

Fakultät für Physik und Astronomie  
Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg

Diplomarbeit  
im Studiengang Physik

vorgelegt von  
**Günther Balsbach**  
aus Heidelberg

März 1994

Verschiedene Verfahren zur Visualisierung und  
Größenbestimmung von Gasblasen in Wasser

Die Diplomarbeit wurde ausgeführt am  
Institut für Umweltphysik  
unter Betreuung von  
**Herrn Priv.-Doz. Dr. Bernd Jähne**

## Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit werden Visualisierungsverfahren zur Größenmessung von Gasblasen in Wasser vorgestellt. Die mit einer Videokamera gewonnenen Bilddaten werden dabei mittels digitaler Bildverarbeitung ausgewertet. Neben der experimentellen Überprüfung der Eichung des bestehenden Hellfeldverfahrens von [Geißler-93] wird die Entwicklung einer alternativen Dunkelfeld-Technik beschrieben.

Im Gegensatz zu den meisten bisher verwendeten Methoden zur Blasenvermessung ermöglicht die vorgestellte Dunkelfeldtechnik anhand des charakteristischen Bildes, das eine Blase erzeugt, eine eindeutige Unterscheidung von anderen Objekten, die sich im Meßvolumen befinden. Es werden zwei Möglichkeiten beschrieben, um eine Dunkelfeldbeleuchtung zu realisieren. Zusätzlich ermöglicht ein kombinierter Aufbau die gleichzeitige Messung bei Hell- und Dunkelfeldbeleuchtung mit zwei Kameras. Entscheidend ist die Möglichkeit, den Blasendurchmesser auch bei unscharfer Abbildung bestimmen zu können. Dazu wurden für Hellfeld-, Dunkelfeld- und Kombinationsverfahren jeweils Meßreihen durchgeführt, bei denen Blasen verschiedener Durchmesser entlang der optischen Achse verschoben wurden. Eigens angefertigte Standards garantierten die unveränderte Blasengröße während der Messung. Für das Hellfeldverfahren konnte daraus die Gültigkeit der von [Geißler-93] berechneten Eichkurven und des berechneten Meßvolumens bestätigt werden. Darüberhinaus ergaben sich neue Erkenntnisse über die Rauschempfindlichkeit der verwendeten Algorithmen. Die Intensitätsschwankungen der verwendeten Halogenleuchte konnte als Hauptursache des Rauschens identifiziert werden. Aus den Dunkelfeldmessungen wurde ein Konzept für eine automatische Bildanalyse entwickelt. Es zeigte sich ein linearer Zusammenhang zwischen dem Durchmesser der unscharf abgebildeten Blasen und deren Abstand zur Fokusebene. Aus der Unschärfe kann dieser Abstand bestimmt werden. Das Größenverhältnis der Ringstrukturen, die eine Blase erzeugt, ermöglicht es, ihre Lage bezüglich der Fokusebene zu erhalten.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Grundlagen</b>	<b>3</b>
2.1	Digitale Bildverarbeitung . . . . .	3
2.2	Visualisierungstechniken . . . . .	5
2.3	Lichtstreuung an einer Gasblase in Wasser . . . . .	11
2.4	Bisher verwendete Meßtechniken . . . . .	13
2.5	Hellfeldmethode und <i>Depth from Focus</i> . . . . .	14
<b>3</b>	<b>Hellfeldmethode</b>	<b>21</b>
3.1	Meßaufbau . . . . .	21
3.2	Bildaufnahme und Bildauswertung . . . . .	24
3.3	Ergebnisse . . . . .	25
<b>4</b>	<b>Dunkelfeldmethode</b>	<b>30</b>
4.1	Lichtstreuung an einer Luftblase im Dunkelfeld . . . . .	30
4.2	Entwicklung möglicher Aufbauten . . . . .	44
4.3	Messungen: Tiefenserien von Blasen im Dunkelfeld . . . . .	50
4.4	Ergebnisse . . . . .	52
4.5	Kombination von Hell- und Dunkelfeldoptik . . . . .	57
<b>5</b>	<b>Ausblick</b>	<b>61</b>
<b>A</b>	<b>Anhang</b>	<b>63</b>



# Kapitel 1

## Einleitung

Im Mittel sind etwa ein Prozent der gesamten Ozeanoberfläche mit Schaumkronen bedeckt, die durch brechende Wellen entstehen. Neben der Bildung dieser sog. *whitecaps* werden dabei auch Luftblasen in tiefere Wasserschichten eingetragen. Sie spielen bei verschiedenen Austauschvorgängen eine erhebliche Rolle. Beispielsweise stellen sie eine zusätzliche Oberfläche für den Gasaustausch zwischen Atmosphäre und Ozean dar. Kleine Blasen können völlig gelöst werden. Größere Blasen steigen wieder zur Wasseroberfläche auf und platzen dort. Dabei werden sog. *Spray*-Tröpfchen in die Luft geschleudert und tragen zur Aerosolbildung bei. Während des Aufenthalts im Wasser können sich Mikroorganismen in der Blase anreichern und ebenfalls in die Atmosphäre gelangen ([Blanchard-89]). Neben dem reinen Austausch von Masse sind Blasen auch an Impuls- und Energietransfer beteiligt. Etwa 30% der beim Brechen der Wellen freiwerdenden Energie wird zur Blasenbildung verwendet. Diese Energie wird von den aufsteigenden Blasen an die Strömung abgegeben.

Bei der Untersuchung dieser Phänomene hat man es, wie meist bei umweltphysikalischen Systemen, mit einem großen Skalenbereich zu tun. [Monahan-89] beschreibt die bestehenden Schwierigkeiten aus Labor- und Feldmessungen Aussagen über globale Effekte machen zu können. Geeignete Modelle müssen Messungen einzelner Blasen, Blasenspektren, Blasenwolken und Schaumkronen und Messungen des mit *whitecaps* bedeckten Anteils der Ozeanoberfläche miteinander verbinden. Die vorliegende Arbeit befaßt sich mit der kleinsten der genannten Skalen, der Größenbestimmung einzelner Blasen, bzw. -spektren.

Berührungsfreie Meßverfahren eignen sich am besten zur deren Untersuchung. Dadurch läßt sich der Einfluß der Meßinstrumente auf die Strömungsverhältnisse, bzw. die Bildung der Blasenwolke, minimieren. Unter den bereits existierenden Methoden zur Blasenmessung finden sich sowohl optische, als auch akustische Verfahren. In der vorliegenden Arbeit werden bildaufnehmende Methoden zur Größenbestimmung von Blasen beschrieben. Die mit Videokameras gewonnenen Bilddaten werden mittels digitaler Bildverarbeitung ausgewertet. Die vorgestellten Verfahren unterscheiden sich in der Art der Visualisierung. Für die von [Geißler-93] vorgestellte Durchlicht-Hellfeld-Technik und die dabei verwendeten Algorithmen zur Bildanalyse sollte im Rahmen dieser Arbeit eine experimentelle Verifikation der bestehenden Eichung durchgeführt werden. Mit Hilfe dieser Algorithmen kann aus der Abbildungsunschärfe, die entsteht, wenn die

Blase sich nicht in der Fokusebene befindet, ihre Entfernung und reale Größe bestimmt werden. Mit den durchgeführten Messungen konnte eine zusätzliche experimentelle Bestätigung der von ihm berechneten Eichkurven erzielt werden. Die Hellfeldtechnik birgt jedoch zwei Nachteile:

- Es ist zwar möglich die Entfernung der Blase zur Fokusebene zu bestimmen, aber es ist nicht möglich zu entscheiden, ob sie sich davor oder dahinter befindet. Die sich daraus ergebende Unsicherheit in der Größenbestimmung wird bei [Geißler-93] über statistische Betrachtungen ausgeglichen.
- Es ist abgesehen von der Form des Objekts keine Unterscheidungsmöglichkeit zwischen Blasen und anderen Partikeln gegeben.

Die beiden Punkte waren der Anlaß für die Entwicklung einer alternativen Visualisierungstechnik. Mit der vorgestellten Dunkelfeldmethode ist eine Alternative gegeben. Das charakteristische Muster, das eine Blase bei dieser Art der Beleuchtung erzeugt, ermöglicht sowohl eine eindeutige Identifizierung, als auch die Bestimmung der Lage relativ zur Fokusebene. Neben der reinen Dunkelfeldoptik wurde ein kombinierter Aufbau entwickelt und durchgeführt. Dabei wird der selbe Bildausschnitt mit zwei Kameras gleichzeitig beobachtet. Eine der beiden mißt mit der Dunkelfeldtechnik, die zweite im Hellfeld.

Neben der Untersuchung der bei brechenden Wellen eingetragenen Luftblasen, spielt deren Visualisierung ebenfalls eine bedeutende Rolle bei der Strömungsmessung in Wasser. Hierzu werden häufig durch Elektrolyse Wasserstoffbläschen erzeugt und aus deren Spuren die Strömungsverhältnisse bestimmt. Um diese Spuren direkt sichtbar zu machen oder bei Mehrfachbelichtung aus den Meßpunkten zu interpolieren, ist ein Dunkelfeldverfahren ideal geeignet.

# Kapitel 2

## Grundlagen

### 2.1 Digitale Bildverarbeitung

Bei den vorgestellten Techniken zur Größenmessung von Gasblasen in Wasser handelt es sich um bildaufnehmende Verfahren. Die mit einer Videokamera gewonnenen Bilddaten werden mit Hilfe digitaler Bildverarbeitung ausgewertet.

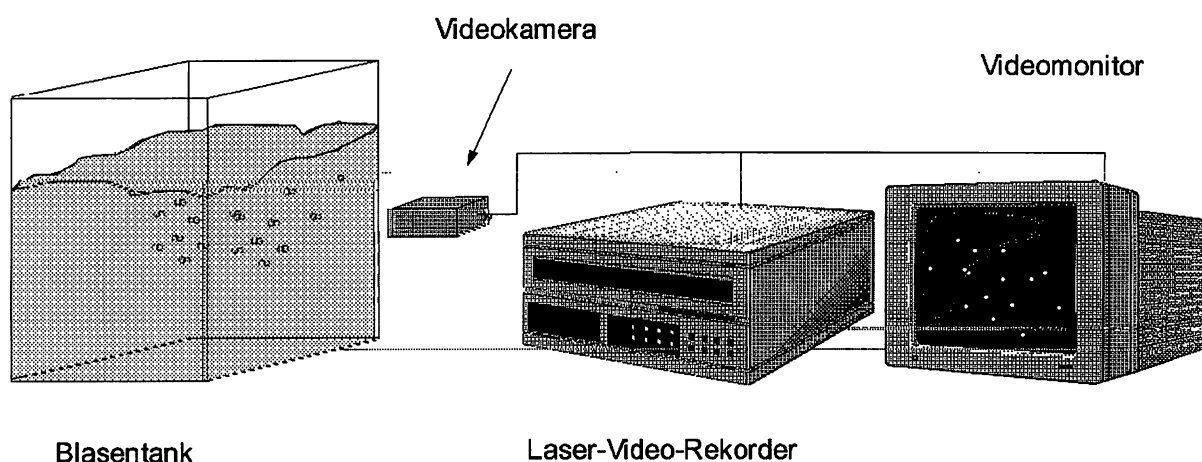


Abbildung 2.1: Bildaufnahme

In Abb. 2.1 sind die zur Bildaufnahme verwendeten Geräte dargestellt. Die in einem Wassertank erzeugten Gasblasen werden mit der vorgestellten Hellfeld- oder Dunkelfeldtechnik beleuchtet. Eine Videokamera nimmt die Szene auf. In der Videokamera dient ein *Charge Coupled Device* (CCD) Chip als lichtempfindlicher Sensor. Es handelt sich dabei um ein zweidimensionales Feld von Halbleiterelementen. Dieser CCD-Chip wandelt die Intensität des auftreffenden Lichts in ein elektrisches Signal, das von der nachfolgenden Kameraelektronik in ein Videosignal umgewandelt wird. Als Speichermedium für die Videobilder dient ein Laser-Video-Rekorder (SONY

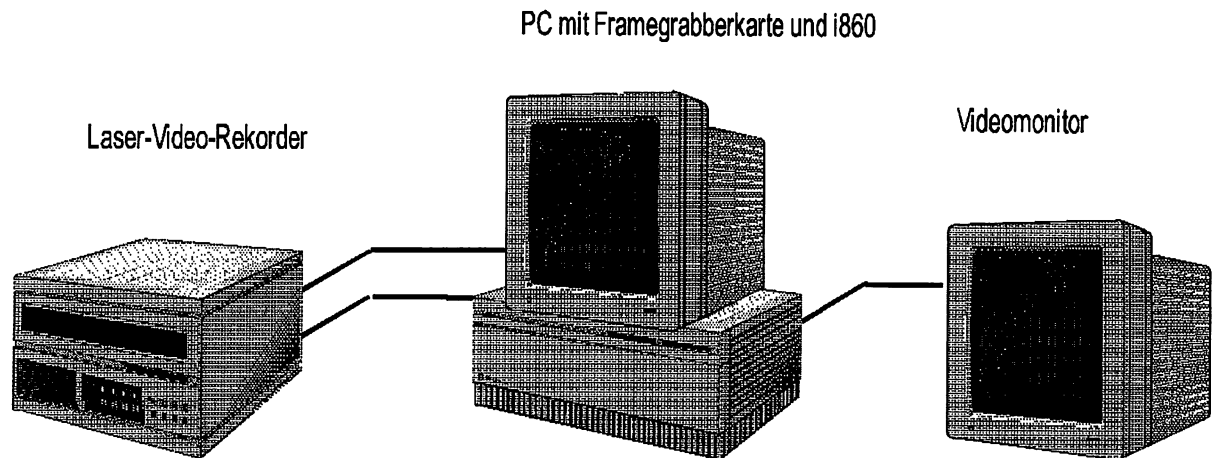


Abbildung 2.2: Bildauswertung

LVR). Dieser ermöglicht sowohl das Abspeichern von Einzelbildern, als auch von Bildsequenzen in Echtzeit (Videotakt: 60Hz bei der amerikanischen Videonorm NTSC). Das Videosignal wird analog aufgezeichnet und bei der Wiedergabe analog ausgegeben. Entscheidende Vorteile gegenüber einem handelsüblichen Videorekorder sind:

- Computergesteuerte Einzelaufnahme
- Schneller computergesteuerter wahlfreier Zugriff auf Einzelbilder während der Auswertung
- Keine Verschlechterung der Bildqualität durch häufige Wiedergabe

Die Hardware zur Bildauswertung (Abb. 2.2) besteht neben dem LVR aus einem System eines i860-Prozessorboards und einer Framegrabberkarte (VFG der Fa. Imaging Technology). Beide befinden sich, mit einem speziellen Daten-Bus miteinander verbunden, in einem Host-PC. Die VFG digitalisiert das anliegende Videosignal. Dabei wird die Bildinformation in einer zweidimensionalen Matrix von ganzzahligen Grauwerten zwischen 0 und 255 (8 Bit) gespeichert. Die einzelnen Bildpunkte werden als Pixel bezeichnet. Die Matrix besteht aus  $512 \times 480$  solcher Pixel. Die weitere Verarbeitung dieser Bilddaten erfolgt auf dem i860-Prozessorboard. Die direkte Verbindung der Framegrabberkarte mit dem i860-Board über den *Visionbus* ermöglicht einen schnellen Datentransfer zwischen beiden. Bei dem i860 handelt es sich um eine RISC-Prozessor, der etwa 20-30 mal schneller arbeitet als ein i386-Prozessor wie er in handelsüblichen PC's verwendet wird. Das bearbeitete Bild wird gleichzeitig auf einem Videomonitor angezeigt. Der Host-PC, der beide Karten aufnimmt, dient als Schnittstelle zum Anwender und steuert gleichzeitig den Laser-Videorekorder. Zur Verarbeitung solcher digitalisierten Bilder stehen eine Reihe von grundlegenden Algorithmen, etwa zur Glättung, Kantendetektion oder Segmentierung zur Verfügung (siehe [Jähne-91] ; [Jain-89]).

## 2.2 Visualisierungstechniken

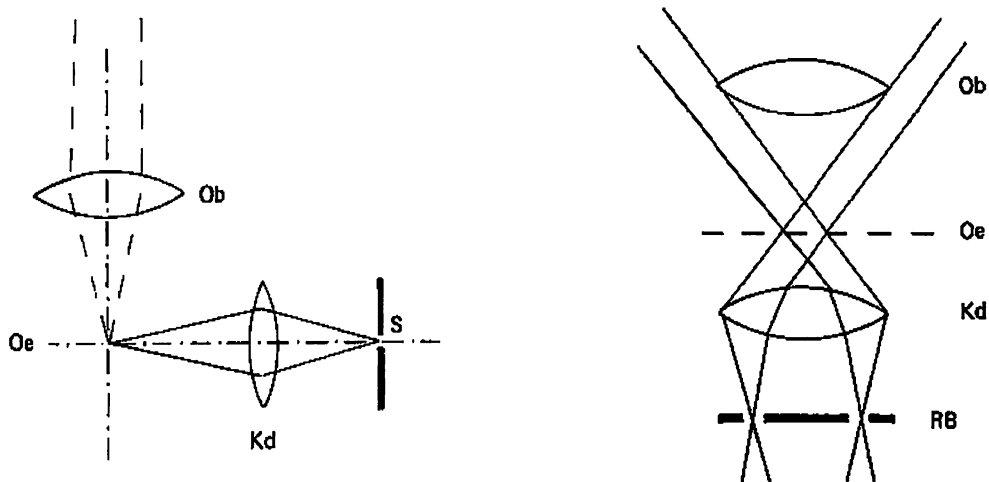


Abbildung 2.3: Grundprinzip der Dunkelfeldbeleuchtung:

Links: Spaltultramikroskop schematisch; Rechts: Durchlicht-Dunkelfeld mittels Ringblende; *S* Spalt, *Kd* Kondensator, *Oe* Objektebene, *Ob* Objektiv, *Rb* Ringblende; aus [Göke-88]

Für die optische Analyse von Objekten spielt die Visualisierung eine entscheidende Rolle. In der Mikroskopie sind verschiedene Techniken bekannt, um unterschiedliche Objekteigenschaften sichtbar zu machen. Die gängigste Beleuchtung ist das *Durchlicht-Hellfeld*. Das zu untersuchende Objekt wird von einer dem Objektiv gegenüberliegenden Lichtquelle durchleuchtet und auf Grund seines variierenden Streu- bzw. Absorptionsvermögens als dunkle Struktur auf hellem Hintergrund sichtbar. Man bezeichnet solche Objekte auch als Amplitudenobjekte. Die Intensität (Amplitude) des Lichts wird an den Objektstrukturen entsprechend herabgesetzt. Handelt es sich dagegen um Objekte mit geringer Absorption aber variierendem Brechungsindex, so stellt die Dunkelfeldbeleuchtung eine geeignete Visualisierungsmöglichkeit dar. In diesem Fall spricht man von Phasenobjekten, da beim Übergang zwischen Bereichen verschiedener Brechungsindizes die Phase des Lichts beeinflusst wird.

Bei der Dunkelfeldmikroskopie sind die Beleuchtungsstrahlen stärker geneigt, als es der Objektivapertur entspricht (Abb. 2.3 rechts). Wenn kein Objekt vorhanden ist, erscheint das gesamte Objektfeld dunkel. Nur Licht, das an einem Objekt durch Brechung, Reflexion oder Beugung von seiner Richtung abgelenkt wird, kann in das Objektiv eintreten. Das direkte Licht nimmt nicht an der Bildentstehung teil. Es werden z.B. Grenzschichten mit unterschiedlichen Brechungsindizes innerhalb eines Objektes sichtbar. Es ist auch möglich, Objekte, die kleiner als das Auflösungsvermögen sind, als Reflex sichtbar zu machen. Erste Arbeiten auf diesem Gebiet stammen von [Siedentopf-Zsigmondy-1903]. Es handelt sich dabei um die Entwicklung des Spaltultramikroskops (Abb. 2.3 links). Das zu untersuchende Objekt wird von einer Seite mit einem Lichtspalt beleuchtet. Die damit ermöglichten Arbeiten von Zsigmondy über Kol-

loidchemie wurden 1925 mit dem Nobelpreis für Chemie gewürdigt. Abb. 2.3 zeigt rechts eine *allseitige* Dunkelfeldbeleuchtung mit Hilfe eines Hellfeldkondensators und einer Ringblende. In Abb. 2.4 sind weitere Dunkelfeldkondensoren dargestellt. Abb. 2.5 zeigt Beispiele für Durchlicht-Dunkelfeldaufnahmen biologischer Objekte (aus [Göke-88]). Typische Anwendungsgebiete der Durchlicht-Dunkelfeldmikroskopie sind die Kolloidchemie, Feinstaubanalyse, Limnologie, Meeresbiologie, Protozoologie und die Bakteriologie.

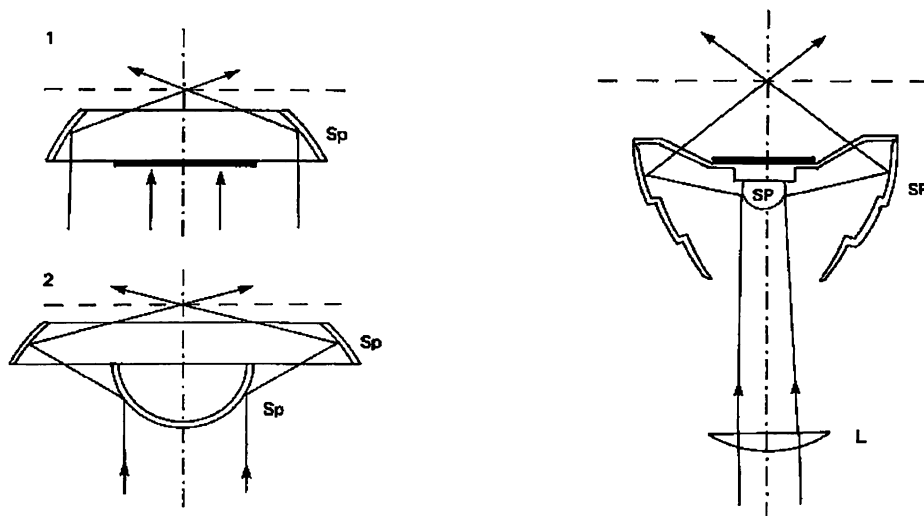


Abbildung 2.4: Verschiedene Spiegel-Dunkelfeldkondensoren

Eine weitere Möglichkeit Phasenobjekte darzustellen, bietet die Phasenkontrastmikroskopie. Für deren Entwicklung erhielt [Zernike-35] 1953 den Nobelpreis für Physik. Dieses dem Dunkelfeld sehr ähnliche Verfahren nutzt die Phasenverschiebung des Lichts bei der Beugung zur Abbildung der Objekte. Im Gegensatz zum Dunkelfeld wird hier das direkte Licht nicht vollständig absorbiert, sondern in der Intensität geschwächt und seine Phase wird durch ein, der Dunkelfeldblende korrespondierendes,  $\lambda/4$ -Plättchen verschoben.

Neben dem bisher beschriebenen Durchlicht-Dunkelfeld besteht auch die Möglichkeit der Aufsicht-Dunkelfeldbeleuchtung [Beyer-88]. Sie ermöglicht die Oberflächenanalyse von undurchsichtigen Objekten. Abb. 2.6 zeigt eine schematische Darstellung des Aufbaus. In Abb. 2.7 sind Hellfeld- und Dunkelfeldaufnahmen der Oberfläche einer Metallprobe nebeneinander dargestellt. Unter der Dunkelfeldbeleuchtung lassen sich Korngrenzen, Risse, Lunker e.t.c. deutlicher erkennen.

Es gibt in der Mikroskopie einige weitere Visualisierungstechniken die jeweils spezielle optische Eigenschaften zur Bildentstehung nutzen. Beispiele sind:

- Das Schlierenverfahren: Kleinste Unterschiede im Brechungsindex werden sichtbar.
- Interferenzmikroskopie: Neben der Visualisierung von Phasenobjekten wird diese Technik zur genauen Gangunterschiedsmessung verwendet.



Abbildung 2.5: Aufnahmen im Durchlicht-Dunkelfeld

Links *Kieselalgen*; Rechts: *Nymphe der Filzlaus* [Göke-88]

- Polarisationsmikroskopie: Eine mögliche Änderung der Polarisationsrichtung des Lichts entsteht beim Durchgang durch doppelbrechende Kristalle.
- Fluoreszenzmikroskopie: Ermöglicht die Untersuchung bio-chemischer Vorgänge an lebenden Mikroorganismen.
- Kombinationen aus obengenannten Methoden: Zur Verbesserung der Bildqualität bei der Arbeit von [Scholz-95] und [Schneider-91] wird zur Zeit mit der Entwicklung einer Kombination von Dunkelfeldbeleuchtung und des verwendeten Auflichtfluoreszenzmikroskops begonnen.

Ausführliche Informationen über die einzelnen Verfahren findet man z.B. in [Beyer-88], [Göke-88], [Gerlach-85], [Leeder-89], [Hecht-89], [Bergmann, Schäfer-87].

Die Oberfläche einer Gasblase in Wasser bildet einen erheblichen Sprung im Brechungsindex, und macht die Dunkelfeldbeleuchtung für ihre Visualisierung interessant. Zur Strömungsvisualisierung in Wasser werden oft einfache, dem Prinzip des Spaltultramikroskops ähnliche Anordnungen verwendet. Geeignete Tracer werden mit einem Lichtschacht beleuchtet und seitlich mit einer Videokamera beobachtet. Bei [Hering-92] handelt es sich z.B. um Polystyrolpartikel, bei [Münsterer93] um einen Fluoreszenzfarbstoff als Tracer. Etliche Anwendungsbeispiele mit durch Elektrolyse erzeugten Wasserstoffblasen als Tracer ([Shraub-65]) findet man in [Flow Visualization-90] und [Oertel-89]. An einer ähnlichen Technik zur Strömungsvisualisierung mit Blasen bei winderzeugten Wasserwellen arbeiten [Hering-95] und [Dieter-94].

Eine weitere Dunkelfeldtechnik zur Strömungsvisualisierung in Flüssigkeiten stellt die *Dark Field Fourier Quasi-Interferometry (DFFQI)* ([Gardavský-90]) dar. Diese recht neue Technik arbeitet

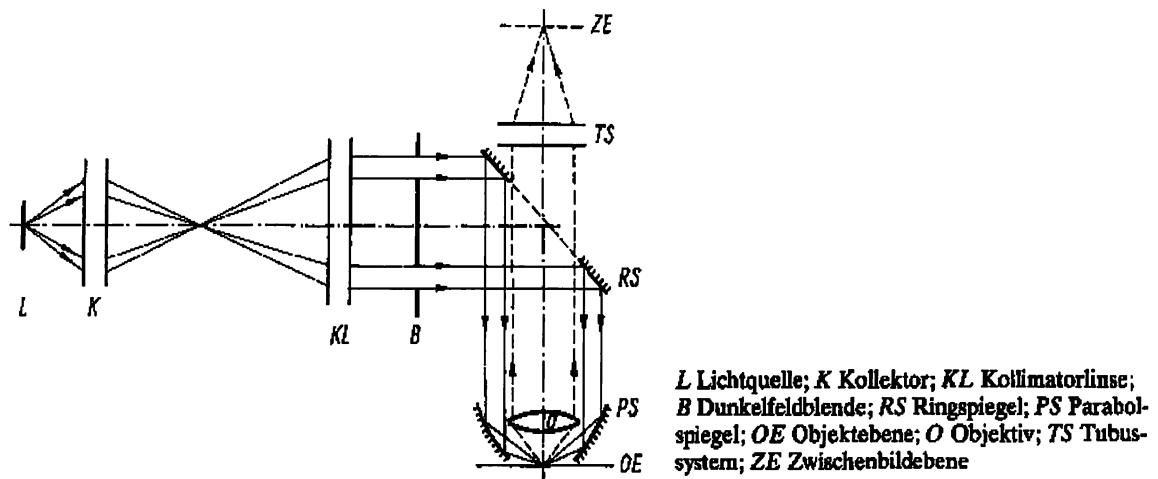


Abbildung 2.6: Schema eines Auflicht-Dunkelfeldmikroskops aus [Beyer]

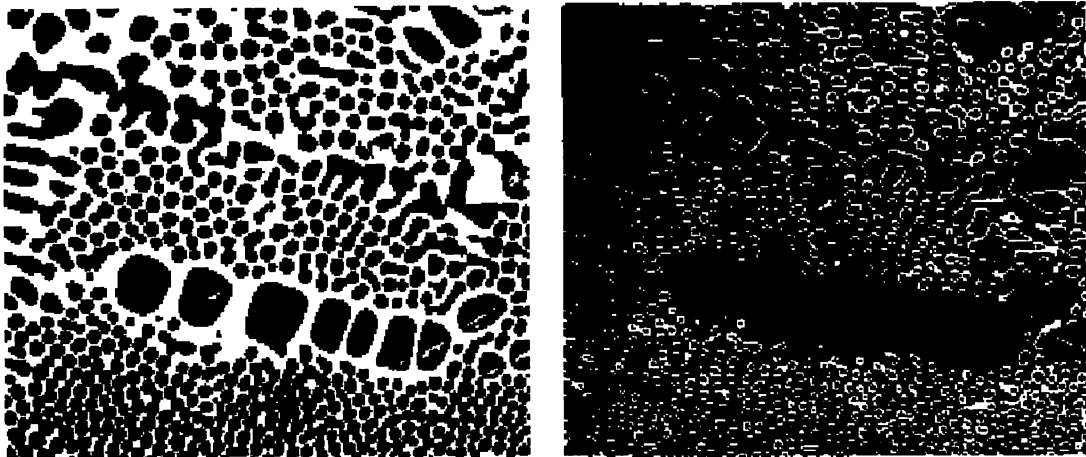


Abbildung 2.7: Spiegeleisen im Hellfeld (links) und Auflicht-Dunkelfeld (rechts)



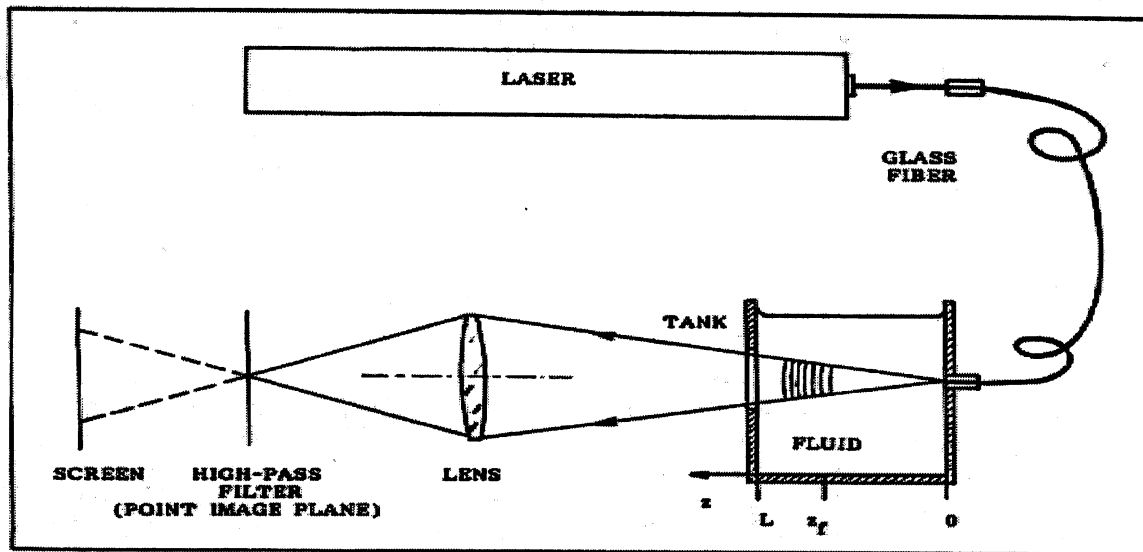


Abbildung 2.8: Schematischer Aufbau zur Strömungsvisualisierung

mittels *Dark Field Fourier Quasi-Interferometry (DFQI)* nach [Gardavský-90];

Die Dunkelfeldblende befindet sich nach dem Objekt auf der Abbildungsseite.

mit einer kohärenten Lichtquelle. Abb. 2.8 zeigt den schematischen Aufbau. Über eine Linse wird die nahezu punktförmige Laser-Lichtquelle wieder auf einen Punkt abgebildet. An dieser Stelle befindet sich eine lichtundurchlässige Scheibe (typischer Durchmesser 0,1mm). Diese Dunkelfeldblende stellt in der Sprache der Fourier-Optik einen *high-pass spatial frequency filter* dar. Die Erzeugung des Dunkelfeldes erfolgt im Gegensatz zu den bisher vorgestellten Verfahren hinter dem abzubildenden Objekt. Der Flüssigkeitstank befindet sich zwischen der Lichtquelle und der abbildenden Optik. Das entstehende Bild zeigt Änderungen im Brechungsindex (bzw. dessen Gradient) innerhalb dieser Flüssigkeit. Abb. 2.9 zeigt einige Aufnahmen die mit dieser Technik entstanden sind.

Kapitel 4 beschreibt die Entwicklung einer Durchlicht-Dunkelfeldvisualisierung zur Blasenmessung mittels digitaler Bildverarbeitung. Im Gegensatz zu den oben genannten Techniken zur Strömungsvisualisierung, handelt es sich um eine *allseitige* Beleuchtung. Da die Streuintensität einer Luftblase für Winkel  $> \pi/2$  (Rückstreuung) zu gering ist (siehe Abb.2.12), scheidet hierfür ein Aufsicht-Dunkelfeld aus. Die Möglichkeit, die Dunkelfeldblende zwischen Objekt und abbildende Optik zu montieren, hat sich im Verlauf der Entwicklung als die geeignetere Variante erwiesen.

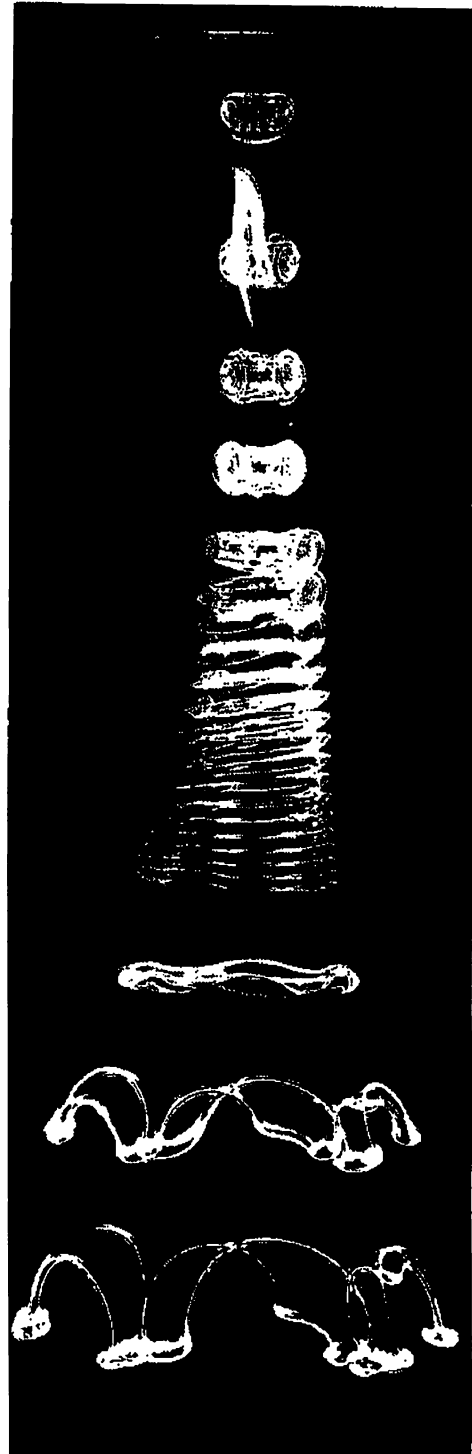
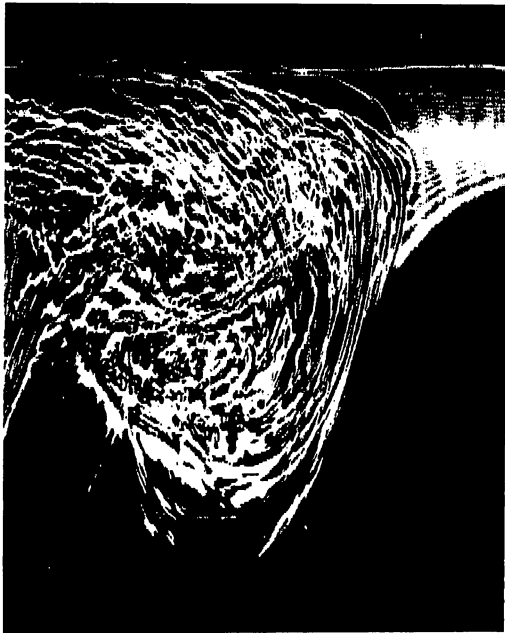


Abbildung 2.9: Strömungsvisualisierung mit *Dark Field Fourier Quasi-Interferometry* (DFFQI).

Die Strömungen wurden erzeugt durch Eintrag von klarem Wasser in wässrige NaCl Lösung.  
Aus [Gardavský-90]

## 2.3 Lichtstreuung an einer Gasblase in Wasser

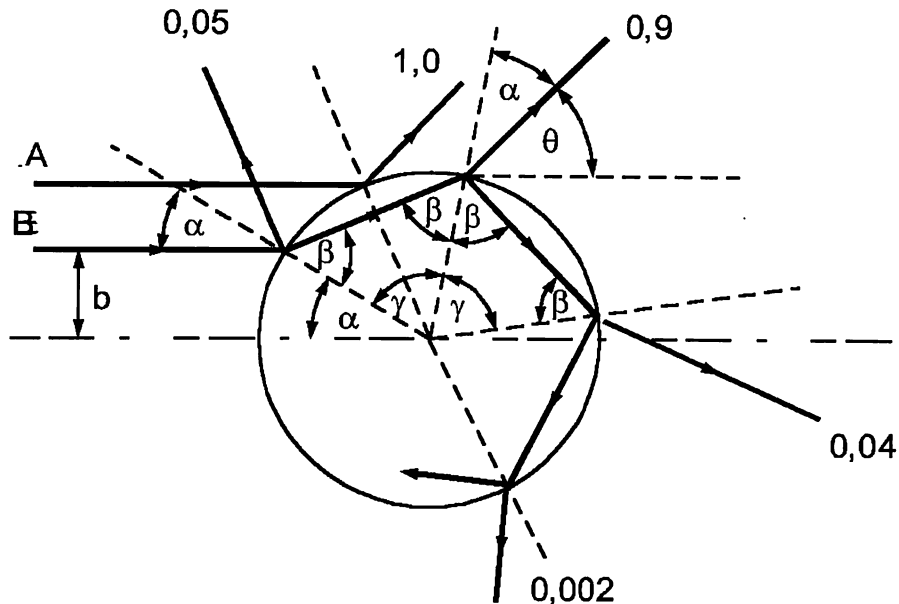


Abbildung 2.10: Zwei Lichtstrahlen die an einer Gasblase in Wasser gestreut werden. Bei Strahl A tritt Totalreflexion auf. Strahl B wird mehrfach reflektiert bzw. transmittiert. An den gestreuten Strahlen ist jeweils der resultierende Transmissionskoeffizient angegeben.

Befindet sich eine Luftblase in Wasser, so entsteht an der Oberfläche der Blase ein Sprung im Brechungsindex von  $n_w = 1.33$  auf  $n_l = 1$ . Licht kann an diesem Übergang reflektiert oder transmittiert werden. Abb. 2.10 zeigt die Aufspaltung eines Lichtstrahls B durch mehrfache Reflexionen und Transmission. Ist der Winkel  $\alpha$  des einfallenden Strahls zum Lot größer als der Totalreflexionswinkel  $\alpha_{tot} = 48,75^\circ$  wie bei Strahl A, so ist keine Transmission möglich. Für Einfallswinkel  $\alpha < \alpha_{tot}$  wird der Strahl bei jeder Berührung mit der Oberfläche (Streuebene) sowohl reflektiert, als auch transmittiert. Der Lotwinkel  $\beta$  innerhalb der Blase berechnet sich aus dem Brechungsgesetz:

$$\beta = \arcsin(n_w \sin(\alpha))$$

Aus Symmetriegründen ist der Austrittswinkel zum Lot gleich dem Einfallswinkel  $\alpha$ . Bei mehrfacher innerer Reflexion bleiben auch die eingezeichneten Winkel  $\beta$  und  $\gamma$  gleich. Der Streuwinkel  $\theta$  nach  $k$  Berührungen der Blasenoberfläche ist gegeben durch:

$$\theta = (2k - 2)\beta - 2\alpha - (k - 2)\pi$$

Die Intensität des reflektierten Strahls berechnet sich aus den Fresnel'schen Formeln. Der Reflexionskoeffizient  $R$  ist abhängig vom Einfallswinkel  $\alpha$ :

$$R(\alpha) = \frac{1}{2} \left( \left\{ \frac{\tan(\alpha - \beta)}{\tan(\alpha + \beta)} \right\}^2 + \left\{ \frac{\sin(\alpha - \beta)}{\sin(\alpha + \beta)} \right\}^2 \right)$$



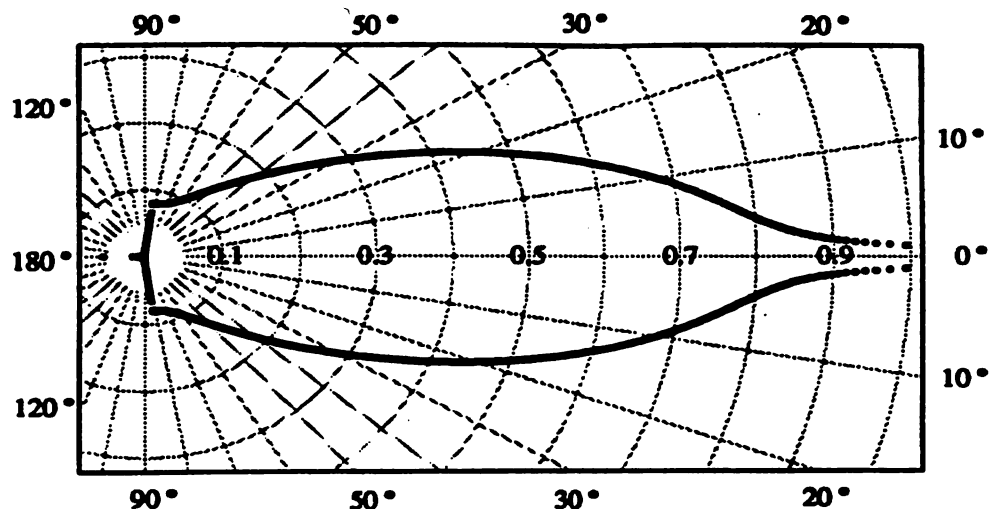


Abbildung 2.12: Winkelverteilung  $\sigma(\theta)$  der von einer Luftblase gestreuten Intensität bezogen auf die gesamte einfallende Leistung. Aus [Geißler-93]

## 2.4 Bisher verwendete Meßtechniken

Bei den bisher verwendeten optischen Methoden zur Blasenmessung finden sich sowohl Techniken, die das von einer Blase gestreute Licht detektieren (Dunkelfeld), als auch solche, die die Absorption als Meßgröße verwenden (Hellfeld). [Wais-83] benutzte einen Laserstrahl als Beleuchtungsquelle und mit einem Halbleiterdetektor wurde die von Blasen gestreute Intensität gemessen. Diese Streuintensität ist proportional zum Quadrat des Blasenradius. Ein wesentlich größeres Meßvolumen erhielten [Jähne-84] bzw. [Barabas-85] mit einer Hellfeldtechnik. Das Prinzip wurde zuerst von [Wu-73] zur Messung von *Spray*-Tröpfchen über einer Wasseroberfläche und bei [Hsu-84] zur Blasenmessung verwendet. Dabei wurde der Laserstrahl direkt auf die Photodiode gerichtet. Eine Blase die sich zwischen Laser und Photodetektor befindetet streut das einfallende Licht aus dem Strahlengang und die Photodiode mißt eine entsprechende Intensitätsabnahme. Neben diesen eindimensionalen Techniken gibt es auch zweidimensionale, bildaufnehmende Verfahren. Photographische Methoden wurden von [Johnson-79] und [Siems-83] benutzt. Das von [Geißler-93] benutzte Verfahren wird in Kapitel 2.5 genauer beschrieben.

Ein dreidimensionales, holographisches Verfahren zur Blasenvisualisierung wird bei [Vikram-92] beschrieben. Dabei trägt sowohl das direkte, also auch das von einer Blase gestreute Licht zur Bildentstehung bei. Abb. 2.13 zeigt den schematischen Aufbau eines Systems zur *In-line Fraunhofer Holography* in seiner einfachsten Form. Bei der Bildaufnahme wird die zu beobachtende Szene mit einem Laserpuls beleuchtet. Das Hologramm zwischen dem direkt transmittierten und dem gebeugten Licht wird mit einem hochauflösenden photographischen Film aufgenommen. Zur Rekonstruktion wird dieser Film mit der gleiche Technik beleuchtet und von dem entstehende,

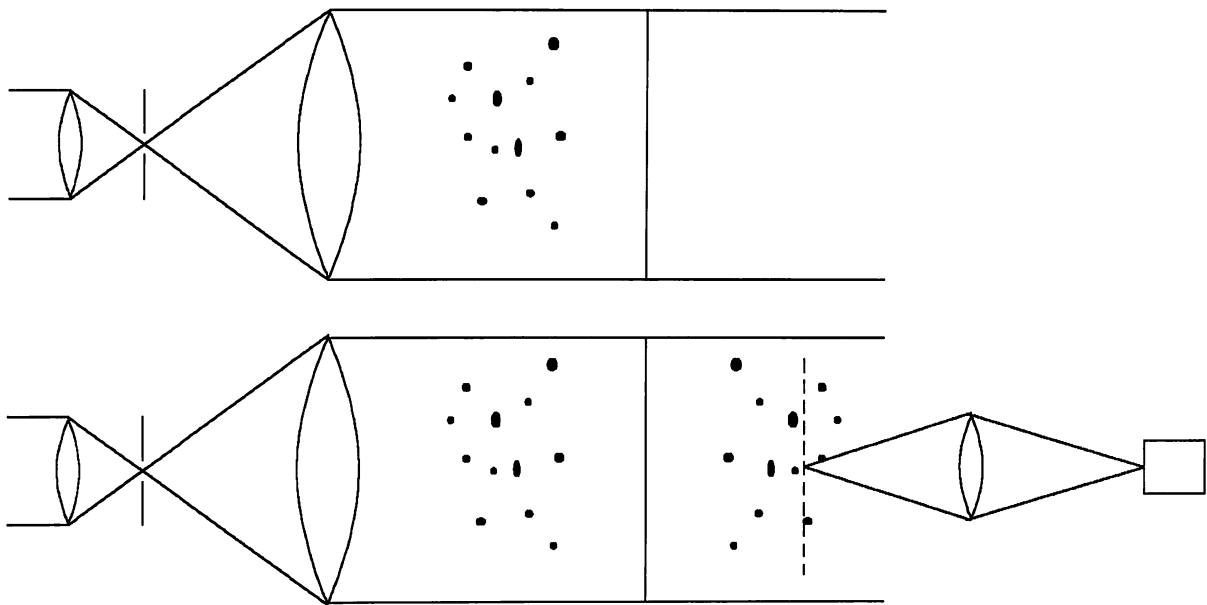


Abbildung 2.13:

Schematischer Aufbau zur *in-line Fraunhofer holography* nach [Vikram-92]

reelle 3-dimensionale Bild werden mit einer Videokamera Schnittbilder aufgenommen. Der Vorteil besteht in der sehr großen Tiefenausdehnung des Meßvolumens bei kleinen Partikelgrößen. Bei einem herkömmlichen optischen System ist dieser beugungsbedingte Bereich durch  $d^2/\lambda$  gegeben. Bei einem Objekt von  $d = 10\mu m$  und einer Wellenlänge des Lichts von  $\lambda = 0,5\mu m$  ergibt sich ein Tiefenbereich von  $0,2mm$ . Mit holographischen Verfahren läßt sich dieser Bereich um einen Faktor 2000 vergrößern. Abb. 2.14 zeigt das Hologramm und das rekonstruierte Bild einiger Luftblasen in Wasser in unterschiedlichen Tiefenpositionen. Zur theoretischen Beschreibung der Abbildung ist allerdings ein erheblicher mathematischer Aufwand nötig.

Neben den optischen Methode werden auch akustische Verfahren zur Messung von Gasblasen in Wasser eingesetzt. Dabei existieren sowohl passive [Melville-93], als auch aktive Verfahren [Medwin-70],[Thorpe-84].

## 2.5 Hellfeldmethode und *Depth from Focus*

In der Arbeit von [Geißler-93] wurde eine bildaufnehmende Methode zur Blasenmessung vorgestellt. Die mit einer CCD-Videokamera aufgenommenen Bilder wurden mit einem S-VHS Videorekorder gespeichert und bei der Auswertung von diesem mit einer VFG Framegrabberkarte digitalisiert. Zur Bildauswertung diente ein i860-Prozessorboard. Bis auf den verwendeten Laser-Video-Rekorder als Bildspeicher wurden für die vorliegende Arbeit die selben Geräte

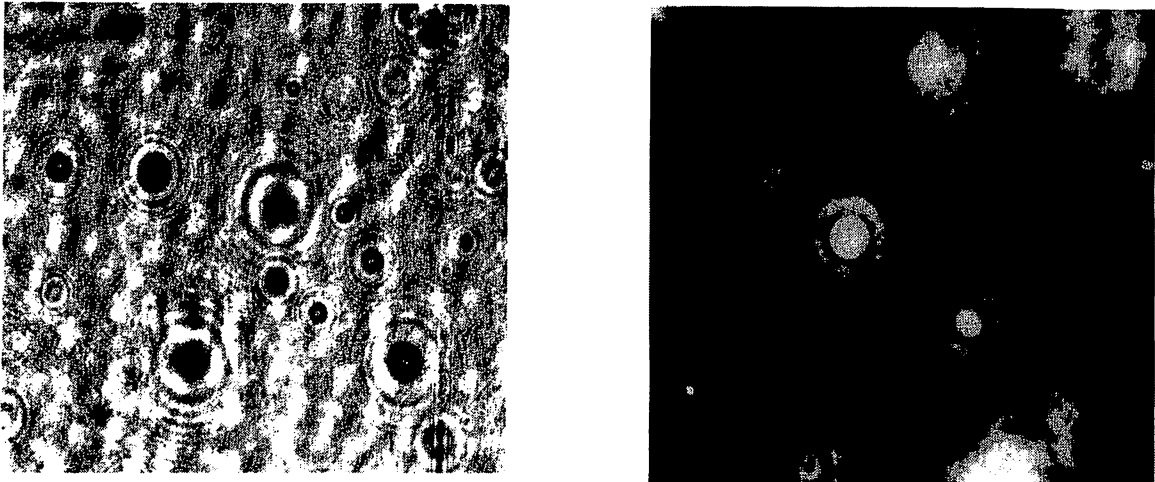


Abbildung 2.14:

Hologramm und Rekonstruktion mehrerer Luftblasen in Wasser

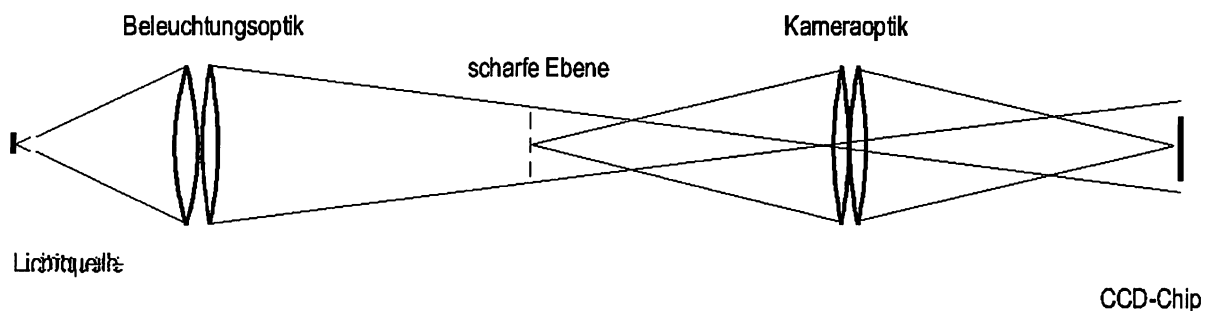


Abbildung 2.15: Optischer Aufbau der Hellfeldmethode

genutzt (siehe Kapitel 2.1). Mit Hilfe der von ihm entwickelten *Depth from Focus* Bildverarbeitungsalgorithmen gelang eine Größenbestimmung der Blasen auch bei unscharfer Abbildung.

### 2.5.1 Optik der Hellfeldmethode

Bei der Visualisierung handelt es sich um ein Durchlicht-Hellfeldverfahren. In Abb. 2.15 ist das Prinzip des optischen Aufbaus gezeigt. Das Meßvolumen befindet sich in der Mitte zwischen Beleuchtungs- und Abbildungsoptik. Zur Beleuchtung dient eine Halogenglühlampe, zur Bildaufnahme eine CCD-Kamera. Die Lichtquelle wird durch die Beleuchtungsoptik auf die Eintrittslinse der Kameraoptik abgebildet. Dadurch wird der Einfluß von Unregelmäßigkeiten der Leuchtfläche auf das aufzunehmende Bild minimiert. Befindet sich ein lichtundurchlässiges Objekt im Strahlengang, so erscheint sein Bild dunkel auf dem sonst hell ausgeleuchteten Bild. Abb. 2.16 zeigt eine Aufnahme von mehreren unterschiedlich scharf abgebildeten Luftblasen in Wasser.

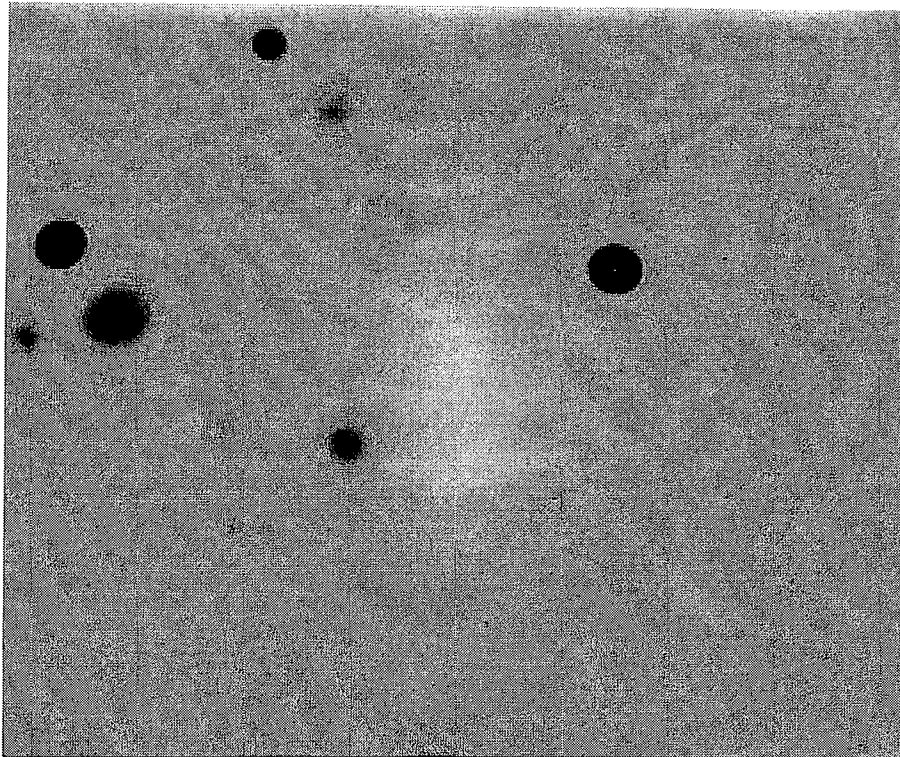


Abbildung 2.16: Hellfeldaufnahme einiger Luftblasen in Wasser

Der optische Aufbau gleicht dem eines Projektionsapparates (“Diaprojektor”) wie er z.B. in [Bergmann, Schäfer-87] oder [Schröder-84] beschrieben ist. Der einzige Unterschied besteht darin, daß sich hier das abzubildende Objekt nicht direkt vor dem Kondensator der Beleuchtung befindet. Auf Grund der geringeren Abbildungsfehler werden jeweils zwei Achromate verwendet.

Entscheidend für die Abbildungseigenschaften sind die im System vorhandenen Blenden. Dazu gehören sowohl die mechanischen Blenden, wie etwa Irisblenden und Linsenfassungen, als auch die Größe der Leuchtfläche bzw. deren Bild. Die Größe des CCD-Chips stellt eine weitere Blende dar. Sie bestimmt die laterale Ausdehnung des Meßvolumens. Die Eintrittsblende der Kameraoptik (Aperturblende) ist durch das Bild der Leuchtfläche oder durch eine zusätzliche mechanische Blende gegeben. Sie bestimmt die Schärfentiefe und ist zusammen mit der Austrittsblende der Beleuchtungsoptik maßgeblich für die gleichmäßige Ausleuchtung des Meßvolumens bzw. des CCD. In Abb. 2.17 sind die Strahlengänge für verschiedene effektive Blenden gezeigt:

- a) **Strahlengang der Beleuchtung:** Vom Mittelpunkt und den beiden Randpunkten der Lichtquelle sind jeweils die Zentral- (unterbrochen) und Randstrahlen (durchgehend) gezeichnet. Das Bild der Lichtquelle befindet sich zwischen den beiden Linsen der Kameraoptik. Dieses Bild bestimmt, welche Strahlen in die Kamera gelangen, und damit die Aperturblende (bzw. Eintrittsluke) der Kameraoptik. Zu erkennen ist, daß einige Strahlen am CCD-Chip vorbeilaufen.



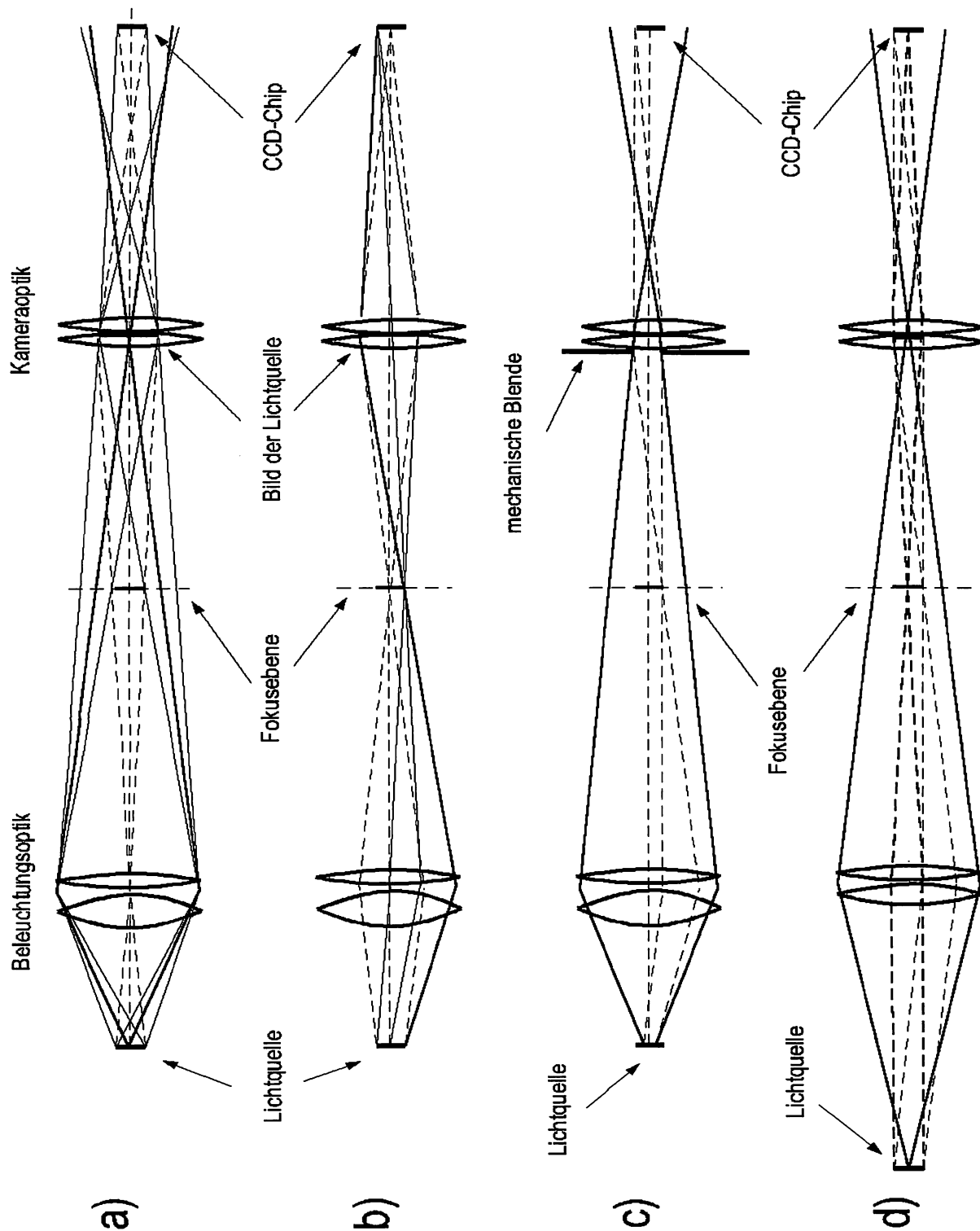


Abbildung 2.17: Einfluß der Blende auf die Abbildungseigenschaften und die gleichmäßige Ausleuchtung des Meßvolumens.

- b) **Abbildungsstrahlengang:** Aufschlußreicher ist die Konstruktion der Strahlen, die in einem Punkt auf dem Sensor enden. Auf Grund der Umkehrbarkeit des Strahlengangs lassen sich diese auch vom Sensor ausgehend konstruieren. In der Abbildung ist zu erkennen, daß bei gegebener Eintrittsluke der Kamera, die Austrittsblende der Beleuchtungsoptik für eine gleichmäßige Ausleuchtung des CCD entscheidend ist. Zur Beleuchtung des Mittelpunktes (unterbrochene Strahlen) trägt die gesamte Leuchtfläche bei. Damit das auch für einen Randpunkt (durchgehende Strahlen) gilt, muß die Austrittsblende genügend groß sein. Hier ist der Grenzfall gezeigt (etwas dicker gezeichneter Strahl). Ist diese Blende dagegen zu klein, so wird der Rand des Sensors nicht mit der gleichen Intensität beleuchtet wie das Zentrum. Bei vorgegebenem Durchmesser der Linsen, der Leuchtfläche und des Abstandes zwischen Beleuchtungs- und Kameraoptik muß gegebenenfalls die Eintrittsblende der Kamera entsprechend kleiner gewählt werden.
- c) **Abbildungsverhältnis der Beleuchtungsoptik:** Eine Möglichkeit besteht in der Wahl der Beleuchtungsoptik. Die Bildgröße der Leuchtfläche ergibt sich aus dem Verhältnis der Brennweiten der beiden verwendeten Linsen. Bei gleichem Linsendurchmesser verringert sich durch den größeren Abstand der Winkel, unter dem Strahlen von der Leuchtfläche in die weitere Optik gelangen. Die Energieausbeute verringert sich dadurch.
- d) **Mechanische Blende:** Eine weitere Möglichkeit, die Eintrittsluke zu verkleinern, besteht darin, eine zusätzliche mechanische Blende zu verwenden. Diese wirkt als Aperturblende für die Abbildungsoptik. Eine Rückprojektion durch die Beleuchtungsoptik zeigt, daß sie wie eine Blende direkt vor der Leuchtfläche wirkt, also bezüglich der Beleuchtungsoptik eine Feldblende darstellt. Die äußeren Punkte der Fläche tragen nicht mehr zur Ausleuchtung des CCD-Chips bei. Auch hier ist die Energieausbeute geringer. Die Vorteile gegenüber obiger Lösung bestehen im kompakteren Aufbau und in der stufenlosen Einstellmöglichkeit.

### 2.5.2 Depth from Focus

[Geißler-93] gelang in seiner Arbeit die Größenbestimmung von Objekten die sich nicht in der Fokusebene befinden und deshalb unscharf abgebildet werden. Sein Verfahren nutzt die bei unscharfer Abbildung entstehende Randunschärfe und den sich ändernden Grauwertverlauf innerhalb des Bildes zur Bestimmung der Objektgröße und des Abstandes zur Fokusebene. Solche Verfahren zur Lagebestimmung aus der Unschärfe sind in der Bildverarbeitung unter dem Stichwort *Depth from Focus* bzw. *Depth from Defocus* bekannt. Die Besonderheit des im folgenden beschriebenen Verfahrens von [Geißler-93] ist, daß es mit Einzelaufnahmen arbeitet.

Ein flächenhaftes, lichtabsorbierendes Objekt, das sich in der Fokusebene befindet, erscheint als scharf begrenzte schwarze Fläche auf dem sonst hell ausgeleuchteten CCD-Sensor. Im digitalisierten Bild entspricht dieser Fläche ein Bereich minimalen Grauwerts. Die Größe des Objekts läßt sich, bei bekanntem Abbildungsverhältnis, einfach aus diesem digitalisierten Bild bestimmen. Befindet sich das Objekt nicht in der Fokusebene, so ändert sich der Grauwertverlauf des Bildes, der Rand wird unscharf und die Größe ändert sich. Für verschieden große kreisförmige Objekte werden die Fläche und der mittlere Grauwert als Funktion des Abstandes zur Fokusebene berechnet.

Die unscharfen Kanten machen eine Definition der Fläche notwendig. Der Rand des Objektes wird durch die Grauwertschwelle  $g_{gr} = \frac{g_{max}}{e}$  definiert. Die so bestimmte Fläche wird im Folgenden als e-Wertfläche bezeichnet. Die berechneten Funktionen bilden ein Kennfeld. Die bei einer Messung bestimmte e-Wertfläche und der mittlere Grauwert werden mit dem berechneten Kennfeld verglichen, um die wahre Größe zu ermitteln.

Entscheidende Grundlage für die Berechnung des Kennfeldes ist die Linearität der optischen Abbildung. Der von einem punktförmigen Objekt, das sich am Ort  $(x_1, x_2)$  der Objektebene befindet, in der Bildebene erzeugte Intensitätsverlauf

$$p(x_2, y_2; x'_1, y'_1) = \mathcal{L} \{ \delta(x_1 - x'_1) \delta(y_1 - y'_1) \}$$

ist durch den die optische Abbildung beschreibenden linearen Operator  $\mathcal{L}$  gegeben. Die Funktion  $p$  wird als Punktantwort oder *point spread function* (PSF) bezeichnet. Ein ausgedehntes Objekt läßt sich als Superposition von Punktobjekten schreiben:

$$g(x_1, x_2) = \iint g(x'_1, y'_1) \delta(y_1 - y'_1) \delta(x_1 - x'_1) dx'_1 dy'_1$$

Das Bild  $b(x_2, y_2)$  diese Objekts ergibt sich wegen der Linearität des Operators zu:

$$\begin{aligned} b(x_2, y_2) &= \mathcal{L} g(x_1, x_2) \\ &= \mathcal{L} \left\{ \iint g(x'_1, y'_1) \delta(y_1 - y'_1) \delta(x_1 - x'_1) dx'_1 dy'_1 \right\} \\ &= \iint g(x'_1, y'_1) \mathcal{L} \delta(y_1 - y'_1) \delta(x_1 - x'_1) dx'_1 dy'_1 \\ &= \iint g(x'_1, y'_1) p(x_2, y_2; x'_1, y'_1) dx'_1 dy'_1 \end{aligned}$$

Man benutzt wenn möglich eine Näherung, in der die *point spread function* unabhängig vom Ort des Punktobjekts in der Objektebene ist (Verschiebungsinvarianz). Damit gilt

$$p(x_2, y_2; x_1, y_1) = p(x_2 - x_1; y_2 - y_1)$$

und somit

$$b(x_2, y_2) = \iint g(x_1, y_1) p(x_2 - x_1; y_2 - y_1) dx_1 dy_1 = g(x_1, y_1) * p(x_1, y_1)$$

Bei dem Integral handelt es sich um eine sog. *Faltung*. Die Funktion  $p$  ist noch abhängig von der Tiefenposition  $z$  der Objektebene auf der optischen Achse. Das Bild eines Objektes an einer beliebigen Position im Meßvolumen läßt sich in zwei Schritten berechnen. Zuerst wird das Objekt mit dem  $z$ -abhängigen Abbildungsverhältnis skaliert und anschließend mit der entsprechenden *point spread function*  $p_z(x_1, y_1)$  gefaltet. Die Faltung kann auch im Fourierraum berechnet werden. Das Faltungstheorem besagt: Werden beide Funktionen  $(g(x, y); p(x, y))$  Fouriertransformiert  $(\hat{g}(k_x, k_y); \hat{p}(k_x, k_y))$ , so ergibt sich die Funktion  $\hat{b}(k_x, k_y)$  durch Multiplikation

$$\hat{b}(k_x, k_y) = \hat{g}(k_x, k_y) \hat{p}(k_x, k_y)$$

und  $b(x, y)$  durch entsprechende Rücktransformation. Die Fouriertransformierte der *Point Spread Function* wird als *Optical Transfer Function* (OTF) bezeichnet.

Die beschriebene Methode zur Berechnung der Ergebnisfunktionen bei linearen Systemen aus der Punktantwort ist in der Elektronik ebenso bekannt. Man spricht dort von der *Impulsantwortfunktion*. Allgemein bei der Lösung von linearen Differentialgleichungen heißt sie *Green'sche Funktion*.

Für die verwendete Durchlichtoptik hat [Geißler-93] eine etwas modifizierte Abbildungsgleichung hergeleitet:

$$1 - I_n(\vec{x}) = \tau\left(\frac{1}{V_g}\vec{x}\right) * PSF(\vec{x})$$

$I_n$  ist die normierte Intensitätsverteilung auf der Sensorfläche,  $\tau\left(\frac{1}{V_g}\vec{x}\right)$  der Verlauf des Absorptionskoeffizienten des mit  $V_g$  vergrößerten Objekts. Mit Hilfe der Abbildungsgeometrie und der gemessenen Intensitätsverteilung der Leuchtfläche der Glühlampe wurde die PSF berechnet. Zusammen mit der Abbildungsgleichung wurden damit die benötigten Kennfelder für verschieden große, kreisförmige Objekte berechnet. Die bei den Messungen ermittelten e-Wertflächen und mittleren Grauwerte werden mit den Kennfeldfunktionen verglichen. Daraus wird die Entfernung und Größe des Objekts bestimmt.

Zur Kontrolle der berechneten Funktionen wurde eine Tiefenserie mit einem Letraset-Punkt (Alfac GS1232 Aufreibepunkt mit 0.5 mm Durchmesser) aufgenommen. In der vorliegenden Arbeit (Kapitel 3) wird eine Vergleichsmessung zwischen Letraset-Punkten und speziell angefertigten Standards vorgestellt.

# Kapitel 3

## Hellfeldmethode

In diesem Kapitel wird eine Kontrollmessung für das von [Geißler-93] entwickelte *Depth from Focus* Verfahren beschrieben (siehe auch Kapitel 2.5.2). Zur Berechnung des Kennfelds ging [Geißler-93] von kreisförmigen lichtundurchlässigen Objekten aus, die sich in verschiedenen Entfernungen zur optischen Achse befanden. Zur Kontrolle wurde von ihm eine Tiefenserie eines solchen Objekts in Form eines Letrasetpunktes aufgenommen. Der Vergleich lieferte eine deutliche Übereinstimmung der berechneten und der gemessenen Werte. Unter der Annahme eine Luftblase im Strahlengang der Hellfeldoptik verhält sich wie eine lichtundurchlässige Scheibe wurde das Verfahren zur Größenbestimmung von Blasen angewendet.

Um eine experimentelle Eichung mit Blasen zu ermöglichen wurden Standards angefertigt, die die Messung von Tiefenserien bei konstantem Radius ermöglichten. Der Originalaufbau von [Geißler-93] konnte für die vorliegende Arbeit wegen seiner Abmessungen nicht verwendet werden. Um eine Aussage über die Gültigkeit der oben genannten Eichverfahren bzw. der genannten Annahme machen zu können, wurden neben Tiefenserien mit Blasen auch entsprechende Aufnahmen von Letraset-Punkten gemacht.

### 3.1 Meßaufbau

#### 3.1.1 Der Blasentank

Der für alle Aufbauten und Messungen verwendete Blasentank ist als Skizze in Abb. 3.1 dargestellt. In Abb. A.2 ist zusätzlich eine Photographie des Tanks gezeigt. Die Gesamtabmessungen, ohne optische Bank, betragen  $40 \times 67 \times 90 \text{ cm}^3$ . Grund- und Deckplatte sind aus PVC. Vier Stahlstützen dienen zur Stabilisierung. Der eigentliche Wassertank besteht aus 10mm Glaswänden und hat ein Innenmaß von  $10 \times 50 \times 60 \text{ cm}^3$ . In der Bodenplatte befinden sich mehrere Öffnungen, die das Füllen und Leeren des Tanks ermöglichen, sowie den Anschluß an eine Druckluftquelle zur Blasenenerzeugung. Um die sich einander gegenüberliegende Beleuchtungs- und Kameraoptik einfach justieren zu können, wurde an der Deckplatte die feste Montage der optischen Bank (Makro- und Mikrobanksystem der Fa. Spindler & Hoyer) an mehreren Positionen ermöglicht. Die Wasseroberfläche befindet sich knapp unterhalb des oberen Randes des

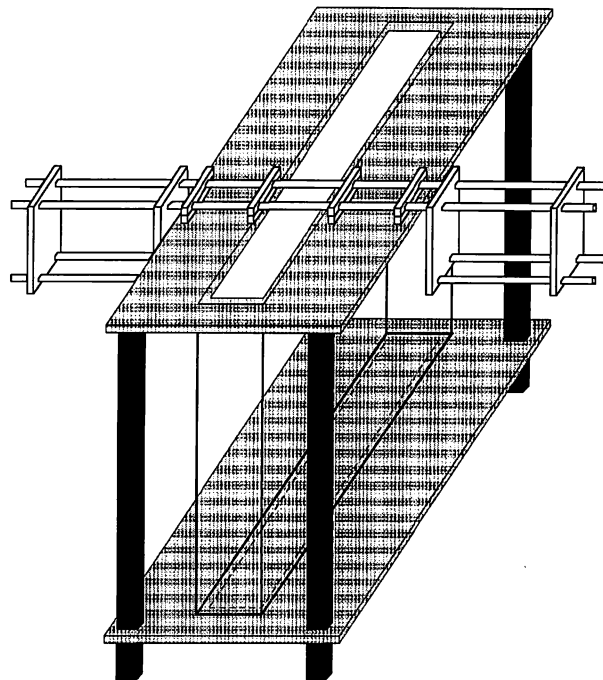


Abbildung 3.1: Skizze des Blasentanks und der optischen Bank

Tanks. Die Höhe des Tanks ist nötig, damit ein ungestörtes Ausbilden der Blasenwolke möglich ist.

Zur Erzeugung der Blasen wurden verschiedene Techniken verwendet:

- **Kapilare:** Über eine Kapilare wird Luft in den Tank gepumpt. Damit können einzelne Blasen erzeugt werden. Die Größe der entstehenden Blasen hängt von der verwendeten Kapilare ab und ist, bei nicht zu hohem Druck, ausreichend konstant.
- **Elektrolyse:** An einem als Anode verwendeten Platindraht bilden sich Wasserstoffbläschen. Mit dieser Methode ist die Erzeugung sehr kleiner Blasen möglich (siehe Abb. 4.17). Diese Technik wird häufig zur Strömungsvisualisierung verwendet.
- **Wasserstrahl:** Der aus einer sich dicht über der Wasseroberfläche befindenden Düse austretende Wasserstrahl erzeugt bei Eintritt ins Wasser Blasen.
- **Wasserstrahlpumpe:** Mittels einer Umwälzpumpe wird Wasser durch einen Schlauch zu einer Düse unter Wasser gepumpt. Durch eine zusätzliche Öffnung, von der ein zweiter Schlauch aus dem Wasser ragt, wird durch die Strömung Luft angesaugt und. Diese nach dem Prinzip einer Wasserstrahlpumpe funktionierende Technik wird häufig zur Belüftung von Aquarien verwendet. In Abb. A.3 ist auf einer Photographie der seitliche Blick in den Tank bei laufender Blasenenerzeugung mit dieser Methode gezeigt.

Die ersten beiden Methode eignen sich, wenn Blasen nur in der Fokusebene, bzw. in einem

festen Abstand dazu erwünscht sind. Die beiden Anderen erzeugen ausgedehnte Blasenwolken und ermöglichen eine Aufnahmesituation wie sie etwa bei brechenden Wellen entsteht.

### 3.1.2 Die Eichstandards

Für die zu messende Tiefenserie waren diese Techniken ungeeignet, da Blasen benötigt wurden, die während der Messung ihre Größe nicht ändern. Deshalb wurden Standards aus Gießharz angefertigt. Nach etwa zwei Dritteln der Topfzeit wurden Luftblasen in den Kunstharz gerührt, und anschließend in spezielle Formen gegossen. Die Topfzeit gibt an wie lange das Material nach der Härterzugabe gießfähig bleibt. Diese ist abhängig von der zugegebenen Härtermenge und beträgt zwischen 20 und 45 min. Die gefüllten und verschlossenen Formen wurden so lange bewegt, bis kein Aufsteigen der Blasen mehr beobachtet wurde. Die angefertigten Zylinderformen bestanden aus zwei seitlichen Halbschalen aus PVC (Innendurchmesser 25 mm, Höhe 20 mm) und zweier Deckflächen aus durchsichtigem PVC, die eine Kontrolle der Zähigkeit des Gießmaterials ermöglichten. Alle Teile wurden mit Silikon-Dichtmasse verbunden und konnten nach dem vollständigen Aushärten einfach geöffnet werden. Die entstandenen Gießobjekte konnten in Montagehalter der Mikrobank befestigt werden. Die durch das Lösen aus den Formen, bzw. durch anhaftende Blasen entstandene Unregelmäßigkeiten machten ein anschließendes Schleifen und Polieren der Planflächen notwendig. Abb. A.1 zeigt die Photographie eines der verwendeten Standards.

### 3.1.3 Beleuchtungs- und Kameraoptik

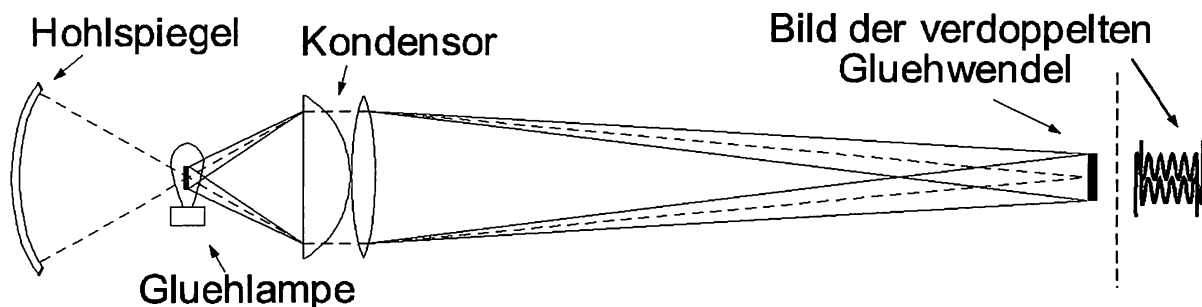


Abbildung 3.2: Glühlampe und Hohlspiegel als Lichtquelle

In Abb.3.2 ist die in den Meßaufbauten (hier und bei der Dunkelfeldmethode) verwendete Lichtquelle genauer dargestellt. Im Abstand der doppelten Brennweite befindet sich vor einem Hohlspiegel eine Halogenglühlampe. Dadurch entsteht im gleichen Abstand ein reelles Bild der Glühwendel. Die Lampe ist so montiert, daß die Wendel und deren Bild aneinander grenzen. Es ergeben sich zwei Vorteile:

1. Die Lichtausbeute wird erhöht, da in Richtung Spiegel emittierte Strahlen nutzbar gemacht werden.

2. Die Leuchtfläche wird verdoppelt, und wird fast quadratisch. Die verwendeten Lampen besitzen eine zu einem ca.  $3,5 \times 1,5$  mm großen Rechteck angeordnete Glühwendel.

Diese "verdoppelte" Wendel wird über die beiden Kondensoren (75 und 200 mm) etwa um einen Faktor 3 vergrößert abgebildet. Die gemessene Größe des Bildes betrug ca.  $9 \times 8$  mm. Zusätzlich wurde eine mechanische Blende mit 6 mm Durchmesser an der Kameraoptik verwendet. Die Intensität der Glühlampe konnte mittels einer einfachen Elektronik stufenlos geregelt werden.

Die Kameraoptik bestand, neben der erwähnten Blende, aus zwei achromatischen Linsen mit je 100 mm Brennweite. Die Blende befand sich zwischen diesen beiden Linsen. Die verwendete CCD-Kamera wurde mit einem speziellen Adapter direkt in die optische Bank montiert. CCD-Sensor und Fokusebene befanden sich jeweils in den Brennpunkten der Linsen. Somit ergibt sich eine 1:1 Abbildung. Der Abstand der Beleuchtungs- und Kameraoptik wurde bei gefülltem Tank so eingestellt, daß das Bild der Glühwendel am Ort der Blende entstand und betrug 208 mm.

### 3.2 Bildaufnahme und Bildauswertung

Die Standards wurden in eine Halterung gespannt, die von oben, an der optischen Bank montiert, in den mit Wasser gefüllten Blasentank reichte. Zur Messung der Tiefenserien wurden sie mit einer Mikrometerschraube entlang der optischen Achse verschoben. In jeder Position wurden fünf Einzelbilder im Sekundenabstand aufgenommen, um bei der Auswertung durch Mittelung eine Rauschunterdrückung zu ermöglichen. Der Unterschied im Brechungsindex des Gießmaterials ( $n = 1,48$ ) zum umgebenden Wasser ( $n = 1,33$ ) wurde in der Auswertung vernachlässigt. Zur Größeneichung wurde eine Tiefenserie mit einem Eichgitter aufgenommen.

Zur Bildaufnahme diente eine CCD-Videokamera (Pulnix TM 640). Diese nach der amerikanischen Videonorm NTSC arbeitende Kamera besitzt ein CCD-Array aus  $649 \times 491$  quadratischen Pixeln, mit einer Seitenlänge von je  $13,5 \mu\text{m}$ . Die kleinste mögliche Belichtungszeit von  $1/15750$  sec wurde verwendet, um die Bewegungsunschärfe der gemessenen Blasen minimal zu halten (siehe [Geißler-93]). Zur Bildspeicherung diente ein Laser-Video-Rekorder (siehe Kapitel 2.1). Die Algorithmen wurden von [Geißler-93] übernommen. Es wurden 30 Objekte, mit Flächen zwischen 53 und 19134 Pixeln (das entspricht 0.02 bzw. 7,8 % der CCD-Fläche, oder Blasendurchmesser zwischen 113 und  $2160 \mu\text{m}$ ) und jeweils, abhängig von der Größe des Objekts, zwischen 30 und 100 Positionen in Tiefenrichtung bearbeitet. Aus dem über fünf Einzelaufnahmen gemittelten Bild wurden die e-Wertfläche  $f_e$  (bzw. der entsprechende Radius  $r_e$ ) und die Grauwertsumme  $g_{sum}$  als Funktion vom Abstand  $z$  zur Fokusebene ermittelt. Die in den Standards eingegossenen Blasen befinden sich an unterschiedlichen Tiefenpositionen. Das Minimum der gemessenen Fläche diente jeweils als Merkmal für die  $z = 0$  Position. Der mittlere Grauwert ist durch  $g_e = g_{sum}/f_e$  gegeben. Die Funktionen  $f_e(g_e)$  für verschieden große Objekte bilden zusammen das benötigte Kennfeld für das *Depth from Focus* Verfahren.



### 3.3 Ergebnisse

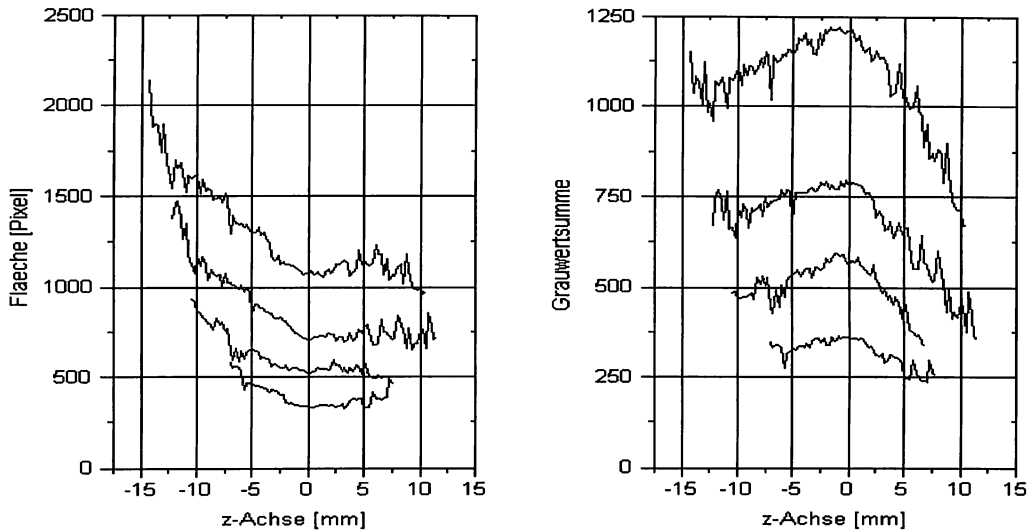


Abbildung 3.3: Beispiele gemessener Flächen und Grauwertsummen

Abb. 3.3 zeigt einige gemessene e-Wertflächen und Grauwertsummen als Funktion des Abstandes zur Fokusebene. Die Werte  $z < 0$  liegen von der Kamera aus gesehen vor der Fokusebene, Punkte mit  $z > 0$  dahinter. Die unterschiedlichen Steigungen erklären sich durch das entfernungsabhängige Abbildungsverhältnis (Kapitel 2.5.2). Es sind nur Werte aus einem kleinen Größenbereich von Blasen dargestellt, um noch Details erkennen zu können. Auffällig ist das erhebliche Rauschen (siehe Kapitel 3.7). Die beiden Schaubilder in Abb. 3.4 zeigen die daraus berechnete Kennfeldkurven  $f_e(g_e)$ . Da der mittlere Grauwert ein Maximum annimmt wenn sich das Objekt in der Fokusebene befindet, sind die Fälle  $z < 0$  und  $z > 0$  getrennt dargestellt.

In Abb. 3.5 sind Eichkurven von vier Letraset-Punkten und einer Blase gezeigt. Die bei mittlerem Grauwert=1,0 in der Mitte liegende Kurve stammt von der Blase. Es zeigt sich eine Übereinstimmung der Kurven im Rahmen der Meßgenauigkeit. Damit konnten die Eichmessungen von [Geißler-93], und die zugrundeliegende Annahme, eine Blase verhält sich bei diesem Verfahren wie ein lichtabsorbierendes Scheibchen, voll bestätigt werden. Aus diesem Schaubild lassen sich auch die Fehlergrenzen abschätzen. Da hier die Kurven teils kaum zu trennen sind, bildet der Bereich der Letraset-Punkte,  $1000 \pm 50$  Pixel, eine untere Grenze für eine Größenangabe aus einem einzelnen Meßpunkt.

In Abb. 3.6 links ist der mittlere Grauwert  $g_{sum}(z)$  dargestellt. Die eingezeichneten Kurven überdecken den gesamten Bereich gemessener Blasengrößen. Die Linearität der Kurven und deren Symmetrie zu  $z = 0$  bedeuten, daß beim Wechsel der Darstellungen von  $f_e(z)$  (Abb. 3.3) zum Kennfeld  $f_e(g_e)$  die einzelnen Kurven lediglich mit einem größenabhängigen Skalierungsfaktor

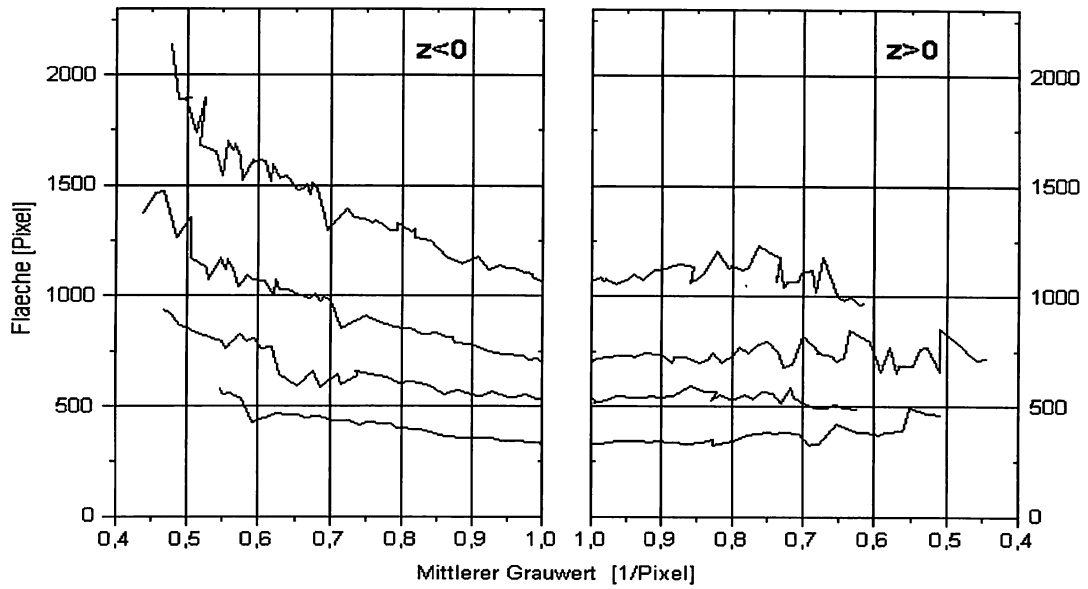
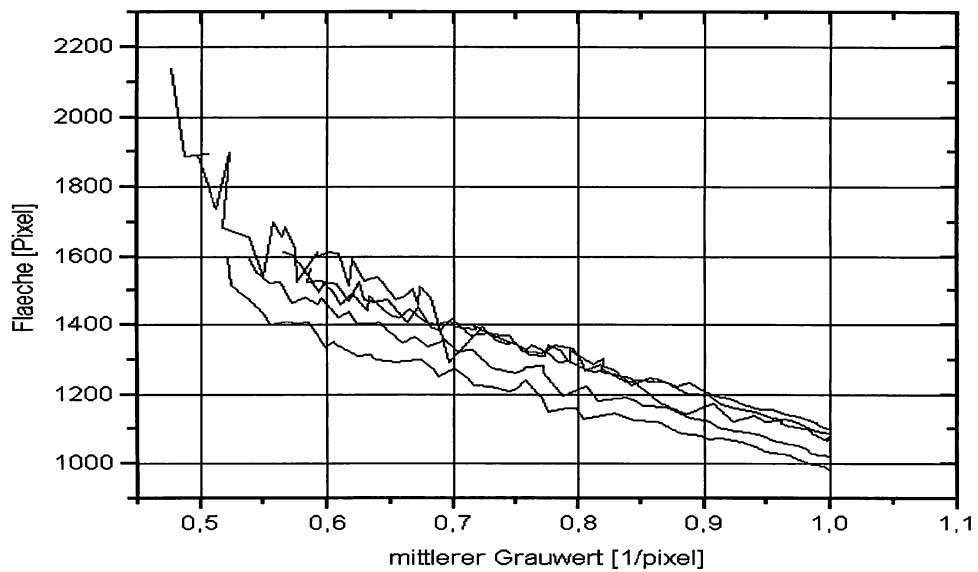
Abbildung 3.4: Kennfeldkurve mit  $z > 0$  und  $z < 0$ 

Abbildung 3.5: Vier Letrasetpunkte (Flächen: 981, 1022, 1075 und 1093 Pixel) und eine Blase vergleichbarer Größe (1069 Pixel)

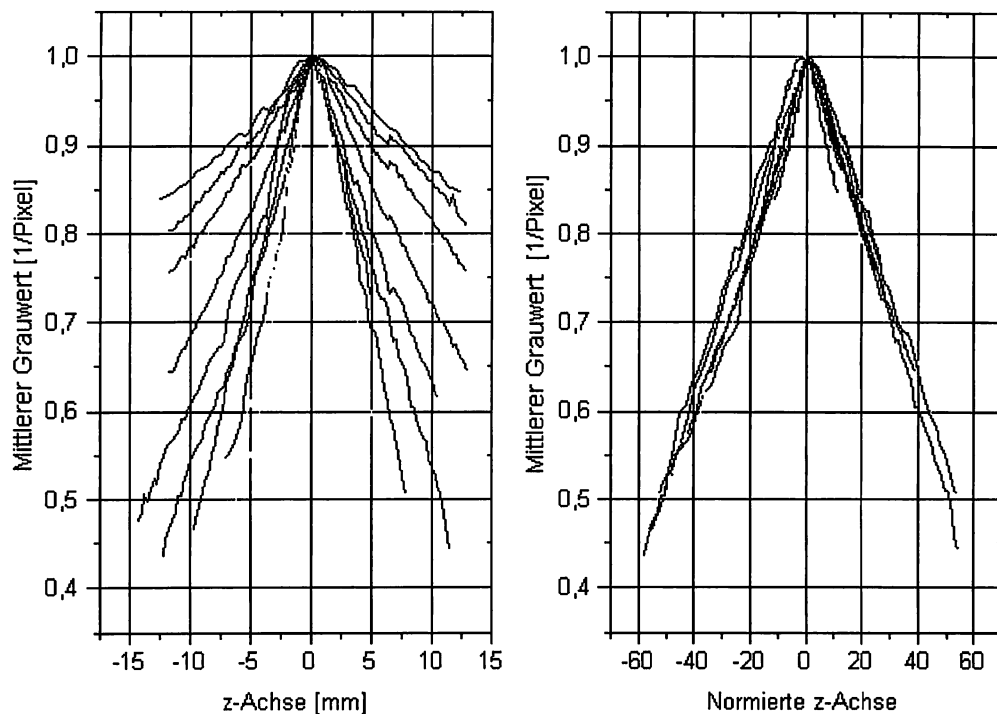


Abbildung 3.6: Mittlerer Grauwert

Links: als Funktion von  $z$ ; Rechts: als Funktion des auf den jeweiligen Blasenradius normierten Abstandes zur Fokusebene  $z/R$

gedehnt werden. Im rechten Bild wurde zusätzlich die  $z$ -Achse durch den Radius der Blasen normiert. Die angegebenen Werte bedeuten 'Vielfaches des Blasenradius'. Die hervorragende Übereinstimmung der Kurven läßt wichtige Schlüsse zu:

- *Rauschen*: Der mittlere Grauwert stellt, im Vergleich zur e-Wertfläche oder zur Grauwertsumme, eine erheblich rauschunempfindlichere Meßgröße dar.
- *Linearer Zusammenhang zwischen Meßvolumen und Blasengröße*: Dieser von [Geißler-93] berechnete Zusammenhang ist hier bestätigt. Wird bei der Auswertung eine von der Blasengröße unabhängige Schwelle für den mittleren Grauwert verwendet, so ergibt der entsprechende  $z$ -Wert den Proportionalitätsfaktor zur Berechnung der Tiefenausdehnung des Meßvolumens. Die Steigung der Kurve hängt von der verwendeten Blende (Apertur) ab. [Geißler-93] hatte für seinen Aufbau einen Proportionalitätsfaktor von 37,5 bei einer gewählten Grauwertschwelle von 0,67 berechnet. Hier ergibt sich bei gleicher Grauwertschwelle etwa ein Proportionalitätsfaktor 35. Das zeigt, daß beide Meßaufbauten vergleichbare Aperturen hatten. Da dieser Faktor in positiver und negativer Richtung gilt ergibt

sich ein gesamtes Meßvolumen in Tiefenrichtung vom 75 bzw. 70-fachen des Blasenradius.

- *Ähnlichkeit*: Die Bilder von gleichen Objekten unterschiedlicher Größe sind skaleninvariant. D.h. das Bild eines Objektes der Größe  $R$  im Abstand  $z$  von der Fokusebene gleicht einem mit  $R/r$  skalierten Bild eines Objektes der Größe  $r$  im Abstand  $zr/R$ . Damit genügt die Messung der Tiefenserie eines einzigen Objektes für eine vollständige Eichung. Diese Ähnlichkeit folgt aus der Linearität der optischen Abbildung.

### 3.3.1 Rauschen

Aus Abb. 3.7 ist zu erkennen, daß der wesentliche Beitrag zum Rauschen während der Aufnahme entsteht.

#### a) Blasenstandards:

Gezeigt sind die Flächen dreier Blasen, die in der selben Szene aufgenommen wurden. Die Kurven zeigen deutlich Ähnlichkeiten in den Rauschpeaks, allerdings an unterschiedlichen  $z$ -Positionen. Zum Beispiel findet sich der gleiche Sprung, den die obere Kurve bei etwa  $z \approx -7$  aufweist, in der Mittleren bei  $z \approx -5$  und unten bei  $z \approx -6$ . Ebenso gleichen sich die Verläufe an den folgenden Stellen: Oben bei  $z \approx 4$ ; Mitte bei  $z \approx 6$  und Unten bei  $z \approx 5$ . Diese konstante Verschiebung entspricht den unterschiedlichen Positionen der Blasen im Standard. Korrespondierende Peaks entstammen der selben Aufnahme. Die Auswertung erfolgte zu unterschiedlichen Zeitpunkten, so daß ein Rauschbeitrag der Digitalisierung diesen Effekt nicht erzeugt haben kann.

#### b) Letrasetpunkte:

Auch hier sind gleiche Strukturen in allen drei Kurven zu erkennen. Die Verschiebung in  $z$ -Richtung entfällt, da die Punkte auf ein Mikroskopobjektträger aufgebracht waren.

Die Hauptursache dieses Rauschens sind wahrscheinlich Schwankungen in der Beleuchtungshelligkeit. Andere Möglichkeiten, variierende Empfindlichkeit der Kamera oder des LVR, sind weniger wahrscheinlich. Da jeweils fünf Bilder pro Position im Abstand etwa einer Sekunde aufgenommen und darüber gemittelt wurde, handelt es sich um recht langsame Schwankungen (nicht etwa durch Effekte wie sie bei Wechselspannungslichtquellen durch die Netzfrequenz auftreten). Ein möglicher Grund für diesen Effekt könnte in der verwendeten Elektronik zur Helligkeitsregelung (Einstellung über einen Potentiometer) liegen.

In Abb. 3.5 ist bei der Kurve der Blase ein stärkeres Rauschen zu erkennen, als bei den Letrasetpunkten. Die Standards verursachten eine deutlich unregelmässige Hintergrundaufleuchtung durch Streulicht. Das wird verursacht durch Unregelmässigkeiten der Oberflächen, Blasen vor oder hinter der momentan scharf abgebildeten Ebene und evtl. auch von Inhomogenitäten im Brechungsindex innerhalb des Gießobjekts (ungleichmäßig verteilter Härter: beim Einrühren waren deutlich Schlieren zu sehen.). Bei den Messungen mit Standards wurden außerdem die Null- und Schwarzbilder ohne Gießobjekt aufgenommen. Durch diese Faktoren wurde der Fehler durch Helligkeitsschwankungen bei der Segmentation noch verstärkt.

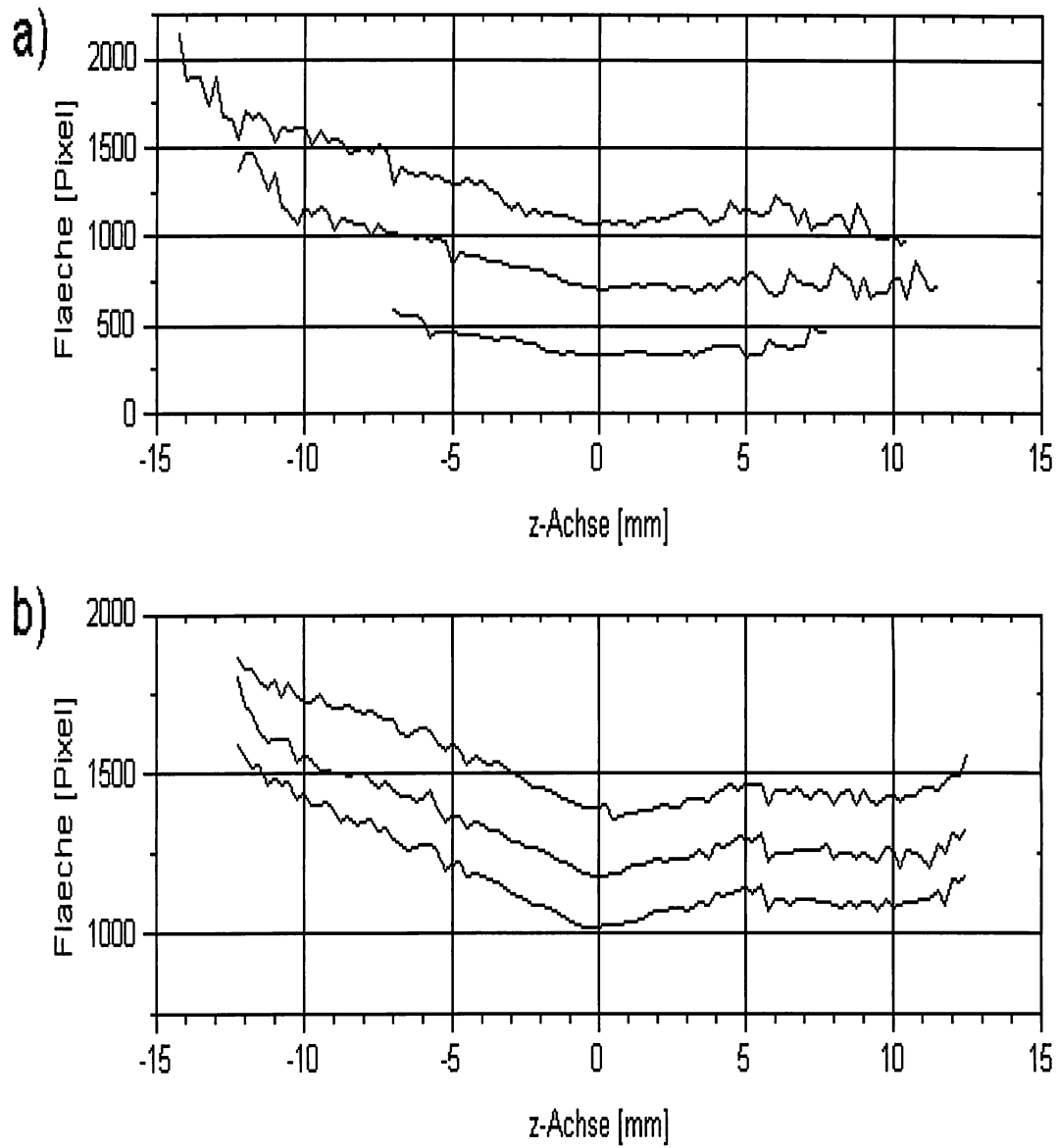


Abbildung 3.7: Ähnlichkeiten in den Rauschpeaks:

Oben: Blasen an unterschiedlichen Positionen innerhalb des Eich-Standards;

Unten: Letrasetpunkte auf einem Mikroskopobjektträger

# Kapitel 4

## Dunkelfeldmethode

In diesem Kapitel wird eine Durchlicht-Dunkelfeldmethode zur Blasenvisualisierung vorgestellt. Die exakte Darstellung der Lichtstreuung an einer so beleuchteten Blase ist notwendig, um die Abbildungseigenschaften einer solchen Optik zu verstehen. Dazu wurde eine komplette Strahl-durchrechnung entwickelt, die es ermöglicht, den Intensitätsverlauf einer abgebildeten Blase zu berechnen. Es wurden zwei Möglichkeiten zum Aufbau einer Dunkelfeldoptik entwickelt. Zusätzlich wurde ein kombinierter Aufbau aus Hell- und Dunkelfeld realisiert.

Mit den in Kapitel 3.1 beschriebenen Eich-Standards wurden Tiefenserien von Blasen im Dunkelfeld aufgenommen. Es wurde der Durchmesser des äusseren Rings, die Breite des Rings und der Durchmesser des inneren Kreises als Funktion des Abstandes zur Fokusebene bestimmt. Aus den Messergebnissen wurde ein Konzept für ein *Depth from Focus* Verfahren für Blasen im Dunkelfeld erstellt.

### 4.1 Lichtstreuung an einer Luftblase im Dunkelfeld

#### 4.1.1 Prinzipieller Aufbau zur Blasenmessung

Der Hauptunterschied einer zur Blasenmessung verwendbaren Optik zu herkömmlichen Dunkelfeldmikroskopen wie sie in Kapitel 2.5.2 vorgestellt wurden, besteht darin, daß sich das beobachtende Objekt nicht direkt vor dem Kondensator, bzw. nicht direkt vor dem Objektiv befindet. Man möchte einen möglichst großen Abstand der optischen Elemente vom Meßvolumen erzielen, um den Einfluß der Meßapparatur auf die Blasen gering zu halten. In Abb. 4.1 ist eine optische Anordnung skizziert.

Der Strahlverlauf ist so gewählt, daß Licht nur dann in die Kameraoptik fällt, wenn sich ein Objekt im Meßvolumen befindet. Beleuchtungs- und Kameraoptik befinden sich einander gegenüber. Am Kondensator wird mittels einer Dunkelfeldblende der innere Teil des Strahls ausgeblendet. Der Strahlengang bildet so den Mantel eines Doppelkegels, in dessen engster Stelle sich das Meßvolumen befindet. An der Kameraoptik ist der Durchmesser der Blende, bzw. der Eintrittsluke so gewählt, daß obige Bedingung erfüllt ist. Im Idealfall treten alle Strahlen, die von einem Objekt unter einem Winkel  $|\theta| < \phi$  zur optischen Achse gestreut werden, in die Kameraoptik ein.

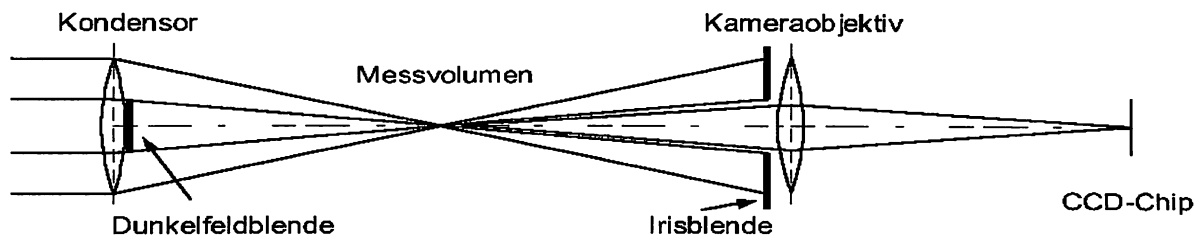


Abbildung 4.1: Prinzip einer Dunkelfeldbeleuchtung

Der Winkel  $\phi$  ist der halbe Öffnungswinkel des Kegels. Für die folgende Betrachtung sei dieser Idealfall angenommen.

#### 4.1.2 Geometrie der Streuung an einer Gasblase

Wie bereits in Kapitel 2.3 dargestellt, handelt es sich bei der Streuung an Blasen um einen sehr komplexen Vorgang, bei dem die verschiedenen Reflexionen und Transmissionen berücksichtigt werden müssen. Im Folgenden werden nun für einfache äußere Reflexion, ein- und zweimalige innere Reflexion und anschließende Transmission die Strahlen ermittelt, die in die Kameraoptik gestreut werden. Es werden sowohl der Austrittsort als auch die Intensität der Strahlen berechnet, um das Bild der Blase zu konstruieren. Strahlen, die häufiger in der Blase reflektiert werden spielen praktisch keine Rolle, da ihre Intensität zu klein ist um bei einer Digitalisierung mit 256 Graustufen noch aufgelöst zu werden.

Für die weiteren Betrachtungen wird von einer Blase mit Radius  $R = 1$  ausgegangen. Der Winkel zwischen dem einfallenden Strahl und der optischen Achse wird mit  $\phi$  bezeichnet. Der Radius ist klein gegenüber den Abmessungen des optischen Aufbaus. Aus geometrischen Betrachtungen lassen sich der Austrittspunkt  $\delta$  sowie der Streuwinkel  $\theta$  als Funktion des Eintrittspunktes  $\psi$  berechnen. Die beiden Punkte werden durch ihren Winkel zur optischen Achse charakterisiert. Alle Winkel werden von der optischen Achse aus gemessen. Die beiden Winkel  $\psi$  und  $\phi$  werden im mathematisch negativen Drehsinn (d.h. im Uhrzeigersinn) gerechnet, sie sind also positiv. Die Winkel sind in Abb. 4.2 a) dargestellt.

a) Notation:

- $\phi$  : Winkel des einfallenden Strahls zur optischen Achse
- $\psi$  : Winkel zwischen Auftreffpunkt des Strahls und der optischen Achse
- $\alpha$  : Lotwinkel im Wasser
- $\beta$  : Lotwinkel in der Blase
- $\gamma$  : Mittelpunktswinkel zwischen zwei inneren Reflexionen
- $\delta$  : Winkel des Austrittspunktes zur optischen Achse
- $\theta$  : Streuwinkel

- $k$  : Anzahl der Reflexionspunkte
- $n$  : Brechungsindex von Wasser = 1.333
- $T_k$  : Transmissionskoeffizient

Es ergeben sich folgende Beziehungen:

$$\begin{aligned} \alpha &= \psi - \phi \\ \frac{\sin(\alpha)}{\sin(\beta)} &= \frac{1}{n} \quad \text{Brechungsgesetz} \\ \Rightarrow \beta &= \arcsin(n \sin(\alpha)) \\ \gamma &= \pi - 2\beta \\ \delta &= \pi - (\psi + (k+1)\gamma) \\ \theta &= \delta - \alpha \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Rightarrow \theta &= \pi - [\psi + (k-1)(\pi - 2 \arcsin(n \sin(\psi - \phi)))] - (\psi - \phi) & (4.1) \\ &= \pi(2-k) + \phi - 2\psi + 2(k-1) \arcsin(n \sin(\psi - \phi)) \end{aligned}$$

$$\delta = \pi - (\psi + (k+1)\gamma) \quad (4.2)$$

Mit Hilfe der beiden Gleichungen 4.1 und 4.2 lassen sich  $\theta(\psi)$  und  $\delta(\psi)$  bei festem Einfallswinkel  $\phi$  und verschiedenen  $k$ -Werten berechnen. Aus dem Grenzwinkel für Totalreflexion  $\alpha_g = \arcsin(1/n) = 48.6^\circ$  ergibt sich ein entsprechender Grenzwinkel für den Eintrittspunkt  $\psi_g = \alpha_g - \phi$ . Für  $\psi > \psi_g$  findet ausschließlich Totalreflexion statt und es ist keine Transmission möglich. Um die Strahlen zu berechnen, die in die Kameraoptik gestreut werden, muß Gleichung 4.1 nach  $\psi$  aufgelöst werden. Für  $\theta$  gelten dabei die Randbedingungen  $-\phi < \theta < \phi$ . Eine geschlossene Lösung läßt sich nur für die beiden Fälle äußerer Reflexion ( $k = 1$ ) und einmaliger Transmission ( $k = 2$ ) angeben:

b)  $k = 1$ :

Einsetzen in Gleichung 4.1 ergibt :

$$\begin{aligned} \theta = \pi - 2\psi + \phi &\quad \Rightarrow \quad \psi = \frac{1}{2}(\pi + \phi - \theta) \\ \delta &= \pi - \psi \end{aligned}$$

Für die beiden Grenzstrahlen  $\theta = \pm\phi$  erhält man die Werte:

- $\theta = \phi$  :

$$\begin{aligned} \psi &= \frac{\pi}{2} \\ \delta &= \frac{\pi}{2} \end{aligned}$$



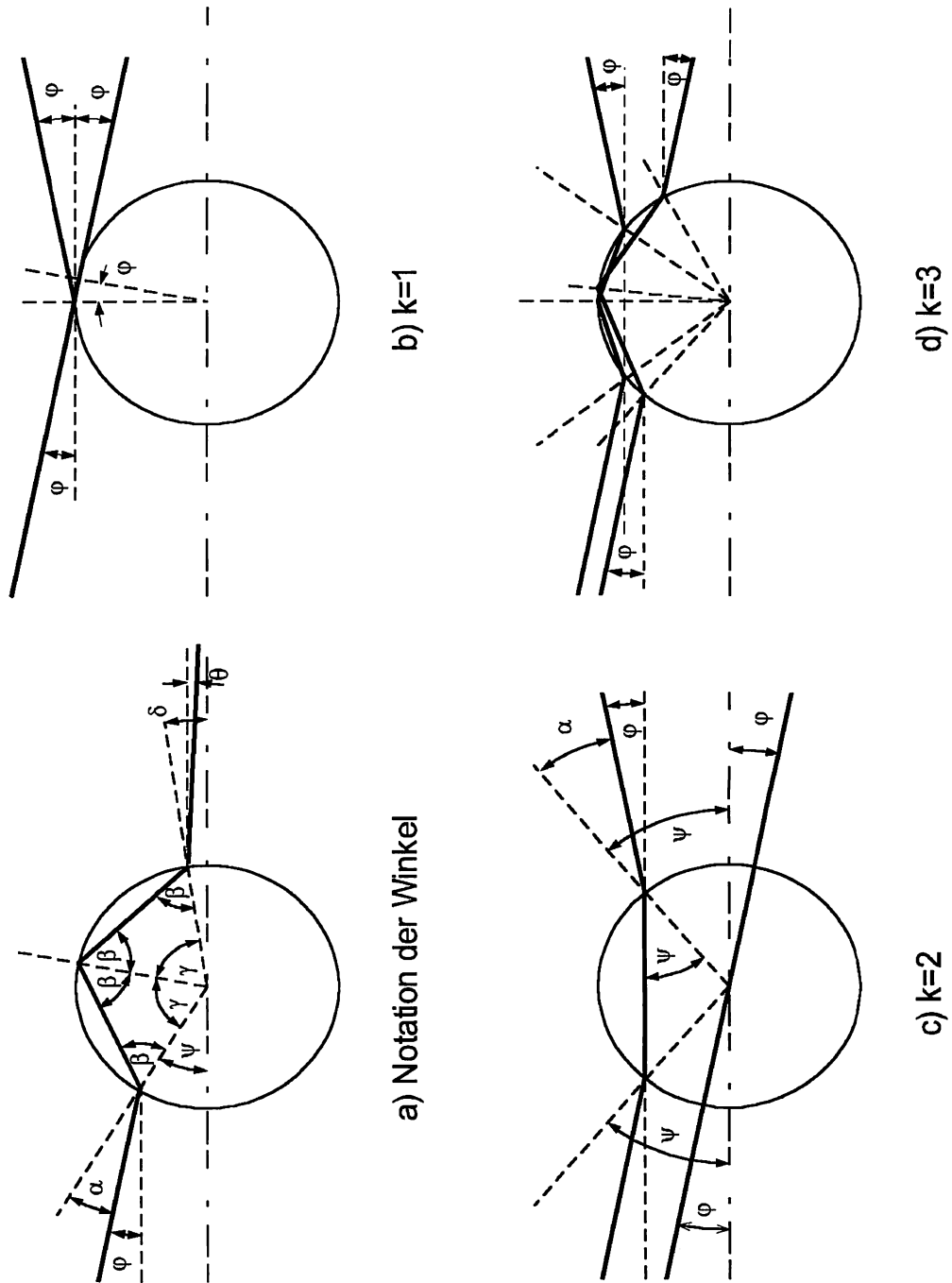


Abbildung 4.2: Strahlgeometrien bei einer Dunkelfeldbeleuchtung

- $\theta = -\phi$  :

$$\begin{aligned}\psi &= \frac{\pi}{2} + \phi \\ \delta &= \frac{\pi}{2} - \phi\end{aligned}$$

Diese Bedingungen werden durch Abb. 4.2 b) verständlich. Es handelt sich im ersten Fall um die Streuung am obersten Punkt der Blase. Hier ist die Tangente parallel zur optischen Achse, und der Streuwinkel  $\theta = \phi$ . Im zweiten Fall ist der Strahl selbst eine Tangente und wird deshalb nicht gestreut, und somit ist  $\theta = -\phi$ . Alle Strahlen, deren Schnittpunkt mit der Blase bei einem Winkel  $\delta$  zwischen  $\pi/2$  und  $\pi/2 + \phi$  liegt, werden unter Totalreflexion in die Kameraoptik gestreut.

- c)  $k = 2$ :

Einsetzen in Gleichung 4.1 ergibt :

$$\begin{aligned}\theta &= \phi - 2\psi + 2 \arcsin(n \sin(\psi - \phi)) \\ \Rightarrow \psi &= \frac{\phi - \theta}{2} - 2 \arcsin(n \sin(\psi - \phi)) \\ \delta &= \theta + \psi - \phi\end{aligned}$$

Für die beiden Grenzstrahlen  $\theta = \pm\phi$  erhält man die Werte:

- $\theta = \phi$  :

$$\begin{aligned}\sin(\psi) &= n \sin(\psi - \phi) = n(\sin(\psi) \cos(\phi) - \cos(\phi) \sin(\psi)) \\ \Rightarrow \psi &= \arctan\left(\frac{\sin(\phi)}{\cos(\phi) - \frac{1}{n}}\right) \\ \delta &= \psi\end{aligned}$$

- $\theta = -\phi$ :

$$\begin{aligned}\psi &= \phi - 2 \arcsin(n \sin(\psi - \phi)) \\ \Rightarrow \sin\left(\frac{\psi - \phi}{2}\right) &= -n \sin(\psi - \phi) \\ \Rightarrow \psi &= \phi \\ \delta &= -\phi\end{aligned}$$

Auch diese Werte werden durch Abb. 4.2 c) anschaulich. Im ersten Fall ist der Strahl innerhalb der Blase parallel zur optischen Achse. Die Spiegelsymmetrie zur senkrechten Achse läßt sofort erkennen, daß in diesem Fall der Austrittswinkel gleich dem Eintrittswinkel ist ( $\theta = \phi$ ). Im zweiten Fall handelt es sich um den Mittelpunktstrahl ( $\theta = -\phi$ ).

d)  $k = 3$ :

Hier muß  $\psi$  für die beiden Fälle  $\theta = \phi$  und  $\theta = -\phi$  numerisch berechnet werden.

In Abb. 4.2 d) zeigt sich für den Fall ( $\theta = \phi$ ) wieder eine Spiegelsymmetrie des Strahlverlaufes zur senkrechten Achse durch die Blase.

### 4.1.3 Berechnung der Streuintensität

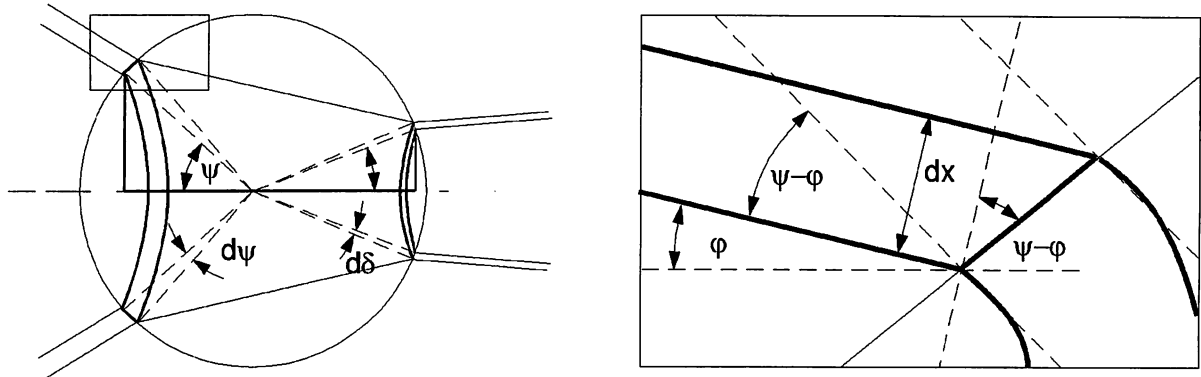


Abbildung 4.3: Flächenelemente zur Intensitätsberechnung

Um die Intensität  $I(\delta)$ , die von den verschiedenen Austrittspunkten abgestrahlt wird, zu berechnen, betrachtet man die Energie  $E$  die in ein Flächenelement  $dA$  eintritt, bestimmt die entsprechende Austrittsfläche  $dA'$ , und multipliziert den Quotienten  $E/dA'$  mit dem Transmissionskoeffizienten  $T_k(\alpha) = T_k(\psi - \phi)$  aus Gleichung 2.1.

$$I(\delta) = T_k(\alpha) \frac{E(dA')}{dA'} = T_k(\alpha) \frac{E(dA)}{dA'}$$

Die Berechnung der Flächenelemente ergibt sich aus Abb. 4.3:

$$dA = 2 \sin(\psi) d\psi$$

$$dA' = 2 \sin(\delta) d\delta$$

Der Winkel  $\delta(\psi)$  ist durch die Gleichungen 4.1 und 4.2 gegeben. Der eintretende Strahl hat zum Oberflächenelement  $dA$  den Winkel  $\cos(\psi - \phi)$ :

$$E(dA) = I_0 \cos(\psi - \phi) dA$$

$$\Rightarrow I(\delta) = T_k(\alpha) I_0 \cos(\psi - \phi) \frac{dA}{dA'} \quad (4.3)$$

$$\Rightarrow I(\delta) = T_k(\alpha) I_0 \cos(\psi - \phi) \frac{\sin(\psi) d\psi}{\sin(\delta) d\delta} \quad (4.4)$$

Bei einer einfachen Abbildung wird das Flächenelement  $dA'$  auf ein  $dA'' = \cos(\delta) dA'$  projiziert:

$$I(\sin(\delta)) = I(\delta) \frac{dA'}{dA''} = T_k(\alpha) I_0 \frac{\cos(\psi - \phi) \sin(\psi) d\psi}{\cos(\delta) \sin(\delta) d\delta} \quad (4.5)$$

In Abb. 4.4 sind die Strahlenbündel mit  $k = 1$  und  $k = 2$  eingezeichnet, wobei die Bereiche einer drei-dimensionalen Blase angedeutet sind, von denen Strahlen in die Kameraoptik gelangen. Rechts davon ist die Intensität ( $I(\sin(\delta))/I_0$ ) dargestellt, die sich durch scharfe Abbildung auf eine Ebene ergibt.

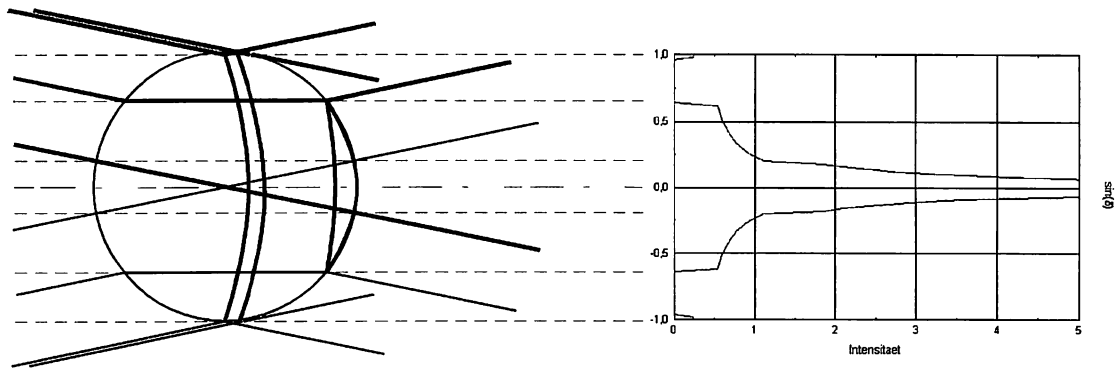


Abbildung 4.4: Intensität bei einer Projektion

Am auffälligsten ist die hohe Intensität der Strahlen, die nahe der optischen Achse austreten. Es ist eine wesentlich höhere Intensität zu beobachten, als es bei  $k = 1$  mit Totalreflexion der Fall ist. Betrachtet man Abb. 4.5, so lassen sich zwei Gründe dafür erkennen.

- Erstens wird ein recht großer Ring von eintretenden Strahlen auf einen sehr kleinen Ring gebündelt, d.h. das Verhältnis von  $dA/dA'$  in Gleichung 4.5 ist sehr groß.
- Zweitens treten an achsennahen Punkten jeweils zwei Strahlen aus: ein Strahl der oberhalb, und ein anderer Strahl der unterhalb der optischen Achse einfällt. Die Intensitäten der beiden addieren sich. Die Blase wirkt für diese Strahlen wie eine Sammellinse.

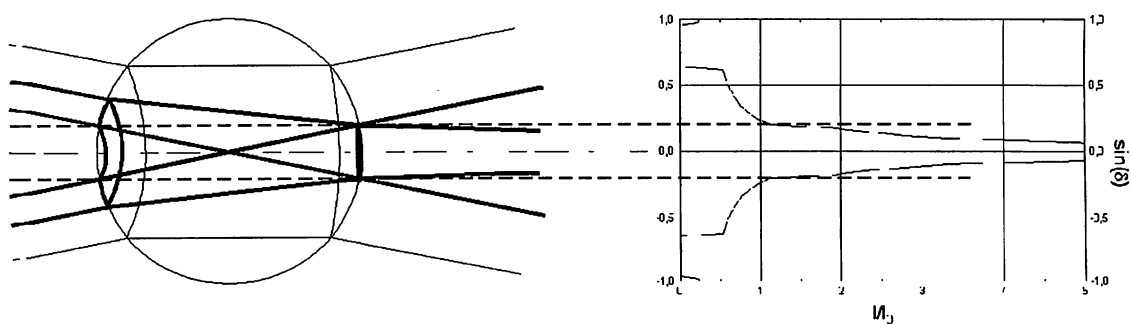


Abbildung 4.5: Detailzeichnung für  $k=2$

Die Intensitätskurven entsprechen einem Schnitt durch das Bild einer Blase auf einem CCD-Chip. Das vollständige Bild ergibt sich durch Rotation der Funktion um die Symmetrieachse. Im Zentrum befindet sich ein sehr heller Kreis ( $k = 2$ ), außen eine heller Ring geringer Breite ( $k = 1$ ) und dazwischen ein weiterer Ring sehr geringer Intensität ( $k = 3$ ). Entscheidend ist dabei:

- Der äußere Ring ist das Bild des Randes der Blase. Damit kann aus einem scharfen Bild einer Blase sofort deren Radius bestimmt werden.
- Das charakteristische Muster, daß eine Blase erzeugt, ermöglicht eine eindeutige Identifikation. Eine Blase läßt sich sehr einfach von einem undurchsichtigen Partikel unterscheiden.

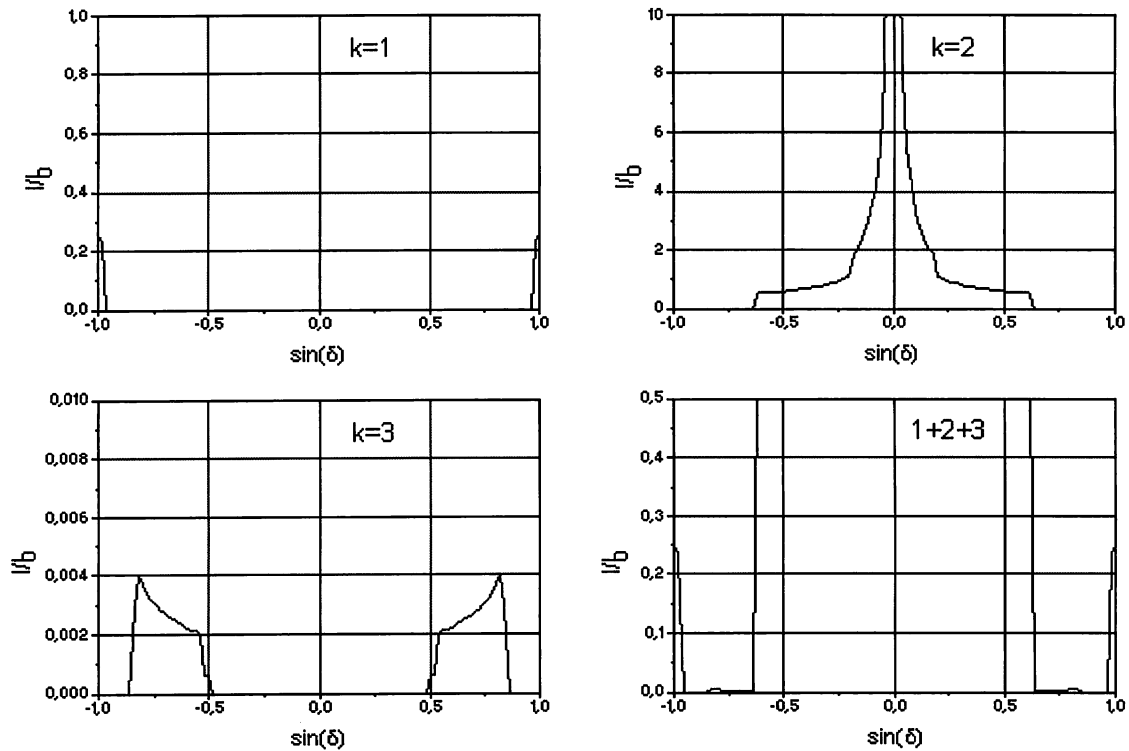


Abbildung 4.6: Intensität für  $k=1,2,3$

Abb. 4.6 zeigt den großen Unterschied in der Streuintensität der verschiedenen Streuebenen ( $k = 1, 2, 3$ ). Zu beachten sind die unterschiedlichen Bereiche, die an den y-Achsen aufgetragen sind.

$$I(k = 2)/I(k = 1)/I(k = 3) = 100/10/1$$

Im Diagramm rechts unten ist die Summe der Intensitäten augetragen. Der Anteil der Streuebene  $k = 3$  ist praktisch nicht zu erkennen. Bei einer Aufnahme mit einer CCD-Kamera kann die Empfindlichkeit so gewählt werden, daß die Intensität des äußeren Ringes ( $k = 1$ ) gerade dem maximalen Grauwert entspricht. Damit ist es in manchen Fällen möglich, den inneren Ring ( $k = 3$ ) noch aufzulösen. In den gezeigten Plots der Gesamtintensität wurde das nicht gemacht, um den Verlauf der Kurve in der Mitte noch erkennen zu können.

#### 4.1.4 Einfluß des Einstrahlwinkels $\phi$

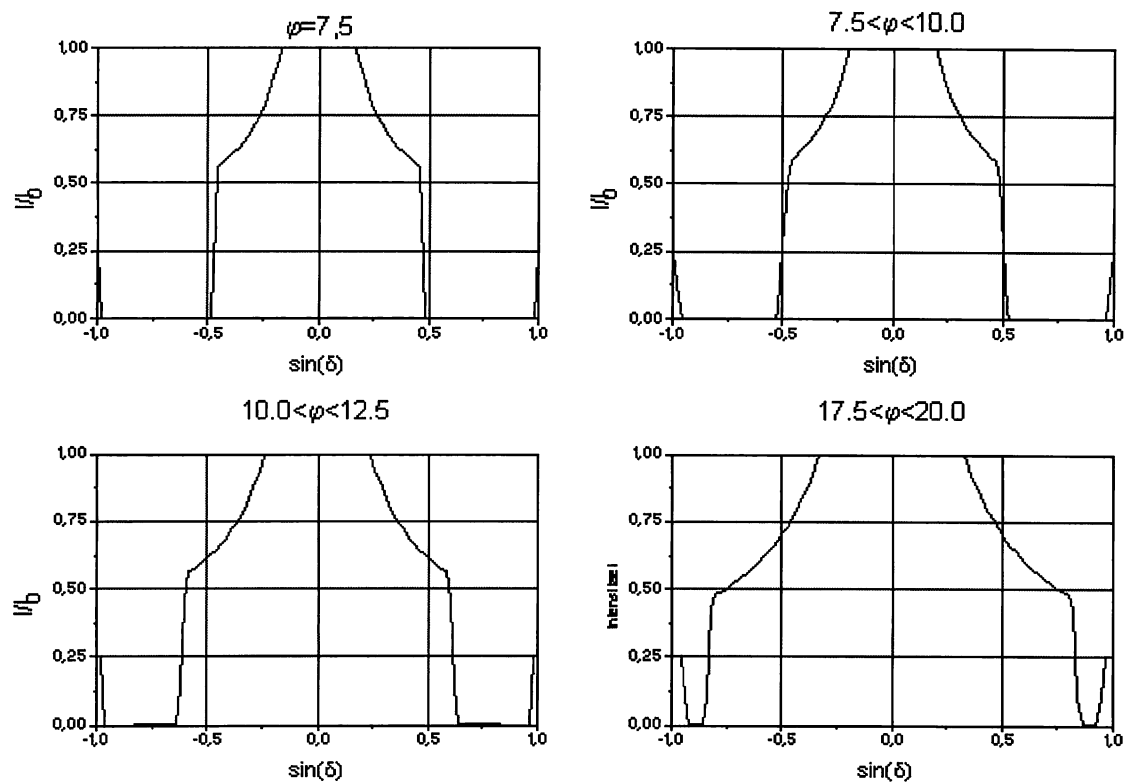


Abbildung 4.7: Intensität bei verschiedenen Einstrahlwinkeln  $\phi$

In Abb. 4.7 ist der Einfluß des Einstrahlwinkels  $\phi$  dargestellt. Der Plot links oben zeigt den Fall  $\phi = 7,5^\circ$ . In den anderen drei Plots wurde über einen ganzen Winkelbereich für  $\phi$  integriert. Die entsprechenden Bereiche sind jeweils bei den Plots angegeben. Ein Vergleich der beiden oberen Kurven zeigt, daß sich diese Integration nicht entscheidend auf den Verlauf der Funktion auswirkt. Deutlicher ist der Unterschied, der sich durch die verschiedenen Einstrahlwinkel ergibt. Je größer  $\phi$  ist, desto breiter wird der innere Kreis. In der unteren rechten Grafik erkennt man, daß der innere Kreis schon den äußeren Ring berührt. Der innere Ring ist völlig durch den Kreis

überdeckt. Für immer kleiner werdenden Winkel  $\phi$  wird der Kreis immer kleiner und die Ringe verschwinden. Im Grenzfall  $\phi \rightarrow 0$  führt das auf den Fall der Hellfeldbeleuchtung, bei der ein heller Fleck in der Mitte des Bildes einer scharf abgebildeten Blase zu sehen war.

#### 4.1.5 Einfluß der Kamerablende

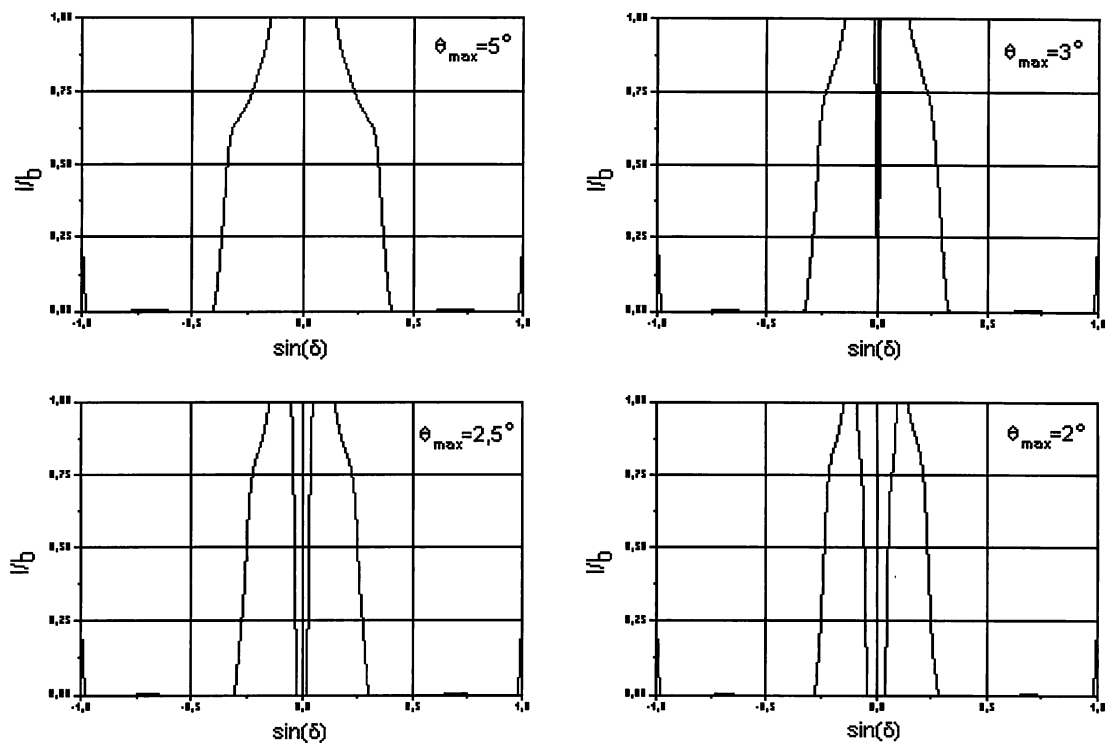


Abbildung 4.8: Intensität bei verschiedenen Kamerablenden ( $\theta_{max}$ )

In den bisherigen Betrachtungen war der maximale Streuwinkel  $\theta_{max}$  gleich dem Einstrahlwinkel  $\phi$ . Wird in der Abbildungsoptik eine zusätzliche Blende verwendet (siehe Kapitel 4.2.1), verringert sich dieser Winkel. Abb. 4.8 zeigt den Einfluß auf das entstehende Bild. Für den Einstrahlwinkel wurde gemittelt über  $5^\circ < |\phi| < 7,5^\circ$ . Mit kleiner werdendem Durchmesser der Kamerablende entsteht aus dem inneren hellen Kreis ein Ring dessen Breite immer weiter abnimmt (siehe Abb. 4.9 rechts).

Abb. 4.9 zeigt diesen Effekt an zwei mit einer Dunkelfeldbeleuchtung aufgenommenen Blasen und den jeweiligen Grauwertschnitt. Es ist jeweils ein Bildausschnitt von 128 x 128 Pixeln (ca. 2 x 2 mm) dargestellt. Die Aufnahmen wurden mit unterschiedlichen CCD-Kameras gemacht:

- links : Pulnix TM 640

Etwas überbelichtet, um den inneren Ring deutlich sichtbar zu machen. Sehr leichtes horizontales Blooming.

- rechts: Sony XC-75

Bei der gleichen Belichtungszeit wurde hier die Blendenöffnung verringert. Die Kamera zeigt bei kurzen Belichtungszeiten ein starkes vertikales Blooming. Dabei handelt es sich um einen Effekt der Videoelektronik bzw. des CCD-Sensors, der bei Überbelichtung und kurzen Belichtungszeiten auftritt. In Abb. A.5 ist dieser Effekt deutlicher zu erkennen. Ausgehend vom mittleren hellen Kreis einer Blase zieht sich ein vertikaler Streifen durch das gesamte Bild.

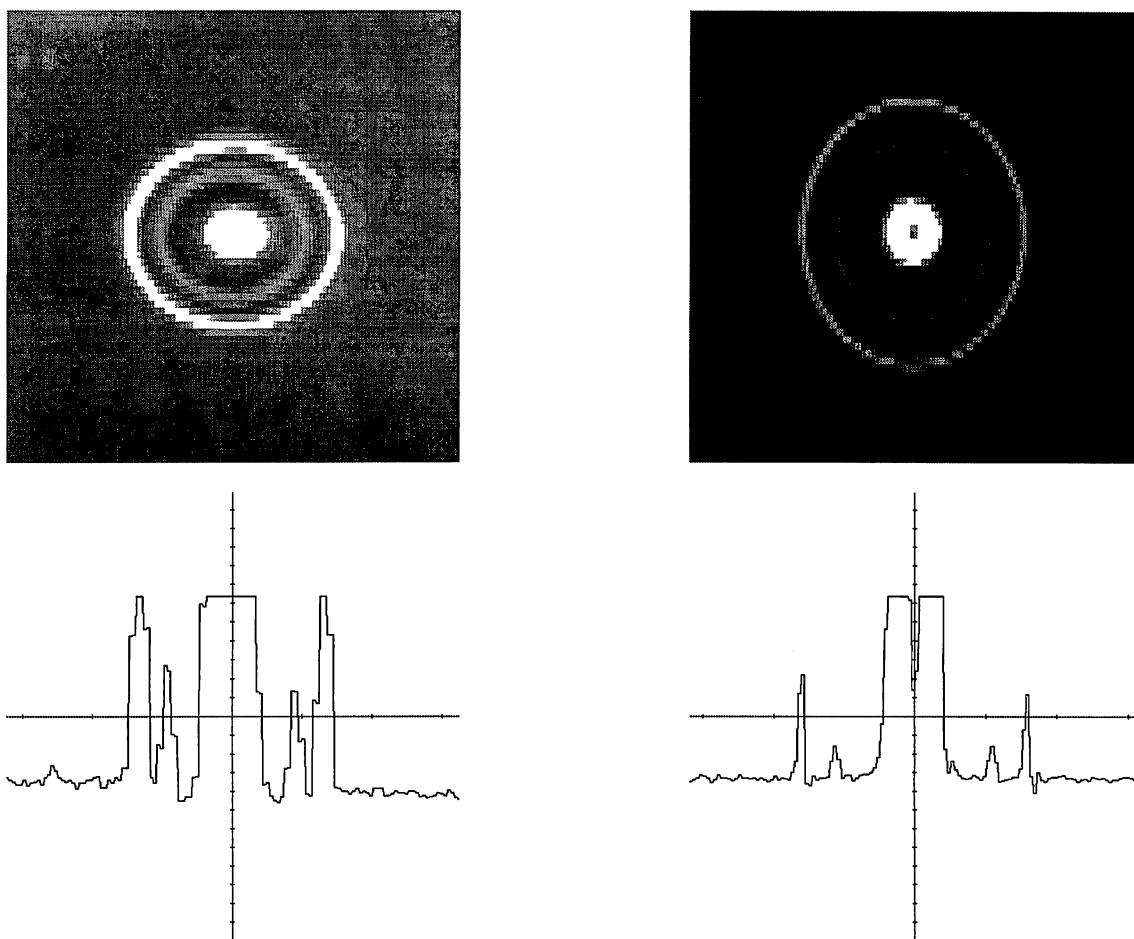


Abbildung 4.9: Dunkelfeldbilder und Grauwertschnitte zweier Blasen

#### 4.1.6 Unschärfe Abbildung

Abb. 4.10 zeigt mehrere Blasen in unterschiedlicher Entfernung zur scharfen Ebene. Das Bild ist ungleichmässig ausgeleuchtet. Es wurde überbelichtet, um die inneren Ringe deutlich sichtbar



zu machen.

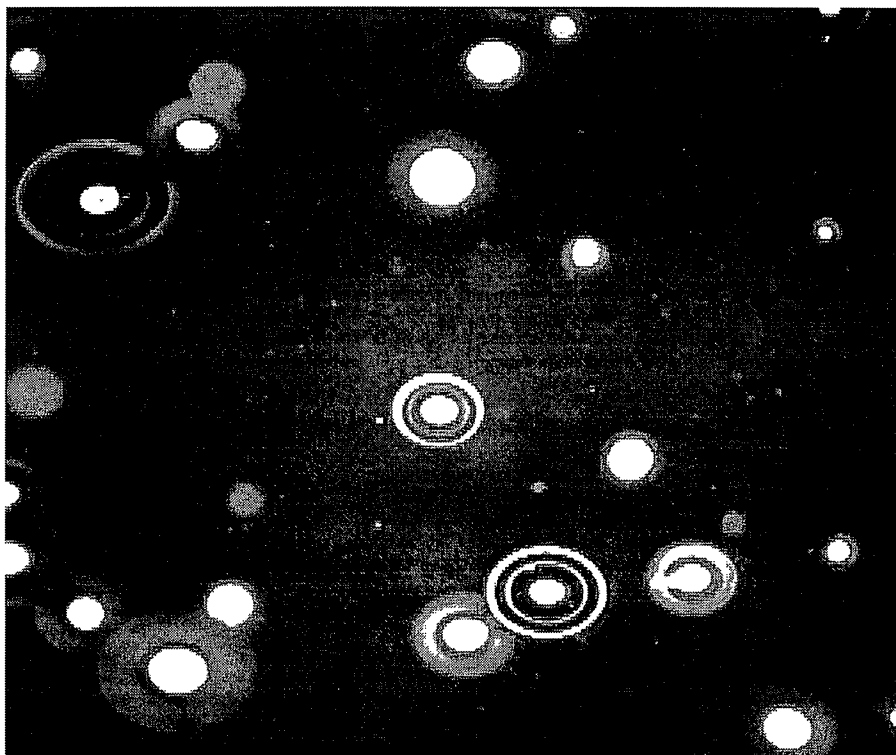


Abbildung 4.10: Mehrere Blasen in unterschiedlichem Abstand zur scharfen Ebene; Ausschnitt: 7,5 x 6 mm

Wie gezeigt wurde, kann bei einer scharfen Abbildung der Durchmesser der Blase sofort angegeben werden. Dies wird dadurch möglich, daß vom Rand der Blase Strahlen in die Kameraoptik gestreut werden ( $k = 1$ ). Dies konnten auch experimentell bestätigt werden (siehe Kapitel 4.5). Im Fall der Hellfeldmethode konnte bei unscharfer Abbildung mit der beschriebenen *Depth from Focus* Methode von [Geißler-93] die Tiefeninformation und die Größe einer Blase bestimmt werden. Entscheidend war dabei, daß sich die Abbildung als Faltung des Objektes mit der ortsunabhängigen *Point Spread Function* darstellen ließ. Das ist bei einer Dunkelfeldoptik nicht der Fall, da es sich hier nicht um Objekte handelt, die diffus abstrahlen. Die Richtung der gestreuten Strahlen ist vielmehr sehr stark vom Emissionsort, bzw. der Neigung des Oberflächenelements von dem der Strahl ausgeht abhängig. Ähnliche Effekte sind durchaus in der Bildverarbeitung bekannt, wenn zum Beispiel von einem Objekt Glanzlichter bzw. Reflexe ausgehen. Solche Reflexe stellen oft ein erhebliches Problem dar, bieten aber evtl. bei speziellen Fragestellungen eine Lösungsmöglichkeit (z.B.: *Shape from Reflection* [Jähne-92]; [Lauer-93]). Man kann, da die optische Abbildung linear bleibt, die Abbildung zwar weiterhin als Faltung mit einer PSF beschreiben, allerdings wird diese PSF nun extrem ortsabhängig, bzw. von der Neigung des Oberflächenelements abhängig. In Kapitel 4.4 wird aus den gemessenen Tiefenserien ein Konzept für ein *Depth from Focus* Verfahren für Blasen im Dunkelfeld abgeleitet.

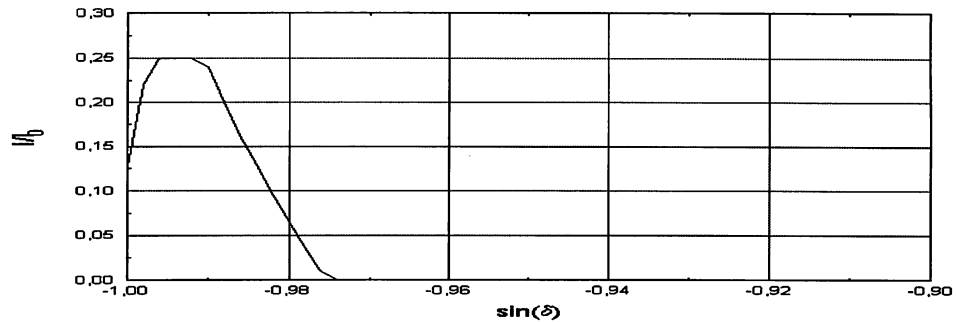


Abbildung 4.11: Intensitätsverteilung für  $k = 1$ , gemittelt über mehrere Einstrahlwinkel  $\phi$

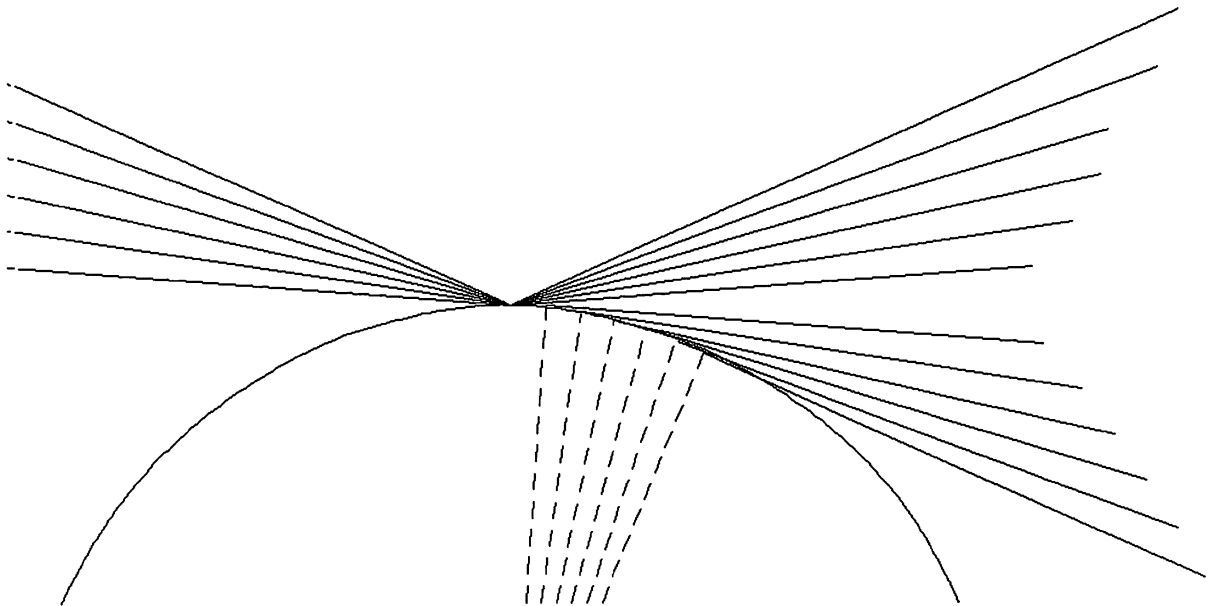


Abbildung 4.12: Detailzeichnung : Emission bei  $k = 1$

Im folgenden wird der Fall  $k = 1$  genauer dargestellt. In Abb. 4.11 ist die Intensität der Totalreflexionen vom Rand der Blase gezeigt. Es wurde über mehrere Einfallswinkel  $\phi$  gemittelt. Beim Maximum handelt es sich um Strahlen, die nahe dem obersten Punkt der Blase emittiert werden. Sie gehen nicht exakt von  $\sin(\delta) = \sin(\pi/2) = 1$  aus, da die Blendenöffnung entsprechend dem kleinsten Einfallswinkel  $\phi_{min}$  gewählt wurde. Diese Strahlen haben jeweils den Emissionswinkel  $\theta = \phi$ . Das Intensitätsmaximum des Ringes kommt also von Strahlen, die eine bevorzugte Emissionsrichtung haben. (siehe Abb. 4.12)

In Abb. 4.13 ist der Fall unscharfer Abbildung für diffuse und gerichtete Emission skizziert. Links befindet sich jeweils das Objekt, rechts sind mehrere Bildebenen eingezeichnet.

- Im oberen Bild handelt es sich um ein diffus strahlendes Objekt. Der Bildpunkt wird durch

die *Point Spread Function* verwaschen, der Schwerpunkt (Intensitätsmaximum) wandert mit dem Strahl, der die Linse im Mittelpunkt durchdringt. Das entspricht gerade der Tiefenabhängigkeit der Vergrößerung. Befindet sich zusätzlich eine Dunkelfeldblende vor der Linse, so wird die PSF ringförmig.

- Im unteren Bild ist dagegen die Situation für einen Reflex dargestellt, bei dem Strahlen um einen gewissen Vorzugswinkel emittiert werden. Der Bildpunkt wird weniger schnell verwaschen, ändert aber seinen Schwerpunktsort in Abhängigkeit von dieser Vorzugsrichtung. Zum direkten Vergleich sind die entsprechenden Bildobjekte aus obiger Zeichnung übernommen. Man kann das Bild auch durch Faltung des scharf abgebildeten Objekts mit einer PSF berechnen, die entsprechend von Ursprung verschoben ist und deren Ausdehnung bestimmt ist durch den Öffnungswinkel der vom Objektpunkt emittierten Strahlen.

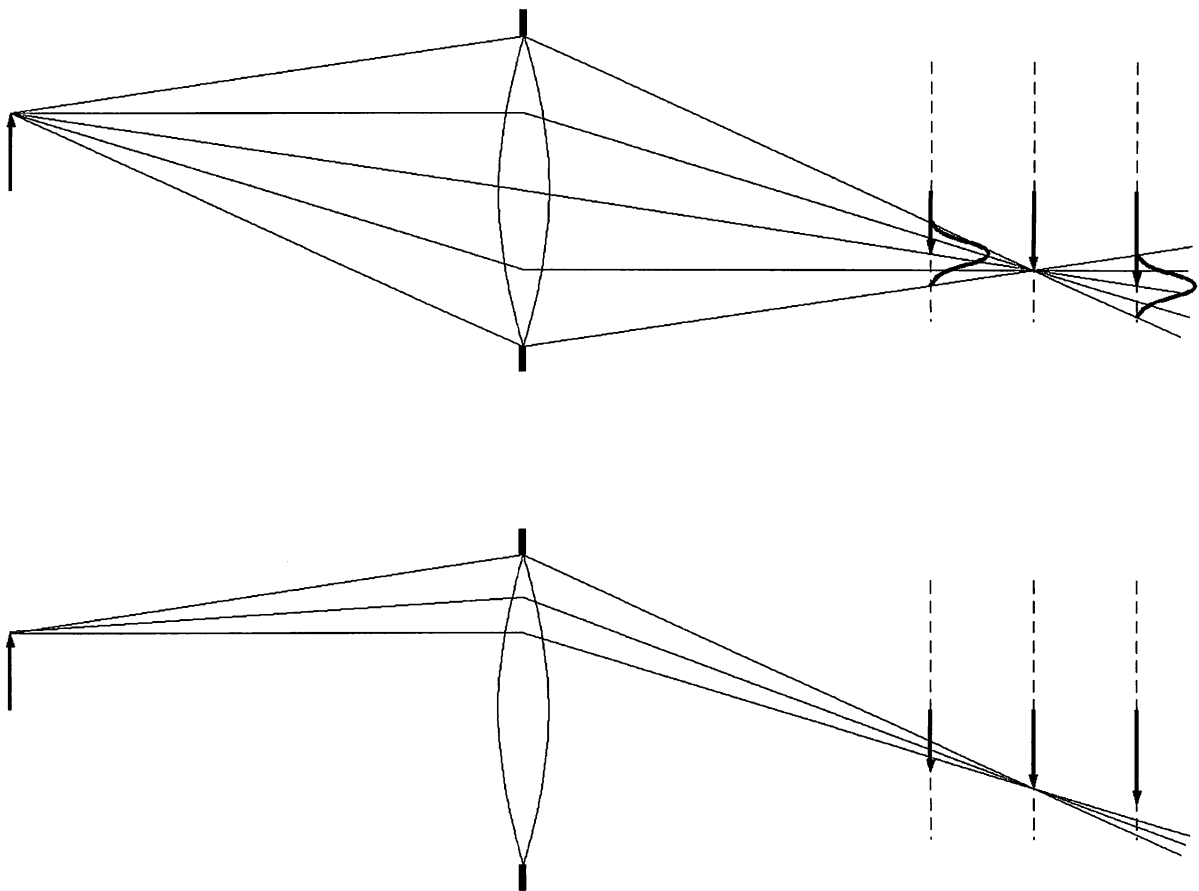


Abbildung 4.13: Unschärfe bei diffuser und gerichteter Emission

In einem normalen Aufbau befindet sich die Bildebene an fester Position. Eine aufzunehmende Blase kann sich vor oder hinter der Fokusebene befinden. Der Effekt ist jedoch in beiden Fällen ähnlich. Befindet sich die Blasen von der Kamera aus gesehen vor ( hinter ) der scharfen Ebene, so erscheint der äußere Ring kleiner ( größer ) als bei scharfer Abbildung. In Abb. 4.24 ist

dieser Effekt an einigen Aufnahmen demonstriert. Mit einer entsprechenden Eichung läßt sich bei Kenntnis der Größe des Objekts dessen Tiefenposition bestimmen bzw. umgekehrt (Kapitel 4.4).

Mit Hilfe eines einfachen Modells läßt sich die Größenänderung des Durchmessers  $\delta D$  als Funktion des Abstandes  $\delta z$  zur Fokusebene abschätzen:

Fokus- und Sensorebene befinden sich jeweils im Abstand der doppelten Brennweite  $f$  einer Sammellinse mit Durchmesser  $D_L$ . Eine Blase mit Durchmesser  $D_B$  befindet sich im Abstand  $\delta z$  vor der Fokusebene bei  $g = 2f - \delta z$ . Aus der allgemeinen Abbildungsgleichung für dünne Linsen ergibt sich der Bildort  $b$  und dessen Verschiebung  $\delta b$  zur Sensorebene zu:

$$b = \frac{fg}{g-f} = \frac{(2f - \delta z)f}{f - \delta z}$$

$$\rightarrow \delta b = b - 2f = \frac{f\delta z}{f - \delta z}$$

Unter der Annahme, daß vom äußersten Rand der Blase nur Strahlen unter dem maximalen Öffnungswinkel zum entsprechenden Randpunkt der Linse in die Optik treten (durchgehende Strahlen in Abb. 4.14), ergibt sich der Durchmesser des Bildes  $D$  auf dem Sensor in erster Näherung zu:

$$D = D_B + \frac{D_L}{b}\delta b \quad (4.6)$$

$$\rightarrow \delta D = D - D_B = D_L \frac{\delta z}{2f - \delta z}$$

$$\rightarrow \delta D \approx \frac{D_L}{2f}\delta z \quad (4.7)$$

Das Verhältnis  $f/D$  definiert die sog. *Blendenzahl*. Im Bild der Blase begrenzen diese Strahlen den äußeren Ring. Befindet sich die Blase vor der Fokusebene bilden sie die Innenkante, dahinter die Außenkante des Rings. Die Breite des Rings ist durch den Winkelbereich der emittierten Strahlen bestimmt. Würden diese Randpunkte diffus strahlen, wie in Abb. 4.13 oben, so müßte die Breite des Rings mit der selben Abhängigkeit wie in Gleichung 4.7 zunehmen. Dies ist aber nicht der Fall. Die experimentelle Bestätigung dafür ist in Kapitel 4.4 beschrieben.

## 4.2 Entwicklung möglicher Aufbauten

Bei dem verwendeten Dunkelfeldkondensator handelte es sich um einen Hellfeldkondensator zusammen mit einer Ringblende (siehe Kapitel 2.2). Der äußere Rand war durch die Fassung der Linsen gegeben. Im Folgenden wird mit *Dunkelfeldblende* der innere, undurchsichtige Kreis bezeichnet.

Es wurden zwei Möglichkeiten zum Aufbau einer Dunkelfeldoptik entwickelt. Beide haben gemeinsam, daß sich Beleuchtungs- und Kameraoptik einander gegenüber stehen, und das Meßvolumen sich in der Mitte dazwischen befindet (Durchlicht-Dunkelfeld). Sie unterscheiden sich durch die Position der Dunkelfeldblende. Sie kann sowohl auf die Beleuchtungsseite, als auch

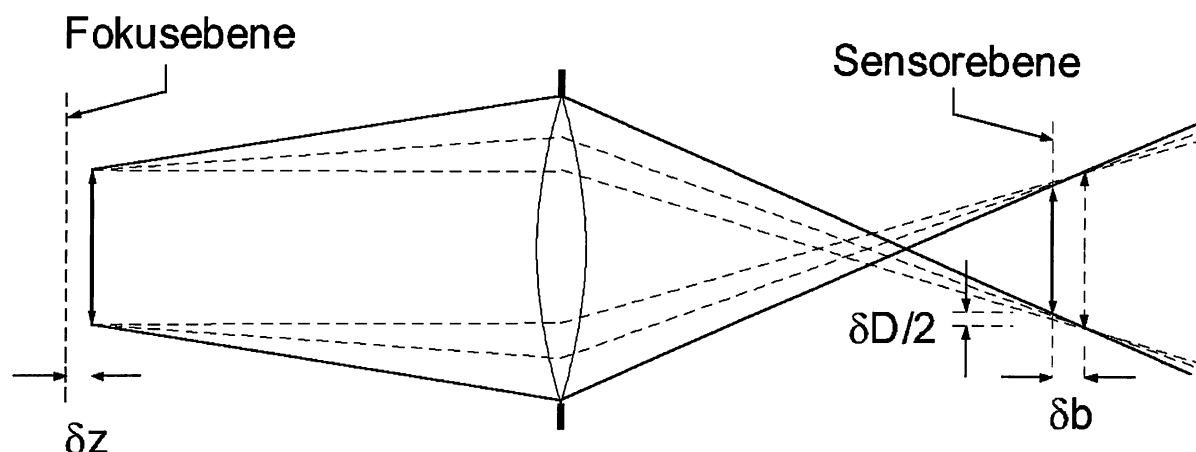


Abbildung 4.14: Ringdurchmesser bei unscharfer Abbildung einer Blase

kameraseitig montiert werden. Für beide Arten gibt es verschiedene Variationsmöglichkeiten. Es ergeben sich jeweils unterschiedliche Vor- und Nachteile, die bei der Beschreibung der jeweiligen Optik diskutiert werden.

Entscheidend für den Aufbau einer Dunkelfeldoptik ist eine geeignete Dunkelfeldblende. Der Unterschied zu einer *normalen* Blende besteht darin, daß gerade diejenigen Strahlen ausgeblendet werden, die nahe der optischen Achse verlaufen. Besonders schwierig gestaltet sich die Realisierung einer variablen Dunkelfeldblende. Dies war aber für die Entwicklung der verschiedenen Aufbauten unerlässlich. Zur Lösung dieses Problems wurden Kreise verschiedener Durchmesser auf ein spezielles Negativ-Filmmaterial (Kodak: LPF 7; LPD), wie es zur Herstellung von Leiterplatten verwendet wird, belichtet. Dieses Material zeichnet sich durch einen extrem hohen Kontrast und eine hohe Absorptionsfähigkeit aus. Mit Hilfe einer CNC-Maschine wurden jeweils vier Löcher gebohrt, um die Montage in die verwendete optische Bank (Mikrobanksystem der Fa. Spindler & Hoyer) zu ermöglichen. Für einen *festen* Aufbau, d.h. mit konstantem Durchmesser der Dunkelfeldblende, empfiehlt es sich, um die Absorptionsfähigkeit weiter zu erhöhen, direkt die verwendete Linse mit einer lichtundurchlässigen Schicht zu bedampfen.

#### 4.2.1 Dunkelfeldblende auf der Beleuchtungsseite

Der prinzipielle Aufbau dieser Optik wurde bereits in Abb. 4.1 gezeigt. Man erkennt deutlich ein Problem: Wären die Lichtstrahlen, die auf die linke Linse fallen wirklich parallel, so wäre das Meßvolumen auf einen Punkt begrenzt. Bei einer 1:1 Abbildung, wie es hier zur Blasenmessung verwendet wurde, muß das Meßvolumen mindestens einen Querschnitt von der Größe des CCD-Chip umfassen. Dieser Bereich muß auch gleichmäßig beleuchtet sein, damit das Bild der Blase nicht von deren Abstand zur optischen Achse abhängig ist.

Das Meßvolumen gleichmäßig auszuleuchten und gleichzeitig eine brauchbare Blendenöffnung der Kameraoptik zu erhalten, ist das Hauptproblem dieser Methode. In Abb. 4.15 ist dies durch einen schrittweisen Aufbau der Optik verdeutlicht:

- a) **Punktlichtquelle:** Das Dunkelfeld ist durch das Füllmuster angedeutet. Wie in Abb. 4.1 ist hier die Ausleuchtung punktförmig. Der benötigte Querschnitt des Meßvolumens ist aber gegeben durch das "Bild" des CCD-Chips durch die Kameraoptik auf die scharfe Ebene. Um nun diese Fläche auszuleuchten, wird dementsprechend eine ausgedehnte Lichtquelle benötigt.
- b) **Leuchfläche:** Die Lichtquelle bzw. die Beleuchtungsoptik wird so gewählt, daß das Bild der Leuchfläche in der scharfen Ebene gerade so groß wie der Querschnitt des Meßvolumens ist. Zwei Gründe sprechen gegen diese Lösung:
- Die scharfe Abbildung der Leuchfläche genau ins Meßvolumen ist unerwünscht. Besteht die Leuchfläche etwa aus einer Glühwendel, so hat auch deren Bild im Meßvolumen Zwischenräume und die entsprechenden Bildpunkte sind nicht ausgeleuchtet. Ideal wäre eine Anordnung bei der, wie im Falle der Hellfeldoptik, keine scharfe Abbildung der Lichtquelle durch die Kameraoptik erfolgen kann. Doch das ist hier nicht möglich.
  - In der Zeichnung ist zu erkennen, daß vor der ersten Linse des Kameraobjektivs kaum noch von einem Dunkelfeld gesprochen werden kann. Die Blende muß viel zu klein gewählt werden.
- c) **Abbildung der Leuchfläche vor das Meßvolumen:** Beide oben genannten Nachteile sind in diesem Fall gemildert. Die Leuchfläche sollte trotzdem möglichst homogen sei. Beim Einsatz von Glühlampen sollte man zusätzlich eine Streuscheibe verwenden. Das Bild der Lichtquelle wirkt wie eine imaginäre Lichtquelle, die sich kurz vor dem Meßvolumen befindet. Von ihr gehen allerdings an jedem einzelnen Punkt nur Strahlen ab einem gewissen Winkel zur optischen Achse aus. Zu erkennen ist allerdings, daß die Ausleuchtung in der Nähe der scharfen Ebene sehr leicht ungleichmäßig wird wenn der Abstand zu groß gewählt wird. Nahe der optischen Achse ist dann die Intensität höher als am Rande. Die Eintrittsblende der Kamera muß weiterhin relativ klein gewählt werden. Sie hängt von der Größe der Dunkelfeldblende und der Größe des Bildes der Leuchfläche ab. Das Dunkelfeld ist nicht so exakt begrenzt, wie es in der Zeichnung dargestellt ist. Die etwas dicker gezeichneten Strahlen definieren gerade den inneren Mantel des Kegels. Die Intensität steigt nach außen relativ langsam an. Diese Strahlen treten am Rand der Dunkelfeldblende unter einem sehr flachen Winkel aus.
- d) **Zweite Dunkelfeldblende:** Durch die zweite Blende zwischen Lichtquelle und Kondensorlinse ist es möglich, gerade diese Strahlen auszublenden, ohne die erste Dunkelfeldblende größer machen zu müssen. Letzters wäre nicht sinnvoll, da von deren Rand auch Strahlen ausgehen, die zur Beleuchtung des Meßvolumens beitragen, aber am Kameraobjektiv nicht stören.
- Der Ort der zweiten Dunkelfeldblende ist so gewählt, daß deren Bild durch die Beleuchtungsoptik an der Eintrittsblende der Kamera entsteht. So war bei der Hellfeldmethode gerade die Abbildung der Leuchfläche gewählt. Aus dem Abbildungsverhältnis und der gewünschten Kamerablendenöffnung errechnet sich der Durchmesser der neuen Dunkelfeldblende. Die erste Dunkelfeldblende ist nur noch dazu da, einen Dunkelfeldkegel auf der

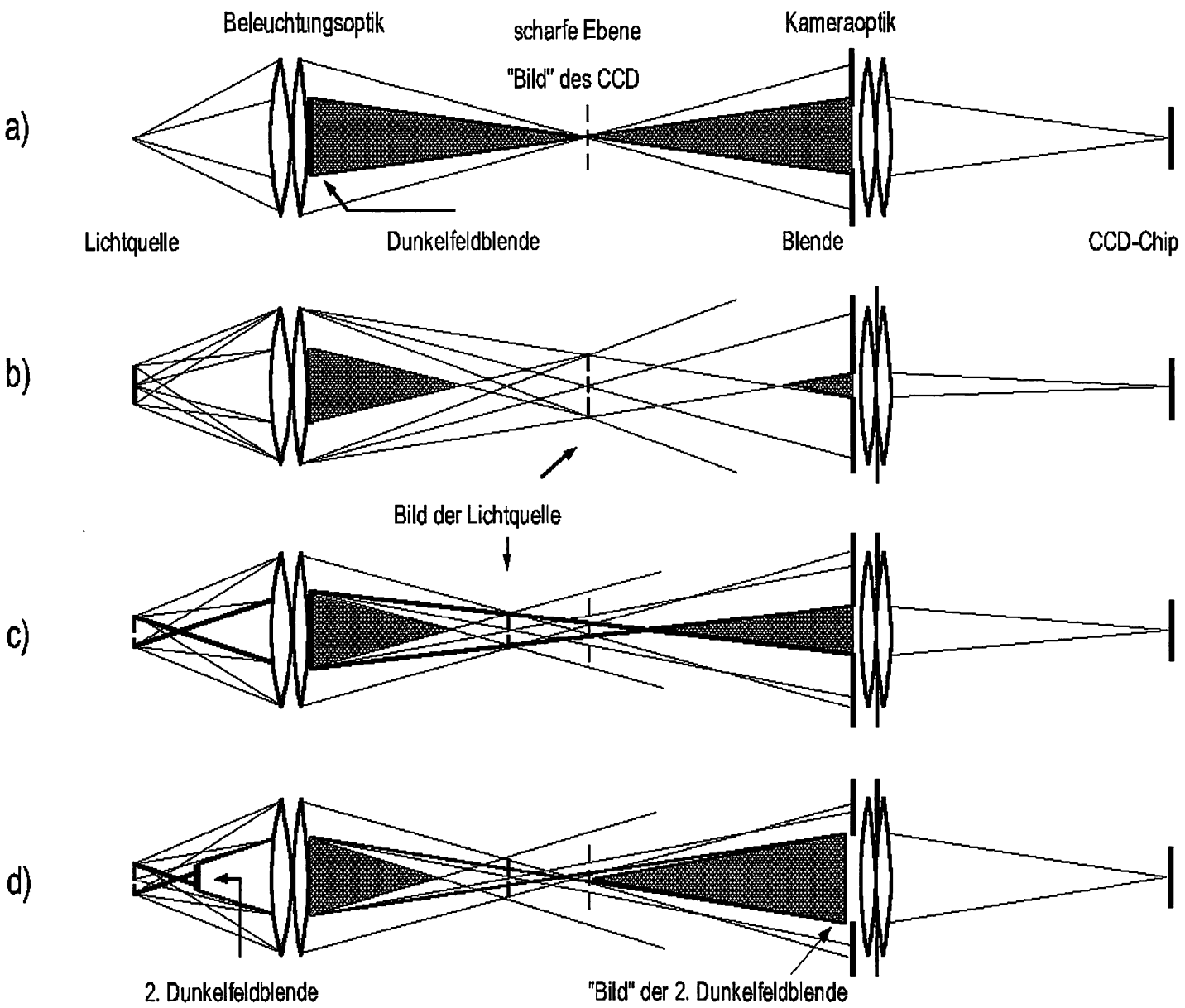


Abbildung 4.15: Dargestellt ist das Problem, ein ausgedehntes Meßvolumen zu beleuchten und gleichzeitig ein ausgeprägtes Dunkelfeld zu erhalten.

Beleuchtungsseite aufzubauen. Dies ist sinnvoll, damit möglichst wenig Streulicht von Objekten, die nicht mehr scharf abgebildet werden können, in die Kameraoptik gelangt. Sie bestimmt somit auch die Ausdehnung des Meßvolumens in Richtung der optischen Achse.

In Abb. 4.16 ist die verwendete Lichtquelle gezeigt. Die Wendel einer Glühlampe, wie bei Abb. 3.2 durch einen Hohlspiegel verdoppelt, wird mit dem Kondensator auf eine Streuscheibe abgebildet. Diese tritt nun an die Stelle der Lichtquelle in Abb. 4.15.

Mit der Irisblende kann sehr einfach die Größe der Leuchtfläche geändert werden.

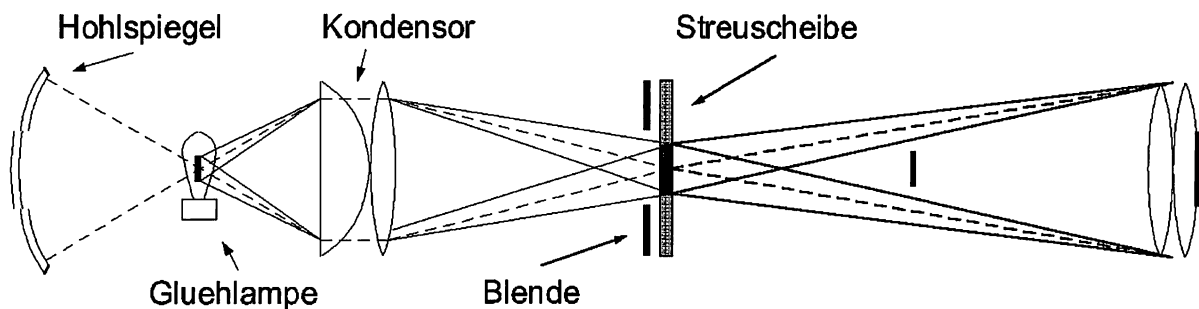


Abbildung 4.16: Lichtquelle für Dunkelfeldoptik

Die optimale Wahl der verschiedenen Parameter die bei dieser Methode zur Verfügung standen (Ort und Größe des Bildes der Leuchtfläche, Durchmesser der verschiedenen Blenden), gestaltete sich schwierig. Die Verbesserung einer speziellen Eigenschaft (z.B.: Ausleuchtung des Messvolumens) bewirkte meist gleichzeitig eine Verschlechterung anderer (kein reines Dunkelfeld, bzw. Dunkelbild, bei Abwesenheit von Messobjekten). Die Parameter wurden so gewählt, daß sich ein geeigneter Kompromiß zwischen den verschiedenen Anforderungen ergab. Diese Probleme führten zur Entwicklung einer alternativen Realisationsmöglichkeit, die im folgenden Kapitel dargestellt ist.

Abb. 4.17 zeigt ein Bild, das mit einem solchen Aufbau aufgenommen wurde. Unten ist ein Elektrolysedraht zu sehen, an dem einige Blasen haften. Kleinere Blasen steigen auf. Die ungleichmäßige Ausleuchtung ist zu erkennen. Die Helligkeit der kleinen Blasen nimmt zu den Rändern des Bildes immer mehr ab. Unten links sind auch die größeren Blasen kaum noch zu erkennen.



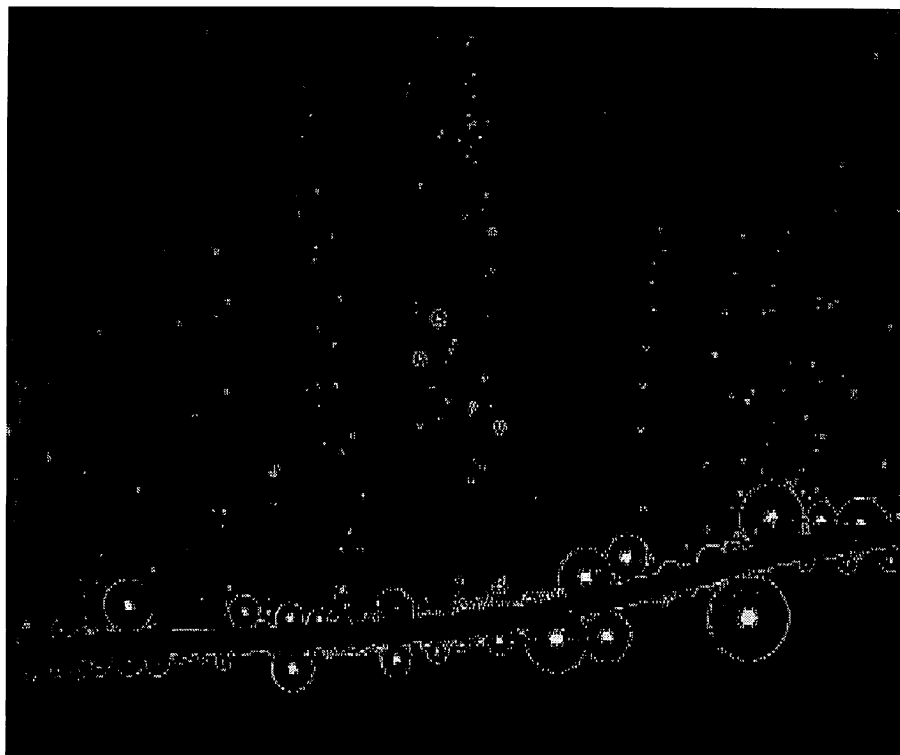


Abbildung 4.17: An einem Elektrolysedraht anhaftende und aufsteigende Wasserstoffblasen. Die Aufnahme entstand mit einer beleuchtungsseitigen Dunkelfeldblende. Der Bildausschnitt beträgt etwa  $7.5 \times 6 \text{ mm}$

#### 4.2.2 Dunkelfeldblende kameraseitig

In Abb. 4.18 ist der Aufbau skizziert:

- a) **Aufbau:** Die Dunkelfeldblende sitzt direkt vor der Eintrittslinse der Kameraoptik. Die Lichtquelle wird durch die Beleuchtungsoptik scharf auf die Dunkelfeldblende abgebildet. Somit gelangt kein direktes, sondern nur an Objekten gestreutes Licht in die Kamera.
- b) **Strahlengang der Beleuchtung:** Es ist zu erkennen, daß am Rand des Meßvolumens die Ausleuchtung etwas ungleichmäßig wird. Diese Randpunkte sind nur mit Strahlen beleuchtet, die von da in Richtung optischer Achse verlaufen. Experimentell konnte aber kein Effekt beobachtet werden.
- c) **Strahlengang der Kameraoptik:** Das durch das Füllmuster angedeutete Dunkelfeld unterscheidet sich von dem in Abb. 4.15. Dort verliefen die von einem Objekt in die Kamera gestreuten Strahlen innerhalb dieses Dunkelfeldes. Hier dagegen existieren keinerlei Strahlen innerhalb dieses Bereichs. Die zur Abbildung eines Objektes beitragenden Strahlen gelangen zwischen der Dunkelfeldblende und dem äußeren Rand der Linse in die Kamera.

Die Streuverhältnisse an einer Blase haben sich im Vergleich zu Kapitel 4.1.3 nur unwesentlich

geändert. Dort wurde die Streuung für einen Bereich des Einstrahlwinkels  $\phi_{min} < |\phi| < \phi_{max}$  und für einen Streuwinkel  $0 < |\theta| < \theta_{max} = \phi_{min}$  durchgerechnet. Hier haben die Bereiche der beiden Winkel gerade gewechselt. Es gelten  $0 < |\phi| < \phi_{max}$  und  $\theta_{min} < |\theta| < \theta_{max} = \phi_{max}$ . Die Streugeometrie hat sich nicht geändert, damit ist auch hier der äußere Ring das Bild des Randes der Blase. Das ist in Kapitel 4.4 experimentell überprüft. Alle gezeigten Blasenaufnahmen mit Ausnahme von 4.17 sind mit einer kameraseitigen Dunkelfeldblende aufgenommen.

Die entscheidenden Vorteile ergeben sich aus folgendem Vergleich: Der optische Aufbau in Abb. 4.18 unterscheidet sich von dem Hellfeldaufbau in Abb. 2.15 nur durch die verwendete Blende an der Eintrittslinse der Kameraoptik.

**Vorteile:**

- (+) Der Aufbau der Beleuchtungsseite ist im Vergleich zu Abb. 4.15 und Abb. 4.16 erheblich einfacher. Die Lichtquelle besteht aus einer Glühlampe und einem Hohlspiegel wie in Abb. 3.2. Die Zwischenabbildung auf eine Streuscheibe entfällt.
- (+) Einfachere Ausleuchtung des Meßvolumens (wie bei Hellfeld Kapitel 2.5.1)
- (+) Möglichkeit zur Kombination beider Methoden (Kapitel 4.23)
- (+) Möglichkeit zum schnellen Wechsel zwischen Hell- und Dunkelfeldmethode

**Nachteil:**

- (-) Stärkeres Hintergrundrauschen, da aus dem gesamten Raum zwischen Beleuchtungs- und Kameraoptik Streulicht in die Kamera gelangen kann

Für die im folgenden Abschnitt beschriebenen Messungen wurde diese Methode der Dunkelfeldbeleuchtung gewählt.

### 4.3 Messungen: Tiefenserien von Blasen im Dunkelfeld

Von den in Kapitel 3.1 beschriebenen Standards wurden Tiefenserien aufgenommen. Zur Messung wurden die selben Geräte (CCD-Kamera, Laser-Video-Rekorder, Blasentank, Verschiebetisch) verwendet wie bei der Hellfeldmethode. Zur Größeneichung wurde zusätzlich eine Tiefenserie mit einem Eichgitter aufgenommen. Der verwendete optische Aufbau gleicht dem der Hellfeldmessung bis auf zwei Punkte:

1. **Kameraoptik:** Anstelle der Irisblende wurde eine Dunkelfeldblende mit 10 mm Durchmesser verwendet.
2. **Beleuchtungsoptik:** Als Austrittslinse wurde ein 100 mm Achromat verwendet, um die Größe des Bildes der Glühwendel am Ort der Dunkelfeldblende auf ca. 4,5x4 mm zu ver ringern. Dies war nötig, da die Abbildung sehr diffus ist.

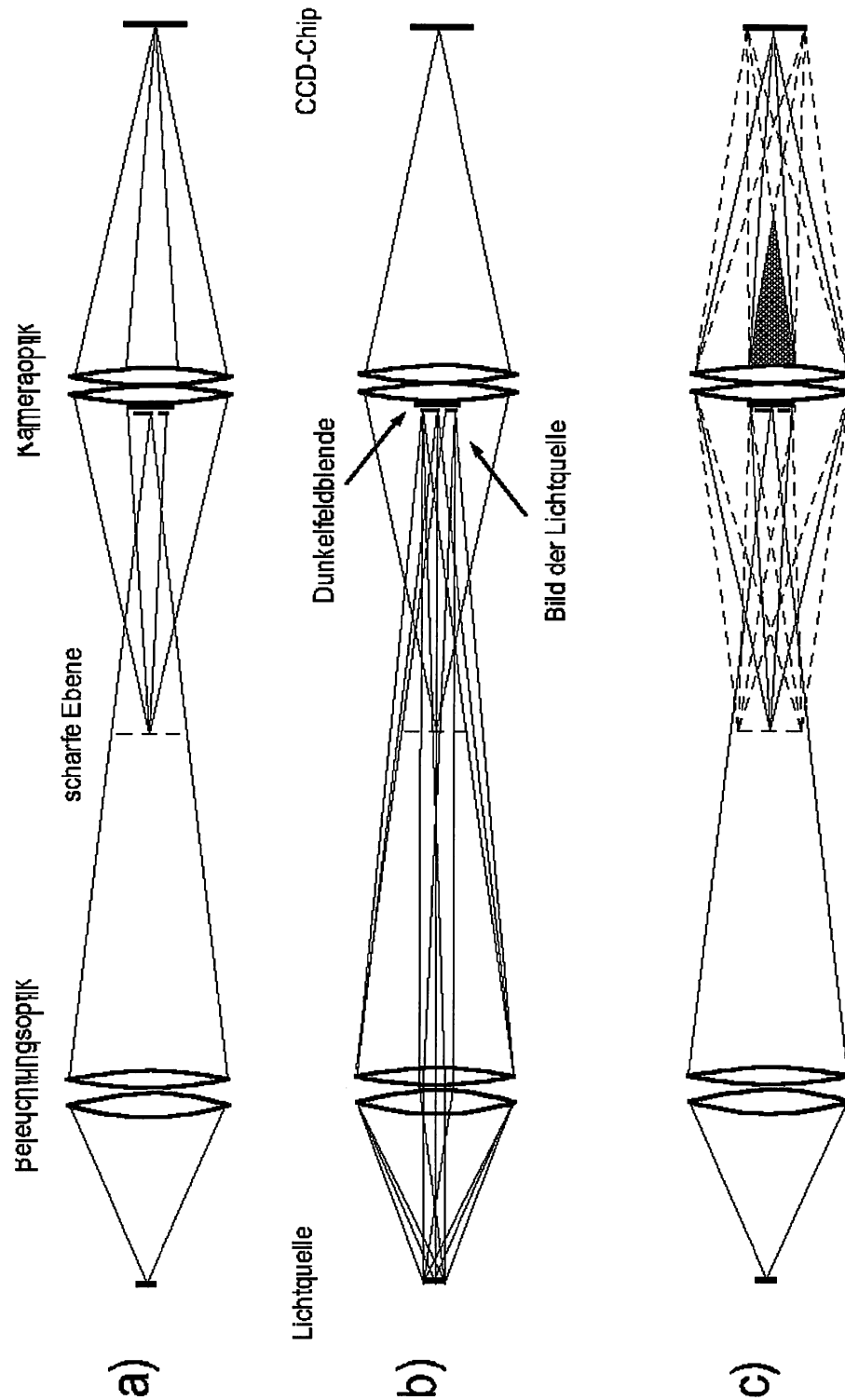


Abbildung 4.18: Beleuchtungs- und Abbildungsstrahlengang bei kameraseitiger Dunkelfeldblende

Da keine speziellen Algorithmen entwickelt wurden, erfolgte die Bildauswertung interaktiv. Das zu bearbeitende digitalisierte Bild wurde dazu auf einem Video-Monitor angezeigt und mit Hilfe eines 'Maus-Zeigers' wurde der Durchmesser bestimmt.

In Abb. 4.24 sind links einige Bilder einer Tiefenserie von Dunkelfeldaufnahmen der Standards dargestellt. Die Aufnahmen entstanden zwar mit dem in Kapitel 4.23 beschriebenen kombinierten Hell-Dunkelfeld-Aufbau, zeigen aber den typischen Verlauf der gemessenen Tiefenserien.

## 4.4 Ergebnisse

Die folgenden Meßgrößen wurden als Funktion des Abstandes der Blase zur Fokusebene bestimmt:

1. Der Durchmesser des äußeren Rings der Blasen
2. Die Breite des Rings
3. Der Abstand des Rings zum inneren Kreis

Mit den folgenden Meßergebnissen wird gleichzeitig ein Konzept eines *Depth from Focus* Verfahrens für eine Dunkelfeld-Blasenmessung vorgestellt. Die Überlegungen aus Kapitel 4.1.6 zeigen, daß das bestehende *Depth from Focus* Verfahren von [Geißler-93] bei der Dunkelfeldbeleuchtung nicht anwendbar ist, da es sich bei der Abbildung um Reflexe handelt und keine ortsunabhängige PSF existiert.

### 4.4.1 Ringdurchmesser

Bei scharfer Abbildung läßt sich die Größe der Blase direkt aus dem äußeren Ring des Bildes bestimmen. Dies wurde in Kapitel 4.1.3 theoretisch gezeigt und experimentell in Kapitel 4.5 bestätigt. Um bei unscharfer Abbildung einen Durchmesser angeben zu können wurde sowohl der innere, als auch der äußere Ringdurchmesser bestimmt und daraus der Mittelwert gebildet.

Abb. 4.19 zeigt am Beispiel einer Blase die gemessenen Durchmesser als Funktion des Abstandes zur Fokusebene. Für  $z < 0$  befindet sich die Blase von der Kamera aus gemessen vor der Fokusebene und umgekehrt. Die obere Meßkurve ( $\circ$ ) zeigt den Außen- ( $D_A$ ), die untere Kurve ( $\bullet$ ) den Innendurchmesser ( $D_I$ ) des Rings. Die dazwischen liegende Kurve ( $\diamond$ ) zeigt den Mittelwert ( $\bar{D} = (D_A + D_I)/2 =$  mittlerer Ringdurchmesser). Im Folgenden ist mit Durchmesser  $D = \bar{D}$  immer dieser Mittelwert bezeichnet. Es zeigt sich deutlich ein linearer Zusammenhang zwischen dem Durchmesser und dem Abstand zur Fokusebene. Die gestrichelte Linie zeigt den linearen Fit aus den Mittelwerten.

In Abb. 4.20 a) ist der Durchmesser für vier verschieden große Blase aufgetragen. Abb. 4.21 zeigt die gleichen Meßwerte in relativen Koordinaten  $D_{rel}(z_{rel}) = D(z_{rel})/D(0)$  und  $z_{rel} =$

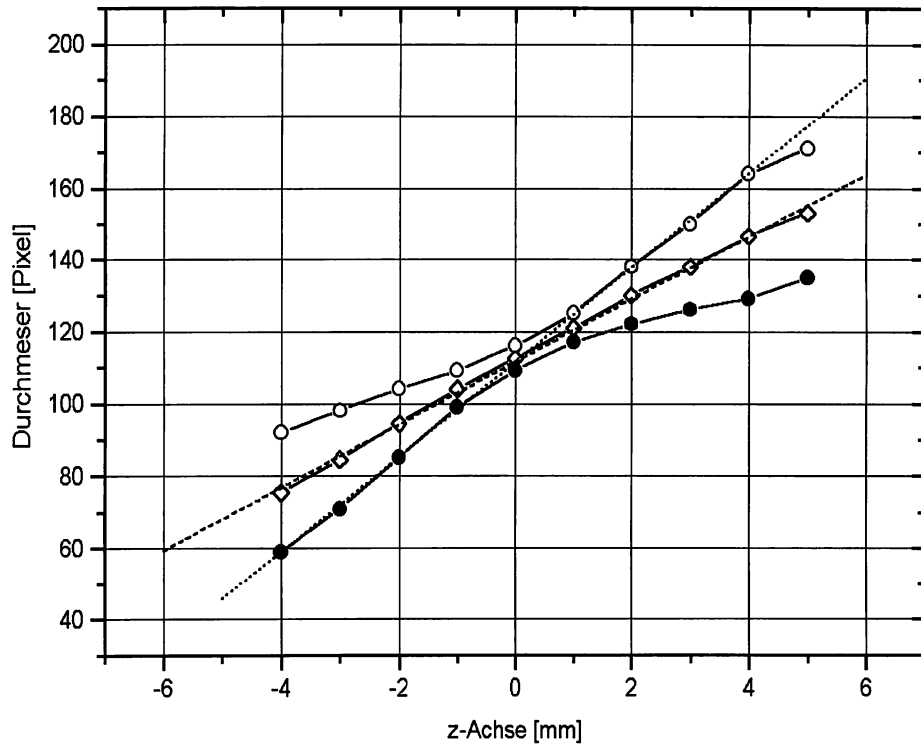


Abbildung 4.19: ○ Aussen-, ● Innen- und ◇ mittlerer Durchmesser des äußeren Rings einer Blase im Dunkelfeld

$2z/D(0) = z/R(0)$ . Hier zeigt sich die Ähnlichkeit der Bilder von Objekten unterschiedlicher Größe wie in Abb. 3.6 für das Hellfeldverfahren, bzw. die Unabhängigkeit von  $\delta D/\delta z$  von der Blasengröße. D.h. die Tiefenserie einer einzigen Blase reicht theoretisch für eine Eichung aus. Eine Kurvenschar  $D(z)$  für verschiedene Blasendurchmesser läßt sich durch einfache Skalierung berechnen und kann als Eich-Kennfeld dienen.

Die Linearität von  $\frac{\delta D}{\delta z}$  wurde in Kapitel 4.1.6 hergeleitet, unter der Annahme, die vom äußersten Rand der Blase emittierten Strahlen treten unter einem maximalen Streuwinkel in die Kame-ralinse ein. Das entspricht der gepunkteten Gerade in Abb. 4.19. Aus dem Linsendurchmesser  $D_L = 20 \text{ mm}$  und der Gesamtbrennweite aus beiden Achromaten  $f = 50 \text{ mm}$  ergibt sich mit Gleichung 4.7 eine theoretische Steigung von:

$$\frac{\delta D}{\delta z} \approx \frac{D_L}{2f} = 20/100 = 0,2$$

Die Steigung der gepunkteten Linie in Abb. 4.19 beträgt

$$\frac{\delta D}{\delta z} = 13,15 \frac{\text{Pixel}}{\text{mm}} \quad 14,83 \frac{\mu\text{m}}{\text{Pixel}} = 0,195$$

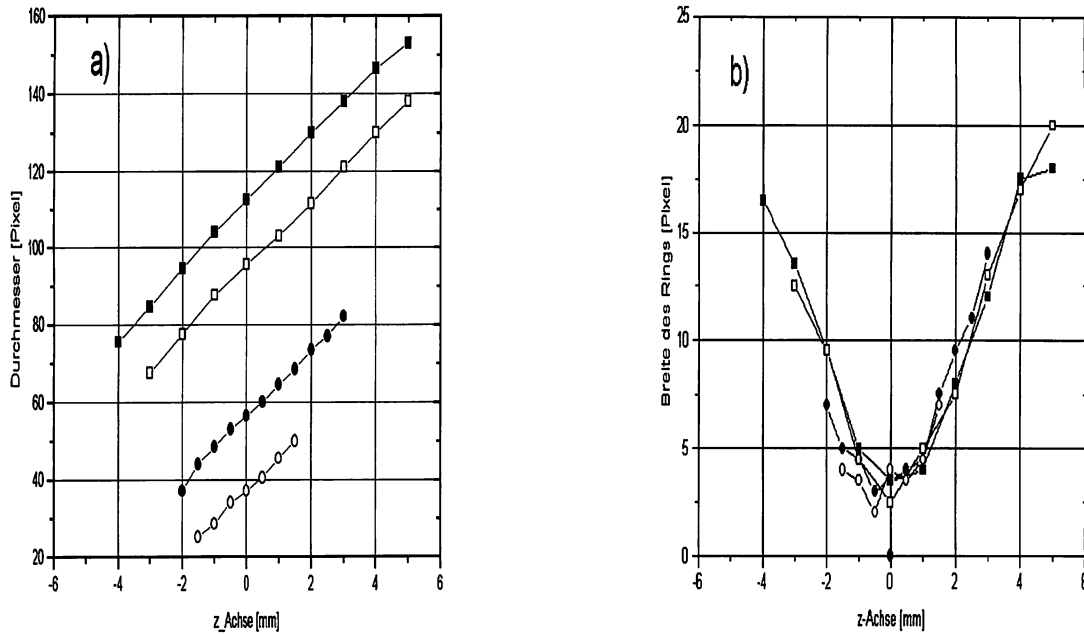


Abbildung 4.20: a): Durchmesser  $D$  und b): Breite des Rings von vier verschiedenen Blasen

und bestätigt die gemachten Annahmen. Die Größenänderung des Durchmessers ist wie erwartet durch die Blendenzahl bestimmt.

Um aus einer Einzelaufnahme und einem Eich-Kennfeld  $D(z)$  die reale Größe einer Blase zu bestimmen, benötigt man neben dem Durchmesser (mittlerer Ringdurchmesser) eine Tiefeninformation. Aus der Breite des Rings (Abb. 4.20 b) ) läßt sich der Abstand zur Fokalebene bestimmen.

#### 4.4.2 Ringbreite

Aus der Differenz  $d = (D_A - D_I)/2$  ergibt sich die Breite  $d$  des Rings. Befindet sich die Blase in der Fokalebene, so ist  $d$  minimal. Vor und hinter der Fokalebene wird der Ring durch die unscharfe Abbildung breiter. Abb. 4.20 b) zeigt die gemessene Ringbreite  $d$  verschiedener Blasen. Da die Breite des Rings bei scharfer Abbildung nur einige Pixel beträgt, ist die Zunahme mit steigendem Abstand zur Fokalebene annähernd unabhängig von der Blasengröße.

Die Änderung der Breite des Rings ergibt sich aus Abb.4.20 b) zu

$$\frac{\delta d}{\delta z} \approx 3,75 \frac{\text{Pixel } 14,83\mu\text{m}}{\text{mm}} \frac{\text{Pixel}}{\text{Pixel}} = 0,056$$

Bei einer diffusen Abbildung ist der Unschärfekreis eines Punktobjekts gegeben durch Gleichung 4.7 bzw. dem oben berechneten oder gemessenen Wert  $\delta D/\delta z = 0,2$ . Die deutliche Abweichung

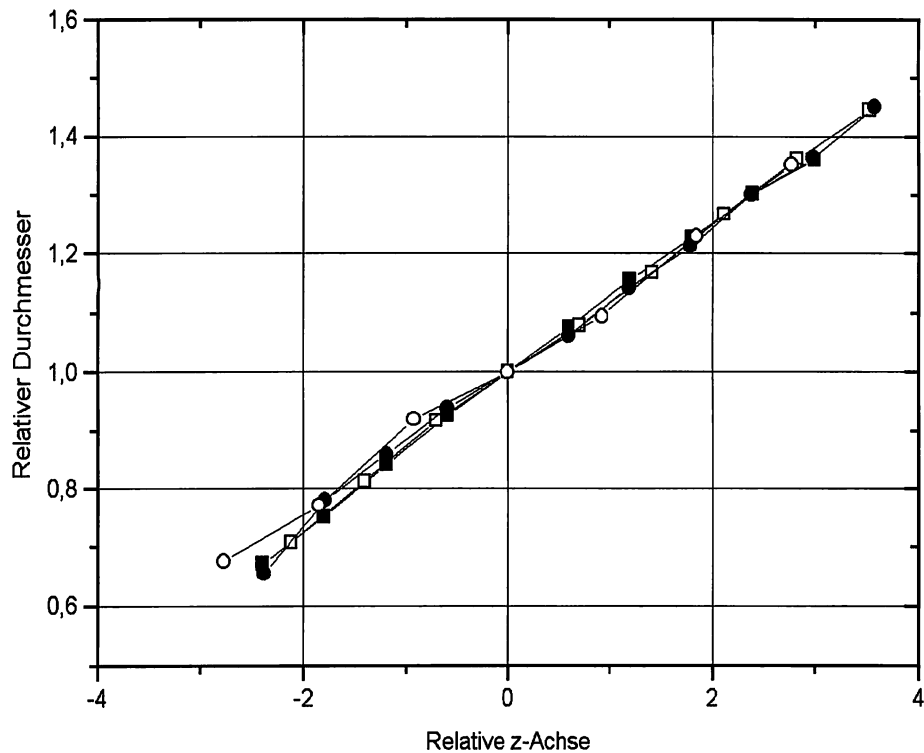


Abbildung 4.21: Durchmesser verschiedener Blasen in relativen Koordinaten  $D(z/D_0)/D_0$ , wobei  $D_0 = D(z = 0)$  ist

zwischen beiden Werten zeigt noch einmal den Unterschied diffuser Abbildung und des Auftretens von Reflexen. Hier ist der Unschärfekreis um einen Reflex durch den Öffnungswinkel der vom Objektpunkt ausgehende Strahlen bestimmt.

#### 4.4.3 Abstand des Rings zum inneren Kreis

Im Gegensatz zur Hellfeldmethode läßt sich zusätzlich angeben, ob sich die Blase vor oder hinter der Fokusebene befindet. In den Bildern der Tiefenserie (Abb. 4.24 links) ist zu erkennen, daß der Durchmesser  $D$  des äußeren Rings stetig abnimmt, der innere Kreis dagegen ein Minimum annimmt wenn sich die Blase in der Fokusebene befindet. In Abb. 4.22 a) ist oben der Ringdurchmesser  $D$  und unten der Durchmesser  $D_K$  des inneren Kreises dargestellt.

Abb. 4.22 b) zeigt die Differenz der beiden Radien  $A = D_A/2 - D_K/2$ . Für  $z < -4$  berühren sich der Ring und der Kreis und es ist keine Größenbestimmung mehr möglich. Ein Schwellwert für diesen Abstand  $A$  dient als Unterscheidungsmerkmal für die Lage in Bezug auf die Fokusebene.

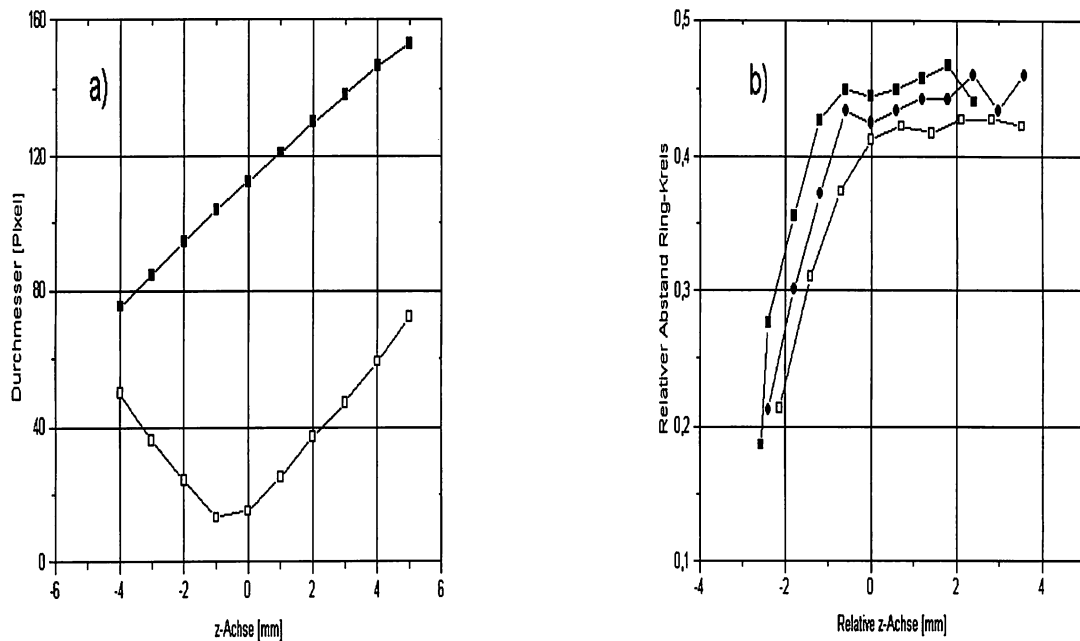


Abbildung 4.22: a): Durchmesser des äußeren Rings  $D$  (oben) und des inneren Kreises  $D_K$  (unten) einer Blase; b): Abstand  $A$  zwischen Außenkante des Rings  $D_A$  und innerem Kreis

Wird der gemittelte Radius  $D$  verwendet, so nimmt der Abstand  $A$  für  $z > 0$  wieder langsam ab und die Lage ist nicht mehr eindeutig.

#### 4.4.4 Meßvolumen und Größenmeßbereich

In Abb. 4.21 ergaben sich die Grenzen der Messungen in  $z$ -Richtung aus der Segmentierbarkeit des Objekt. Für größere Entfernungen war keine Trennung von Objekt und Hintergrund möglich, bzw. für  $z < 0$  überdecken sich Ring und Kreis. Daraus ergibt sich ein in der Blasengröße lineares Meßvolumen in  $z$ -Richtung von etwa dem 6, 5-fachen des Blasendurchmessers. Das Meßvolumen ist etwa um einen Faktor 5 kleiner als bei der Hellfeldmethode ( $\approx 70$ -facher Blasenradius, siehe Kapitel 3.3).

Der Größenbereich der meßbaren Blasendurchmesser ist im Vergleich zur Hellfeldmethode ebenfalls geringer, da hier kleine Strukturen auszumessen sind (Ringdurchmesser, innerer Ring). Bei einem Blasendurchmesser von 40 Pixel beträgt z.B. der Durchmesser des Kreises nur etwa 8 Pixel. Das war für die vorliegenden Messungen die untere Grenze der meßbaren Blasengröße. Bei der Hellfeldmethode wurden Blasen bis zu 8 Pixel Durchmesser ausgewertet.



#### 4.4.5 Depth from Focus

Abschließend ist noch einmal das Konzept für ein mögliches automatisches Bildanalyseverfahren zur Größenmessung von Blasen im Dunkelfeld zusammengefaßt:

- Aus dem Bild einer Blase wird der mittlere Durchmesser  $D = (D_A + D_I)/2$  und die Breite  $d = (D_A - D_I)/2$  des Rings bestimmt.
- Zusätzlich wird der Durchmesser des inneren Kreises  $D_K$  und dessen Abstand zur Außenkante des Rings  $A = (D_A - D_K)/2$  gemessen.
- Aus  $d$  ergibt sich mit Abb. 4.20 b) der Betrag des Abstandes zur Fokusebene  $|z|$ .
- Mit  $D$ ,  $|z|$  und der Funktion  $D_{rel}(z_{rel})$  in Abb. 4.21, bzw. mit dem daraus berechneten Kennfeld, ergeben sich zwei mögliche Durchmesser der Blase  $D_{minus}$  für  $z < 0$  und  $D_{plus}$  für  $z > 0$  ist.
- Aus dem Vergleich der beiden Werte  $A/D_{minus}$  und  $A/D_{plus}$  mit Abb. 4.22 b) ergibt sich der richtig  $z$ -Wert und somit auch der Durchmesser der Blase.

### 4.5 Kombination von Hell- und Dunkelfeldoptik

Die kameraseitig montierte Dunkelfeldblende ermöglichte, mit Hilfe eines Strahlteilers, einen kombinierten Aufbau in dem sowohl Dunkelfeld-, als auch Hellfeldverfahren realisiert waren (Abb. 4.23). Damit konnten Tiefenserien der Standards aufgenommen werden, wobei von beiden Kameras der selbe Bildausschnitt aufgenommen wurde. Durch den Strahlteiler ist eines der Bilder an einer Achse gespiegelt. Im Gegensatz zu den Hellfeld- bzw. reinen Dunkelfeldmessungen wurde hier mit einer vergrößernden 2:1 Abbildung gearbeitet. Zur Bildaufnahme dienten zwei baugleiche CCD-Kameras (SONY XC-75), die mit der gleichen Belichtungszeit (1/2000 sec.) betrieben wurden. Der Durchmesser der Kameraeintrittsblende der Hellfeldoptik betrug 2 mm. In den Strahlengang der Hellfeldoptik waren zusätzlich zwei Polarisationsfilter eingebaut, die eine Intensitätsregulierung ermöglichten. Zur Speicherung der Bilder diente der Laser-Videorekorder. Es wurden von jeder Tiefenposition fünf Dunkelfeld- und anschließend fünf Hellfeldaufnahmen gemacht. Die gleichzeitige Speicherung der beiden Kamerasignale in zwei Farbkanälen des Rekorders im RGB-Modus wäre möglich. Diese Möglichkeit wurde aber aus zwei Gründen nicht genutzt: Neben der aufwendigen Synchronisation der beiden Kameras besteht die Gefahr des Übersprechens der Signale, d.h. die Kanäle sind bei der Wiedergabe nicht vollständig getrennt. Deshalb wurden die Bilder der Hell- und der Dunkelfeldmethode bei jeder  $z$ -Position nacheinander aufgenommen. Zur Größeneichung wurde eine Tiefenserie mit einem Eichgitter aufgenommen.

Diese Technik ermöglicht den direkten Vergleich der Bilder beider Visualisierungsmethoden bei gleichem Bildausschnitt. Abb. 4.24 zeigt eine Tiefenserie die mit dem Kombinationsaufbau aufgenommen wurde. Zu beachten ist, daß die Hellfeldbilder durch den Strahlteiler an der vertikalen Achse gespiegelt sind. Der Durchmesser der größten Blase wurde in der Fokusebene bestimmt.

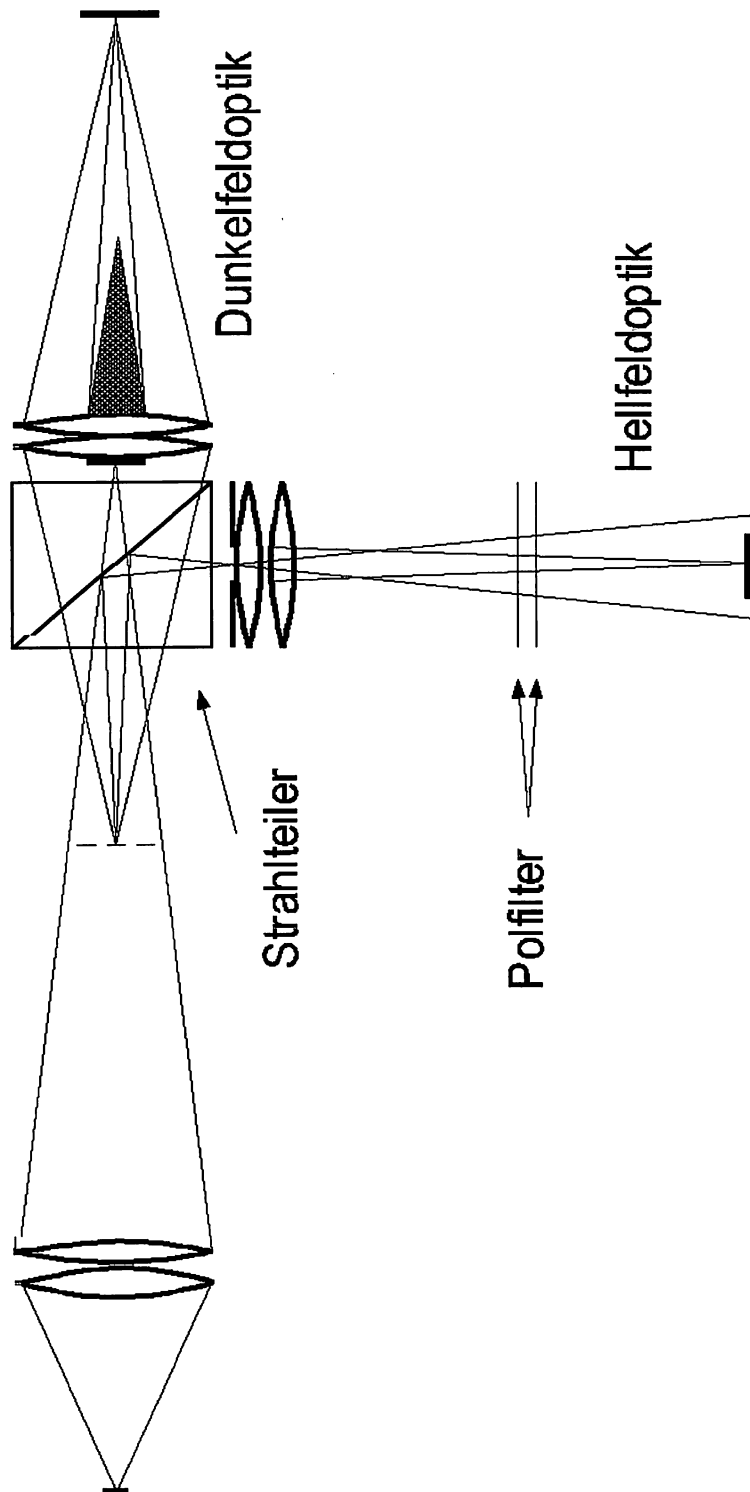


Abbildung 4.23: Kombinationsaufbau von Hell- und Dunkelfeldoptik

In beiden Bildern, Hell- und Dunkelfeld, wurde interaktiv der gleich Durchmesser  $132 \pm 1$  Pixel bzw:  $810 \pm 6 \mu m$  gemessen. Der Fehler  $\pm 1$  Pixel ist größer als der Unterschied der beiden Größeneichungen. Damit ist bestätigt, daß bei scharfer Abbildung einer Blase im Dunkelfeld der äußere Ring exakt den Rand der Blase darstellt.

Der Durchmesser der unscharf abgebildeten Blase ändert sich in den Dunkelfeldbildern sehr viel schneller, da es sich um reflektierte Strahlen handelt. Auch die Breite des Rings wächst schneller als die Unschärfe der Kanten in den Hellfeldbildern. Das resultiert aus der größeren Blendenöffnung der Dunkelfeldoptik. Im direkten Vergleich wird auch das um erheblich kleinere Meßvolumen in z-Richtung anschaulich. In dem ersten bzw. letzten Dunkelfeldbild der Serie ist die Grenze der Meßbarkeit für die größte Blase erreicht. Dagegen ist der Rand im Hellfeldbild kaum verwaschen.

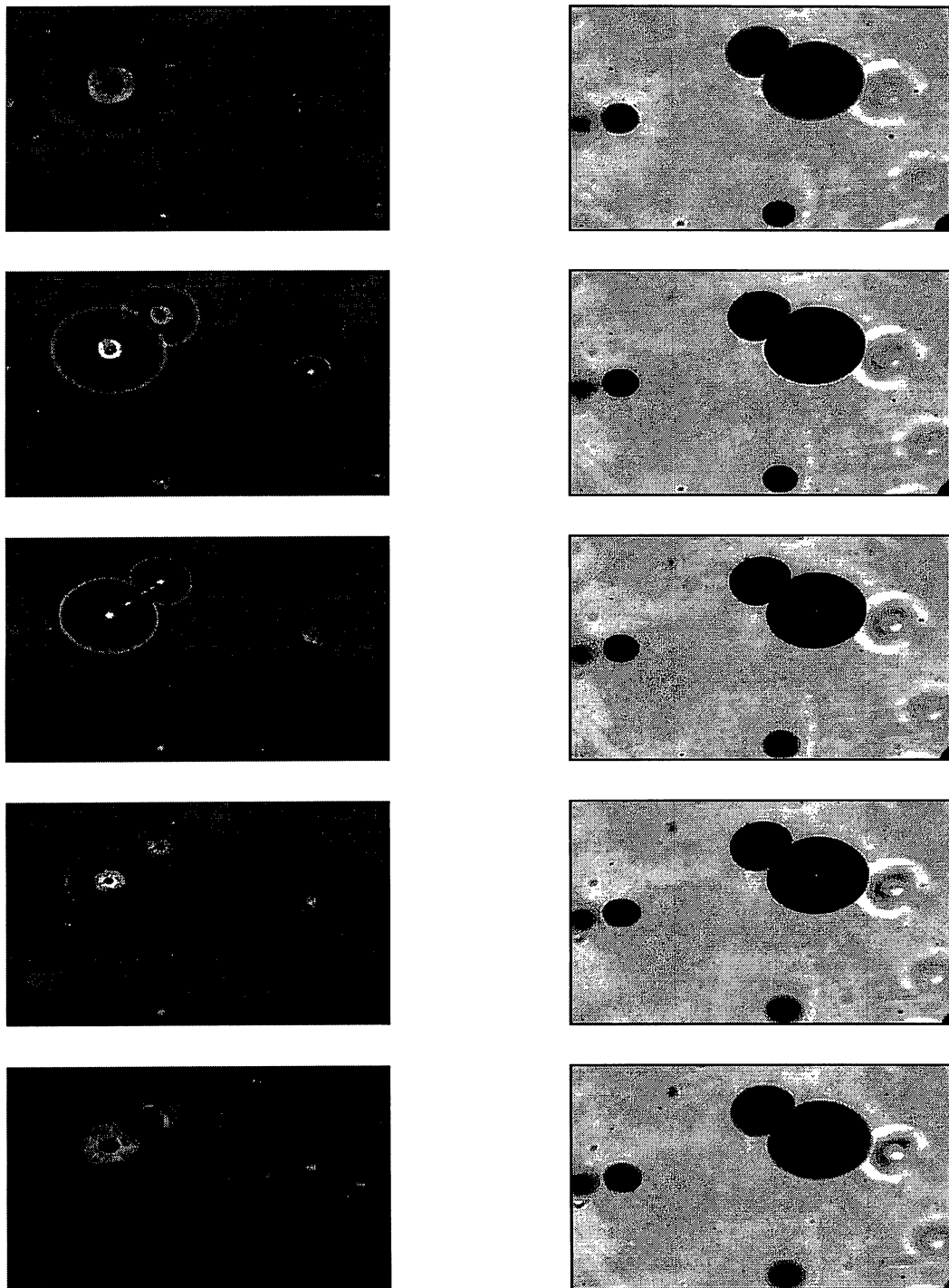


Abbildung 4.24: Tiefenserie : Vergleich einer Tiefenserie bei Dunkel- und Hellfeldbeleuchtung. Der Bildausschnitt beträgt ca.  $3 \times 2,5 \text{ m}^2$ . Der Abstand zur Kamera nimmt von oben nach unten jeweils um  $\Delta z = 1 \text{ m}$  zu. Die Hellfeldbilder sind durch den Strahlteiler vertikal gespiegelt

# Kapitel 5

## Ausblick

Für die von [Geißler-93] vorgestellte Hellfeld-Technik zur Visualisierung und seinem *Depth from Focus* Bildanalyseverfahren zur Größenbestimmung von Gasblasen in Wasser wurden in der vorliegenden Arbeit Kontrollmessungen mit eigens angefertigten Standards durchgeführt. Damit konnte die Gültigkeit der von ihm berechneten Eichkurven bzw. der durchgeführten Eichmessungen mit Letraset-Punkten experimentell bestätigt werden. Die Messungen haben allerdings auch gezeigt, daß die bisher verwendeten Algorithmen sehr empfindlich gegenüber Schwankungen der Beleuchtungsverhältnisse sind. Die Blasengröße wird aus der gemessenen e-Wertfläche, dem mittleren Grauwert und dem Eichkennfeld bestimmt. Die Bestimmung der e-Wertfläche ist hierbei mit dem größten Fehler behaftet. Der mittlere Grauwert stellt eine deutlich stabilere Meßgröße dar. Für zukünftige Messungen, empfiehlt sich eine andere Beleuchtungsquelle zu verwenden. Versuche mit einer Laserdiode haben gezeigt, daß kohärentes Licht wegen der entstehende Interferenzstrukturen dafür ungeeignet ist. Die damit erzielten Bilder ähneln dem in Abb. 2.14 links gezeigten Hologramm. Denkbar ist der Einsatz einer Leuchtdioden als Ersatz für die Halogenleuchte. Da bei Feldeinsätzen mit Streulicht zu rechnen ist, sollte weiterhin geprüft werden, ob nicht ein alternatives Verfahren zur Bildauswertung entwickelt werden kann. Falls ein Verfahren gefunden wird, die Blasengröße mit Hilfe der Kurve in Abb. 3.6 (mittlerer Grauwert als Funktion von  $z$ ) und der Skaleninvarianz (etwa mit einem Mehrgitterverfahren) zu bestimmen, so könnte die Messgenauigkeit weiter erhöht werden.

Die beiden Hauptkritikpunkte am Verfahren von [Geißler-93] sind die fehlende Möglichkeit zwischen Blasen und anderen Partikeln zu unterscheiden und die nicht eindeutig bestimmbare Lage der Blase vor oder hinter der Fokusebene.

Mit der in dieser Arbeit vorgestellten Dunkelfeld-Visualisierungstechnik steht ein neues bildaufnehmendes Verfahren zur Größenmessung von Gasblasen in Wasser zur Verfügung. Aus den durchgeführten Messungen konnte ein Konzept für eine automatische Bildanalyse zur Größenbestimmung erstellt werden. Das von einer Blase im Dunkelfeld erzeugte Bild zeigt ein charakteristisches Muster. Dieses Muster ermöglicht eine eindeutige Unterscheidung von anderen Partikeln. Weiterhin lassen sich daraus die Lage und der Abstand der Blase zur Fokusebene eindeutig bestimmen. Die Nachteile im Vergleich zur Hellfeldmethode bestehen im geringeren Meßvolumen und dem kleineren Größenmeßbereich.

Die entwickelte Optik mit kameraseitiger Dunkelfeldblende gestattet aber nicht nur den Einsatz der Dunkelfeldtechnik als Alternative zum Hellfeld. Vielmehr kann sie auch in dem vorgestellten Kombinationsaufbau als Ergänzungsmessung dienen. Damit ist zB. bei einer Auswertung der Hellfeldbilder mit den bestehenden Algorithmen die Möglichkeit einer Kontrolle gegeben, ob es sich bei dem gemessenen Objekt tatsächlich um eine Blase handelt. Auch eine Kontrolle der statistischen Korrekturen der Hellfeldmethode bezüglich der Lage vor oder hinter der Fokusebene ist mit einer kombinierten Hellfeld–Dunkelfeld Messung möglich.

Neben der Größenbestimmung von Blasen ist auch eine Anwendung in der Strömungsvisualisierung denkbar. Abb. A.4 zeigt eine Bildfolge von Luftblasen im Dunkelfeld. Einzelne Blasen lassen sich über mehrere Halbbilder verfolgen. Durch den Einsatz von Leuchtdioden wäre auch eine Mehrfachbelichtung der einzelnen Bilder möglich. Beim Hellfeldverfahren ist eine mehrfache Belichtung nicht sinnvoll, da die Summe der Lichtimpulse gerade der maximalen Helligkeit entsprechen muß. Ein zu verfolgendes Objekt absorbiert aber an einem Bildpunkt nur die Intensität eines einzelnen Lichtpulses. Die Grauwertdynamik zwischen Objekt und Hintergrund sinkt entsprechend der Anzahl der Lichtpulse pro Bild.

Im Rahmen der beginnenden Dissertation von Geißler ist an den Einsatz der kombinierten Hellfeld–Dunkelfeld–Messung gedacht.

## Anhang A

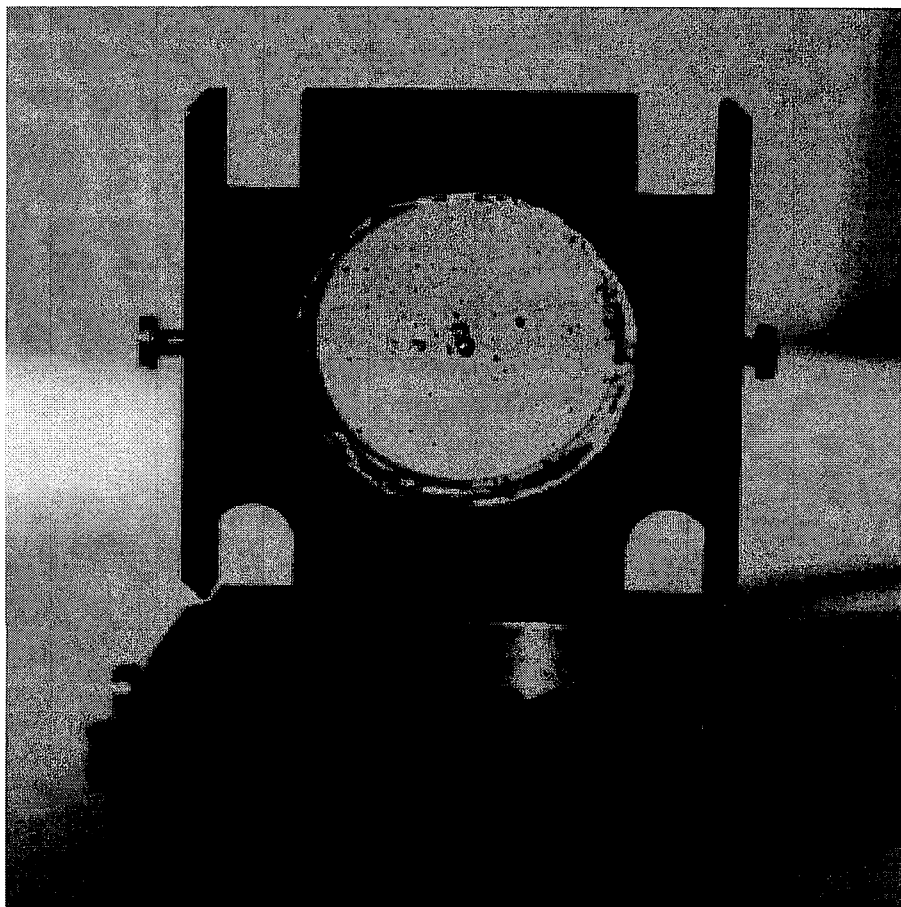


Abbildung A.1: Einer der angefertigten Eich-Standards zur Messung der Tiefenserien befindet sich in einem Montage-Element der optischen Bank.

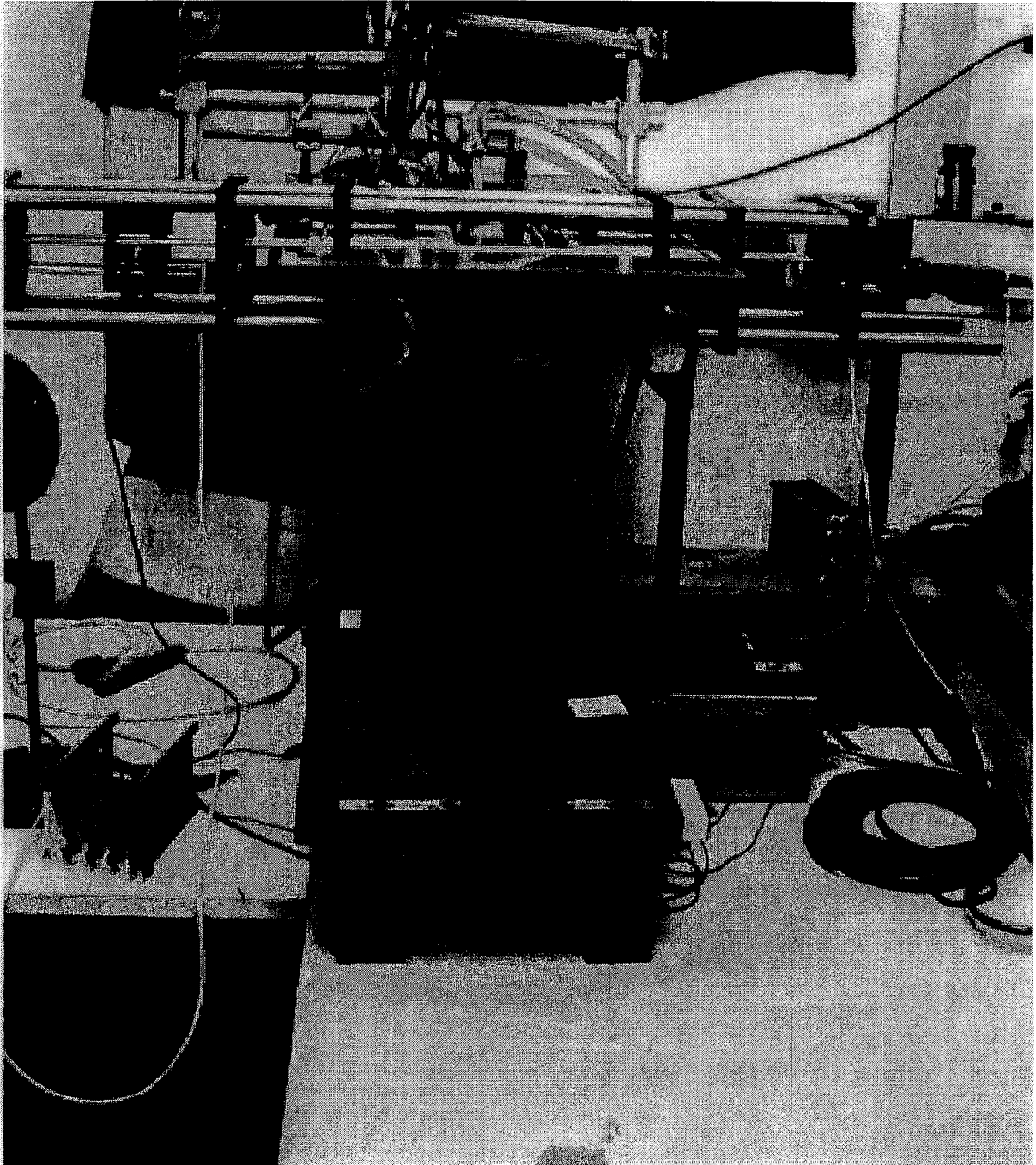


Abbildung A.2: Der bei allen Messungen und zur Entwicklung der Dunkelfeldoptik benutzte Blasentank. Obenauf montiert sind die optische Bank und einige Befestigungselemente für die zur Blasenerzeugung benutzten Geräte.





Abbildung A.3: Seitlicher Blick in den Tank bei laufender Blasenerzeugung durch die Wasserstrahlpumpe.

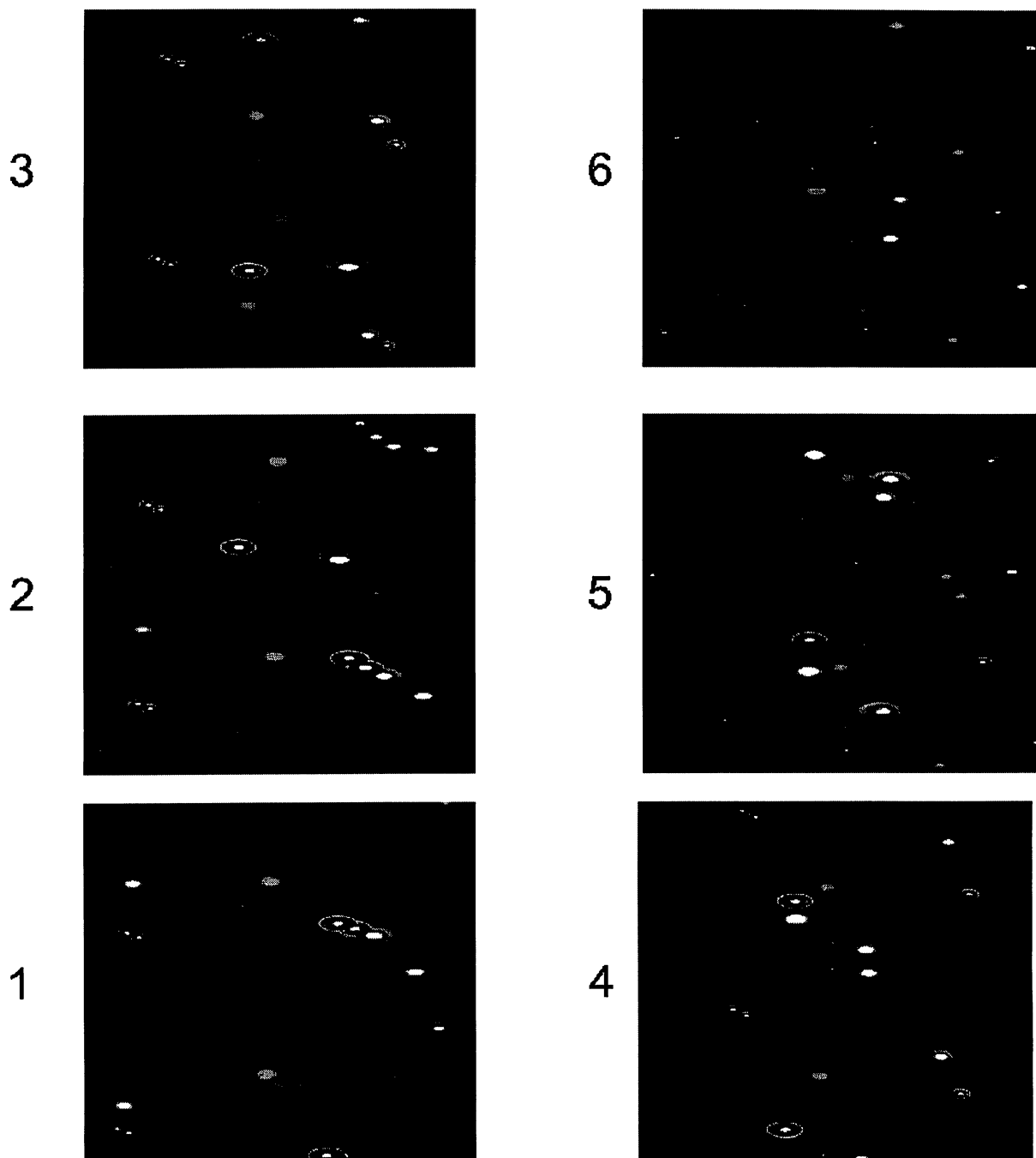


Abbildung A.4: Zeitserie von sechs Bildern im 60 Hz Videotakt. Die Aufnahmen entstanden mit einer 1:1 Abbildung. Der sichtbare Ausschnitt beträgt 7,5 x 6 mm. Die Numerierung entspricht der zeitlichen Abfolge. In den einzelnen Videobildern sind jeweils die beiden Halbbilder getrennt. Das in der unteren Hälfte dargestellte Halbbild ist das zuerst aufgenommene. Einzelne Blasen oder Gruppen davon sind über mehrere Halbbilder zu verfolgen.

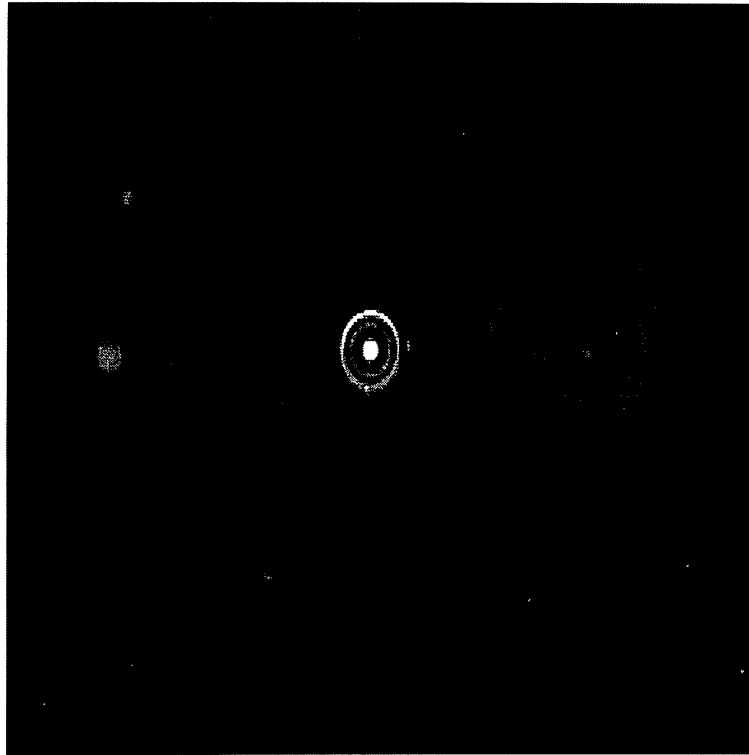


Abbildung A.5: Einige CCD-Kameras zeigen bei extrem kurzen Belichtungszeiten ein starkes blooming. Dabei entstehen von überbelichteten Stellen ausgehend helle Streifen in der Bildnachschaft. Die Aufnahme entstand mit einer Sony XC 75 CCD-Kamera bei einer Belichtungszeit von  $1/10000\text{sec}$ . Von inneren hellen Kreis einer Blase im Dunkelfeld zieht sich dieser blooming-Effekt über die gesamte Bildhöhe.

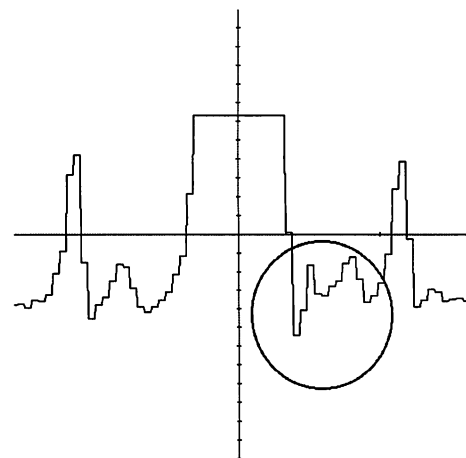
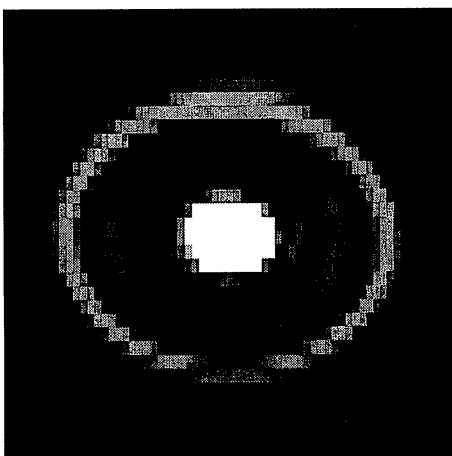


Abbildung A.6: Ein weiterer Effekt lokaler Überbelichtung: Nach extrem steil abfallenden Grauwertkanten zeigt sich ein Übersprechen der Video-, bzw. Framegrabberelektronik. Siehe auch [Schaum-93]

# Literaturverzeichnis

- [Baldy-85] Baldy, S. and M. Bouruel *Measurements of Bubbles in a Stationary Field of Breaking Waves by a Laser-Based Single-Particle Scattering Technique* Journal of Geophysical Research , Vol. 90 No. 1 , 1985
- [Barabas-85] Barabas, M. *Aufbau und Weiterentwicklung von optischen Verfahren zur Messung von Gasblasen in Wasser*, Diplomarbeit IUP
- [Bergmann, Schäfer-87] Bergmann L., Schäfer C. *Optik Lehrbuch der Experimentalphysik Band III, 8. Auflage*, de Gruyter 1987
- [Beyer-88] Beyer, H. *Handbuch der Mikroskopie*, VEB Verlag Technik Berlin 1988
- [Blanchard-89] Blanchard, D.C. *Bacteria and Other Materials in Drops from Bursting Bubbles in : Climate and Health Implications of Bubble-Mediated Sea-Air Exchange*
- [Davis-55] Davis E. *Scattering of Light by an Air Bubble in Water*, Journal of the Optical Society of America Vol. 45 No. 7 , 1955
- [Dieter-94] Dieter, J. *Strömungsmessung in der laminaren Grenzschicht* Diplomarbeit in Vorbereitung IUP 1994
- [Flow Visualization-90] *Flow Visualization I-V*, Hemisphere, New York 1990
- [Gallon-90] *Application of the Hydrogen Bubble Visualization Method to the Water Tunnels of ONERA; Flow Visualization V*, Hemisphere, New York 1990
- [Gardavský-90] Gardavsky, J. *Dark Field Fourier Quasi-Interferometry; Flow Visualization V*, Hemisphere, New York 1990
- [Geißler-93] Geißler, P. *Dept-from-focus Bildanalyseverfahren zur Messung der Konzentration und Größe von Blasen und Organismen*, Diplomarbeit, IUP 1993
- [Gerlach-85] Gerlach D., *Das Lichtmikroskop* , Thieme 1985
- [Göke-88] Göke, G. *Moderne Methoden der Lichtmikroskopie* Franckh'sche Verlagshandlung 1988
- [Hecht-89] Hecht E. , *Optik*, Addison Wesley 1989

- [Hering-92] Hering, F. *Messung von Transportgeschwindigkeiten in winderzeugten Wasserwellen mittels Digitaler Bildfolgenanalyse*, Diplomarbeit IUP
- [Hering-95] Hering, F., Diss. i.Vorb. , IUP 1995
- [Hsu-84] Hsu, Y.-H. L. , Hwang, P.A. and Jin Wu *Bubbles produced by breaking waves*, in: *Gas Transfer at Water Surfaces* 1984
- [Jähne-84] Jähne, B. , T. Wais, M. Barabas *A New Optical Bubble Measuring Device; A Simple Model for Bubble Contribution to Gas Exchange* , in: *Gas Transfer at Water Surfaces* 1984
- [Jähne-91] Jähne, B. *Digital Image Processing - Concepts, Algorithms and Scientific Applications*, Springer 1992
- [Jähne-92] Jähne, B. *Spatio-Temporal Image Processing With Scientific Applications*, Habilitationsschrift, Technische Universität Hamburg-Harburg 1992
- [Jain-89] Jain, A. K. *Fundamentals of Digital Image Processing* Prentice Hall 1989
- [Johnson-79] Johnson, D., R. C. Cooke *Bubble Populations and Spectra in coastal Waters: A photographic Approach*, *Journal of Geophysical Research* Vol.84 , pp. 3761 - 3766
- [Lauer-93] Lauer, H. *Messung der Neigungsverteilung winderzeugter Wasserwellen mittels digitaler Bildverarbeitung*, Diplomarbeit IUP
- [Leeder-89] Leeder, O., Blankenburg, H.-J. *Polarisationsmikroskopie* VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig 1989
- [Medwin-70] Medwin, H. *In situ acoustic Measurements of Bubble Populations in coastal ocean waters*, *Journal of Geophysical Research* , Vol. 75 , No. 3
- [Melville-93] Melville, W. K. , M.R. Loewen und Eric Lamare *Bubbles, Noise and breaking waves; a review of laboratory experiments* *Natural Physical Sources of Underwater Sound*, 483-501, Kluwer Academic Publisher, 1993;
- [Monahan-89] Monahan, E. C. *From the Laboratory Tank to the Global Ocean*, in : *Climate and Health Implications of Bubble-Mediated Sea-Air Exchange*
- [Münsterer93] Münsterer, T. *Messung von Konzentrationsprofilen gelöster Gase in der wasserseitigen Grenzschicht* Diplomarbeit IUP 1993
- [Oertel-89] Oertel, H. sen, Oertel, H. jun. *Optische Strömungsmesstechnik*, G. Braun Karlsruhe 1989
- [Pulnix] TM-640 Sequential Scanning Mos Camera - Operations and Maintenance Manual , Pulnix
- [Schaum-93] Schaum, M. *Subpixelgenaue Positionsbestimmungen in digitalen Bildern*, Diplomarbeit IUP 1993

- [Schneider-91] Schneider, K. *In Situ Mikroskopie*, Diplomarbeit Univ. Hannover, Inst. f. techn. Chemie
- [Scholz-95] Scholz, Th. *Die Anwendung von Schärfentiefe in der Bildverarbeitung am Beispiel der in situ Mikroskopie zur Konzentrationsbestimmung von Mikroorganismen in biologischen Medien* Diss. i.Vorb., IUP
- [Schröder-84] Schröder, G. *Technische Optik*, Vogel 1984
- [Shraub-65] Shraub, F.A. Kline, S.J., Runstadler, P.W. Litell, Jr., A. *Use of hydrogen bubbles for quantitative determination of time dependent velocity fields in low-speed water flows* Journal of Basic Engineering, June 1965, p. 429-443
- [Siedentopf-Zsigmondy-1903] Siedentopf, H. und Zsigmondy, R. *Über Sichtbarmachung und Größenbestimmung ultramikroskopischer Teilchen, mit besonderer Anwendung auf Goldrubingläser* Ann. Phys. Bd. 10 1-39 1903
- [Siems-83] W. Siems and H. C. Broecker *The Role of Bubbles for Gas Transfer from Water to Air at Higher Windspeeds. Experiments in the Wind-Wave Facility in Hamburg* in: Brutsaert, W. and G. H. Jirka (eds.) *Gas Transfer at Water Surfaces*
- [Thorpe-84] Thorpe, S. A. *On the Determination of  $K_v$  in the Near-Surface Ocean from Acoustic Measurements of Bubbles*, Journal of Physica Oceanography, Vol. 14 1984 pp. 855 - 863
- [Vikram-92] Vikram, c. S., *Particle Field Holography*, Cambridge University Press 1992
- [Wais-83] Wais, Th. *Aufbau eines optischen Verfahrens zur Messung von Gasblasen in Wasser*, Diplomarbeit IUP
- [Wu-73] Jin Wu *Spray in the atmospheric surface layer: Laboratory studies*, J. Geophys. Res., Vol. 78, pp. 511-600
- [Wu-79] Jin Wu *Fast moving suspended particles : Measurement of their Size and Velocity*, Appl. Optics 16, 1977
- [Wu-81] Jin Wu *Bubble Populations and Spectra in Near-Surface Ocean : Summary and Review of Field Measurements*, JGR 86, 1981
- [Zernike-35] Zernike, F. *Das Phasenkontrastverfahren bei der mikroskopischen Beobachtung*, Z. Physik 36,848 1935; Z. Techn. Physik 16,454 1935

Erklärung:

Ich versichere, daß ich diese Arbeit selbständig verfaßt und keine anderen als die angegebenen Quellen benutzt habe.

Heidelberg, den 30.03.1994

.....

(Unterschrift)