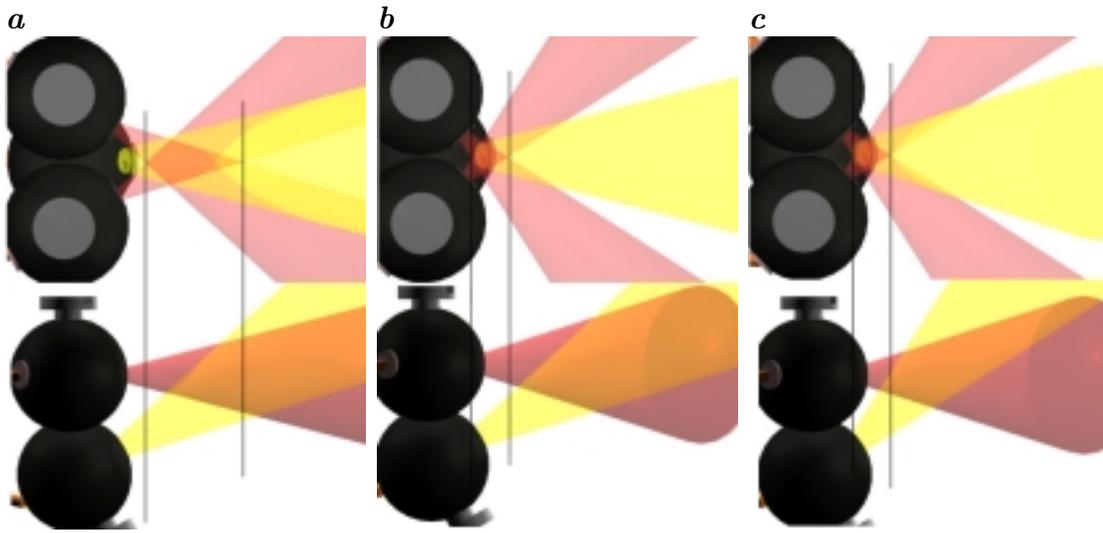


Abbildung 3.10: Simulation des Dreikugelaufbaus. Die Tiefenbegrenzungen der Stereobereiche sind mit Linien gekennzeichnet. [My Lillistierna]

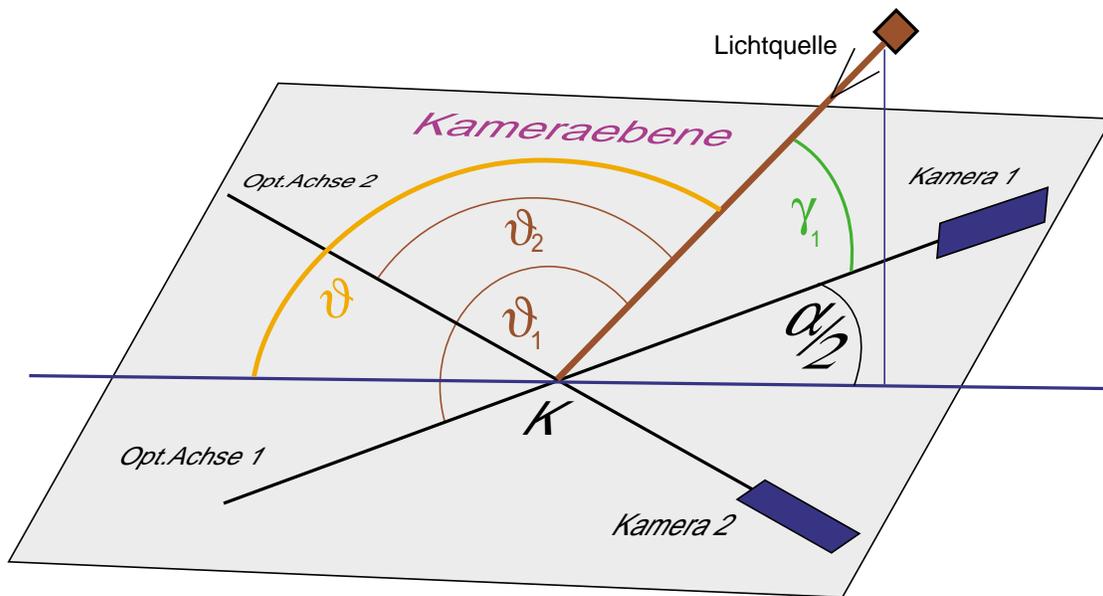


Abbildung 3.11: Statt den 2D-Streuwinkel ϑ zu benutzen, muss die Ausdehnung des Aufbaus berücksichtigt werden. Die tatsächlichen Streuwinkel sind ϑ_1 und ϑ_2 .

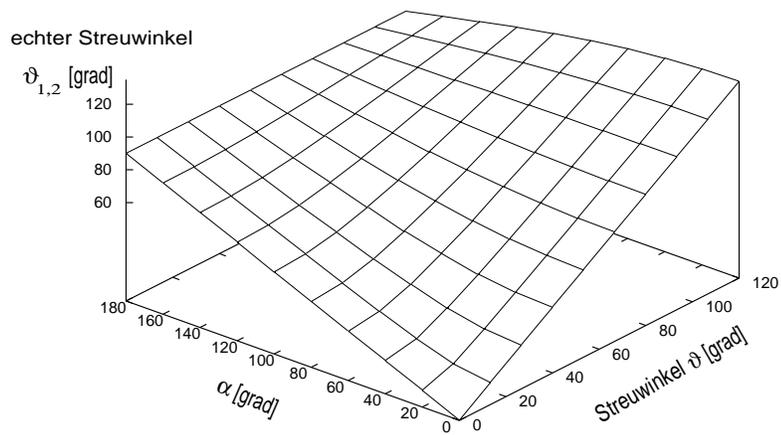


Abbildung 3.12: Abhängigkeit der tatsächlichen Streuwinkel $\vartheta_1 = \vartheta_2$ vom Streuwinkel zur Symmetrieachse ϑ und vom Konvergenzwinkel α .

Kapitel 4

Kamerakalibrierung

Die Abbildung eines Punktes im Beobachtungsvolumen auf den CCD-Chip der Kamera wird mit Hilfe eines Kameramodells beschrieben. Die Bestimmung der Parameter dieses Modells wird als Kalibrierung bezeichnet. Eine genaue Kenntnis der Kameraparameter ist Voraussetzung für die Gewinnung metrischer Information aus den Bildern.

Zur Bestimmung der Parameter wird zunächst ein Satz von Punkten benötigt, deren relative Positionen bekannt sind. Dies wird hier mit einem Kalibriergitter unternommen (Abschnitt 4.1). Mit diesen Punkten wird anschließend eine Kalibrierung durchgeführt.

Hier wurde eine neue Kalibriermethode verwendet, bei der ein ebenes Target in verschiedenen, beliebigen Positionen aufgenommen wird. Die Zwangsbedingung, dass die Markierungen jeweils planar angeordnet sind, fließt in die Rechnung ein und ermöglicht die Bestimmung der Lage der Ebene, ohne dass die genaue Position vorher bekannt war (Abschnitt 4.3.2).

4.1 Extraktion der Kalibrierpunkte

Bevor man die Bildkoordinaten der Kalibrierpunkte in die Rechnung einfließen lassen kann, müssen diese subpixelgenau bestimmt werden. Dies leistet ein von [SCHULTZ 1997] entwickelter und von [GARBE 1998] angepasster Algorithmus, der kreuzende Linien an ein gaussförmiges Kreuz fittet. Die Modellfunktion lautet:

$$\begin{aligned} F(u_1, u_2) &= a - d \cdot \\ &\cdot (1 - \exp[-w_1((u_2 - l_2) \cos \theta_1 + (u_1 - l_1) \sin \theta_1)^2]) \\ &\cdot (1 - \exp[-w_1((u_2 - l_2) \cos \theta_1 + (u_1 - l_1) \sin \theta_1)^2]) \end{aligned} \quad (4.1)$$

	a	Hintergrundmaximum
	d	Tiefe der Kreuzlinien
mit den Parametern	w_1, w_2	Kehrwert des Quadrats der Linienbreite
	l_1, l_2	Verschiebung des Kreuzes zum lokalen Ursprung
	θ_1, θ_2	Winkel der Kreuzlinien zu den Bildachsen

Man übergibt der Routine einen lokalen Ursprung, eine Umgebung in Form eines Radius und Startwerte der angegebenen Parameter. Insbesondere sind die Grauwerte des Kreuzes und des Hintergrunds absolut anzugeben.

4.2 Geometrische Kalibrierung

Ein Modell der Kameraabbildung wird je nach benutztem optischen System und erforderter Genauigkeit erstellt. Sehr gebräuchlich ist das Modell von [TSAI 1986]. Es benutzt ein lineares Modell, das Startwerte für eine nichtlineare Erweiterung liefert.

Homogene Koordinaten

Bei der Beschreibung der Transformation der Weltpunkte in Bildpunkte tritt neben der Translation und Rotation auch eine perspektivische Projektion auf. Um auch die im Euklidischen nichtlineare Projektion in Matrixform darstellen zu können, führt man in der projektiven Geometrie homogene Koordinaten ein. Vektoren der Weltpunkte haben darin vier Komponenten der Form $\tilde{X} = (X, Y, Z, 1)^T$, Bildkoordinaten die Form $\tilde{x} = (kx, ky, k)^T$, $k \in \mathbb{R}$. k ist dabei ein freier Skalierungsfaktor; für $k = 1$ erhält man euklidische Koordinaten. Die Erweiterung um eine Dimension trägt der Tatsache Rechnung, dass ein einziger Bildpunkt von beliebigen Weltpunkten auf einer Geraden, dem Sehstrahl, aus abgebildet werden kann (vgl. Abschn. 4.2.1) und für die Abbildung dadurch ein zusätzlicher, skalierender Freiheitsgrad entsteht.

4.2.1 Das lineare Lochkameramodell

In diesem Modell wird die einfache, idealisierte Lochkamera ohne Linsen benutzt. Gegeben sind die Brennweite f und das optische Zentrum O , das den Ursprung der Kamerakoordinaten bildet. Da von mehreren Koordinatensystemen die Rede ist, sollen sie hier kurz erläutert werden (vgl. Abb. 4.1):

- Weltkoordinaten $\vec{U} = (U_1, U_2, U_3)^T$
- Kamerakoordinaten¹ $\vec{X} = (X_1, X_2, X_3)^T$
- Sensorkoordinaten $\vec{x} = (x_1, x_2)^T$
- Bildkoordinaten $\vec{u} = (u_1, u_2)^T$

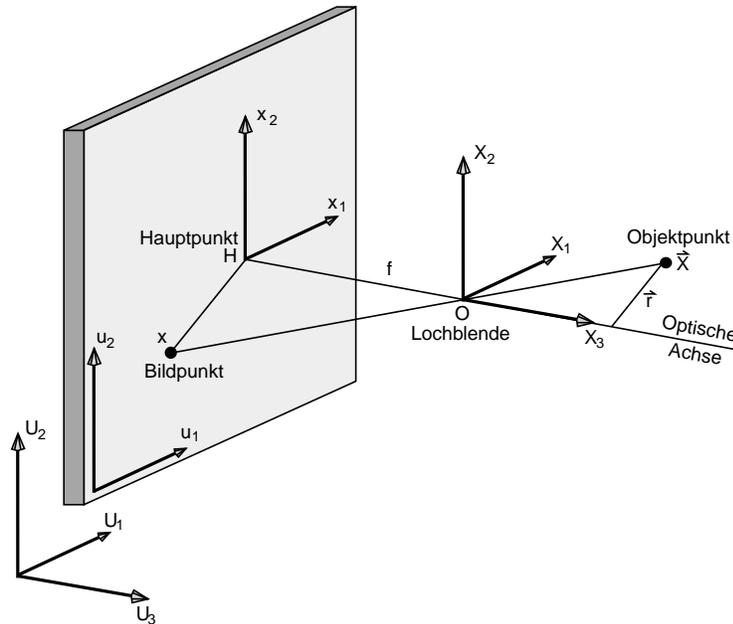


Abbildung 4.1: Lochkammermodell und Koordinatensysteme: Welt-punkt in Weltkoordinaten \vec{U} und in Kamerakoordinaten \vec{X} (Ursprung O), Bild-punkt in Bildkoordinaten \vec{x} (Ursprung H) und Sensorkoordinaten \vec{u} (Ursprung Bildecke).

Unter Benutzung homogener Koordinaten sind die darin linearen Transformationen in Weltkoordinaten als 4x4-Matrizen darstellbar. Eine Transformation von Objekt- in Bildkoordinaten ist eine 3x4-Matrix (s. Gl. (4.7)). Aufgrund der Assoziativität der Matrixmultiplikation kann man die gesamte lineare Transformation $\mathbf{M} = (m_{ij})$ (3x4-Matrix) als Produkt der verschiedenen Transformationen schreiben:

$$\mathbf{M} = \mathbf{SPRT}, \quad (4.2)$$

¹Darunter ist abermals die Endoskopspitze zu verstehen.

wobei die Translation \mathbf{T} die Form

$$\mathbf{T} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & t_1 \\ 0 & 1 & 0 & t_2 \\ 0 & 0 & 1 & t_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (4.3)$$

die Rotation die Form

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & 0 \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & 0 \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (4.4)$$

mit den Elementen

$$\begin{aligned} r_{11} &= \cos \varphi \cos \kappa \\ r_{12} &= \sin \omega \sin \varphi \cos \kappa - \cos \omega \sin \kappa \\ r_{13} &= \cos \omega \sin \varphi \cos \kappa + \sin \omega \sin \kappa \\ r_{21} &= \cos \varphi \sin \kappa \\ r_{22} &= \sin \omega \sin \varphi \sin \kappa + \cos \omega \cos \kappa \\ r_{23} &= \cos \omega \sin \varphi \sin \kappa - \sin \omega \cos \kappa \\ r_{31} &= -\sin \varphi \\ r_{32} &= \sin \omega \cos \varphi \\ r_{33} &= \cos \omega \cos \varphi \end{aligned}, \quad (4.5)$$

wobei φ, κ und ω die eulerschen Winkel bezeichnen. Da die Rotation nicht kommutativ ist, muss man die Reihenfolge der einzelnen Rotationen festlegen.

Die perspektivische Projektion mit der Brennweite f lautet

$$\mathbf{P} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/f & 0 \end{pmatrix} \quad (4.6)$$

Der Ursprung der Bildkoordinaten liegt in der linken, oberen Ecke des Bildes, der Ursprung der Sensorkoordinaten ist \vec{H} . Es erfolgt also noch eine Bildverschiebung von Sensor- auf Bildkoordinaten samt einer Skalierung:

$$\mathbf{S} = \begin{pmatrix} S_x d_x & 0 & H_x \\ 0 & d_y & H_y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4.7)$$

und hat 11 Spalten. Liegen alle Kalibrierpunkte \vec{X}_i koplanar, hat \mathbf{L} nicht vollen Rang [FAUGERAS 1993], sondern nur Rang 8. Man erkennt dies sehr gut, wenn man beispielsweise alle $Z_i = 0$ setzt. Das bedeutet, dass Gl. (4.8) bei Verwendung einer Kalibrierebene nicht lösbar ist. Entweder benutzt man stattdessen einen 3D-Kalibrierkörper oder man bedient sich eines anderen, im folgenden beschriebenen Formalismus.

Lineare Lösung mit mehreren Kalibrierebenen

Die Abbildung eines Punktes auf einer Ebene i ($Z=0$) lässt sich nach Ansatz von [ZHANG 1998] als lineare Abbildung schreiben:

$$s \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{H}_i \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (4.9)$$

Hier ist s ein freier Skalierungsfaktor. Für jede Ebene lässt sich eine Homographie \mathbf{H}_i mit der Methode der kleinsten Quadrate schätzen. \mathbf{H}_i hat darüberhinaus die Form

$$\mathbf{H}_i = \mathbf{S}\mathbf{P}[\vec{r}_1 \vec{r}_2 \vec{t}]_i \quad (4.10)$$

mit $\vec{t} = (t_1, t_2, t_3)^T$ und $\vec{r}_j = (r_{j1}, r_{j2}, r_{j3})^T$. Aus der Orthogonalität der Rotationsmatrix folgt $\vec{r}_1 \cdot \vec{r}_2 = 0$. Dies liefert zwei Einschränkungen an die intrinsischen Parameter bei bekanntem \mathbf{H}_i . Aus der Konstanz der intrinsischen Parameter von Ebene zu Ebene folgt, dass man theoretisch aus 2 Ebenen \mathbf{S} und \mathbf{P} bestimmen kann. In der Praxis sollte man allerdings eine höhere Anzahl von Ebenen verwenden.

Das weitere Vorgehen ist für beide Methoden identisch.

4.2.2 Nichtlineare Erweiterungen

Mit dem linearen Modell werden geometrische Verzerrungen beschrieben, die dreieckstreu (affine Abbildung) oder parallelentreu (perspektivische Projektion) abbilden. Linsen weisen hingegen Abbildungen auf, die auch in homogenen Koordinaten nicht linear sind. Diese sind nicht mehr in Matrixform notierbar und erfordern einen nichtlinearen Fit. Dazu wird ein Levenberg-Marquardt-Verfahren benutzt, das das Abstandsquadrat minimiert. Alle Parameter werden gleich behandelt und nacheinander variiert, solange das Residuum dadurch verkleinert wird. Dabei kann ein lokales Minimum irrtümlich als Optimum gedeutet werden. Um dies zu verhindern, sind die Startwerte nahe dem Ergebnis zu wählen. So wählt man die

bisherigen Parameter aus der linearen Schätzung und die nichtlinearen Korrekturen verschwindend.

Aus Überlegungen der geometrischen Optik ergeben sich folgende Korrekturen:

Radiale Verzerrung: Mit dem Abstand zum Hauptpunkt $r = |\vec{u} - \vec{H}|$ wächst die radiale Verzerrung von Linsen $\delta\vec{u}_r$. Der Fehler wird gemäß einer Taylorreihe genähert und die Entwicklung nach geforderter Genauigkeit ausgeführt. Ausreichend ist hier die zweite Ordnung:

$$\delta\vec{u}_r = (k_1 r^2 + k_2 r^4)\vec{u} + O(r^6) \quad (4.11)$$

Linsensysteme mit besonders starker Verzerrung sind solche mit kurzer Brennweite, wie sie sich in den Endoskopspitzen findet. Die Verzerrung der Endoskope ist sehr stark kissenförmig und fällt visuell bereits stark auf (s. Abbildung 4.2).

Tangentiale Verzerrung: Tritt Licht durch ein System mehrerer Linsen, so liegen die Zentren der Linsenkrümmungen meist nicht kollinear. Dies führt neben einem radialen Fehler zu einer tangentialen Verzerrung [SLAMA 1980]. Man kann auch sie nach dem zweiten Term abbrechen:

$$\delta u_1^t = 2p_1 \cdot u_1 u_2 + p_2 \cdot (r^2 + 2 \cdot u_1^2) + O(r^4) \quad (4.12)$$

$$\delta u_2^t = p_1 \cdot (r^2 + 2u_2^2) + 2 \cdot p_2 \cdot u_1 u_2 + O(r^4) \quad (4.13)$$

Prismenverzerrungen: Zusätzlich kann man eine Korrektur kleiner Linsenfehler einführen [CALZOLARI 1996]. Diese sind aber klein gegenüber der Verzerrung und werden meist vernachlässigt.

4.3 Kalibriermethoden

In der Kalibrierroutine wurden verschiedene Methoden implementiert. Die erste unterscheidet sich grundsätzlich von einem Stereoaufbau. Die anderen beiden Methoden sind in der Wahl des Kalibrierobjektes verschieden: Man kann einen Körper benutzen oder eine Ebene in mehreren Orientierungen aufnehmen.

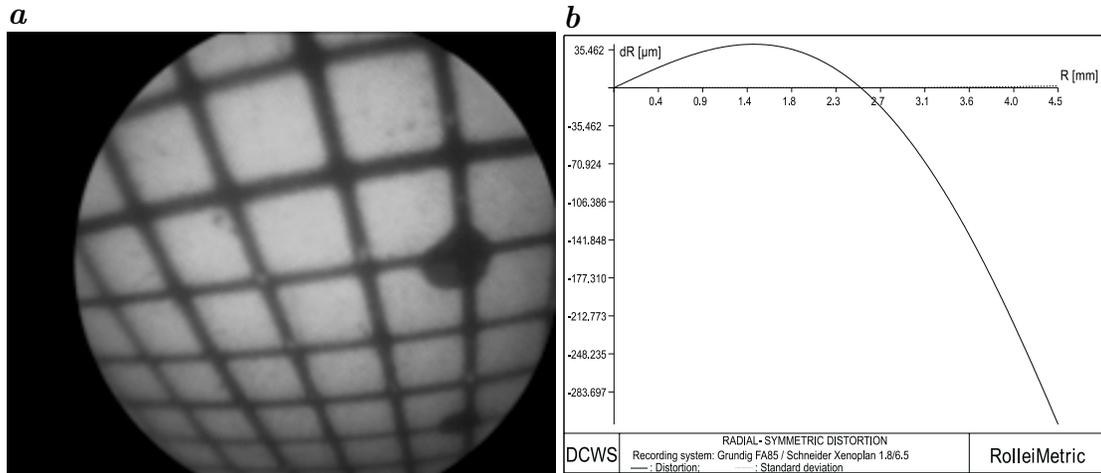


Abbildung 4.2: **a** Schon mit bloßem Auge ist die radiale Verzerrung der Endoskopoptik erkennbar: Die parallelen Linien des Gitters erscheinen nach außen gebogen. **b** : Typischer Verlauf einer radialen Linsenverzerrung. Quelle **b** : [GODDING 1999]

4.3.1 Kalibrierung einer 2D-Messebene

Die einfachste Kalibriermethode ist für Aufnahmen einer einzelnen Kamera geeignet, bei denen das Messvolumen auf eine Ebene reduziert ist. Ein Anwendungsbeispiel ist die in Kapitel 2.4 erwähnte Beobachtung mit einem starren Endoskop, dessen Sichtfeld durch ein ebenes Fenster begrenzt wird oder die Bewegungsanalyse von Pflanzenwurzeln, die in einer ebenen Petrischale beobachtet werden.

4.3.2 3D-Kalibrierung

Wenn man mit der Tiefeninformation arbeitet, darf das Kalibrierobjekt nicht eben sein, da sonst Gleichung (4.8) nicht mehr lösbar ist. Man bedient sich entweder eines (nichtebenen) Kalibrierkörpers oder erzeugt einen virtuellen Körper (s.u.). In beiden Fällen ist darauf zu achten, dass sie das Stereovolumen ausfüllen. Man benutzt meist folgende Verfahren:

Nichtebener Kalibrierkörper

Oft wird hierzu ein Würfel mit Kalibriermarken hergestellt. Die Anfertigung eines solchen Würfels der geforderten Größe und Genauigkeit ist mit erheblichen Kosten verbunden.

Direkt bekannter, virtueller Körper

Eine gängige Methode ist, ein ebenes Target auf einem Verschiebetisch zu montieren und äquidistante Verschiebungen in der Tiefe durchzuführen, um eine bekannte räumliche Beziehung zwischen den Kalibrierpunkten sicherzustellen. Die Serie von lokalisierten, jeweils ebenen Markierungen wird dann im Rechner zu einem virtuellen Markierungskörper zusammengefügt und mit diesem wie oben beschrieben verfahren.

Der Einsatz eines Verschiebetisches ist bei dieser Messung allerdings nicht praktikabel. Der Stereoaufbau und das Stereovolumen sind bei den Endoskopen viel kleiner als bei Standardobjektiven. Mit dem in der Bildverarbeitungsgruppe vorhandenen Verschiebetisch ist eine einmalige und genaue Kalibrierung zwar möglich. Allerdings ist beabsichtigt, die Kalibrierung für Messungen an der Wasserrinne der BAW, am besten direkt im Wasser und kurz vor der Messung vorzunehmen.

Beliebiger, virtueller Körper

Der oben beschriebene Formalismus erlaubt eine Kalibrierung mittels einer Aufnahmeserie einer Ebene in beliebigen Orientierungen. Für den Einsatz bei der BAW ist diese Methode weitaus praktikabler.

Kapitel 5

Vorverarbeitung der Rohdaten

Um die Bilder segmentieren zu können, ist es wichtig, Bildfehler derart zu unterdrücken, dass die Kalibrierung nicht beeinflusst wird, sie sich also geometrisch nicht verändern. Wegen der unterschiedlichen Art der Daten ist schon bei der Signalextraktion zu unterscheiden, ob es sich um Kalibrier- oder Messaufnahmen handelt.

Bei Kalibrieraufnahmen ist eine ausreichende Beleuchtung möglich. Dadurch wird das Rauschen minimiert. Der Fehler besteht bei solchen Aufnahmen in der Wabenstruktur der Glasfaser-Abbildung. Die Bilder dienen dazu, Kreuzungspunkte mittels eines gaussförmigen Fits zu ermitteln. Um diesen Fit zu unterstützen, sollen die Fehler durch isotrope Glättungsverfahren behandelt werden (Abschnitt 5.2).

Bei Messaufnahmen handelt es sich um Bildfolgen von Streuaufnahmen, deren Beleuchtung begrenzt ist. Rauschen spielt bei solchen Sequenzen eine wichtige Rolle. Reflexionen und Strukturen, die nicht von zu segmentierenden Teilchen herrühren, stellen dabei die größten Fehler dar und sollen zuerst eliminiert werden (Abschnitt 5.1). Durch diesen Arbeitsschritt wird eine Segmentierung ermöglicht. Um daraufhin das Rauschen von den Signalen trennen zu können, kam erstmalig ein neues Verfahren der dreidimensionalen anisotropen Diffusion (Abschnitt 5.4) zur Anwendung.

5.1 Extraktion des Hintergrunds

Bei Messaufnahmen befinden sich im Bild als Fehler zu betrachtende Objekte, die zwei verschiedene Ursachen haben: Ein großes Problem stellen Reflexionen der Porenwände dar. Die Messbedingungen erlauben es nur bedingt, diese durch Ändern

des Hintergrundes oder des Streuwinkels zu unterdrücken. Ein weiteres Schwärzen des Hintergrundes beispielsweise erscheint nicht möglich. An einigen Stellen setzen sich zudem zeitweise Sand- oder Tracerteilchen fest, die keine Information über die vorhandene Strömung führen. Eine Segmentierung wird dadurch erschwert, dass der Kontrast der Teilchen vor dem beleuchteten Hintergrund sehr gering ist. Mit bloßem Auge sind Teilchen nur in dunklen Bereichen auszumachen (vgl. Abb. 5.1).

Man darf annehmen, dass ruhende Strukturen nicht die Strömung beschreiben. Integriert man in zeitlicher Richtung, so erhält man in guter Näherung den statischen Anteil der Sequenz. Dieser wird subtrahiert, so dass bewegte Strukturen im Bild belassen werden. Zu ihnen gehört allerdings auch das Rauschen, das in Abschnitt 3.2.2 untersucht wird.

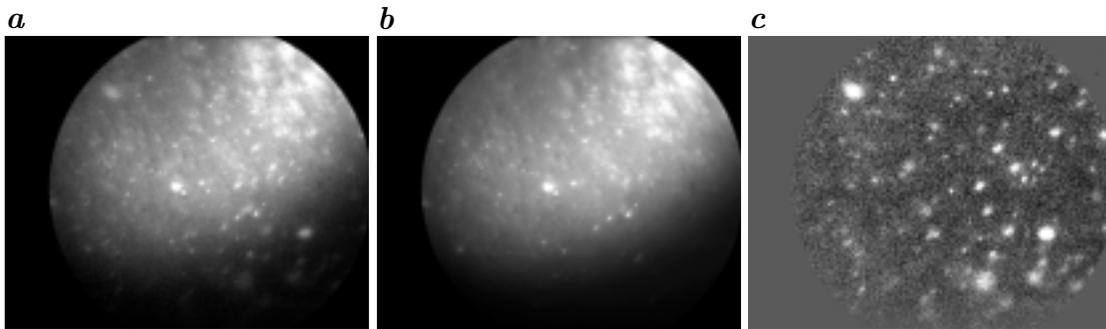


Abbildung 5.1: Subtraktion des statischen Hintergrundes: **a** Originalbild, **b** berechneter Hintergrund, **c** Differenz (verstärkt dargestellt)

5.2 Isotrope Glättungsverfahren

Zum Verständnis der benutzten Vorgehensweise soll zunächst die Fouriertransformation rekapituliert werden.

5.2.1 Fouriertransformation, Faltung und Powerspektrum

Durch eine Fouriertransformation wird eine n -dimensionale Funktion $f(\vec{x})$ aus dem Ortsraum in den (komplexen) Wellenzahlraum überführt:

$$\hat{f}(\vec{k}) = \frac{1}{(2\pi)^n} \int_{-\infty}^{\infty} d^n x \exp(-i\vec{k}\vec{x}) f(\vec{x}) \quad (5.1)$$

Die inverse Transformation hat die Form

$$f(\vec{x}) = \int_{-\infty}^{\infty} d^n k \exp(i\vec{k}\vec{x}) \hat{f}(\vec{k}) \quad (5.2)$$

Bei Filtern bezeichnet man die Transformierte auch als *Transferfunktion*.

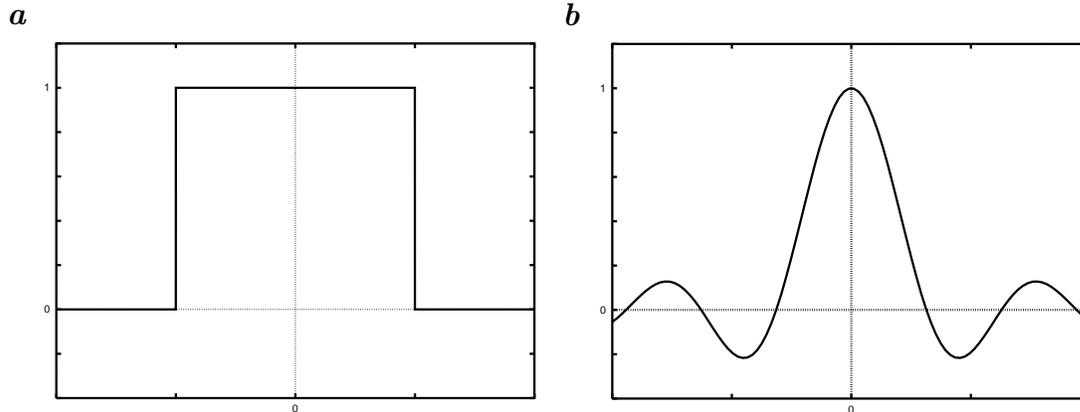


Abbildung 5.2: **a** Eine Rechteckfunktion und **b** ihre Fouriertransformierte, die sinc-Funktion (ohne Skalierung)

Die Transformierte bildet Amplituden nicht mehr ortsabhängig ab, sondern zerlegt die Struktur in Grauwertwellen unterschiedlicher Frequenz¹ und gibt dafür eine Amplitude an. Für die Bildverarbeitung benutzt man die zwei- oder dreidimensionale, diskrete Form (DFT), wobei das Bild am Rand periodisch fortgesetzt betrachtet wird und die kleinsten Wellenlängen durch die Pixelgröße begrenzt sind. Weisses Rauschen ist im Orts- und im Fourierraum gleich verteilt. Bei hohen Wellenzahlen ist jedoch der Rauschanteil sehr hoch, da sich unkorreliertes Rauschen nur auf ein Pixel erstreckt. Neben den örtlichen Wellenzahlen k_x und k_y gilt dies auch für die zeitliche k_t . Die Ortsinformation steckt bei der Transformierten in der Phase, also im Exponenten $-i\vec{k}\vec{x}$.

Zur Darstellung der komplexwertigen Fouriertransformierten lässt sich im Wellenzahlraum ein *Power- oder Energiespektrum* erzeugen. Dazu wird die Amplitude gemäß

$$\left| \hat{f}(\vec{k}) \right|^2 = \hat{f}(\vec{k})^* \cdot \hat{f}(\vec{k}) \quad (5.3)$$

quadriert, d.h. mit der komplex Konjugierten multipliziert. Man erhält dadurch für jede Wellenzahl einen reellen Wert, dem in der Quantenmechanik und Elektrodynamik die Energie entspricht.

¹Bei räumlichen Wellen verwendet man den Begriff Wellenzahl, die mit der Wellenlänge λ über $k = 2\pi/\lambda$ zusammen hängt.

Eine *Faltung* $f * g$ von den (komplexen) Funktionen $f(\vec{x})$ und $g(\vec{x})$ in die komplexen Zahlen hat die Form

$$(f * g)(\vec{y}) = \int_{-\infty}^{\infty} d^n x f(\vec{x}) g(\vec{y} - \vec{x}) . \quad (5.4)$$

In der Fouriertransformierten entspricht ihr eine Multiplikation der transformierten Funktionen $\hat{f} \cdot \hat{g}$.

Neben dieser Transformation existieren noch andere. Man nutzt je nach Anwendung bestimmte Eigenschaften einer Transformationen. Die hier benutzte Eigenschaft besteht in der einfachen Identifizierung regelmäßiger Strukturen.

Fensterfunktion

Bei der Fouriertransformation eines rechteckigen Bildes treten am Rand Unstetigkeiten auf. Wiederum hat das Bildrechteck den Effekt einer Faltung mit der sinc-Funktion ², diesmal tritt jedoch die Multiplikation im Ortsraum und die Faltung im Wellenzahlraum auf. Stehen die Abtastfrequenz und die Frequenz der sinc-Funktion in einem bestimmten Verhältnis, wird letztere nicht mehr im Maximum abgetastet. An sämtlichen DFT-Rasterpunkten entstehen Fehler, die einen sog. *leakage*-Effekt der Hauptspektrallinie erzeugen. Diesen begegnet man durch Einsatz einer Fensterfunktion Abb. 5.3. Bei der Bearbeitung der Bilder kam eine zweidimensionale Hanning-Fensterfunktion zum Einsatz, die eine kosinusartige Kurve auf einem $N \times M$ -Bild erzeugt gemäß

$$A(x, y) = \frac{1}{4} \left[1 - \cos \left(\frac{2\pi x}{N} \right) - \cos \left(\frac{2\pi y}{M} \right) + \cos \left(\frac{2\pi x}{N} \right) \cdot \cos \left(\frac{2\pi y}{M} \right) \right] .$$

Nach Rücktransformation wird das Bild durch diesen Wert wieder dividiert.

5.2.2 Bandpass im Fourierspektrum

Charakteristisch für die Waben ist, dass sie sich auf den gesamten Bildkreis erstrecken und überall von gleicher Skala, jedoch nicht von räumlich regelmäßiger Struktur sind. Diese Eigenschaften legen die Benutzung einer Fouriertransformation nahe. Ein Ansatz, um ausschließlich die Wabenstruktur zu entfernen, ist eine Bandpassfilterung, die durch Faltung mit einem Filter erreicht wird. Äquivalent

² sinc: $f(x) = \frac{\sin(x)}{x}$

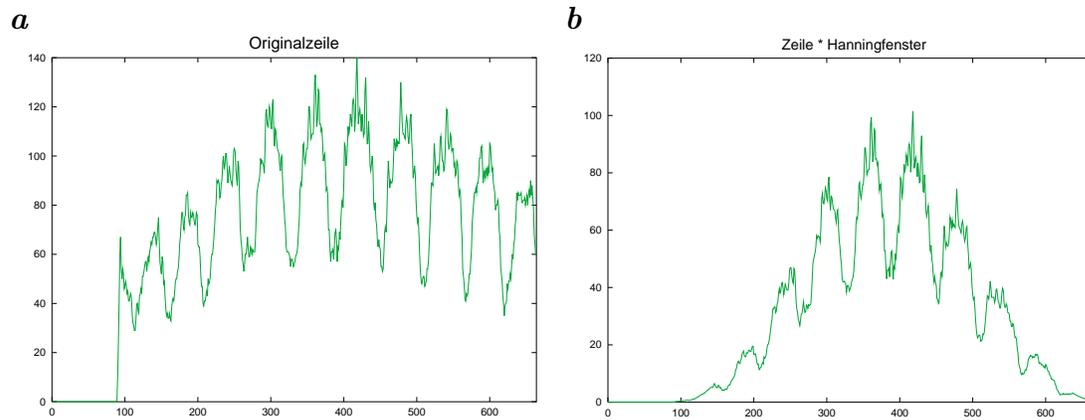


Abbildung 5.3: Zeilenschnitte **a** des Originalbildes, **b** des Produkts mit einer Hanning-Fensterfunktion.

kann man das Bild in die Frequenzdarstellung fouriertransformieren, dort mit der Transferfunktion des Filters multiplizieren und anschließend wieder rücktransformieren. Da dadurch das Verständnis über das Bild vertieft wird, soll dieser Umweg gemacht werden.

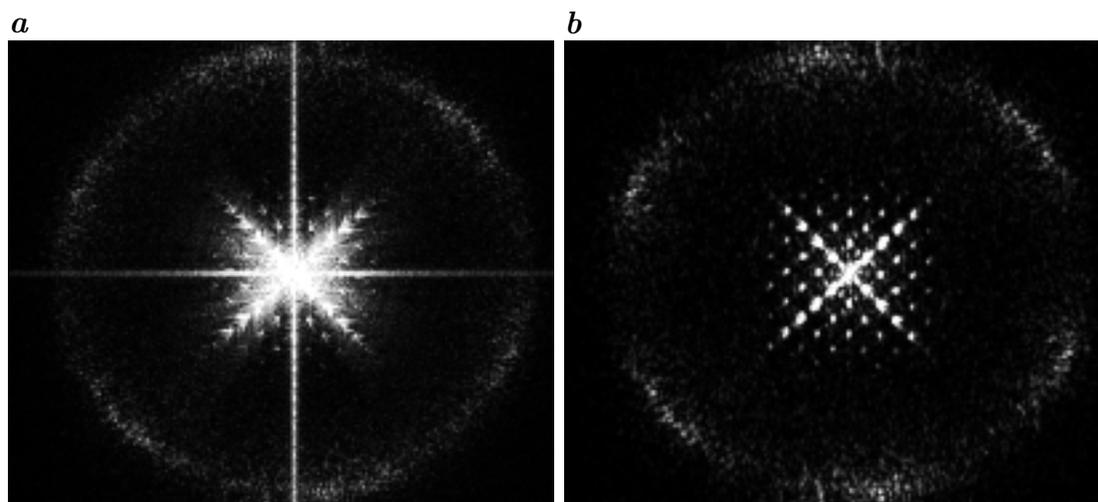


Abbildung 5.4: Powerspektrum des Kalibrierbildes in Abb. 8.2. **a** nach direkter Transformation, **b** unter Benutzung einer Hanning-Fensterfunktion. Das Gitter entspricht dem Muster nahe dem Zentrum, die Wabenstruktur erzeugt den Ring. Man erkennt, wie deutlich diese Strukturen trennbar sind. Im Zentrum sieht man die Transformierte des Kalibriergitters. Sie erinnert an die aus der Festkörperphysik bekannten Laue-Interferenzen, bei denen das inverse Gitter eines Kristalls sichtbar wird.

Zur Bestimmung der Wellenzahlen der Wabenstruktur wird von einem Referenz-

bild die Fouriertransformierte gebildet. Deren Powerspektrum ist radialsymmetrisch um die Wellenzahl $k = 0$ angeordnet. Kleine Strukturen liegen somit am Rand, große im Zentrum dieser Darstellung. Man erkennt in der Darstellung einen sehr klar abgegrenzten Ring (s. Abb. 5.4), der die Waben repräsentiert. Schneidet man per Multiplikation mit einer radialen Rechteckfunktion diesen Ring heraus, entspricht dies einer Faltung im Ortsraum mit der Transferfunktion des Rechtecks, der sinc-Funktion (s. Abb. 5.2).

Dadurch ergeben sich insbesondere an den Rändern kleine Fehler (s. Abbildung 5.5).

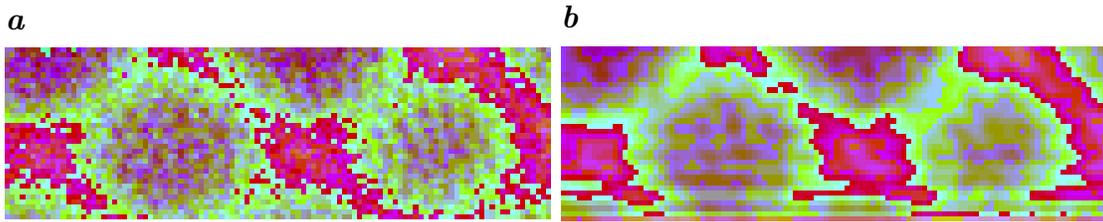


Abbildung 5.5: Ein Beispielbild in Falschfarben **a** vor und **b** nach der Bandpassfilterung mit der Rechteckfunktion. Es ist ein stark vergrößerter Ausschnitt des unteren Rands von Abbildung 8.2 dargestellt. Man erkennt die Faltungsartefakte am Rand des Bildkreises als wellenförmige Überschwinger.

Man kann ein ähnliches Vorgehen auch mit anderen als der Rechteckfunktion durchführen. Dazu bietet sich die Gaussfunktion an, deren Transferfunktion wieder gaussförmig ist. Dies entspricht einer isotropen Glättung, die bei anderer Implementierungen weniger Rechenaufwand erfordert.

5.2.3 Gausspyramide

Die Größe der Waben (s. Gl. (3.3)) legt eine andere, schnellere Art der isotropen Glättung nahe: Die erste Ebene einer Gausspyramide.

Wie z.B. in [JÄHNE 1999] beschrieben, ist eine Multiskalenrepräsentation durch sukzessives Unterabtasten oft sehr effizient. Dies geschieht durch Erzeugen einer Gausspyramide aus einem Bild folgendermaßen: In jeder höheren Ebene $q + 1$ wird die Ebene q in jede Achsenrichtung nur in jedem zweiten Punkt abgetastet. Dadurch entsteht bei zweidimensionalen Bildern ein um den Faktor 4 reduziertes Bild. Setzt man dies bis zu einem einzigen Punkt fort, so benötigt die gesamte Pyramide eines Bildes mit N Pixeln in jede Richtung

$$N^D \left(1 + \frac{1}{2^D} + \frac{1}{2^{2D}} + \dots \right) < N^D \frac{2^D}{2^D - 1}$$

Bildpunkte. Eine 2D-Pyramide ist $1/3$, eine 3D-Pyramide nur $1/7$ mehr Speicherplatz als das Bild. Es ist bei jeder Glättung das Abtasttheorem zu beachten um *Aliasing*³ zu verhindern. Das bedeutet in diesem Falle, dass alle Strukturen, die weniger als vier Mal pro Wellenlänge abgetastet werden, unterdrückt werden müssen. Das Bild auf der ersten Ebene wird durch Interpolation⁴ vierfach vergrößert und erscheint wieder in der Ausgangsgröße.

5.3 Zweidimensionale anisotrope Diffusion

Bei den Kalibrierbildern ist eine Glättung wünschenswert, die die Wabenstruktur als Rauschen auffasst und unterdrückt. Gleichzeitig sollen die Gitterlinien als Signal erkannt werden und senkrecht der Linien nur minimales Glätten stattfinden. Dies kann durch anisotrope Diffusion erreicht werden, die hier in der zweidimensionalen Form kurz erläutert werden soll. Die anisotrope Diffusion wurde von [WEICKERT 1998] eingeführt. Sie verbindet Ideen der nichtlinearen Diffusionsfilterung mit einer Orientierungsanalyse durch den Strukturtensor.

Funktionsweise der anisotropen Diffusion

Mit Hilfe des (symmetrischen, positiv semi-definiten) Struktur tensors \mathbf{J} (s. z.B. [HAUSSECKER und SPIES 1999]), der die Form

$$J_{pq} = B * (\partial_p g \cdot \partial_q g) \quad (5.5)$$

hat, wird die lokale Bildstruktur gemessen. Dabei bezeichnet g die Grauwertfunktion und ∂_p, ∂_q die Ableitungen entlang der Bildachsen. Der Operator B bewirkt eine lokale Mittelung. Die Eigenvektoren von \mathbf{J} geben die Orientierungen und deren (nichtnegativen) Eigenwerte den lokalen Kontrast in den jeweiligen Richtungen an. Die Orientierung mit dem kleinsten Eigenwert zeigt also entlang der Struktur.

Die Diffusionsgleichung ergibt sich nach Anwendung des Fickschen Gesetzes und der Kontinuitätsgleichung zu

$$\frac{\partial g}{\partial \tau} = \vec{\nabla} \cdot (\mathbf{D} \vec{\nabla} g), \quad (5.6)$$

wobei $g(\vec{x}, \tau)$ den Grauwert zur Diffusionszeit τ bezeichnet. Der Diffusionskern \mathbf{D} ist ein Tensor zweiter Stufe, wenn entlang der Hauptachsen unterschiedlich

³Scheinstrukturen, die beim Unterabtasten entstehen. In der Festkörperphysik entspricht diesem Effekt die Reduzierung auf die 1. Brillouinzone.

⁴Meist wird die kubische Interpolation verwendet.

geglättet werden soll.⁵ Er verwendet dieselben Eigenvektoren wie der Strukturtenor.

Bei der Anwendung auf die Kalibrierbilder wird eine kantenverstärkend wirkende (*edge enhancing*) Diffusion benutzt, die in den strukturschwachen Umgebungen stark glättet. Es handelt sich um eine anisotrope Erweiterung der nichtlinearen isotropen Diffusion [PERONA und MALIK 1990]. Die Eigenwerte werden von einem Parameter k abhängig gesetzt:

$$\lambda_1 = \frac{1}{1 + (\vec{\nabla}g)^2/k^2}, \quad \lambda_2 = 1. \quad (5.7)$$

Die Richtungsgenauigkeit dieses Prozesses ist wichtig, damit die Bildqualität nicht unter Glättungsartefakten aufgrund falsch ermittelter Richtungen leidet. Dieser Punkt ist bei feinen Linien relevant (s.u.).

5.4 Dreidimensionale anisotrope Diffusion

Bei der dreidimensionalen anisotropen Diffusion handelt es sich um eine einfache Erweiterung des zweidimensionalen Falls, wobei nun entlang der Trajektorien geglättet wird. Bisher war sie jedoch derart implementiert, dass die Diskretisierung der Diffusionsgleichung eine Bevorzugung gewisser Orientierungen bewirkte (vgl. Abb. 5.7). Die in [SCHARR 2000b] vorgestellte Verbesserung, die auch im zweidimensionalen Fall zum Einsatz kam, behandelt alle Orientierungen gleich. Warum dies in Bildfolgen wichtig ist, soll kurz ausgeführt werden.

Richtung der Trajektorien

Abbildung 5.6 skizziert einen xt-Schnitt. Bewegt sich ein Objekt in der Bildfolge mit einer Geschwindigkeit $v_x = \delta x / \delta t$, so ist die Neigung gemäß

$$\alpha = \arctan \left(\frac{\delta x}{\delta t} \right) = \arctan v_x \quad (5.8)$$

von der Geschwindigkeit abhängig. Ruhende Strukturen verlaufen vertikal, mit zunehmender Geschwindigkeit neigen sie sich zur x-Achse. Eine Neigung von 45° entspricht einer Geschwindigkeit v_x von 1 Pixel/frame und kann damit nicht als

⁵Hier ist er ebenso wie \mathbf{J} eine 2×2 -Matrix.

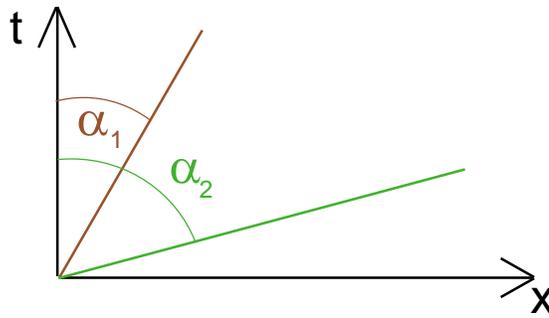


Abbildung 5.6: Ein xt -Schnitt mit zwei Punkten der Geschwindigkeit v_x mit $v_x(\alpha_2) > 1 \text{ Pixel/Bild} > v_x(\alpha_1)$.

ausgezeichnete Richtung gelten, d.h. Bewegung in dieser Richtung wäre ein Zufall der Aufnahmeparameter.

Somit eignet sich diese Art der Bearbeitung für stark verrauschte Strömungsbildfolgen. Bei der Auswertung dieser Arbeit wurde das Verfahren verwendet. Die Parameter werden in Abhängigkeit vom Rauschen gewählt.

Eine systematische Untersuchung dieses Verfahrens steht noch aus.

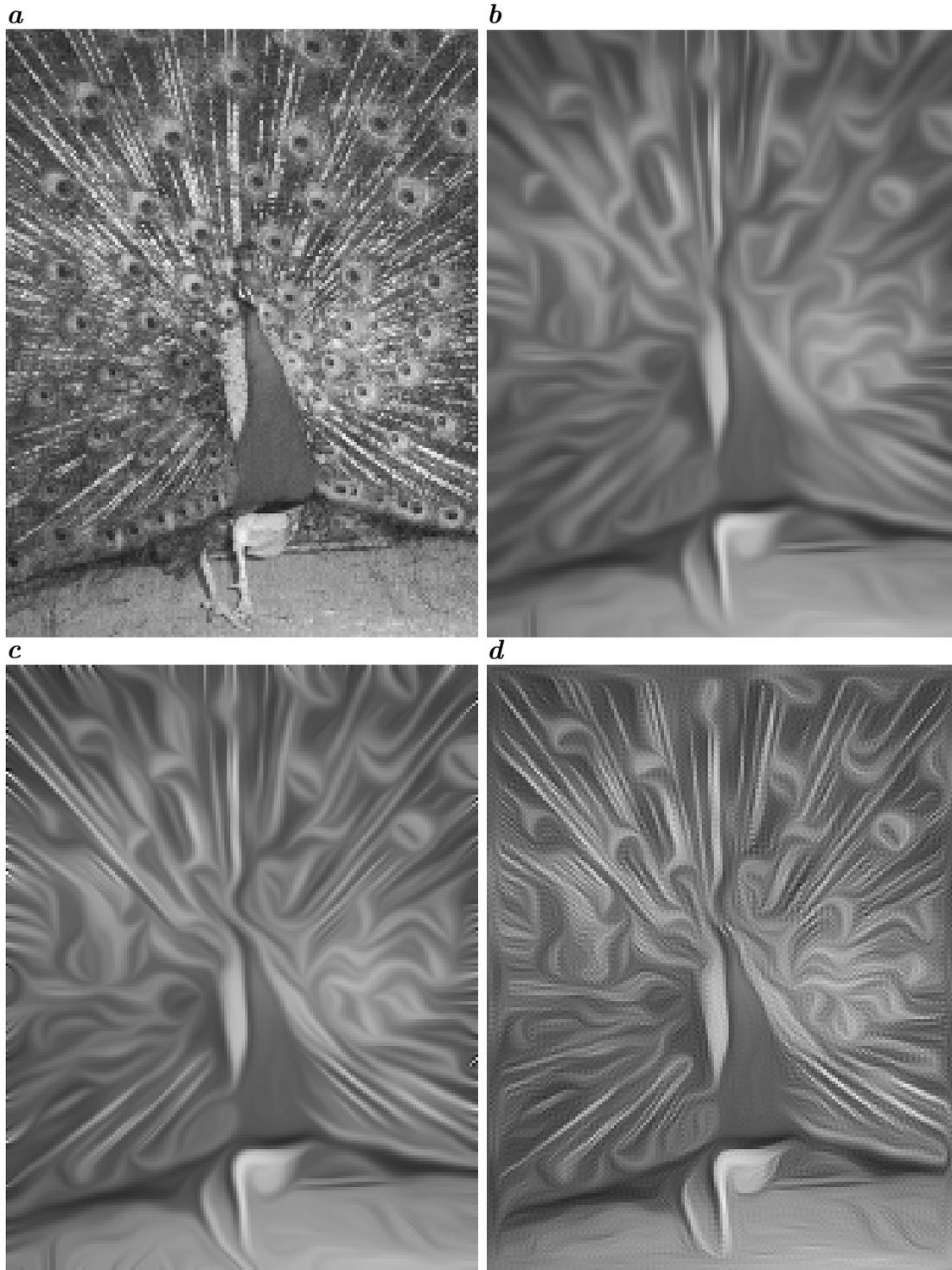


Abbildung 5.7: Anwendung der anisotropen Diffusion auf ein reales Bild (Pfau): **a** Originalbild, **b** Standardverfahren, das horizontale und vertikale Strukturen erkennt, **c** das nichtnegative Schema liefert zusätzlich in der Winkelhalbierenden gute Ergebnisse. **d** demonstriert das neue Verfahren, das alle Richtungen gleich behandelt. Die Parameter sind bei allen Berechnungen gleich gewählt. Quelle: [SCHARR 2000a]

Kapitel 6

Particle Tracking Velocimetry

Unter Particle Tracking Velocimetry (PTV) versteht man ein Strömungsvisualisierungsverfahren, welches die Lage und Geschwindigkeit von Tracerteilchen in lagrangescher Darstellung beschreibt. Es basiert auf der Erkennung und Verfolgung von Teilchen in Bildfolgen, deren Geschwindigkeit ermittelt wird. Soll dies in drei Dimensionen erfolgen (3D-PTV), so müssen mehrere Kameras simultan benutzt werden. Um die raumzeitliche Lokalisierung eines Teilchens in Form einer Trajektorie verfolgen zu können, sind zwei Arten der Zuordnung zu erfolgen: die zeitliche innerhalb einer Sequenz und die räumliche aus der Position der Kameras.

Die Korrespondenzsuche zur Identifikation einer 3D-Trajektorie kann auf zwei Weisen erfolgen: In dem benutzten Algorithmus wird ein Teilchen innerhalb jeder Bildfolge zu einem zeitlichen *Streak* zusammen gesetzt (2D-PTV). Die Streaks werden unter Verwendung der aus der Kalibrierung bekannten Kamerapositionen mit einer Spur der zweiten Bildfolge korreliert (Abschnitt 6.3). Ein anderer Ansatz besteht darin, zunächst die Korrespondenz eines detektierten Teilchens von den verschiedenen Positionen aus herzustellen und dann die Bewegung zeitlich zu verfolgen [MAAS et al. 1993]. Dazu ist es hilfreich, mehr als zwei Kameras einzusetzen.

Der erste Schritt stellt die Unterteilung eines Bildes in Teilchen und Hintergrund, also Signaltbereiche und Rauschen, dar. Diese Abbildung wird Segmentierung genannt (Abschnitt 6.1) und erfordert einen modellbasierten Algorithmus. Die hier benutzte Segmentierung wurde für die Erkennung von Streaks in Strömungsbildern entwickelt.

Im Zweidimensionalen wurde die Messmethode innerhalb der Arbeitsgruppe Digitale Bildverarbeitung erstmals von [WIERZIMOK 1991] umgesetzt und von [HERING 1996] für Messungen am Heidelberger Wind-Wellen-Kanal weiterentwickelt. Einen theoretischen Algorithmus für 3D-PTV stellte [NETZSCH 1995] vor;

eine Implementierung und Anwendungen fand er in Adaption von [GARBE 1998] und [ENGELMANN 2000] am Wind-Wellen-Kanal und [STÖHR 1998] an Blasensäulen. Die Fragestellungen dabei sind prinzipiell die gleichen dieser Arbeit, so dass die vorhandene Implementierung benutzt wird.

6.1 Segmentierung und morphologische Nachbearbeitung

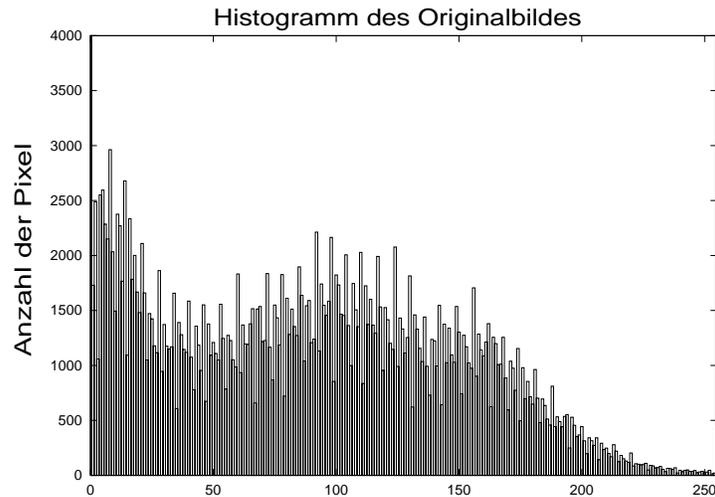


Abbildung 6.1: Histogramm einer Messaufnahme (Abb. 5.1a). Die Grauwerte sind breit verteilt. Eine pixelbasierte Segmentierung ist hier ungeeignet.

Mathematisch stellt die Segmentierung eine Funktion aus der Menge der Grauwerte \mathbb{G} in die binären Zustände $g_s(\vec{u}) : \mathbb{G} \mapsto \{0, 1\}$:

$$g_s(\vec{u}) = \begin{cases} 1 & : \vec{u} \in \text{Objekt} \\ 0 & : \text{sonst} \end{cases}$$

dar. Das Kriterium $\vec{u} \in \text{Objekt}$ bildet die Schwierigkeit. Dem Menschen gelingt eine solche Klassifizierung (auf grober Skala und bei ausreichendem Kontrast) bei Betrachten der Bildfolge mühelos. Zur maschinellen Segmentierung muss man je nach Aufgabenstellung verschiedene Methoden anwenden (s. auch [JÄHNE 1997]):

- Pixelbasierte Methoden: Es wird nur der Grauwert einzelner Pixel betrachtet. Oberhalb einer globalen oder lokalen Schwelle wird ein Objekt vermutet.

- Regionenorientierte Methoden: Dabei wird zusätzlich der Grauwert innerhalb einer Nachbarschaft genutzt, um Merkmale zu ermitteln.
- Kantenbasierte Methoden: Es werden Kanten erkannt und das Objekt dadurch abgegrenzt.
- Modellbasierte Methoden: Die Kenntnis der Form des Objekts wird benutzt, um die Objektregion daran anzupassen.

Wie [WIERZIMOK 1991] gezeigt hat, sind pixelbasierte Methoden für die Segmentierung von Strömungsbildern ungeeignet. Die Beleuchtung ist sehr inhomogen und wegen der Kontinuität des optischen Flusses f

$$\partial_t g + \mathbf{f} \vec{\nabla} g = 0$$

ist der Grauwert von der Ausdehnung des Objekts und damit der Teilchengeschwindigkeit abhängig. Bei der Bearbeitung der Probemessungen wurde ein regionenbasiertes Verfahren eingesetzt.

Einfache Segmentierungen weisen häufig Fehler auf (vgl. Abb. 6.2). Meist fehlen in einem Objekt einzelne Punkte, oder es werden im Hintergrund einige vom Rauschen erzeugt. Auch kann das Kreuzen zweier Streaks ein Teilen der Objekte bewirken. Dem begegnet man z.B. mit morphologischen Operationen ([RUSS 1994], [SOILLE 1999], [SPIES 1998]). Die grundlegenden Operationen sind die Dilatation und die Erosion, die Bereiche gemäß eines nachbarschaftsartigen Elements vergrößern bzw. verkleinern. Aus den Grundoperationen lassen sich weitere wie das Opening und das Closing kombinieren. Solche Operationen sind bei Bildfolgen auch zeitlich möglich.

Regionenwachstumsverfahren

Eine kombinierte Segmentierung und morphologische Nachbearbeitung bietet eine Methode von [MATAS und KITTLER 1995], das von [WIERZIMOK 1991] implementiert wurde. Eine genauere Beschreibung befindet sich in [HERING 1996]. Der Algorithmus gliedert sich in vier Schritte: Zunächst werden lokale Grauwertmaxima aufgefunden, die als Keimpunkt weiterer Operationen dienen. In ihrer Umgebung werden im zweiten Schritt Merkmale extrahiert. Daraufhin erfolgt eine Objekterkennung: Wird ein als Parameter angegebener Kontrast überschritten und liegt die Breite des Grauwertpeaks in einem vorgegebenen Intervall, so wird diese Umgebung als Streak erkannt. Zuletzt folgt ein Regionenwachstum, das eine quadratische Umgebung solange vergrößert, bis kein neuer Objektpunkt gemäß folgender Kriterien dem Streak hinzugefügt wird: Innerhalb der 8er-Nachbarschaft muss sich ein

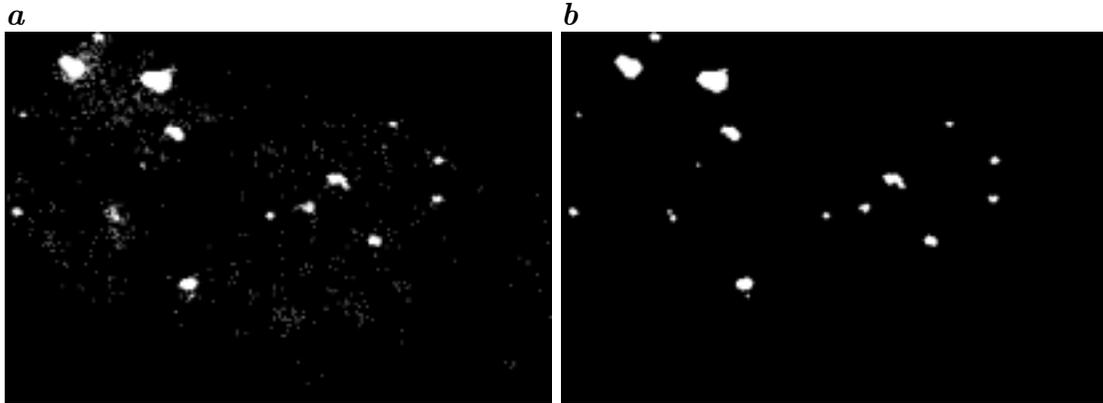


Abbildung 6.2: Demonstration einer morphologischen Operation: **a** mit globaler Schwelle segmentiertes, bereits vorverarbeitetes Strömungsbild, **b** nach Opening mit einem 3×3 -Kreuz (5 Pixel).

weiterer Objektpunkt befinden (*Konnektivität*) und der Grauwert muss über einer aus dem Grauwert des Keimpunkts berechneten Schwelle liegen (*Signifikanz*).

Dieses Verfahren ist der Segmentierung von Streaks gut angepasst, wobei lange Streaks leicht fragmentieren. Um gute Ergebnisse zu erzielen, muss der Rauschabstand genügend groß sein und die breite Varianz der Streakgrößen im Stereobereich berücksichtigt werden.

Adaptive Schwelle

Ein weiteres, regionenorientiertes Verfahren zur Erkennung ähnlicher Strömungsbildfolgen benutzt eine adaptive Schwelle [ENGELMANN 2000]. Zunächst wird ein Bild mit einer Glättungsmaske stark isotrop geglättet, so dass Objekte bis zu einer gewissen Größe ausdiffundieren. Die Filtergröße hat eine Größe von $A \times B \simeq 30 \times 30$, mit der Objekte bis etwa 15×15 besonders stark geglättet werden. Das erhaltene Bild wird vom Original abgezogen und sehr dunkle Regionen durch eine Schwelle entfernt. Das Ergebnis ist ein hochpassgefiltertes Bild mit verstärktem lokalem Kontrast. Die Objekte werden daraufhin durch eine Dilatation vergrößert, um angrenzende Objekte zusammenzufügen.

6.2 2D-PTV

Das Bild wird daraufhin in ein *Labelbild* überführt, das zusammenhängende Pixel zu einem Gebiet gruppiert und die Objekte durchnummeriert. Man erhält eine

indizierte Menge von Streaks.

Die Lage des Streaks wird durch den Grauwertschwerpunkt

$$\vec{u}_{cm} = \frac{\sum \vec{u}_i \cdot g(\vec{u}_i)}{\sum g(\vec{u}_i)} \quad (6.1)$$

bestimmt. Der Summationsindex läuft jeweils über alle Pixel innerhalb des Streaks. Dieser Bereich wird vom Labelbild geliefert, während der Grauwert aus dem Originalbild an den entsprechenden Pixeln gelesen wird. In die Schwerpunktberechnung geht bei großer Ausdehnung der Streaks und geringem Kontrast ein großer Fehler ein (vgl. Kap. 8.5). [HERING 1996] gibt ihn als größte Fehlerquelle des Algorithmus mit 0,6% an.

Nachdem die Objekte lokalisiert und ihre Schwerpunkte bestimmt sind, wird die zeitliche Nachbarschaft nach Korrespondenzen durchsucht. Der existierende Algorithmus verwendet eine Dilatation zur Aufweitung der Streaks. Tritt eine Überlappung auf, so wird dies als hinreichendes Kriterium für die Identität beider Objekte herangezogen. Die Geschwindigkeit (im Bild) ergibt sich aus der Verschiebung des Schwerpunktes während einer Belichtungszeit t_e : $\vec{v} = \frac{\delta \vec{u}_{cm}}{t_e}$. Bei hohen Geschwindigkeiten oder hohen Teilchendichten müssen zusätzliche Kriterien zur Identifikation der Teilchen herangezogen werden. Dazu erscheint die Ausdehnung des Streaks gut geeignet.

Ergebnis der 2D-PTV sind N Trajektorien der zeitlichen Ausdehnung von k_i , $i = 1, \dots, N$ Bildern entsprechend einer Verfolgungsdauer von $t_i = k_i \cdot t_e$ und k_i Aufpunkten $\vec{u}_{cm,i}$. Zusätzlich wird zu jedem Streak eine auf die Fläche normierte Grauwertsumme ausgegeben.

Für eine genauere Darstellung des Algorithmus sei auf [HERING 1996] verwiesen. Das folgende 3D-PTV ist in [GARBE 1998] beschrieben und soll ebenfalls nur knapp nachvollzogen werden.

6.3 3D-PTV

Nach Anwendung des 2D-PTV in den Bildfolgen der beiden Kameras werden nun die örtlichen Korrespondenzen gesucht.¹ Dazu benötigt dieses Verfahren die von der 2D-PTV berechneten Daten und die Kameraparameter aus der Kalibrierung, mit denen eine Transformation der Bildkoordinaten in Sehstrahlen gemäß dem Tsai-Modell vorgenommen wird.

¹Die folgenden Betrachtungen sind natürlich symmetrisch bezüglich der Wahl der Kameras.

Zur Lösung des räumlichen Korrespondenzproblems müssen einige Einschränkungen an die Suche möglicher Korrespondenzpartner gemacht werden. Die erste besteht darin, dass aus der Menge aller Streaks nur solche in die Suche einfließen, die zeitlich überlappen, also mindestens in einem simultanen Bildpaar zu finden sind. Die darauf folgende Epipolareinschränkung soll nun kurz erläutert werden.

Epipolareinschränkung

Diese erlaubt die Einschränkung der Suche auf eine Dimension. Alle auf den Bild-

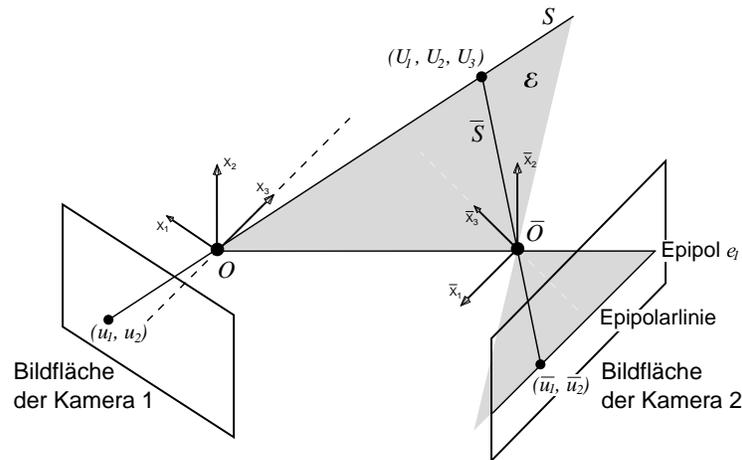


Abbildung 6.3: Die Epipolargeometrie mit eingefärbter Epipolarebene \mathcal{E} , die von \vec{U} , \vec{O} und \vec{O} aufgespannt wird, und dem Epipol \vec{e}_1 . Quelle: [GARBE 1998]

punkt \vec{u} abgebildeten Weltpunkte \vec{U} liegen auf einem Strahl \mathcal{S} . Die Abbildung dieses Strahls auf die andere Kamera wird *Epipolarlinie* genannt (vgl. Abb. 6.3). Ein zu \vec{u} korrespondierender Bildpunkt \vec{u} muss auf dieser Linie liegen. Diese Einschränkung reduziert die Suche bei N Bildpunkten von einem $N!$ - zu einem N^2 -Problem.

Durch die Begrenzung des Beobachtungsvolumens wird eine Strecke auf \mathcal{S} festgelegt. In Abbildung 6.3 ist dies für das optische Zentrum \mathbf{O} dargestellt, das eine Halbgerade definiert. Die Abbildung der Begrenzung nennt sich *Epipol* und sorgt für eine weitere Reduzierung des Rechenaufwandes.

Die Bestimmung der Epipolarlinie ist immer mit einem Fehler behaftet. Der Suchbereich des Korrespondenzproblems wird daher auf einen 2ϵ -Bereich um diese Linie ausgedehnt.

Bei der Strömungsvisualisierung sind die Kameras meist außerhalb der Flüssigkeit angebracht, wodurch eine Ablenkung des Mehrmedienübergangs entsteht. Bei dem vorgestellten Aufbau entfällt diese Korrektur, da die Endoskope im Wasser eingebracht sind.

Korrespondenzproblem

Innerhalb des Suchfensters $\pm\epsilon$ um die Trajektorie 1 (T_1) können folgende Fälle bei der Korrespondenzsuche auftreten (vgl. Abb. 6.4):

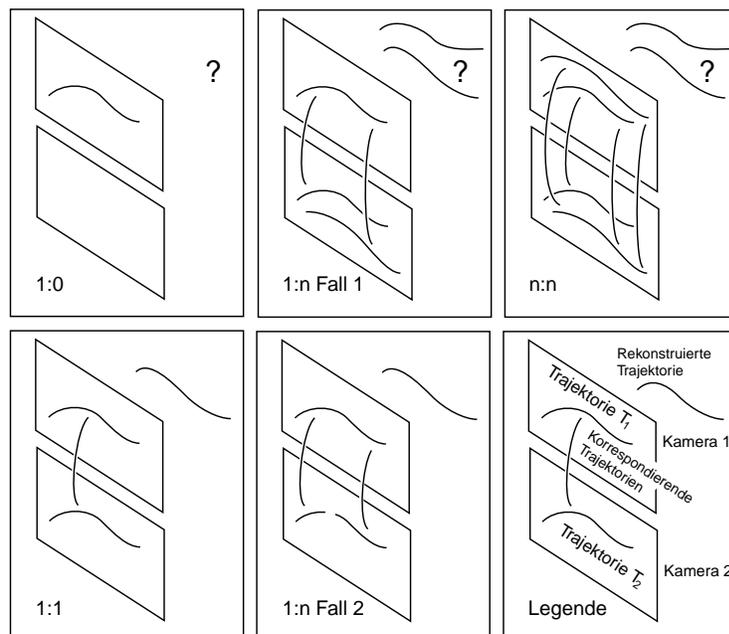


Abbildung 6.4: Mögliche Ergebnisse der Kandidatensuche innerhalb eines Suchbereichs beim 3D-PTV. Erläuterung im Text. Quelle: [GARBE 1998]

1:0 Keine Korrespondenz

Dieser Fall tritt auf, wenn das Teilchen den Stereobereich verlässt: $\vec{u}_{cm} \notin SS$ (vgl. Abschn. 3.3 und Abb. 3.6 auf S. 27). Ebenso ist es möglich, dass ein Streak bei der Segmentierung nicht erfasst wurde. Eine ungenaue Kalibrierung kann einen großen Suchbereich ϵ erfordern oder ein generelles Scheitern der Korrespondenz verursachen.

1:1 Eindeutige Korrespondenz:

Dies stellt den Idealfall dar.

1:n Eins-zu-Viele:

Fall 1: bei zeitlichem Überlapp der Korrespondenzpartner tritt ein zum n:n analoger Fall auf.

Fall 2: ohne zeitlichen Überlapp entspricht dies der 1:1-Korrespondenz.

n:n Viele-zu-Viele:

Es treten mehrere zeitlich überlappende, potenzielle Kandidaten auf. Um die Mehrdeutigkeit aufzulösen, sind weitere Kriterien heranzuziehen. Implementiert ist die Untersuchung der Standardabweichung der Abstände von der Epipolarlinie.

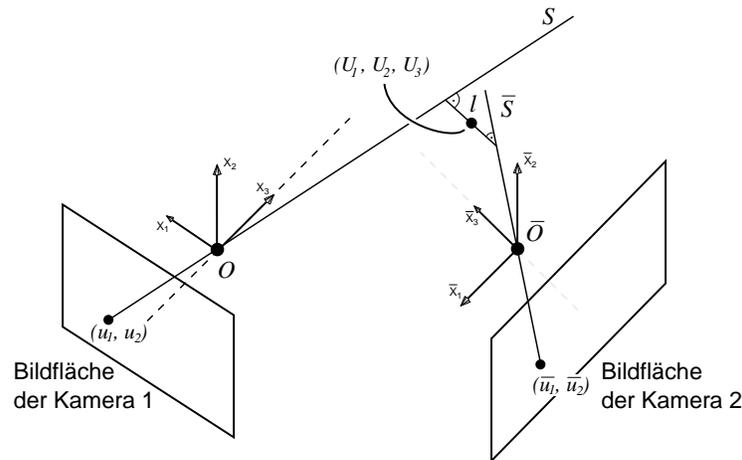


Abbildung 6.5: Rekonstruktion in den Objektraum: Die Strahlen der Ergebnisse der korrespondierenden Schwerpunkte liegen i.a. windschief mit einem Abstand l . Der Objektpunkt $\vec{U} = (U_1, U_2, U_3)^T$ wird als dessen Mittelpunkt angenommen. Quelle: [GARBE 1998]

Nach dem Auffinden einer Korrespondenz liefert die Inversion des Kameramodells zu jedem Schwerpunkt \vec{u}_{cm} einen Strahl im Objektraum (vgl. Abb. 6.5). Im allgemeinen liegen die Strahlen der beiden Kameras windschief mit einem Abstand l . Der Objektpunkt \vec{U}_{cm} wird im halben Abstand angenommen, was eine ausreichende Genauigkeit liefert [STÖHR 1998]. Es existieren genauere Rekonstruktionsverfahren, z.B. von [HARTLEY und STURM 1997].

Teil II

Versuchsaufbau und Ergebnisse

Kapitel 7

Experimenteller Aufbau

In diesem Kapitel wird die Messanordnung beschrieben. Zunächst werden die verwendeten Tracerpartikel und Kalibriergitter vorgestellt. Der wichtigste Teil des Aufbaus bildet der miniaturisierte Stereoaufbau mit externer Beleuchtung, dem sich der folgende Abschnitt widmet. Darauf folgt eine Beschreibung des Einführens in das Kiesbett. Zuletzt soll das benutzte Aufnahmesystem mit seinen optischen und elektronischen Komponenten erläutert werden.

7.1 Wahl des Tracers

Da bereits in anderen Arbeiten Tracerpartikel benutzt wurden, um Wasserströmungen zu visualisieren, standen einige Stoffe zur Verfügung, die folgende Anforderungen erfüllen:

- Die Dichte sollte nahe der des Wassers liegen, um eine Eigenbewegung der Teilchen aufgrund der Schwerkraft auszuschließen.
- Ihre Größe sollte ausreichen, eine hinreichend große Streuintensität zu erhalten.
- Sie sollten das Strömungsverhalten inklusive kleinskaliger Turbulenzen wiedergeben können. Sie sollten also möglichst klein gewählt werden.

Bei vergleichenden Aufnahmen wurde festgestellt, dass sich die *Optimage*-Teilchen für diesen Aufbau am besten eignen.

Tabelle 7.1: Vergleichsuntersuchung der zur Verfügung stehenden Tracer

Tracerpartikel	Mittl. Durchmesser [μm]	Menge [mg/l]	Helligkeit	Beobachtung
Polysterol-Scripps-Pulver	180	1066	dunkel	wenige Teilchen sichtbar
Optimage	30	43,3	hell	Teilchen verklumpen leicht
S22-Hohlkugeln	35	112	dunkel	Absetzen an der Oberfläche
Glashohlkugeln	10	514	hell	neblige, strukturlose Flächen entst.

7.1.1 Streuquerschnitt

In vorigen Untersuchungen von [LEUE 1996] und [GARBE 1998] wurde das winkelabhängige Streuverhalten einiger Tracer untersucht. In Übereinstimmung mit der Mie-Theorie nimmt der Streuradius bei hohen Streuwinkeln stark ab (s. Abb. 7.1). Wie in Kapitel 3.4 deutlich wird, ist das Intervall $\vartheta \in [60^\circ, 140^\circ]$ für den Aufbau interessant.

7.2 Kalibriertargets

Um eine präzise Kalibrierung zu erreichen, sollten möglichst viele, genaue Markierungen auf dem Target aufgebracht sein. Dazu wurden Gitter mit einem Fotobelichtungsdrucker mit etwa $1\mu\text{m}$ Genauigkeit auf eine Folie gebracht.¹ Der Gitterabstand beträgt 1 und 2 mm, die Linienbreite 0,1 mm. Um die Folie eben zu halten wurde sie zwischen zwei Mikroskopie-Deckgläser² geklebt. Deren Maße betragen 26 mm x 76 mm x $(0,15 \pm 0,02)$ mm; der Fehler, der durch Brechung beim Mehrmedienübergang entsteht, wurde wegen der geringen Dicke des Glases bei der Kalibrierung vernachlässigt.

Markierungen auf dem Gitter erlauben es, einen Referenzpunkt und orientierte Achsen in den verschiedenen Ansichten zu identifizieren. Sie müssen in beiden Bildern des Stereoaufbaus sichtbar sein.

¹ Elektronikwerkstatt des Physikalischen Instituts.

²aus dem Institut für Botanik

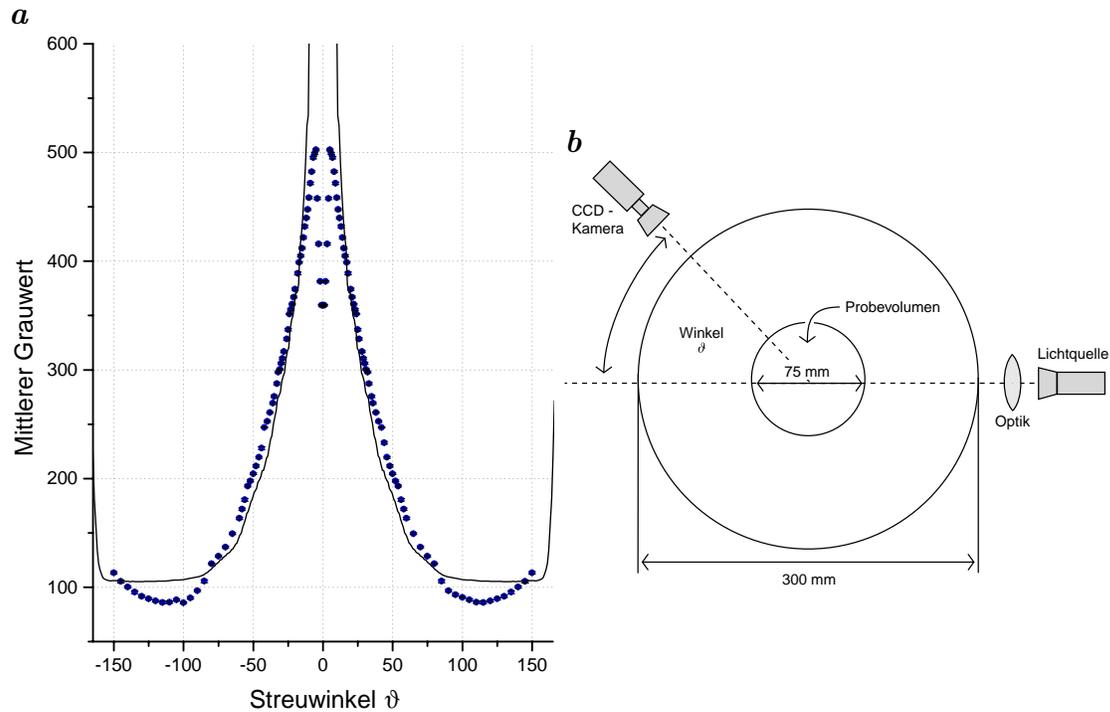


Abbildung 7.1: Als Tracer wurde das polykristalline Optimage gewählt. **a** zeigt den Streuquerschnitt mit Messwerten und der nach Mie-Theorie erwarteten Kurve. **b** Skizze des dabei verwendeten Messaufbaus. (Quelle [GARBE 1998])

Die verwendeten Targets sind in Abbildung 7.2 dargestellt. Darauf sind mehrere der L-förmigen Markierungen zu erkennen.

7.3 Realisierung des Stereoaufbaus

Neben den Forderungen an den Stereoaufbau (Abschn. 3.3.3) und die Beleuchtung (Abschn. 3.4 und 7.1.1) müssen auch andere praktische Aspekte bei der Umsetzung und beim Einbringen in die Kiesschicht beachtet werden. Dazu zählt das Fixieren der Endoskope und des Lichtleiters: Sie müssen dauerhaft, robust und starr miteinander verbunden sein, ohne dass ihr Einbau die Strömung beeinflusst. Der Zugang zu dem fixierten Aufbau muss vor dem Einbau in das Kiesbett frei sein, damit eine Kalibrierung möglich ist. Nachdem eine Messung beendet ist und die kalibrierte Einstellung verworfen werden kann, soll auch eine Demontage leicht möglich sein.

Zu diesem Zweck wurden einige aus je drei Kugeln bestehende Halterungen entwickelt. Die Kugeln haben einen Radius von 8 mm und sind aus Duroplast gefertigt.

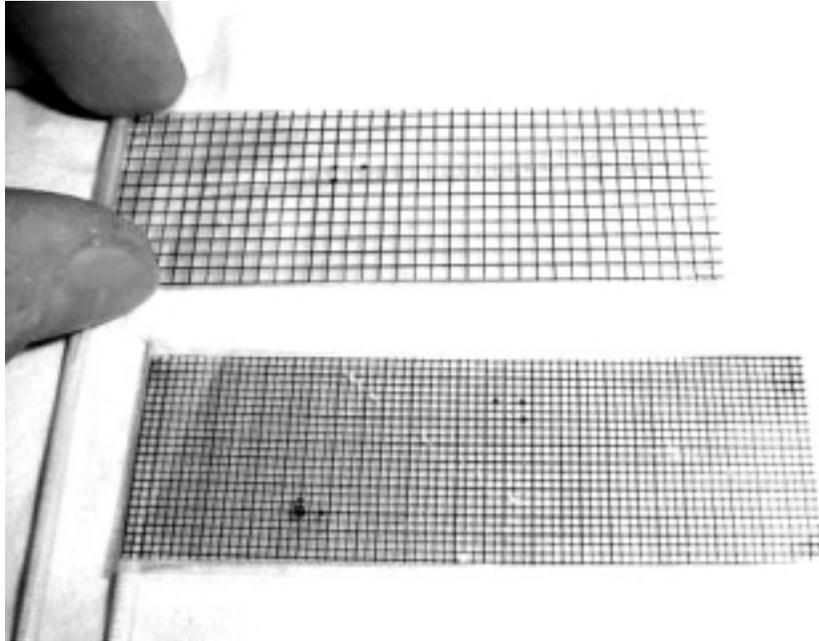


Abbildung 7.2: Die verwendeten Kalibriertargets für freie, miniaturisierte Kalibrierung.

tigt. In ihnen ist ein M4-Messinggewinde mit einer Tiefe von 12 mm eingefasst.³ Senkrecht zum Gewinde wurde ein Loch gebohrt (*Verschraubung Typ A*), das dem Durchmesser des einzubringenden Endoskops (oder Lichtleiters) entspricht (vgl. Tab. 7.4). In das Gewinde kann anschließend eine unten abgefeilte Stahlschraube eingebracht werden, die auf die stahlverstärkte Spitze des Endoskops drückt. Die fixierende Kraft muss ausreichen, um jegliches Dejustieren während und nach der Kalibrierung zu verhindern.⁴ Da die Endoskope und Lichtleiter mit einem recht starren Schutzschlauch versehen sind, ist dieser Punkt schwierig zu erfüllen, ohne das fragile Faserbündel zu beschädigen.

Einige der Kugeln wurden etwas abweichend bearbeitet (*Typ B*): Entlang des Gewindes wurde die Öffnung für das Endoskop gebohrt und senkrecht dazu ein Loch, das mit einem Gewindebohrer so erweitert wurde, dass eine 3M-Madenschraube zum Fixieren benutzt werden konnte.

Die kleinen Madenschrauben werden in die Kugel versenkt und bieten keine strömungsbeeinflussenden Flächen wie die großen Köpfe der M4-Schrauben. Entlang der Achse verbreitert sich das Loch im Gewinde, was bei den dünnen Endo-

³Diese Kugeln dienen normalerweise als schraubbare Kugelknöpfe an Werkstatthebeln.

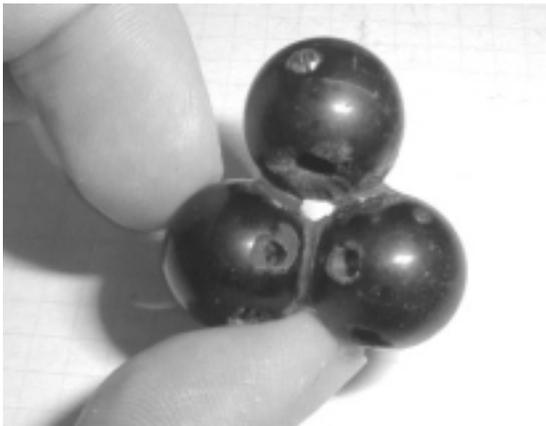
⁴ Bei den nun vorhandenen Endoskopen ist dies auch möglich, jedoch sind bei den Modellen mit einer zu kurzen Stahlspitze beim Festschrauben die Glasfasern gebrochen.

skopen die Stabilität beeinträchtigt.

Jeweils zwei Kugeln wurden daraufhin mit einem flüssigen Sekundenkleber an aufgerauten Stellen verklebt. Die Ungenauigkeit des Konvergenzwinkels α (s. Abb. 3.6) beträgt dabei etwa $\pm 4^\circ$. Dieser Winkel wird aus der Kalibrierung erhalten.

Eine weitere Kugel dient der Beleuchtung. Das Hinzufügen der dritten Kugel setzt sehr filigranes Arbeiten voraus und kann mit den verfügbaren Mitteln nur mit begrenzter Genauigkeit vorgenommen werden. Auch kann nicht während des Zusammenbaus überprüft werden, ob der Stereobereich komplett ausgeleuchtet wird. Um eine möglichst vollständige Ausleuchtung des Stereobereichs zu gewährleisten, wird die Beleuchtungskugel direkt – ohne stützendes Zwischenstück – auf die anderen gesetzt. Durch die Größe der Kugeln ist der Streuwinkel ϑ nach oben auf etwa 140° beschränkt (vgl. Abb. 3.11 auf S. 34). Die Einstellung dieser Position ist selbst bei der direkten Montage bestenfalls auf ± 1 mm genau vorzunehmen. Bei einem Abstand zum Kreuzungspunkt von 10 mm entspricht dies einer Winkelgenauigkeit $\arcsin\left(\frac{1\text{mm}}{10\text{mm}}\right) \simeq 6^\circ$. Tabelle 7.2 zeigt die gemessenen Parameter der angefertigten Aufbauten. Die Fehler beziehen sich hierbei auf die Messung.

a



b



Abbildung 7.3: Die Dreikugelaufbauten. **a** zeigt die Verschraubung Typ A für die Endoskope Typ I. Die obere Kugel dient der Beleuchtung. In **b** sind die eingebrachten Endoskope und der Lichtleiter zu sehen.

Später wurden die Klebstellen einiger Aufbauten mit einem Zweikomponentenkleber verstärkt und teilweise wegen der kleinen Kontaktstellen mit einem unterstützenden, sehr kleinen Kiesel verstärkt. Die Aufbauten müssen bei den Messungen unterschieden werden können und tragen daher einen Kennbuchstaben.⁵

⁵Aus Analogie zu einem untersuchenden Arzt, der an der Stirn eine Lampe trägt, und dem

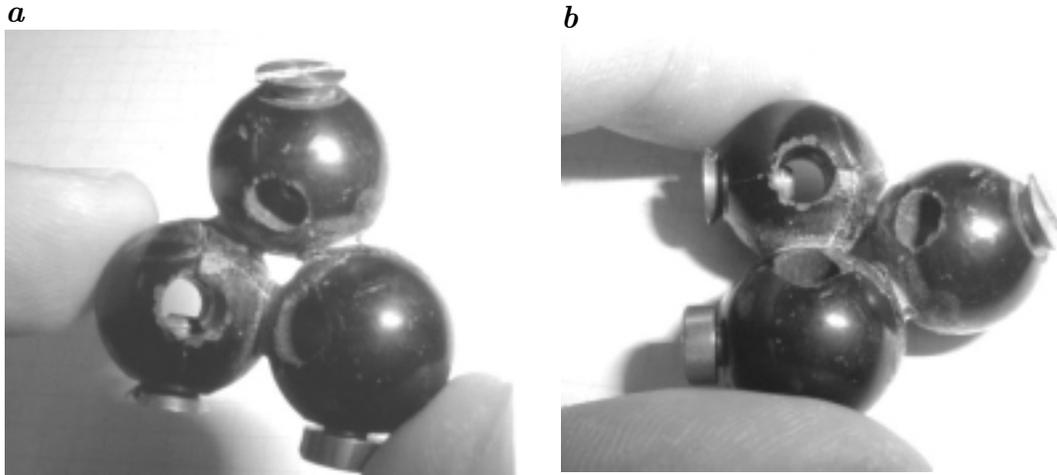


Abbildung 7.4: Die Dreikugelaufbauten mit der Verschraubung Typ B mit Bohrungen für die größeren Endoskope vom Typ II.

7.4 Einbringen des Aufbaus in den Kies

Nach der Kalibrierung kann der Aufbau für die Messungen in den Kies eingebracht werden. Dazu wird er zuvor mit einer in diesem Abschnitt beschriebenen Pore verklebt und in das Kiesbett in bekannter Höhe, Lage und Orientierung eingebettet. Dabei ist wiederum auf die von den Zuleitungen erzeugten Kräfte zu achten, die die Lage der Pore leicht verändern können.

Brächte man den Dreikugelaufbau direkt in das Kiesbett ein, so ergäben sich einige Probleme: Die Nahbereiche und der Überlappbereich können leicht mit einem Kiesel verdeckt werden, so dass eine Messung unmöglich wird. Dies könnte auch während der Messphase auftreten, so dass sie aufwändig unterbrochen und der Aufbau neu eingebracht werden müsste. Außerdem treten bei der Beleuchtung starke Reflexe auf, die es zu unterdrücken gilt.

Aus diesen Gründen wurden mehrere künstliche Kiesporen angefertigt, die ein definiertes Messvolumen frei halten (s. Tabelle 7.3). Die benutzten Kiesel werden mit mattem Kamera-Sprühlack behandelt, was eine deutliche Reduzierung der Reflexe bewirkt.⁶

Hauptanwendungsgebiet von Endoskopen sind diese Buchstaben als Initialen großer Ärzte zu lesen: **G**alen, **I**mhotep, **H**ensler, **S**usruta, **E**risistratas.

⁶Die Poren tragen ihrer Namen aufgrund der Ähnlichkeit zu walisischen Schlossruinen: **C**aernarfon, **B**eaumoris, **K**idwelly.

Tabelle 7.2: Parameter der Kugelaufbauten

Aufbau:	G	I	H	S	E
für Endoskope Typ	II	I	II	I	II
Verschraubung Typ	A	B	A	A/B	A
b gemessen	11 mm	7mm	9mm	11mm	9mm
Fehler	1mm	1mm	1mm	1mm	1mm
α gem.	50°	62°	60°	55°	46°
Fehler	$\pm 4^\circ$	$\pm 4^\circ$	$\pm 5^\circ$	$\pm 3^\circ$	$\pm 6^\circ$
ϑ gem.	135°	120°	139°	138°	134°
Fehler	$\pm 7^\circ$	$\pm 10^\circ$	$\pm 9^\circ$	$\pm 4^\circ$	$\pm 4^\circ$
Verstärkung vorh.?	X	—	—	X	X

Tabelle 7.3: Maximal erreichbare Ausdehnung des Messvolumens mit den künstlichen Poren

Pore:	C	B	K
max. Tiefe	(20 \pm 4) mm	(18 \pm 4) mm	(13 \pm 2) mm
max. Breite	(20 \pm 2) mm	(19 \pm 2) mm	(16 \pm 1) mm

7.5 Die Signalkomponenten

Bei den Endoskopen und Lichtleitern handelt es sich um Spezialanfertigungen. Die optischen Eigenschaften der Endoskope variieren selbst bei den Modellen desselben Typs (s. 8.5).

7.5.1 Endoskope

Als Endoskope wurden zweierlei Typen verwendet: Vier *micro-Bendoscope* der Volpi AG (Typ I) und zwei *Microline-Fiberscope* der Firma Visutool (Typ II). Bei beiden Modellen handelt es sich um handgefertigte Einzelstücke, die sich individuell unterscheiden können. Dies ist bei der Kalibrierung zu beachten und wirkt sich auf die Bildqualität aus. Wesentliche Unterschiede der beiden Modelltypen sind in Tabelle 7.4 aufgelistet.

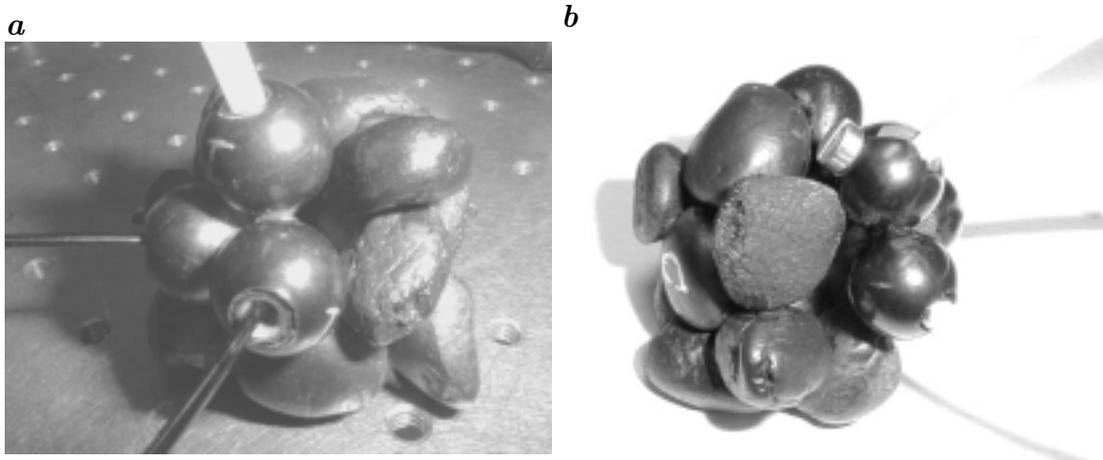


Abbildung 7.5: Die künstliche Pore C mit angesetztem Kugelaufbau. In **a** sind Endoskope des Typs I eingesetzt, in **b** des Typs II.

7.5.2 Lichtleiter

Als Beleuchtung wurde ein Glasfaser-Lichtleiter gewählt, der speziell für die Messanforderungen hergestellt wurde⁹: Er ist dreiarmig ausgeführt, damit alle Aufbauten von einer gemeinsamen Lichtquelle versorgt werden können. Ähnlich dem Endoskop Typ II ist eine Durchführungsmetallhülse auf halber Länge angebracht, um ein Anflanschen an die Wasserwandung zu ermöglichen. Zudem wurde es an der distalen Spitze als Schutz beim Fixieren in dem Kugelaufbau verstärkt. Als Lichtquelle wird eine regelbare 90 W-Halogen-Kaltlichtquelle benutzt.¹⁰ Der Lichtleiter hat an der Spitze einen Durchmesser von 4,0 mm und überträgt Infrarot-gefiltertes Licht. Ein Erwärmen des beleuchteten Volumens kann somit vernachlässigt werden.

7.5.3 Kameras

Als Kameras wurden mit *Sony XC-73 CE* preiswerte Standard Zeilentransfer-CCD-Kameras gewählt, die in der CCIR-Videonorm (s. Kap. 3.2.1) in 256 Grauwerten auslesen. Sie verfügen über einen am Gehäuse einstellbare Verstärkung bis zu 18 dB, von dem im Versuch Gebrauch gemacht wurde und der das Rauschen maßgeblich beeinflusst. Die CCD-Chipgröße beträgt 1/3 Zoll, die der Einzelzelle $6,5 \mu\text{m} \times 6,25 \mu\text{m}$ [SONY 1998]. Es besteht die Möglichkeit, einen elektronischen Verschluss (*Shutter*) zu benutzen. Bei ausreichender Beleuchtung kann man auf

⁹Firma Visitoool

¹⁰Intralux®4000-1 Firma Volpi AG

Tabelle 7.4: Daten der Endoskope und Lichtleiter im Vergleich

	Typ I (Volpi)	Typ II (Visitool)	Lichtleiter
Länge	ca. 800 mm	ca. 2000 mm	ca. 2000 mm
Durchmesser Spitze	2,3 mm	5,0 mm	4,0 mm
Durchmesser Leitung	1,1 mm ⁷	3,8 mm	3,8 mm
Durchm. Flanschhülse	15 mm	6,0 mm	6,0 mm
Anzahl der Glasfasern	10.000	30.000	30.000
Öffnungswinkel $\zeta_{1,2}$	30°	30°	30°
Schärfebereich	4 mm - ∞	2-6 mm	—
Länge der Verstärkung	30 (5) mm ⁸	20 mm	20 mm
Robustheit	gering	hoch	hoch
Aufnahmehelligkeit	hoch	gering	—
Druckbeständigkeit	2-3 bar	3 bar	3 bar

diese Weise verhindern, dass die Qualität von Kalibrieraufnahmen durch Bewegungsunschärfe abgesenkt wird. Die Kameras sind sowohl in einem *interlaced*- als auch einem *non-interlaced*-Modus betreibbar, wobei die Auswahl über Softwareansteuerung erfolgt.

7.5.4 Framegrabber und Computer

Über ein Hirose-Kabel werden die Daten in einen PCEYE4¹¹-Frame Grabber geleitet. Dort werden sie digitalisiert und an den Computerspeicher geleitet. Die horizontale und vertikale Synchronisation beider Kameras wird von einem Sync-Generator auf dem Framegrabber gesteuert, so dass eine synchrone Aufnahme in beiden Bildern erfolgt.

Die Bildfolgen werden während der Aufnahme in den Arbeitsspeicher des Computers geschrieben. Um die Daten in Echtzeit auf die Festplatte zu schreiben, reicht der Datendurchsatz der Festplatten von wenigen MB/s nicht aus, so dass die Messung unterbrochen werden muss, bis das Speichern beendet ist. Es wurde versucht, während der Messung in Echtzeit auf ein RAID¹²-System zu schreiben, da solche Systeme für Brutto-Datenraten von bis zu 40 MB/s ausgelegt sind. Bei geschickter Implementierung der Speicherroutine ist dies prinzipiell möglich, jedoch wiesen die Probeaufnahmen mit einer Kamera bereits Lücken auf. Damit ist die Sequenzlänge

¹¹Firma Eltec Elektronik

¹²Redundant Array of Independent Disks

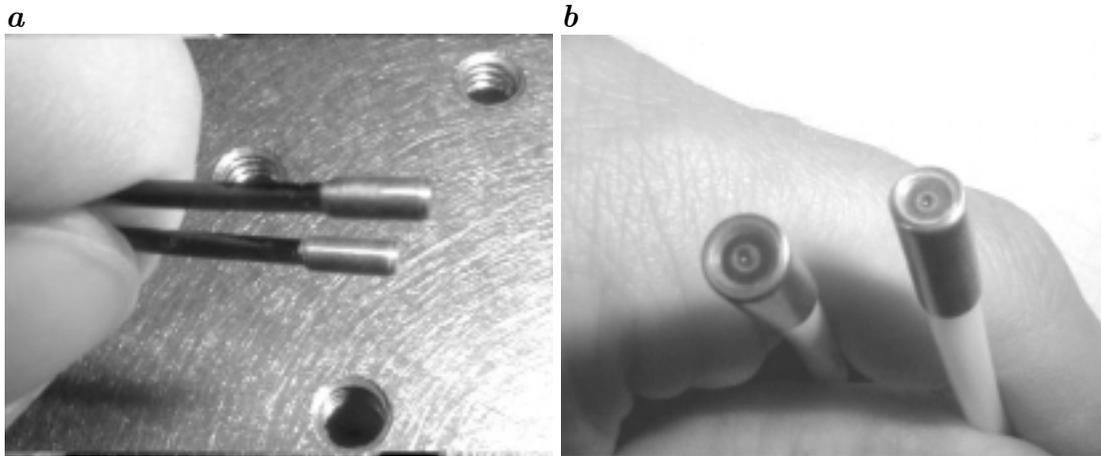


Abbildung 7.6: *a* zeigt die Endoskopenden des Typs I der Firma Volpi, *b* zeigt den Typ II der Firma VisiTool.

bislang auf die Kapazität des Arbeitsspeichers begrenzt. Hier wurde eine Allokierung bis 150 MB (entsprechend 2x220 Bilder) erreicht.

7.6 Beschreibung der Messungen

Zur Vorbereitung des Einsatzes in der BAW ist eine Probemessung des Systems durchgeführt worden. Dazu wurde die prinzipielle Messsituation in einem Wasserbecken der Größe 100 cm x 40 cm nachgestellt. Es wurde mit einer Sandschicht befüllt, über der ein Kiesfilter von 10 cm Höhe aufgebracht wurde (s. Abb. 7.8). In das darüber eingefüllte Wasser ragten zwei Enden einer regulierbaren Umwälzpumpe, die eine kontinuierliche Strömung durch einen Wasserkreislauf produzierte. Die maximale Geschwindigkeit wurde am Einlass zu näherungsweise 1 m/s bestimmt.

Es wurden zwei Messreihen in verschiedenen Lagen im Kiesbett aufgenommen. Dazu wurde ein Stereopaar des Endoskoptyps II im Kugelaufbau E in die Pore C eingesetzt (vgl. Tabellen in diesem Kapitel). Zusätzlich wurde eine Messreihe mit einem Endoskop des Typs I in der Wasserschicht aufgenommen, bei dem ein Echtzeittransfer der Daten auf ein RAID-System stattfand.

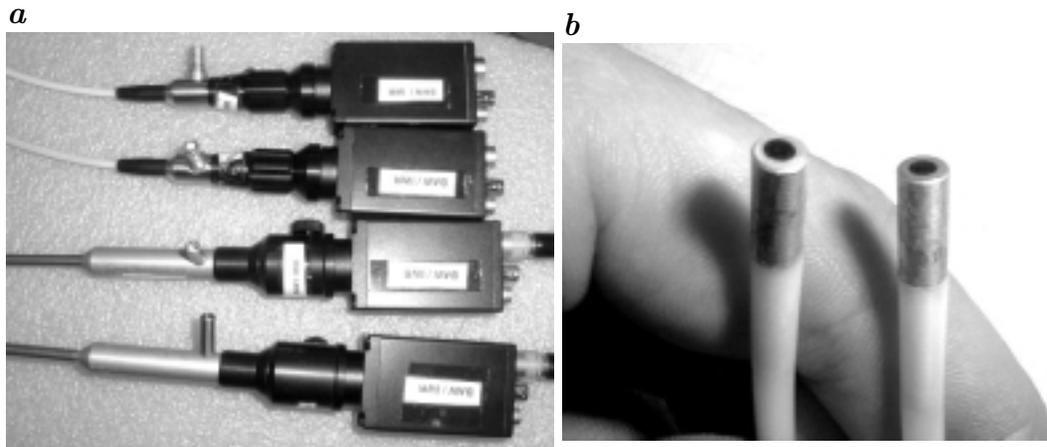


Abbildung 7.7: a zeigt die verwendeten Kameras mit angebauten Endoskopen, b die Enden der Lichtleiter

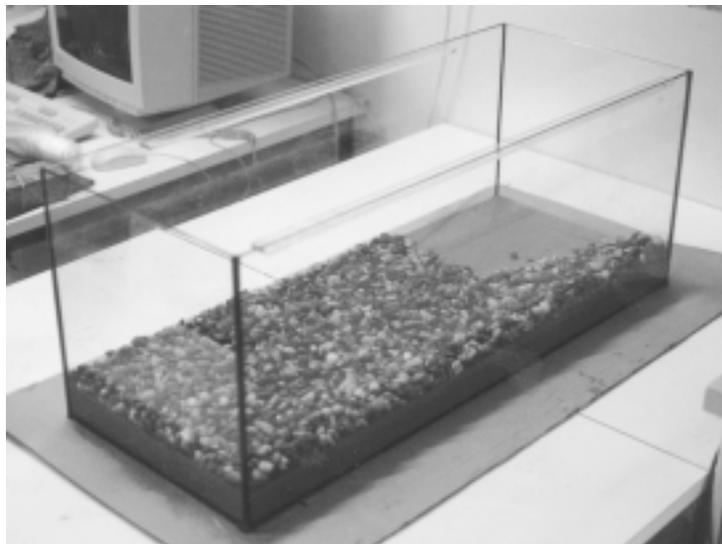


Abbildung 7.8: Das zur Probemessung benutzte Aquarium beim Befüllen.

Kapitel 8

Ergebnisse

Die Verarbeitung der Bilddaten geschieht für die Kalibrierdaten und die Messungen unterschiedlich. Aus jedem Kalibrierbild müssen zunächst die Punkte der Gitterebene im Bild lokalisiert werden, um eine Kalibrierung zu ermöglichen. Bei den Bildfolgen der Messungen muss als Voraussetzung für die 3D-PTV zuerst eine Segmentierung der Teilchen erfolgen und anschließend die Trajektorien mittels 2D-PTV gefunden werden.

Beide Datentypen werden im folgenden auf mögliche Verbesserungen mit Hilfe von Bildvorverarbeitung untersucht.

8.1 Berücksichtigen der Betriebsart

Wie in Kapitel 3.2.1 begründet wird, ist der non-interlaced Modus für die Messaufgabe besser geeignet als der interlaced Modus. Bei den Stereomessungen gelang allerdings eine Ansteuerung nur im *interlaced frame integration* Modus, d.h. ein Vollbild besteht aus zwei sich zeitlich überlappenden Halbbildern. Streaks verändern dadurch ihre Form (s. Abb. 8.1). Trennt man die Sequenzen in eine, die die oberen Halbbilder und eine, die die unteren enthält, so ergeben sich zwei Sequenzen, deren Belichtungszeiten von 40 ms kontinuierlich, d.h. ohne Überlapp oder Unterbrechungen aufeinander folgen. Sie sind zeitlich insgesamt um 20 ms versetzt und lesen ein um eine Zeile verschobenes Sensorhalbfeld aus. Ansonsten sollten sie die gleiche Information tragen. Eine Kalibrierung muss der Halbbildextraktion Sorge tragen. Dazu werden auch diese in Halbbilder geteilt und die Kalibrierung getrennt ausgeführt. Die Redundanz der Daten kann für eine Genauigkeitsanalyse der Auswertung herangezogen werden.

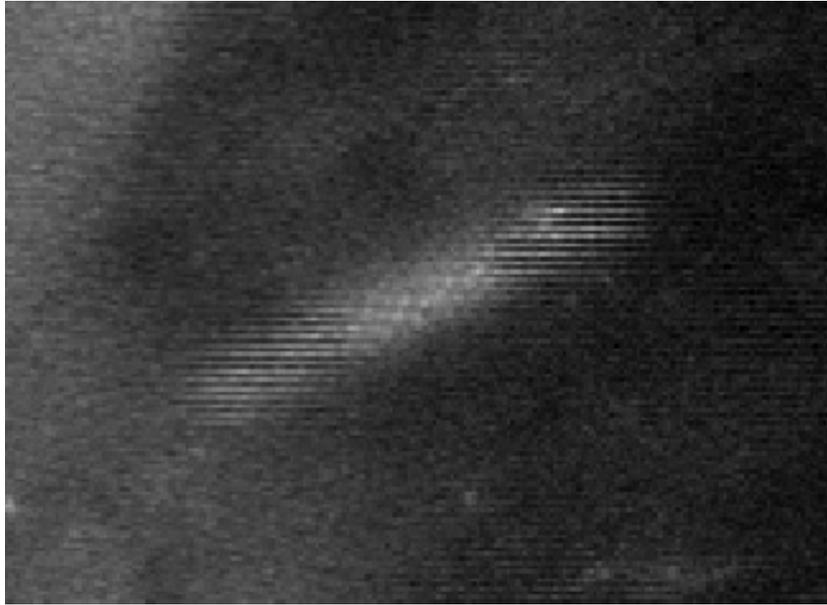


Abbildung 8.1: Vergrößerte Darstellung einer Messaufnahme im frame integration interlaced Modus. Die Belichtungszeiten der Halbbilder von 40 ms haben einen Überlapp von 20 ms. Streaks erscheinen im Vollbild immer zerklüftet.

8.2 Vorverarbeitung der Kalibrierbilder

Zunächst werden die mit den in den Abschnitten 5 und 5.3 vorgestellten Verfahren bearbeiteten Bilder gegenübergestellt. Da eine homogene Durchleuchtung des Targets schwer möglich ist, variieren die Helligkeitsniveaus stark (vgl. Zeilenschnitte Abb. 8.4–8.5). Dies ist bei der anisotropen Diffusion korrigiert worden.

8.3 Lokalisieren der Kalibriermarken

Grundlage der Kalibrierung bildet die aus den Kalibrieraufnahmen extrahierte Menge von Kreuzungspunkten auf dem Gitter. Die Bestimmung der Bildpunkte gliedert sich in zwei Schritte: Zunächst wird die grobe Position der Gitterpunkte mitsamt ihrer durch eine Markierung definierte Gitterkoordinate bestimmt. Die Bildpositionen dienen als jeweils lokaler Ursprung eines Subpixelfits gemäß Abschnitt 4.1. Dazu wird eine Kreuzfunktion mit gaussförmige Kreuzarmen gefittet (vgl. Abb. 8.6). Die Wahl der Startwerte wird dadurch sehr erleichtert, dass die Beleuchtungsinhomogenität ausgeglichen wird (s. Abschn. 8.2).

Tabelle 8.1: Parameter aus der Kalibrierung der Kameras W und A im Vergleich, Bezeichnung der Variablen s. Kapitel 4

	Rohdaten (W)	Rohdaten (A)	Gausspyr.(A)	anis. Diff. (A)
f [mm]	2,18	2,13	2,24	2,25
a	1,61	2,03	2,01	2,04
H_x [Pixel]	80,0	382,7	297,6	353,0
H_y [Pixel]	161,5	118,7	99,6	105,2
k_1	-0,056	-0,026	-0,029	-0,029
k_2	0,00098	0,0014	0,00024	0,00015
p_1	-0,31	0,38	0,53	0,33
p_2	7,1	1,08	1,25	0,95
t_1 [mm]	2,16	2,77	-0,06	3,46
t_2 [mm]	2,42	-4,60	-2,71	-3,95
t_3 [mm]	16,42	17,0	10,6	18,1
ϕ	-0,98	-0,18	-0,07	-0,20
κ	-0,37	0,09	0,25	0,10
ω	-0,59	0,75	0,77	0,74
$\bar{\epsilon}$ [Pixel]	1,16	1,16	1,19	1,20

Bei Vergleich der Kalibriermarken der Halbbilder sollte idealerweise eine vertikale Verschiebung von 0,5 Pixel und keine in horizontaler Richtung auftreten. Die Punkte sind bei vielen Aufnahmen jedoch versetzt, was auf eine Bewegungsunschärfe bei der Aufnahme hindeutet, da einige Kalibriertargets aus freier Hand aufgenommen wurden.

Für jede Kamera standen für die Kalibrierung etwa 700 Punkte aus 10 Ebenen zur Verfügung.

8.4 Ergebnis der Kalibrierung

Mit Hilfe des in Kapitel 4 beschriebenen Modells und der Methode in Abschnitt 4.2.1 wurde eine Kalibrierung unternommen (vgl. Tab. 8.1). $\bar{\epsilon}$ bezeichnet den mittleren Fehler in Pixeln. Das ist der Betrag des mittleren Abstandes zwischen den vom Modell ins Bild projizierten Punkten und den gefundenen Gitterpunkten.

In die *aspect ratio* a geht bei Halbbildern eine doppelte Ausdehnung d_y ein. Bei

einer angegebenen Zellengröße von $d_x = 6,5\mu\text{m}$ und $d_y = 6,25\mu\text{m}$ gilt dann

$$a = S_x \frac{2dy}{dx} \simeq 1,92 \cdot S_x .$$

Die Parameter lassen den Schluss einer adäquaten Abbildungsbeschreibung zu. Die Auswirkung der ermittelten Verzerrung wird in Abbildung 8.7 dargestellt. Aus $\bar{\varepsilon}$ lässt sich vermuten, dass das Auffinden der Kreuzungspunkte durch eine Glättung nicht verbessert wird. Die Möglichkeit der Verbesserung sollte dennoch auch bei künftigen Kalibrierungen untersucht werden.

Bei einer festen Montierung des Targets konnte eine Kalibrierung von Endoskopen des Typs I ein Wert von $\bar{\varepsilon} = 0,6$ produziert werden, bei Benutzung eines Standard 25mm-Objektivs wurde sogar $\bar{\varepsilon} = 0,08$ erreicht.

Die systematische Untersuchung der Kalibrierroutine steht noch aus.

8.5 Ergebnis der Messungen

Die Bildfolgen sollten hinsichtlich einer möglichen Verarbeitung mit der PTV untersucht werden. Es wird zunächst gezeigt, dass eine Vorverarbeitung der Rohdaten unumgänglich ist. Die Wirkung der einzelnen Schritte wird dargestellt.

Es wird eine Trajektoriendarstellung gewählt, in der aus einer Halbbildserie gefundene Streaks gezeigt werden. Die Streaks müssen sich dabei auf mindestens 4 Bilder erstrecken. Die Verschiebung des gefundenen Schwerpunkts wird farbkodiert und ist in Pixel/Bild angegeben.

Das Auffinden von Trajektorien wurde zunächst auf den Rohdaten versucht. igt, dass dieser Versuch bei der Aufnahme fehlschlägt.

Der nächste Schritt besteht aus der Extraktion der bewegten Strukturen, was wie in Abschnitt 5.1 vorgenommen wird. Zur Demonstration Schrittes ist in Abbildung 8.10 ein Beispiel angegeben.

Mit dem so bearbeiteten Bild liefert die PTV das Ergebnis in Abbildung 8.11.

Daraufhin wurde die dreidimensionale Anisotrope Diffusion angewandt. Das Ergebnis ist eine erhebliche Verbesserung des Bildmaterials. Abbildungen 8.12–8.13 zeigen die Wirkung dieses Schritts anhand einer Teilvergrößerung und eines Zeilenschnitts. Das Ergebnis der PTV in Abb. 8.14 macht deutlich, wie sehr die Auswertung dadurch verbessert wird.

Ein Vergleich mit der gleichen Auswertung nach Diffusion mit synchronen Aufnahmen der anderen Kamera zeigt, dass diese weitaus bessere Bilder liefert (s. Abb. 8.15). Dies ist keine Folge asymmetrischer Ausleuchtung. Die Verstärkung der Kamera W wurde auf etwa 5dB eingestellt, während Kamera A bei etwa 14dB betrieben werden musste.

Ein Ändern der Segmentierung kann ebenfalls die Qualität der Datenauswertung signifikant verbessern.

Die Probemessung mit einem Endoskop des Typs I macht folgendes deutlich: Die Diffusion macht sich nicht stark bemerkbar, da die Aufnahmen der heller abbildenden Endoskope für ein wesentlich besseres SNR sorgen.

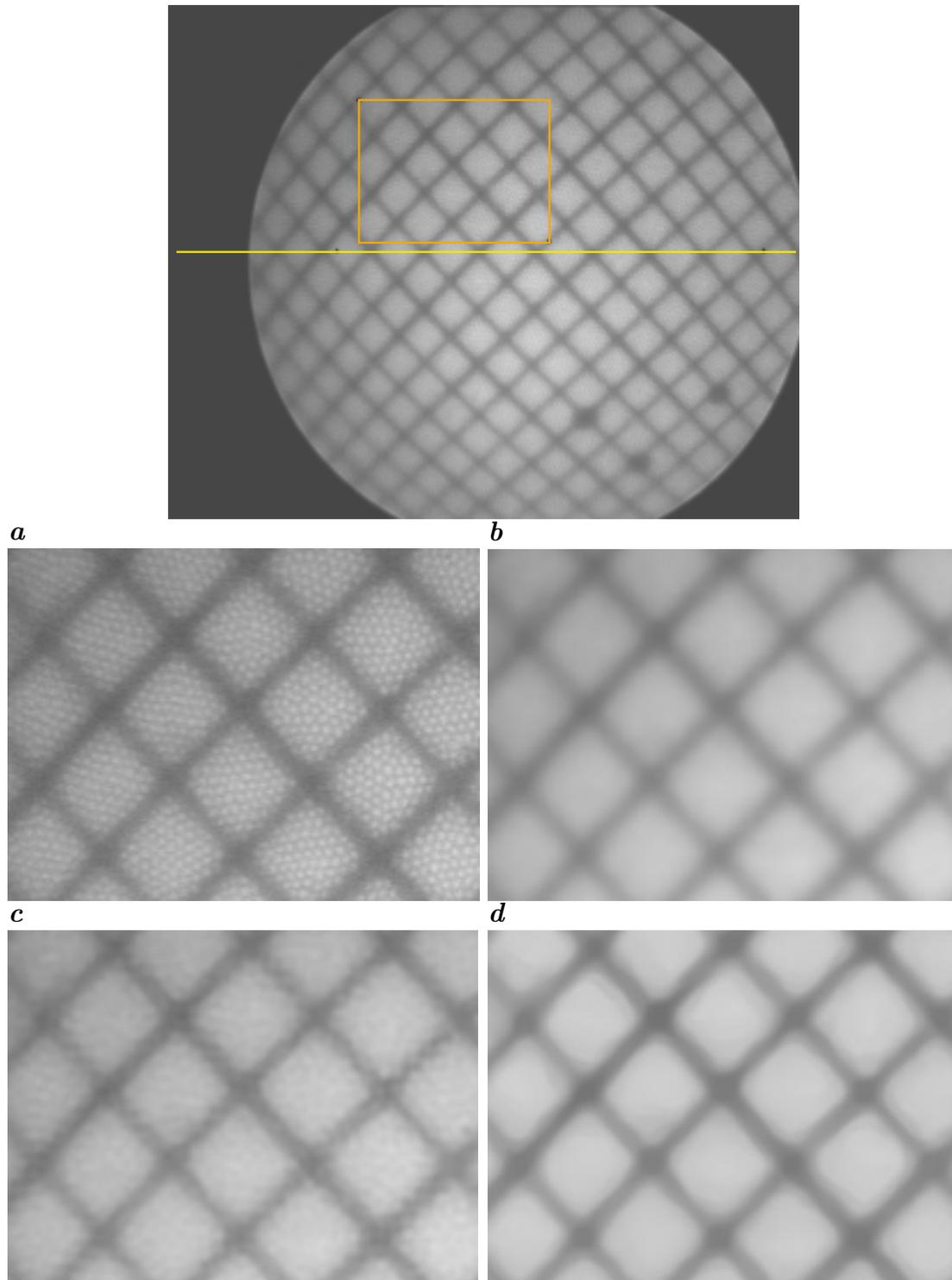


Abbildung 8.2: Beispiel eines Kalibrierbildes. Der vergrößerte Bereich und der Ort des Zeilenschnitts sind markiert. *a* Originalausschnitt, *b* nach Gaußpyramiden-Glättung, *c* nach Bandpass, *d* nach anisotroper Diffusion mit $k=1,0$ $\lambda=0,01$ und 20 Iterationen.

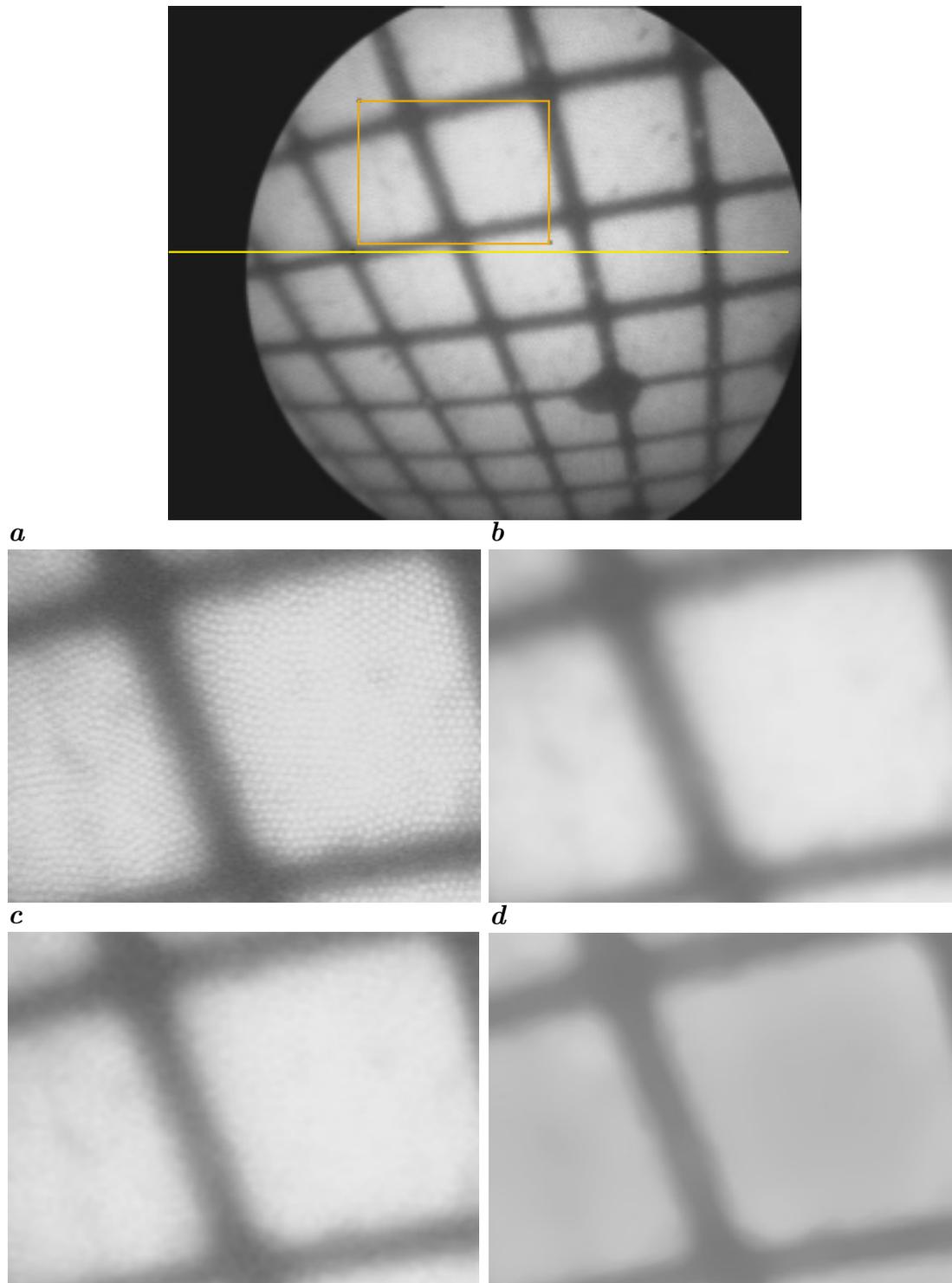


Abbildung 8.3: Ein stark verkipptes Kalibrierbild. **a** Originalausschnitt, **b** nach Gaußpyramiden-Glättung, **c** nach Bandpass, **d** nach anisotroper Diffusion.

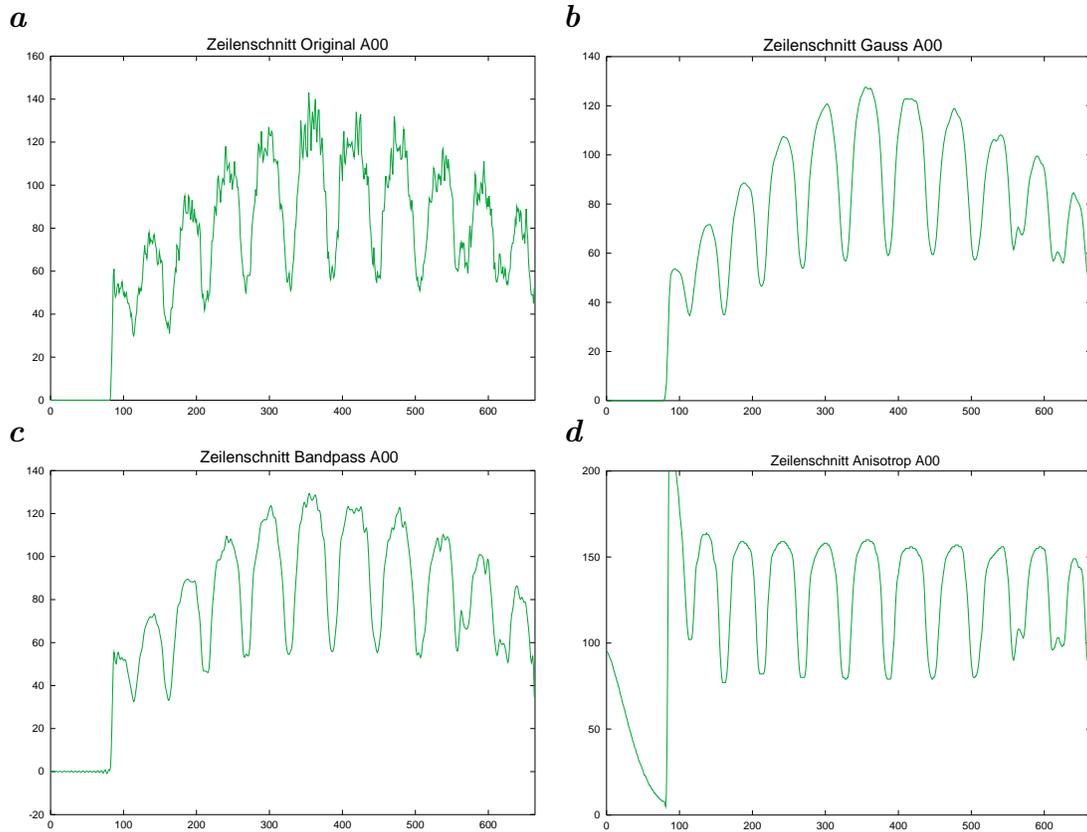


Abbildung 8.4: Vergleich der Glättungen anhand eines Schnitts der Zeile 260 aus *Abbildung 8.2*.

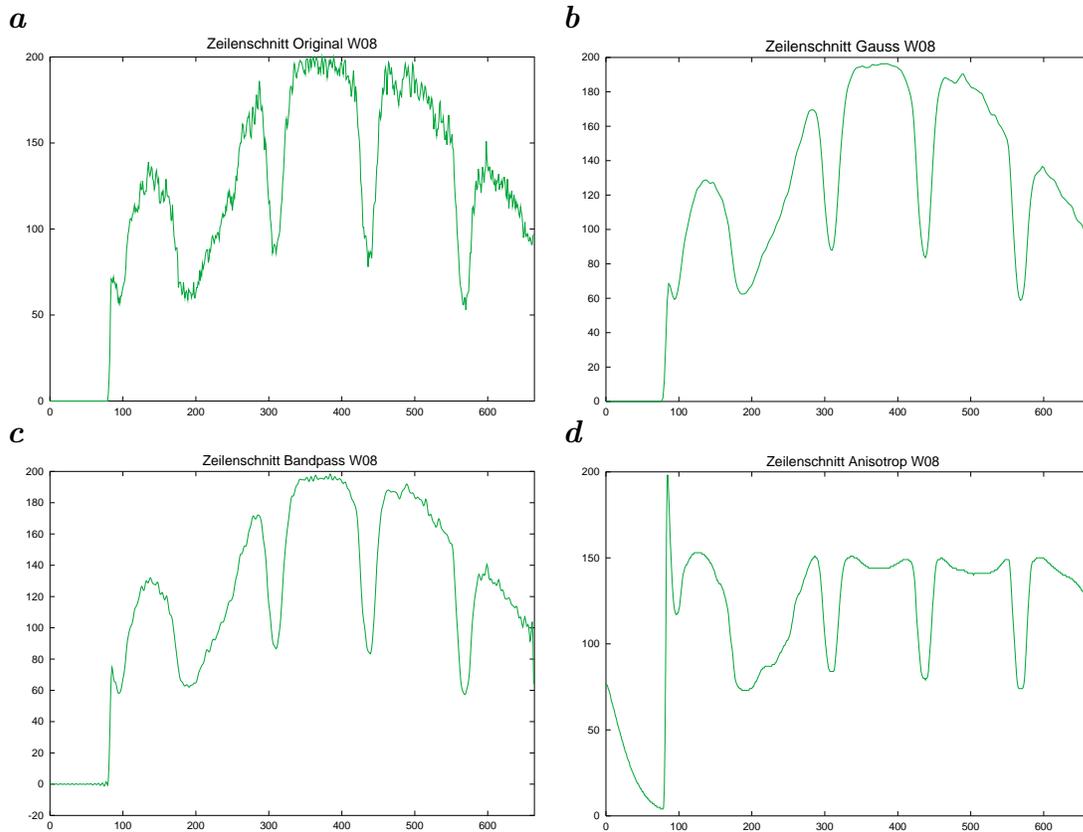


Abbildung 8.5: Vergleich der Glättungen anhand eines Schnitts der Zeile 260 aus *Abbildung 8.3*.

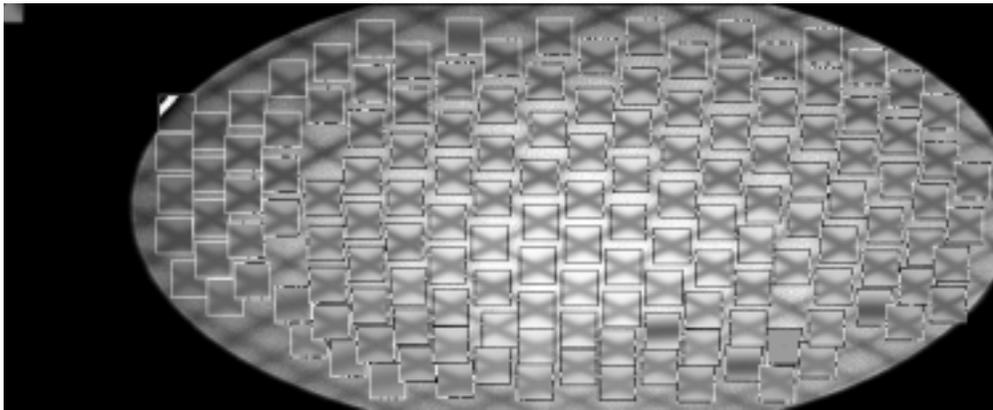


Abbildung 8.6: Subpixelfit an die gaussförmige Kreuzfunktion. Die berechneten Kreuze wurden an den Stellen, an denen der Fit konvergierte, dem Originalbild überlagert. Die Quadrate zeigen den Suchbereich des Fits an. Man erkennt in dieser Darstellung unmittelbar die Ausreißer.

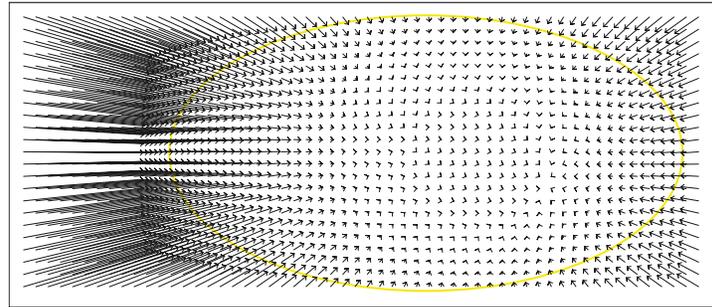


Abbildung 8.7: Auswirkung der berechneten Verzerrung des Endoskops A. Verstärktes Vektorbild der durch Verzerrung verursachten Verschiebung. Der Bildkreis ist eingezeichnet.

Z

Abbildung 8.8: e

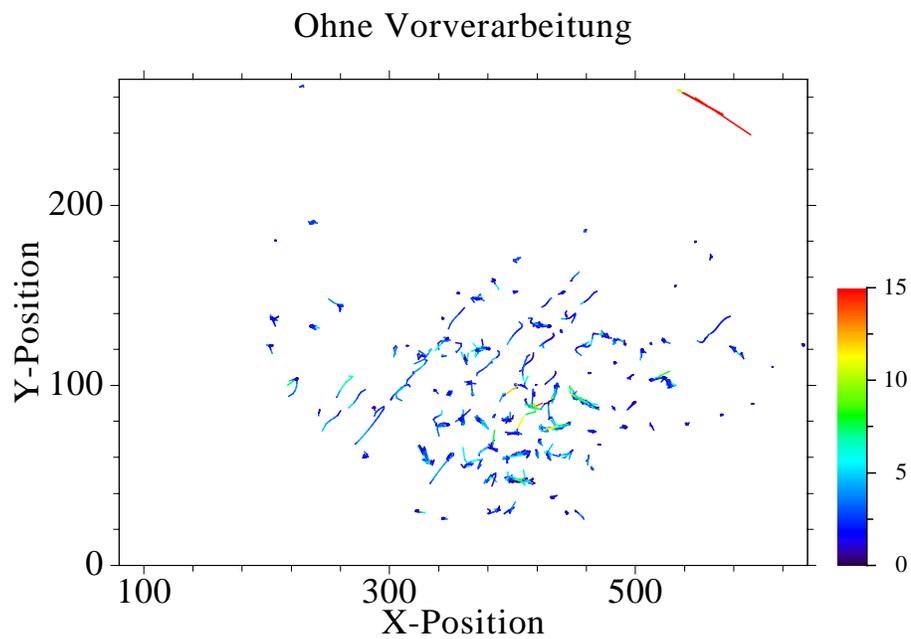


Abbildung 8.9: Direkte Verarbeitung der Rohdaten der Kamera A: Der Versuch, die Rohdaten zur Verarbeitung zu benutzen, scheitert. Die Farbe kodiert die Verschiebung zwischen den Einzelbildern.

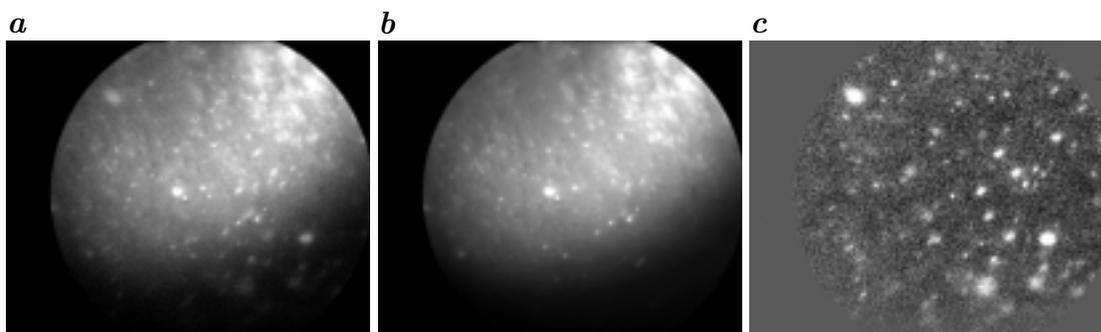


Abbildung 8.10: Subtraktion des statischen Hintergrundes: **a** Originalbild, **b** berechneter Hintergrund, **c** Differenz (verstärkt dargestellt)

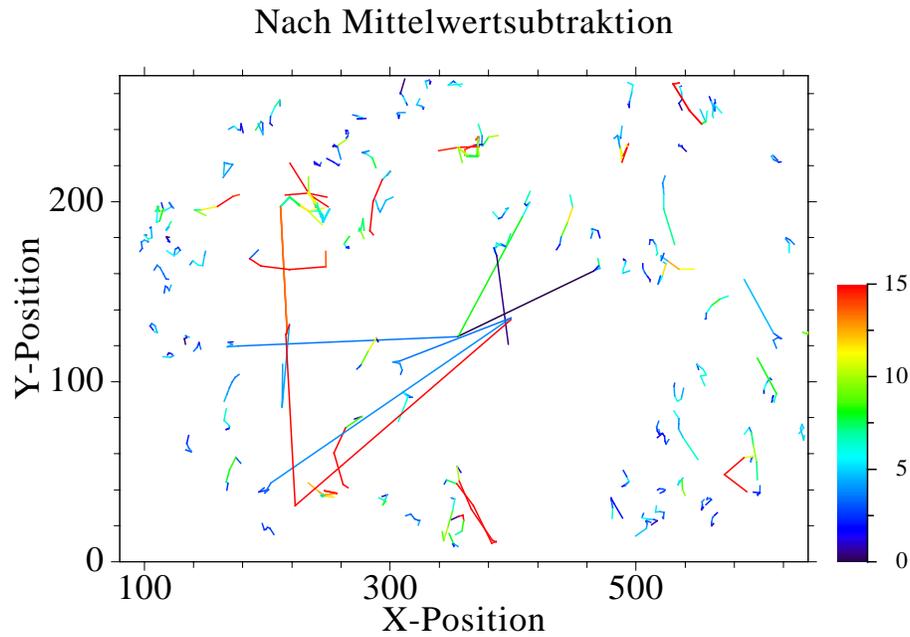


Abbildung 8.11: Nach Subtraktion des Hintergrundes: Es bleiben stark verrauschte Sequenzen, bei denen die Segmentierung irre geleitet wird und viele Ausreißer auftreten.

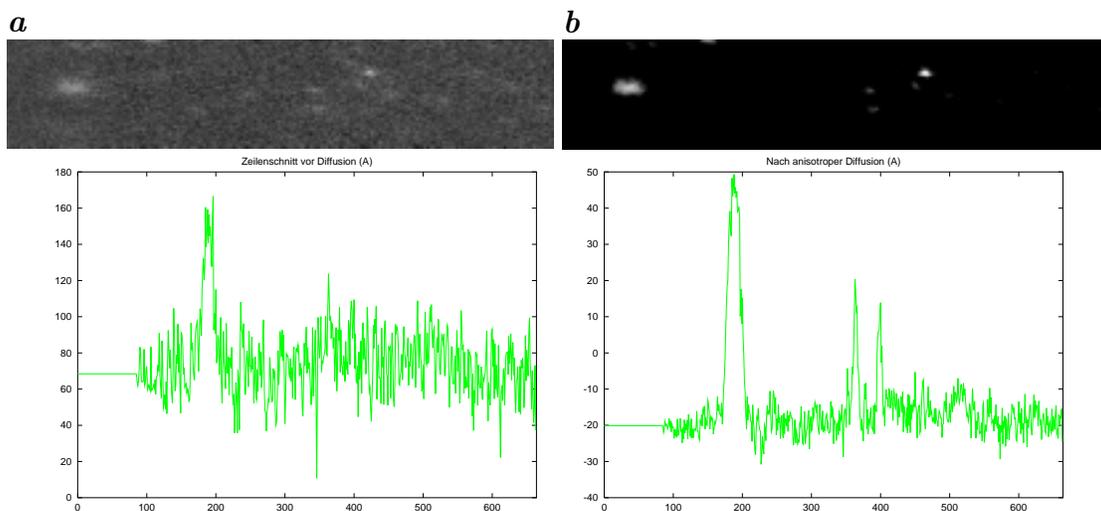


Abbildung 8.12: Kamera A: Ausschnittvergrößerung und Zeilenschnitt vor und nach anisotroper Diffusion mit $k = 1,0$, $\lambda = 0,01$ und 20 Iterationen. Die Signale sind nach Diffusion einfach auszumachen.

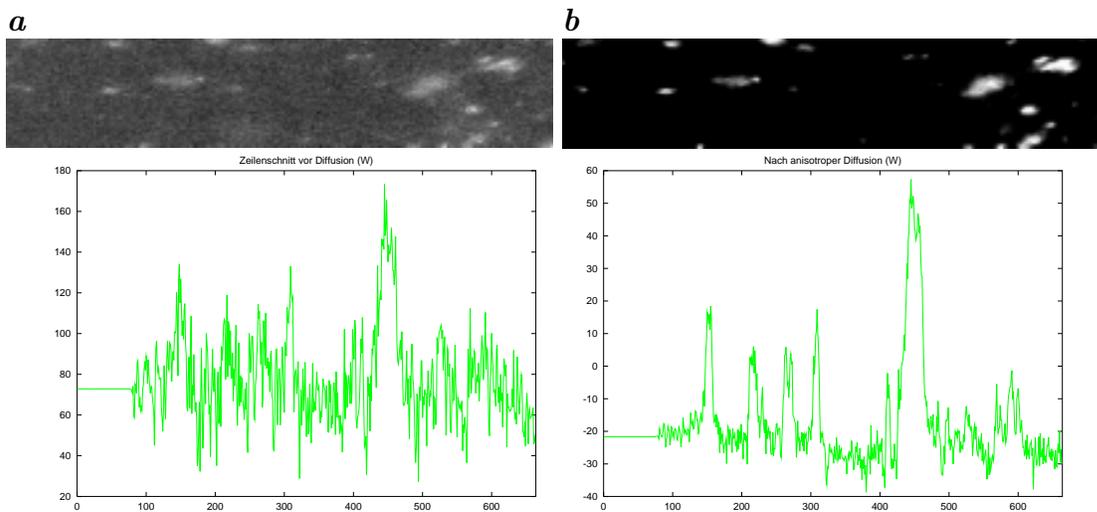


Abbildung 8.13: Kamera W: Ausschnittvergrößerung und Zeilenschnitt vor und nach anisotroper Diffusion mit $k = 1,0$, $\lambda = 0,01$ und 20 Iterationen. Die Signale sind nach Diffusion einfach auszumachen.

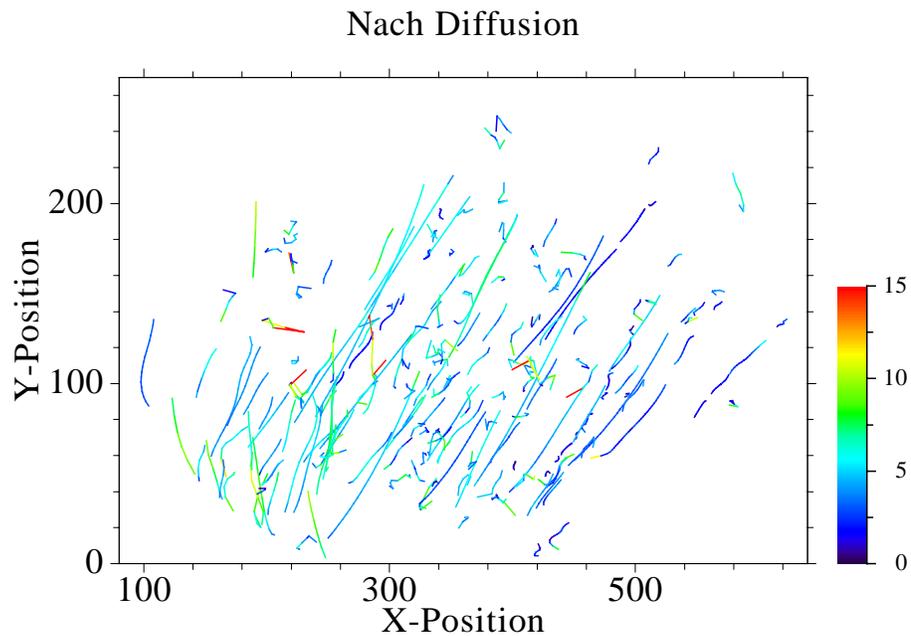


Abbildung 8.14: Nach dreidimensionaler anisotroper Diffusion: Es ist eine Strömung erkennbar. Das Bildmaterial wurde erheblich verbessert.

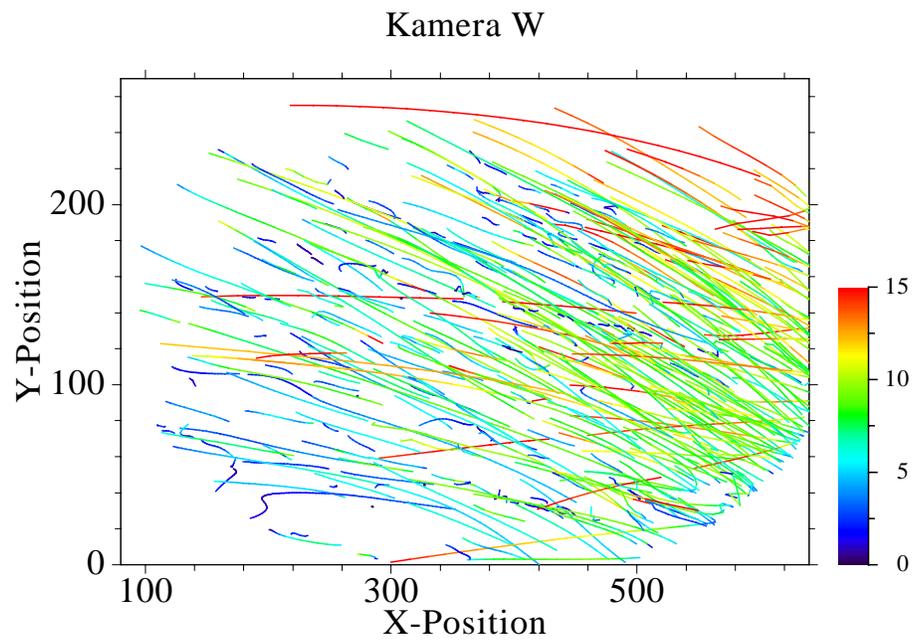


Abbildung 8.15: Andere Kamera: Die andere Kamera bildet heller ab. Die Teilchen können besser erkannt werden.

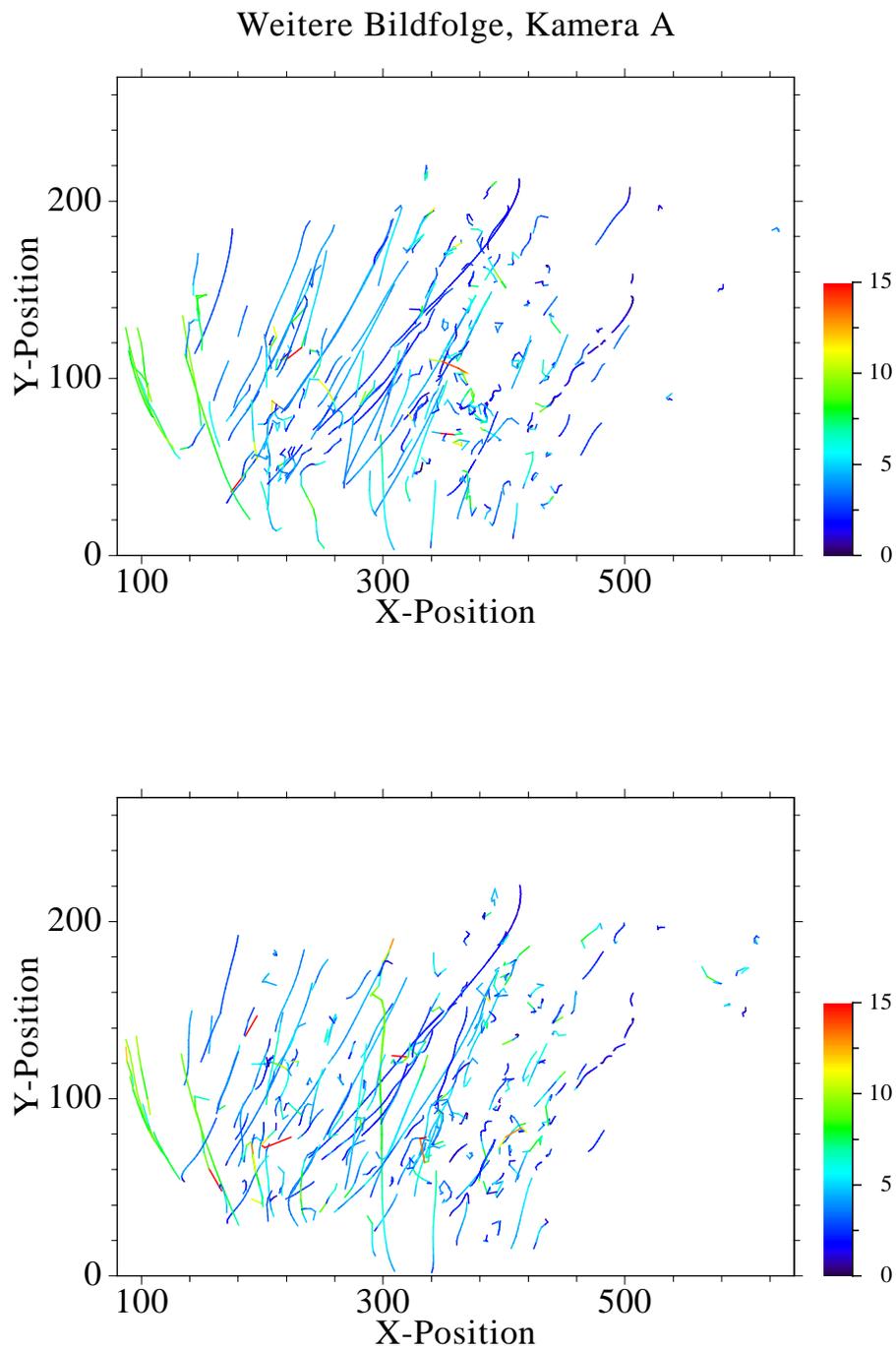


Abbildung 8.16: *Andere Segmentierung: Es ist eine andere Bildfolge dargestellt. Im zweiten Bild wurde bei der Segmentierungen die Dilatation erweitert.*

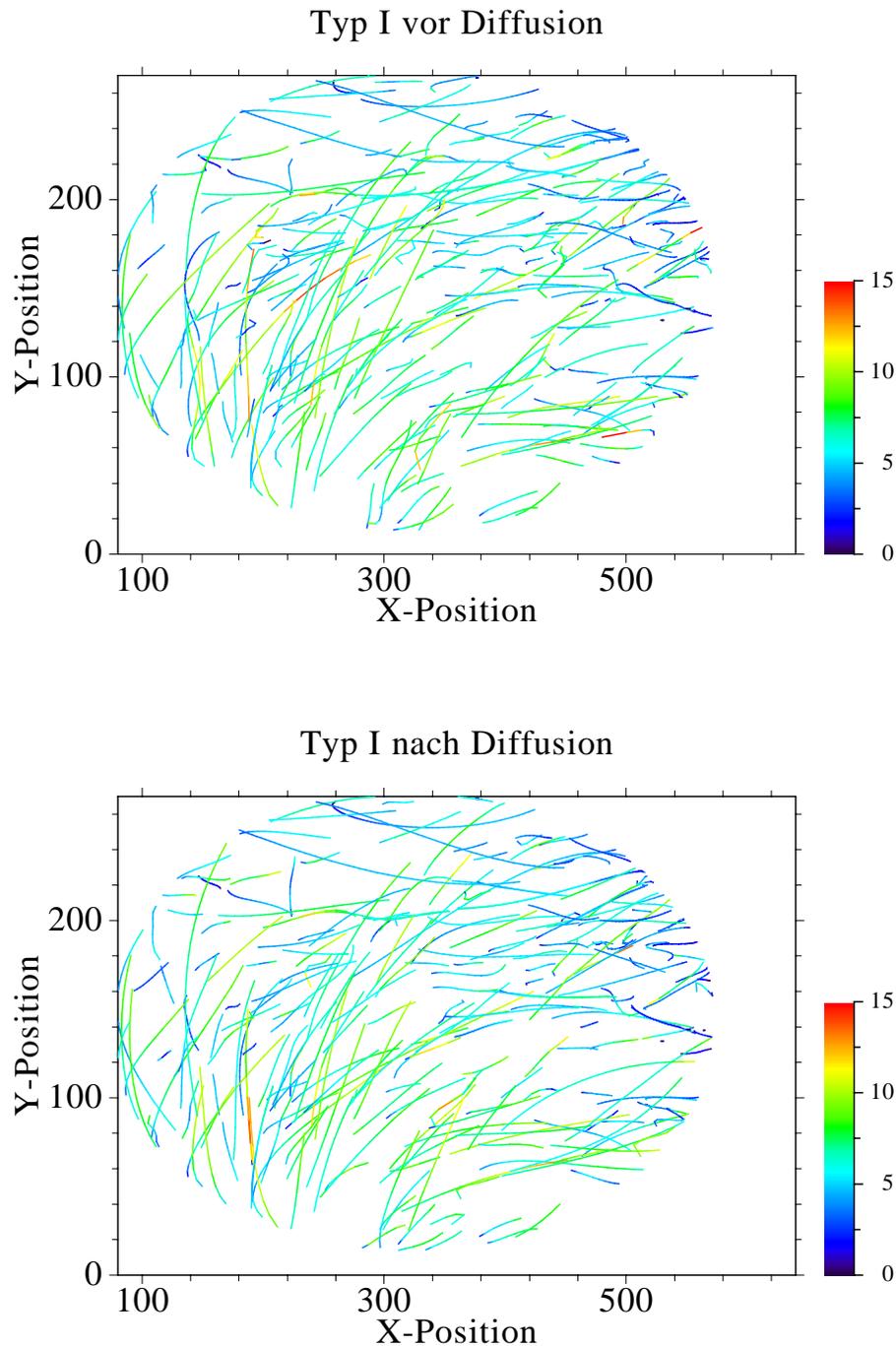


Abbildung 8.17: Beispielaufnahme im freien Wasser: Es wurde ein Endoskop vom Typ I benutzt. Hier tauchen keine Reflexionen auf. Die Situation entspricht etwa der nach Mittelwertextraktion. Die Diffusion wirkt sich wenig aus. Es ist deutlich zu erkennen, dass das viel lichtstärkere Endoskop, das dadurch ein hohes Signal-zu-Rausch-Verhältnis aufweist, ohne diesen Schritt auskommen könnte. Da ein Bild der Sequenz fehlte, führt der Sprung zu ein fälschlich angenommenen, plötzlich erhöhten Geschwindigkeit.

Kapitel 9

Resumee und Ausblick

Es wurde ein miniaturisierter Messaufbau entwickelt, der in der Lage ist, die Strömung in Kiesbetten zu visualisieren. Dazu werden mehrere flexible Endoskope paarweise zur Stereoskopie eingesetzt, wobei die Endoskope unmittelbar in den Porenraum blicken, ohne die Strömung zu beeinflussen. Damit ist es erstmals möglich, die Strömungsgeschwindigkeiten und die Turbulenz innerhalb eines Geofilters zu bestimmen.

Zur Optimierung des Stereoaufbaus wurde eine genauere Betrachtung der auftretenden Effekte und ihrer Ursachen unternommen. Die realisierten Aufbauten stellen einen Kompromiss aus möglichst gutem Signal-zu-Rausch-Verhältnis und praktischen Erwägungen dar. Insbesondere zählt hierzu die Möglichkeit, hohe Geschwindigkeiten zu erfassen, sowie eine gute Handhabbarkeit.

Durch die Verwendung von Glasfaserleitungen treten besondere Schwierigkeiten bei der Bearbeitung der Bilddaten auf. Einerseits erzeugen die Faserbündel durch ihre Größe und Anordnung eine Struktur in den Bildern. Andererseits ist die Lichtausbeute sehr gering, was eine schlechte Bildqualität verursacht. In dieser Arbeit wurden verschiedene Methoden angewendet und verglichen, die eine weitere Verarbeitung mit vorhandenem Particle Tracking erheblich verbessern. Dazu wurde auch erstmalig eine neuartige Realisierung einer dreidimensionalen anisotropen Diffusion eingesetzt, die bei stark verrauschten Bildfolgen mit Abstand die besten Ergebnisse liefert.

Die geringe Größe des Stereoaufbaus erforderte ein spezielles Verfahren der Kalibrierung. Ein solches wurde eigens für diese Aufgabe entwickelt und erfolgreich eingesetzt.

Zukünftige Arbeiten

Die in dieser Arbeit gesammelten Erfahrungen legen folgende Erweiterungen des Messverfahrens nahe:

- Einsatz einer Echtzeitspeicherung der Daten auf einem RAID-System. Damit könnte der Beobachtungszeitraum deutlich vergrößert werden.
- Vermeiden von Bewegungsunschärfe bei Kalibrieraufnahmen. Dies kann durch Fixieren des Kalibriertargets oder, bei ausreichender Beleuchtung, durch Einsatz des elektronischen Verschlusses erreicht werden.
- Implementierung des non-interlaced Modus auch bei Stereoaufnahmen. Damit lässt sich die zeitliche Auflösung verdoppeln.
- Entwicklung eines Aufbaus, welcher die Möglichkeit bietet, die Lichtquelle in kleinen Streuwinkeln zu positionieren. Dadurch kann der Kontrast der Tracer zum Hintergrund verbessert werden.
- Einsatz des Messsystems bei dem in Abschnitt 2.4 beschriebenen Messprogramm an der Wasserrinne der BAW.

Literaturverzeichnis

- [CALZOLARI 1996] CALZOLARI, PEDERSINI ET AL. (1996). *Calibration and self-calibration techniques for multi-camera systems*. Technischer Bericht96-10-1, Politecnico di Milano.
- [EHRBÄCHER 1999] EHRBÄCHER, ULRICH (1999). *Voruntersuchungen für ein Meßsystem zur Analyse von Strömungen in Sedimentporen mittels digitaler Bildfolgenanalyse*. Diplomarbeit, Universität Heidelberg.
- [ENGELMANN 2000] ENGELMANN, D. (2000). *3D-Flow Measurement by Stereo Imaging*. Doktorarbeit, Universität Heidelberg.
- [FAUGERAS 1993] FAUGERAS, OLIVIER (1993). *Three-Dimensional Computer Vision - A Geometric Viewpoint*. Artificial Intelligence. MIT Press, Cambridge, Massachusetts & London, England.
- [GARBE 1998] GARBE, CHRISTOPH S. (1998). *Entwicklung eines Systems zur dreidimensionalen Particle Tracking Velocimetry mit Genauigkeitsuntersuchungen und Anwendung bei Messungen in einem Wind-Wellen Kanal*. Diplomarbeit, Universität Heidelberg.
- [GODDING 1999] GODDING, R. (1999). *Geometric Calibration and Orientation of Digital Imaging Systems*. In: JÄHNE, B., H. HAUSSECKER und P. GEISSLER, Hrsg.: *Handbook on Computer Vision and Applications*. Academic Press.
- [HARTLEY und STURM 1997] HARTLEY, R.I. und P. STURM (1997). *Triangulation*. Computer Vision and Image Understanding, 68(2):146–157.
- [HAUSSECKER und SPIES 1999] HAUSSECKER, H. und H. SPIES (1999). *Motion*. In: JÄHNE, B., H. HAUSSECKER und P. GEISSLER, Hrsg.: *Handbook on Computer Vision and Applications*. Academic Press.
- [HEALEY und KONDEPUDY 1994] HEALEY, GLENN E. und R. KONDEPUDY (1994). *Radiometric CCD Camera Calibration and Noise Estimation*. IEEE Transactions On Pattern Analysis And Machine Intelligence, 16(3).

- [HERING 1996] HERING, F. (1996). *Lagrangesche Untersuchungen des Strömungsfeldes unterhalb der wellenbewegten Wasseroberfläche mittels Bildfolgenanalyse*. Doktorarbeit, Universität Heidelberg.
- [J. SHIMIZU 1990] J. SHIMIZU, T. TSUJIMOTO, H. NAGAWAKA (1990). *Experiment and macroscopic modelling of flow in highly permeable porous medium under free-surface flow..* Hydroscience and Hydraulic Engineering, 8(1):69–78.
- [JÄHNE 1999] JÄHNE, B. (1999). *Multiresolutional Signal Representation*. In: JÄHNE, B., H. HAUSSECKER und P. GEISLER, Hrsg.: *Handbook on Computer Vision and Applications*. Academic Press.
- [JÄHNE 1997] JÄHNE, BERND (1997). *Digitale Bildverarbeitung*. Springer, Berlin.
- [KOENDERS 2000] KOENDERS, REYMANN, KÖHLER (2000). *Theoretical and experimental analysis of flow in a turbulent filter layer*. In: *Filters and Drainage in Geotechnical and Environmental Engineering*, S. 67–73.
- [KÖHLER 1993] KÖHLER, H. J. (1993). *The influence of hydraulic head and hydraulic gradient on the filtration process*. In: BRAUNS, HEIBAUM und SCHULER, Hrsg.: *Filters in Geotechnical and Hydraulic Engineering*, Rotterdam. Balkema.
- [LEUE 1996] LEUE, CARSTEN (1996). *Ein Verfahren zur Segmentierung von Partikelbildern in der Strömungsvisualisierung*. Diplomarbeit, Universität Heidelberg.
- [LUHMANN 2000] LUHMANN, THOMAS (2000). *Nahbereichsphotogrammetrie: Grundlage, Methoden und Anwendungen*. Wichmann Verlag, Heidelberg.
- [MAAS et al. 1993] MAAS, H.G., A. GRUEN und D. PAPANTONIOU (1993). *Particle tracking velocimetry in three-dimensional flows, Part 1: Photogrammetric determination of particle coordinates*. Experiments in Fluids, 15.
- [MATAS und KITTLER 1995] MATAS, J. und J. KITTLER (1995). *Spatial and feature clustering: Applications in Image Analysis*. In: *Proc. of 6th International Conference on Computer Analysis of Images and Patterns, Prague, Prague*.
- [MELEN 1994] MELEN, T. (1994). *Geometrical Modelling and Calibration of Video Cameras for Underwater Navigation*. Dr.Ing thesis, Norges tekniske høgskole, Institutt for teknisk kybernetikk, Trondheim, Norway.
- [NETZSCH 1995] NETZSCH, T. (1995). *Dreidimensionale Particle Tracking Velocimetry*. Doktorarbeit, Universität Heidelberg.

- [PERONA und MALIK 1990] PERONA, P. und J. MALIK (1990). *Scale space and edge detection using anisotropic diffusion*. IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell., 12:629–639.
- [PRATT 1991] PRATT, W. (1991). *Digital Image Processing*. Wiley, New York.
- [RUSS 1994] RUSS, J. C. (1994). *The image processing handbook, 2nd edition*. CRC Press, Boca Raton, Florida.
- [SCHARR 2000a] SCHARR, H. (2000a). *A New Scheme for Anisotropic Diffusion: Performance Evaluation of Rotation Invariance, Dissipativity, and Efficiency*. In: *Proc. of the 22nd DAGM-Symposium, Mustererkennung*. Springer Verlag.
- [SCHARR 2000b] SCHARR, H. (2000b). *Optimale Operatoren in der Digitalen Bildverarbeitung*. Doktorarbeit, Universität Heidelberg.
- [SCHMUNDT 1995] SCHMUNDT, DOMINIK (1995). *Voruntersuchung der Einsatzmöglichkeiten digitaler Bildverarbeitung zur Analyse von Transportvorgängen und Wachstumprozessen in Pflanzen*. Diplomarbeit, Universität Heidelberg.
- [SCHULTZ 1997] SCHULTZ, MICHAEL (1997). *Geometrische Kalibrierung von CCD-Kameras*. Diplomarbeit, Universität Heidelberg.
- [SEITZ 1999] SEITZ, P. (1999). *Solid-State Image Sensing*. In: JÄHNE, B., H. HAUSSECKER und P. GEISSLER, Hrsg.: *Handbook on Computer Vision and Applications*. Academic Press.
- [SLAMA 1980] SLAMA, C. C., Hrsg. (1980). *Manual of Photogrammetry*. American Society of Photogrammetry, Falls Church, Virginia, 4. Aufl.
- [SOILLE 1999] SOILLE, PIERRE (1999). *Morphological Operators*. In: JÄHNE, B., H. HAUSSECKER und P. GEISSLER, Hrsg.: *Handbook on Computer Vision and Applications*. Academic Press.
- [SONY 1998] SONY (1998). *XC-75 series / XC-73 series Component/OEM data sheet*. Sony Corp.
- [SPIES 1998] SPIES, HAGEN (1998). *Bewegungsdetektion und Geschwindigkeitsanalyse zur Untersuchung von Sedimentverlagerungen und Porenströmungen*. Diplomarbeit, University of Heidelberg.
- [STÖHR 1998] STÖHR, M. (1998). *Entwicklung dreidimensionaler Particle Tracking Velocimetry zur Messung der Zweiphasenströmung in Gas-Flüssig-Reaktoren*. Diplomarbeit, Universität Heidelberg.

- [STRÜDER 1998] STRÜDER, L. (1998). *Elektronische Bildwandlung – Fortschritte bei Charged Coupled Devices und Active Pixel Sensors*. Physikalische Blätter, 16.
- [TSAI 1986] TSAI, R. Y. (1986). *An Efficient and Accurate Camera Calibration Technique for 3-D Machine Vision*. In: *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Proceedings*, S. 364–374.
- [WEICKERT 1998] WEICKERT, J. (1998). *Anisotropic diffusion in image processing*. Teubner, Stuttgart.
- [WIERZIMOK 1991] WIERZIMOK, D. (1991). *Messung turbulenter Strömung unterhalb der wellenbewegten Wasseroberfläche mittels Bildfolgenanalyse*. Doktorarbeit, Universität Heidelberg.
- [WUETSCHNER 1997] WUETSCHNER, MANFRED (1997). *Einführung in dieameratechnik*. Stemmer Imaging GmbH.
- [YOUNG 1997] YOUNG, MATT (1997). *Optik, Laser, Wellenleiter*. Springer, Berlin.
- [ZHANG 1998] ZHANG, Z. (1998). *A Flexible New Technique for Camera Calibration*. Technischer Bericht MSR-TR-98-71, Microsoft Research, Redmond, USA.

Danksagung

Ich möchte mich bei allen bedanken, die am Gelingen der Arbeit Beitrag hatten.

Ganz besonders gilt mein Dank meinem Betreuer Hagen Spies. Fachlich und persönlich hat er mir sehr geholfen.

Besonderen Dank für die Hilfe möchte ich Dirk und Hanno sagen.

Bei Herrn Prof. Dr. Bernd Jähne möchte ich mich für die Möglichkeit, diese interessante Arbeit auszuführen, bedanken. Er hat mich für das spannende Gebiet der Bildverarbeitung motiviert. Für die Übernahme der Zweitgutachtens danke ich Herrn Prof. Dr. Ulrich Platt.

Ohne weitere Nennung möchte ich den vielen Mitarbeitern der Forschergruppe und angeschlossener Projekte danken. Die freundschaftliche Atmosphäre und gute Zusammenarbeit, insbesondere die ständige Hilfsbereitschaft möchte ich hervorheben.

Meinen Eltern danke ich ausdrücklich für die Unterstützung während des Physikstudiums. Sie haben mir die Erfüllung eines großen Wunsches ermöglicht.

Nicht zuletzt danke ich meiner Freundin Claudia für eine ganze Menge.