

# Vermessung von Wirbeln mit der Hintergrundsclieren-Methode

Untersuchung der räumlichen Position und Stärke des kompressiblen  
Tragflächenspitzenwirbels des Außenflügels eines Transportflugzeuges mit einer  
stereoskopischen Hintergrundsclieren-Methode und der Stereo Particle Image Velocimetry

Dem Fachbereich Maschinenbau der  
Universität Hannover  
zur Erlangung des akademischen Grades  
Doktor-Ingenieur  
genehmigte

## Dissertation

von

**Dipl.-Ing. Falk Klinge**

geboren am 22. Mai 1974 in Bad Harzburg

2003

Referent:  
Korreferent:

Professor Dr.-Ing. Jörg Seume  
Professor Dr.-Ing. Andreas Dillmann

Tag der Promotion:

27. 6. 2003

Schlagwörter:

Wirbel, PIV, BOS, Hintergrundschlieren-  
Methode, Position, Dichte, Geschwindigkeit,  
Dichtefeld, Dichtemesstechnik, Brechungsindex

Vortex, PIV, BOS, Position, Density, Velocity,  
Density measurement technique, Refraction in-  
dex

## Zusammenfassung

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist die *quantitative* Vermessung der räumlichen Position und Stärke kompressibler Wirbel.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Hintergrundschlieren-Methode (engl. Background Oriented Schlieren Method, BOS) erweitert. Grundsätzliche Untersuchungen bezüglich der Auflösung und Empfindlichkeit der Methode ermöglichten die quantitative Bestimmung zweidimensionaler Dichtefelder. Mit Hilfe von Vergleichsmessungen durch ein erprobtes Verfahren konnte die Richtigkeit der Ergebnisse bestätigt werden. Die Entwicklung des Programms VRIEDER zur Auswertung stereoskopischer BOS-Aufnahmen ermöglicht die Positionsbestimmung fadenförmiger Objekte (z.B. kompressible Wirbel) im Raum aus deren Projektionen. Mit Kenntnis dieser Position ist die quantitative Bestimmung der Dichteverteilung des zu untersuchenden Objektes möglich, wenn ein achsensymmetrisches Dichtefeld angenommen wird. Damit steht für diese Untersuchung der räumlichen Position und Stärke von z.B. kompressiblen Wirbeln jetzt eine einfache und effektive Dichtemesstechnik zur Verfügung.

Die Untersuchung des Randwirbels des Außenflügels eines modernen Transportflugzeuges im transsonischen Windkanal in Göttingen bei Reisefluggeschwindigkeiten wurde gleichzeitig mit der erweiterten stereoskopischen Hintergrundschlieren-Methode und Stereo-PIV (Particle Image Velocimetry) als Geschwindigkeitsmessverfahren durchgeführt. Mit der erweiterten Hintergrundschlieren-Methode konnte die Position des Wirbels bestimmt werden. Diese ermittelte Wirbelposition deckt sich mit der, die mit Stereo-PIV bestimmt wurde. Mit Kenntnis der Wirbelposition wurde zusätzlich die Dichteverteilung des Wirbels mit der erweiterten Hintergrundschlieren-Methode bestimmt. Die Ergebnisse des Versuchs stellen die Anwendbarkeit und Effizienz des Verfahrens unter Beweis.

## Abstract

The aim of this work is the *quantitative* measurement of the positions and strengths of vortices. In the frame of this work, the applicability of the Background Oriented Schlieren method (BOS) was extended. Basic considerations of the resolution and sensitivity of the method enables the proved that the determination of a two-dimensional density distribution was possible quantitatively. The exactness of the results was checked by another known measurement technique. The development of the program named VRIEDER enabled the determination of the location of an object (e.g. a vortex filament) in space co-ordinates by its projections. Knowing the position of the vortex, the density distribution can be achieved quantitatively if an axi-symmetrical density field is assumed. With these developments, a powerful and simple measurement technique is now ready for the investigation of e.g. compressible vortices.

The investigation of a wing-tip vortex trailing downstream of a modern transport aircraft, at cruise speed, was performed in the transonic wind tunnel, Göttingen by stereo-BOS and stereo-PIV simultaneously.

The developed BOS method enabled the measurement of the vortex location. This position fitted with the one measured by stereo-PIV. The density distribution was investigated by the developed BOS method. The experimental results prove the applicability of the developed method, as well as the efficiency.

Was drängt uns Menschen denn zum Wissen?  
Ist es das Wunder der Natur?  
Warum wir immer forschen müssen?  
Was begeistert uns denn nur?

Ja, die Natur ist einzigartig,  
ist lebende Kunst und Poesie.  
Durch die Physik und Mathematik,  
wie Kinderhände fassen wir sie:

Entdeckend, tapsig, unpräzise,  
erfreut von jedem *erkannten* Stück  
erfahren wir die Schönheit, diese  
ist unser Leben, unser Glück!

Was ich bin und tue, verdanke ich besonderen Menschen

Meinen Eltern  
Gisela und Ingolf Klinge  
und  
Enja Moritz  
gewidmet



# Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis . . . . .	ii
Tabellenverzeichnis . . . . .	iv
Abkürzungsverzeichnis . . . . .	vi
<b>Vorwort</b>	<b>vii</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2 Literaturübersicht</b>	<b>4</b>
2.1 Strömungsmechanische Grundlagen der Wirbelströmung . . . . .	4
2.1.1 Wirbelmodelle . . . . .	5
2.1.2 Wirbelbestimmung mit Hilfe der Navier-Stokes-Gleichungen . . . . .	8
2.1.3 Abschlußbemerkung zur Wirbelberechnung . . . . .	9
2.2 Messtechnik zur Wirbelvermessung . . . . .	11
2.2.1 Geschwindigkeitsmessverfahren . . . . .	11
2.2.2 Dichtemessverfahren . . . . .	17
2.3 Aufgabenstellung der Arbeit . . . . .	23
<b>3 Erweiterung der Hintergrundschlieren-Methode</b>	<b>25</b>
3.1 Auflösung und Empfindlichkeit . . . . .	26
3.1.1 Kriterium zur Auslegung des optischen Aufbaus . . . . .	29
3.1.2 Ablenkungsrichtung . . . . .	33
3.2 Quantitative Bestimmung 2D Dichtefelder . . . . .	34
3.2.1 Aufbau der Hintergrundschlieren-Methode . . . . .	34
3.2.2 Funktion und Aufbau: Catharometrie . . . . .	35
3.2.3 Verknüpfung von Brechzahl und Ablenkungswinkel . . . . .	37
3.2.4 Fehlerabschätzung . . . . .	41
3.3 Bestimmung des Ablenkungsortes . . . . .	43
3.3.1 Funktionsbeschreibung des Programms VRIEDER . . . . .	45
3.3.2 Ergebnis der Auswertung . . . . .	48
3.3.3 Grenzen der vorgestellten Messmethode . . . . .	49
3.3.4 Fehlerabschätzung . . . . .	49
3.4 Quantitative Bestimmung 3D achsensym. Dichtefelder . . . . .	50
<b>4 Randwirbelbestimmung im Windkanal</b>	<b>53</b>
4.1 Experimenteller Aufbau . . . . .	54
4.1.1 Der transsonische Windkanal in Göttingen . . . . .	54
4.1.2 Das untersuchte Modell AEROSTABIL 3D-B . . . . .	55
4.1.3 Versuchsaufbau der optischen Messtechnik . . . . .	55

4.2	Versuchsdurchführung und Auswertung . . . . .	63
4.2.1	Versuchsauswertung Hintergrundsclieren-Methode . . . . .	67
4.2.2	Versuchsauswertung Particle Image Velocimetry . . . . .	72
4.3	Ergebnisse . . . . .	74
4.3.1	Ergebnisse der Hintergrundsclieren-Methode . . . . .	74
4.3.2	Ergebnisse der Particle Image Velocimetry-Messung . . . . .	80
4.3.3	Kombination der Ergebnisse . . . . .	82
4.4	Fehlerabschätzung . . . . .	82
4.4.1	Hintergrundsclieren-Methode: Fehlerbetrachtung . . . . .	82
4.4.2	Particle Image Velocimetry: Fehlerbetrachtung . . . . .	84
4.5	Diskussion der Ergebnisse . . . . .	86
4.5.1	Messtechnik . . . . .	86
4.5.2	Wirbelverhalten . . . . .	88
<b>5</b>	<b>Diskussion und Ausblick</b>	<b>90</b>
5.1	Diskussion der Erweiterungen . . . . .	90
5.1.1	Auflösung und Empfindlichkeit . . . . .	90
5.1.2	Quantitative Untersuchung zweidimensionaler Brechzahlverteilungen	91
5.1.3	Positionsbestimmung von fadenförmigen Objekten . . . . .	91
5.1.4	Quantitative Untersuchung dreidimensional achsensymmetrischer Brech- zahlverteilungen . . . . .	91
5.2	Diskussion der Versuchsergebnisse . . . . .	92
5.3	Eigenschaften der Hintergrundsclieren-Methode . . . . .	93
5.4	Abschlußbemerkung . . . . .	94
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>96</b>
	<b>Danksagung</b>	<b>103</b>
	<b>Lebenslauf</b>	<b>104</b>

# Abbildungsverzeichnis

1.1	Wirbelschlepe hinter einem Großflugzeug . . . . .	2
2.1	Unterscheidung zwischen wirbelbehafteter und wirbelunbehafteter Strömung	5
2.2	PIV-Prinzipbild . . . . .	12
2.3	Skizze des PIV-Aufbaus . . . . .	15
2.4	PIV-Beispiel: Geschwindigkeitsfeld eines Wirbels . . . . .	16
2.5	LIDAR-Prinzipbild . . . . .	17
2.6	Schlieren-Prinzipbild . . . . .	19
2.7	Speckle-Prinzipbild . . . . .	20
2.8	Prinzipbild: Hintergrundschlieren-Methode . . . . .	22
2.9	Blattspitzenwirbel eines Hubschraubers visualisiert mit der Hintergrundschlieren-Methode . . . . .	22
3.1	Abbildung eines Punktes durch Lichtstrahlen . . . . .	27
3.2	Fokussierung eines optischen Systems . . . . .	27
3.3	Einfluss der Blende auf Hintergrundpunktverschiebungen . . . . .	28
3.4	Einfluss der Blende auf Hintergrundpunktverschiebungen, Vergleich . . . . .	29
3.5	Kriterium für quantitative Messungen mit der Hintergrundschlieren-Methode	30
3.6	Auflösung und Empfindlichkeit eines Hintergrundschlieren Aufbaus . . . . .	32
3.7	Empfindlichkeit als Funktion von P . . . . .	32
3.8	Ablenkungsrichtung der Hintergrundpunkte . . . . .	33
3.9	Schlitzdüse . . . . .	34
3.10	Laboraufbau Hintergrundschlieren-Methode . . . . .	35
3.11	Catharometrie-Aufbau . . . . .	36
3.12	Catharometrie-Skizze . . . . .	37
3.13	Heliumkonzentrationen gemessen mit Catharometrie . . . . .	38
3.14	Quantitative Auswertung, Hintergrundschlieren-Methode . . . . .	39
3.15	Heliumkonzentrationen (Hintergrundschlieren-Methode) . . . . .	40
3.16	Heliumkonzentrationen (Catharometrie und Hintergrundschlieren-Methode)	41
3.17	Messaufbau für den Test von VRIEDER . . . . .	43
3.18	Skizze des Versuchsaufbaus für VRIEDER . . . . .	44
3.19	Blickwinkel der Kameras . . . . .	44
3.20	Ablaufplan VRIEDER . . . . .	46
3.21	Funktionsweise VRIEDER I . . . . .	47
3.22	Funktionsweise VRIEDER II . . . . .	48
3.23	Ergebnisdarstellung mit VRIEDER . . . . .	49
3.24	Ergebnis von VRIEDER: Objektposition . . . . .	50
3.25	Bestimmung der Winkel für den Mittelstrahl . . . . .	52

4.1	Übersichtsskizze des Windkanals . . . . .	54
4.2	Das Flügelmodell . . . . .	55
4.3	Geometrie des untersuchten Modellflügels . . . . .	56
4.4	Skizze der Messstrecke mit Ursprung des Koordinatensystems . . . . .	57
4.5	Übersichtsskizze des Versuchsaufbaus der Hintergrundschlieren-Methode . . . . .	58
4.6	Versuchsaufbau Hintergrundschlieren-Methode: Ostseite . . . . .	59
4.7	Versuchsaufbau Hintergrundschlieren-Methode: Westseite . . . . .	59
4.8	Übersichtsskizze Particle Image Velocimetry – Aufbau . . . . .	61
4.9	Montage des Lasers . . . . .	62
4.10	Skizze des Laserlichtschnitts . . . . .	62
4.11	Versuchsaufbau . . . . .	63
4.12	Sequenz des Versuchablaufs . . . . .	64
4.13	Aufweitung des Blickfeldes; Hintergrundschlieren-Methode . . . . .	66
4.14	Messvolumen von VRIEDER . . . . .	66
4.15	Auswertung der Messdaten: Hintergrundschlieren-Methode . . . . .	67
4.16	Beispiel eines Referenz- und Messbildes . . . . .	68
4.17	Verschobenes Bild und Korrektur . . . . .	68
4.18	Verschiebungsfelder unterschiedlicher Referenzbilder . . . . .	69
4.19	Auftriebskoeffizient des Modells . . . . .	70
4.20	Hintergrundpunkt-Verschiebungen in x-Richtung . . . . .	71
4.21	Bestimmung der optischen Kamerapositionen infolge der Glasscheibe . . . . .	72
4.22	Kalibrierbilder Particle Image Velocimetry . . . . .	73
4.23	Entzerrte Kalibrierbilder: PIV . . . . .	73
4.24	Randwirbel (Hintergrundschlieren-Methode) Geschwindigkeitsreihe . . . . .	75
4.25	Randwirbel (Hintergrundschlieren-Methode) Anstellwinkelreihe . . . . .	76
4.26	Wirbelpositionen bestimmt mit VRIEDER . . . . .	78
4.27	Dichteverteilung des Wirbels: Geschwindigkeitsreihe . . . . .	79
4.28	Dichteverteilung des Wirbels: Anstellwinkelreihe . . . . .	79
4.29	3-Komponenten-Geschwindigkeitsfelder der Strömung ohne Wirbel . . . . .	80
4.30	Geschwindigkeitsfelder des Randwirbels . . . . .	81
4.31	Wirbelpositionen: Überblick über die Ergebnisse . . . . .	83

# Tabellenverzeichnis

2.1	Wirbelmodelle . . . . .	6
2.2	Strömungsberechnungsmöglichkeiten . . . . .	10
3.1	Parameter eines Hintergrundsclieren-Aufbaus . . . . .	25
3.2	Brechzahlen von Luft und Helium . . . . .	40
4.1	Meßstrecke des Windkanals . . . . .	54
4.2	Messpunkte des Versuchs . . . . .	65
4.3	Koordinaten der Hintergrundpunkte . . . . .	65
4.4	Kamerakoordinaten . . . . .	65
4.5	Wirbelpositionen in Bildkoordinaten . . . . .	77
4.6	Wirbelpositionen in Raumkoordinaten bestimmt mit VRIEDER . . . . .	77
4.7	Wirbelpositionen in Raumkoordinaten bestimmt aus den PIV-Messdaten . . . . .	80
4.8	Fehlerquellen bei der Hintergrundsclieren-Methode . . . . .	84
4.9	Fehlerquellen bei den PIV-Messungen . . . . .	85
4.10	Vergleich der Strömungsgeschwindigkeiten . . . . .	85

# Abkürzungsverzeichnis

Kurzzeichen	Benennung	Einheit
A	Auflösung des Systems	mm
AFGp	Auswertefenstergröße	Pixel
AM	Abstand der Lichtkegelmittellinien	mm
$c_0$	Lichtgeschwindigkeit im Vakuum	m/s
$c_1$	Lichtgeschwindigkeit im Medium mit der Brechzahl $n_1$	m/s
$c_L$	integraler Auftriebskoeffizient des Flügels	–
$d_m$ in	kleinster abbildbarer Bilddurchmesser	mm
$d_i$	Durchmesser des Bildes eines Punktes auf der Bildebene	mm
e	Verhältnis zwischen z und P	–
$e_{opt}$	mit P normalisierte Entfernung $z_{opt}$	–
$E (= \tan \varepsilon)$	Empfindlichkeit des Systems	rad
f	Brennweite des Kameraobjektivs, bzw. der Linse	mm
$f_{\#}$	Blendenzahl, relative Blendenöffnung	–
FAH	Auswertefenstergröße auf dem Hintergrund	mm
$G(\lambda)$	Gladstone-Dale - Konstante als Funktion der Wellenlänge	$m^3/kg$
i	Entfernung zwischen Objektivhauptebene und Bildebene	mm
$Kon_{Helium}$	Heliumkonzentration	%
l	charakteristische Länge (Reynoldszahl)	mm
L	Länge der Brechungsindexvariation	mm
M	Vergrößerung des optischen Systems	–
n	Brechzahl, Brechungsindex	–
$n_0$	Brechzahl des Umgebung	–
$n_1$	Brechungsindex des Mediums 1	–
$n_{He}$	Brechzahl von Helium	–
$n_m$	gemessene Brechzahl	–
$dn/dx$	Dichtegradient	–
p	Druck	$N/m^2$
P	Abstand zwischen Objektivhauptebene und Hintergrund	–
PGK	Pixelgröße auf der Kamerabildebene	mm
r	Abstand vom Wirbelmittelpunkt	mm
R	spezielle Gaskonstante	$J/(kg K)$
$R(z)$	Durchmesser des - einen Punkt abbildenden - Lichtkegels als Funktion des Abstandes z	mm
T	Temperatur	K, °C
u	Geschwindigkeit in x-Richtung	m/s
v	Geschwindigkeit in y-Richtung	m/s
w	Geschwindigkeit in z-Richtung	m/s
$\Delta x$	Hintergrundpunktverschiebung in x-Richtung	pixel
z	Abstand zwischen Hintergrund und dem zu untersuchenden Objekt	mm
$z_{gewählt}$	gewählter Abstand zwischen Hintergrund und Objekt	mm
$z_{opt}, z_{optimal}$	nach Kriterium ( $R = AM$ ) optimiertes z	mm
$\rho$	Dichte	$kg/m^3$
$\varepsilon$	Ablenkungswinkel	rad
$\nu$	kinematische Viskosität	$m^2/s$
$\Gamma(r)$	Zirkulationsverteilung als Funktion des Abstandes r	$m^2/s$
$\kappa$	Isentropenexponent	–
$\omega$	Wirbelstärke	1/s
$\lambda$	Wellenlänge des Lichtes	nm
$\Lambda$	Seitenverhältnis einer Tragfläche	–

# Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand in der Abteilung Experimentelle Verfahren des Instituts für Aerodynamik und Strömungstechnik des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR).

Die Idee zur Hintergrundsclieren-Methode stammt von Prof. Dr. rer. nat. G.E.A. Meier aus dem Jahre 1999. Die ersten von Dr.-Ing. habil. M. Raffel und Dipl.-Ing. H. Richard in den Jahren 1999 und 2000 durchgeführten Versuche außerhalb des Labors zeigten das Potential der Methode zur Messung von Dichteänderungen. Bei der Untersuchung einer Überschalldüse wurde zusätzlich die Möglichkeit untersucht, die mit der Hintergrundsclieren-Methode ermittelten Dichtegradienten-Änderungen **quantitativ** auszuwerten und die relative Dichteverteilung zu bestimmen. Besonders die Sichtbarmachung der Wirbeltrajektorien der Blattspitzenwirbel eines Hubschraubers stellte die außergewöhnlichen Möglichkeiten der Methode unter Beweis.

Aufbauend auf diesem Kenntnisstand, konnte im Rahmen dieser Arbeit durch den Autor am Von Karman Institut für Strömungsmechanik (VKI) in Brüssel der Beweis erbracht werden, dass die exakte quantitative Bestimmung der lokalen Dichte in zweidimensionalen Brechzahlverteilungen mit der Hintergrundsclieren-Methode möglich ist. Notwendig dafür waren eingehende Betrachtungen zur Auflösung und Empfindlichkeit als Funktion der Auslegung des Systems.

Das bei der Sichtbarmachung der von Hubschrauberblattspitzen-Wirbeltrajektorien erkennbare Potential konnte mit der Entwicklung eines Programms zur Positionsbestimmung dieser Trajektorien genutzt werden. Die Untersuchung eines Tragflächenspitzenwirbels unter den schwierigen experimentellen Bedingungen in einem industriellen, transsonischen Windkanal mittels zweier optischer Messverfahren belegen die Robustheit und Genauigkeit der entwickelten Algorithmen.

Da achsensymmetrische Phasenobjekte, als die kompressible Wirbel im Rahmen der vorliegenden Arbeit angenommen werden, mit Hilfe von sichtlinienintegrierenden Verfahren auch mittels *einer* Projektion quantitativ bestimmt werden können, erweitert sich der Anwendungsbereich der Methode um die Dichtemessung kompressibler Wirbel bei unbekannter Lage. Dieser Fall wurde durch die Anwendung der im Rahmen der vorliegenden Arbeit entwickelten Gleichungen, der genannten Programme zur Lagebestimmung und des von Dipl.-Ing. T. Kirmse während ihrer Diplomarbeit in der Abteilung Experimentelle Verfahren des DLR Göttingen entwickelten Programms zur quantitativen Bestimmung der Dichteverteilung mit den im Windkanal gewonnenen Daten exemplarisch bestätigt.

Aufbauend auf diesen Arbeiten entstand die vorliegende Arbeit mit dem Titel *Vermessung von Wirbeln mit der Hintergrundsclieren-Methode*.



# Kapitel 1

## Einleitung

### Motivation

Die theoretischen Grundlagen der Strömungsmechanik werden heute vielfach als weitgehend verstanden angesehen, so dass experimentelle Untersuchungen durch Rechnungen ersetzt werden können. Die Betrachtung komplizierter, dreidimensionaler, instationärer Strömungen zeigt aber die Grenzen der numerischen Simulation auf: Eine exakte Vorhersage der tatsächlichen strömungsmechanischen Vorgänge z.B. von Wirbeln ist daher schwierig.

In vielen technischen Strömungen entstehen Wirbel vor allem dort, wo ein Fluid ein Profil umströmt und dabei einen Auftrieb erzeugt: z.B. an Schiffsschrauben, Propellern, Tragflügeln und Hubschrauberrotoren. Die Stärke dieser Wirbel ist u.a. abhängig von dem Anstellwinkel des Profils und dem sich ergebenden Auftrieb [Prandtl 1918]. Konzentrierte Wirbel rufen neben erwünschten Wirkungen oft auch störende Effekte hervor, wie z.B. bei Hubschraubern, wo der Hauptlärm im Sinkflug aus Interaktionen zwischen den gerade von einem Rotorblatt gebildeten Wirbel und den nachfolgenden Rotorblättern entsteht (engl.: Blade Vortex Interactions, BVI) z.B. [Beaumier *et al.* 1994]. Diese Interaktionen können nur minimiert werden, wenn Lage und Bewegung der Wirbel bekannt sind.

Tragflächenwirbel mit besonders hoher kinetischer Energie entstehen beispielsweise bei Großflugzeugen u.a. während des Starts und der Landung (Abb. 1.1). Diese Wirbel stellen eine Gefährdung für den nachfolgenden Flugverkehr dar. Die Deutsche Flugsicherungs-GmbH (DFS) hat deshalb in Anlehnung an die International Civil Aeronautical Organisation (ICAO) Sicherheitsmindestabstände zwischen den Luftfahrzeugen definiert, um dennoch einen gefahrlosen Flugbetrieb zu garantieren. Die Sicherheitsabstände liegen je nach Einteilung des Luftfahrzeuges in die entsprechende Gewichtsklasse (leicht, mittel, schwer) zwischen 2,5 und 6 nautischen Meilen. Dies entspricht bei einer Geschwindigkeit des Flugzeuges von ca. 200 km/h zwischen 66 sec und 159 sec [Gerz 2001]. Diese Sicherheitsabstände limitieren die Kapazität der Flughäfen sowie der Reiseflughöhen: Die Flughäfen Frankfurt a.M. und London Heathrow sind beispielsweise schon jetzt an dieser Kapazitätsgrenze angelangt [Gerz 2001]. Aufgrund des beschränkten Raumangebotes in Mitteleuropa ist eine Erweiterung der Reiseflughöhen, sowie der Start- und Landebahnen, nicht ohne weiteres möglich. Entsprechend sind Luftfahrzeughersteller wie Flughafenbetreiber aus wirtschaftlichen Gründen gleichermaßen daran interessiert, das Wirbelverhalten umfassend zu erforschen und die Luftfahrzeuge entsprechend dem gewonnenen Wissen weiterzuentwickeln. Auf dem Sektor des Großflugzeuges wird mit großem Aufwand an der Erforschung der Mechanismen von Wirbelschleppen gearbeitet. Allein die EU fördert die Untersuchung mit einem

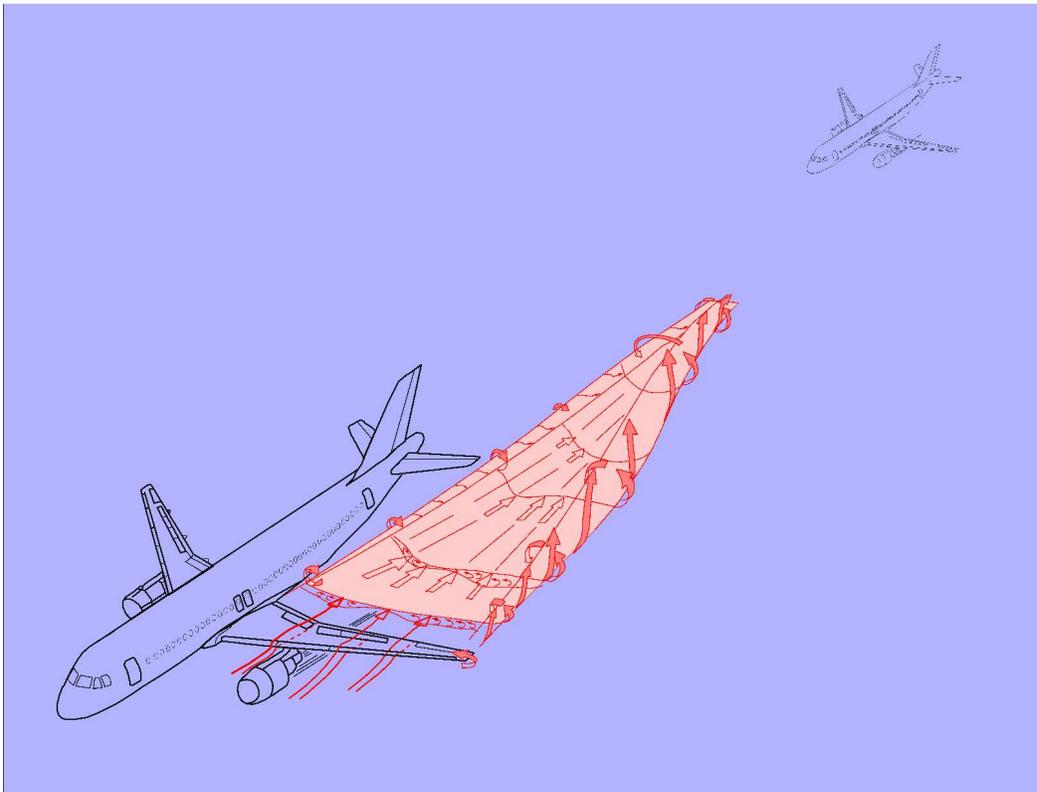


Abbildung 1.1: Wirbelschleife hinter einem Großflugzeug

Jahresbudget von mehr als 100 Mio Euro [Vollmers 2003].

Die Bestimmung der Position und Stärke von Wirbeln kann grundsätzlich auf zwei Arten geschehen: durch *Vermessung* oder *Berechnung* des Strömungsfeldes.

### Berechnung von Wirbelströmungsfeldern

Die Berechnung von Wirbelströmungen kann auf Grundlage von Wirbelmodellen oder der allgemeinen Navier-Stokes-Gleichungen durchgeführt werden. Voraussetzung für die Anwendung ist die genaue Kenntnis der wirbelerzeugenden Geometrie, sowie der Umgebungsverhältnisse (Seitenwind, u.ä. meteorologische Einflüsse). Die Navier-Stokes-Gleichungen sind zwar allgemein als geschlossene Theorie anzusehen, der Aufwand für die rechnerische Bestimmung von Strömungsfeldern nimmt aber etwa mit dem Quadrat der Reynoldszahl zu [Canuto *et al.* 1988]. Für einfache Strömungen liegt die realistische Grenze (Rechenzeit auf einem modernen Großrechner im Jahre 2003 bei ca. 4 Wochen) für komplette Lösungen bei ca.  $Re = 1000$ . Die Berechnung von komplizierten Strömungen mit höheren Reynoldszahlen kann infolgedessen nur unter vereinfachenden Annahmen geschehen. Entsprechend müssen die Ergebnisse der Berechnungen durch experimentelle Messungen bestätigt werden.

## Vermessung von Wirbelströmungsfeldern

Die experimentelle Bestimmung von Wirbeln, die auch der Anforderung genügt Zerfall und Instabilität zu beleuchten, ist trotz neuerlicher Fortschritte der optischen Messtechnik schwierig. Es existieren nur wenige Messtechniken, die eine Vermessung der Strömung

- berührungslos, d.h. ohne eine Störung einzubringen
- momentan, d.h. auch geeignet, um zeitlich kurze Effekte darzustellen
- feldvermessend, d.h. gleichzeitig ein ganzes Strömungsfeld erfassend

ermöglichen *und* für die Bestimmung der Wirbelcharakteristika geeignet sind. Für die Überprüfung von rechnerisch prognostizierten Strömungsdaten ist die experimentelle Erfassung möglichst vieler Strömungsparameter wichtig: Das Optimum ist die vollständige Erfassung des lokalen kinematischen und thermodynamischen Zustandes der Strömung. Nur dadurch können die Ergebnisse der numerischen Berechnungsprogramme umfassend geprüft und das Verständnis der Strömungsmechanik weiterentwickelt werden. Bisher existierende Messtechniken können diese Fragestellung noch nicht in ausreichendem Maße beantworten.

## Vorstellung der Arbeit

Eine Hauptfrage im Themenkomplex “Wirbelschleppen–Untersuchung” ist die zeitlich und räumlich hochaufgelöste Bestimmung der Wirbelposition, um mit Hilfe dieser Daten ein genaueres und integraleres Verständnis über die strömungsmechanischen Vorgänge innerhalb der Wirbelströmung auch an realitätsnahen Konfigurationen zu erhalten. Die vorliegende Arbeit stellt die Erweiterung einer neuen Messtechnik vor, die diese Lücke schließt und deren Verwendbarkeit im Versuch nachgewiesen wird: die Hintergrundschlieren-Methode (engl.: Background Oriented Schlieren Method: BOS). Diese Methode basiert auf dem gleichen Effekt wie das 1864 von A. Toepler vorgestellte Schlieren-Verfahren: Lichtstrahlablenkung infolge von Brechungsindexgradienten.

Bei der Entwicklung der theoretischen Grundlagen dieser Messtechnik wurde der erkenntnistheoretische Ansatz benutzt, den schon Aristoteles im Altertum [340v.Chr.] und Descartes [1644] in der Neuzeit beschrieben haben: Die spezielle Theorie wird, basierend auf dem allgemeinen Wissensschatz der Physik, entwickelt und danach im Versuch bestätigt. Dieses Vorgehen (= deduktive Methode), das zur Erweiterung der Hintergrundschlieren-Methode benutzt wurde, steht interessanterweise im Gegensatz zur allgemeinen Erforschung des Wirbelverhaltens. Da außer der Navier-Stokes-Gleichungen keine geschlossene Theorie besteht und vermutlich in absehbarer Zeit aufgrund der zu großen Zahl der Einflussfaktoren auch nicht entwickelt werden kann, muss der empiristische Ansatz (Locke 1632-1704) gewählt werden. Für jede neue Konfiguration (Strömungsgeschwindigkeit, Anstellwinkel, Klappenwinkel, etc.) muss das Wirbelverhalten neu bestimmt werden. Der dadurch entstehende ungleich höhere Versuchs- und Berechnungsaufwand zeigt die Vorteile der deduktiven Methode.

# Kapitel 2

## Literaturübersicht

### 2.1 Strömungsmechanische Grundlagen der Wirbelströmung

#### Definition eines Wirbels

Umgangssprachlich wird der Begriff 'Wirbel' im physikalischen Sinne unscharf verwendet. Es existiert *keine* generelle Definition des Wirbelphänomens. Im Folgenden wird *eine* Definition des Wirbels gegeben, die *eine* Lösung der Navier-Stokes-Gleichungen [Truckenbrodt 1968] darstellt, deshalb physikalisch sinnvoll ist und häufig benutzt wird. Das Phänomen Wirbel lässt sich gemäß den unterschiedlichen möglichen Lösungen der Navier-Stokes-Gleichung in verschiedenen Weisen beschreiben. Inwieweit die Strömung dadurch tatsächlich korrekt beschrieben worden ist, bleibt unklar. Tatsache ist, dass die Komplexität der Wirbelströmung und der dabei auftretenden Mechanismen ein umfassendes Verständnis bisher verhindert hat. Das liegt auch daran, dass das Wirbelphänomen das Strömungsverhalten eines *Gebietes* beschreibt, bzw. bestimmt, während die Navier-Stokes-Gleichungen das Verhalten der Strömung in einem *Punkt* beschreiben, der 'nur' mit der Umwelt gekoppelt ist [Vollmers 2003]. Die derart enthaltene 'Punktinformation' erschwert das Verständnis der Zusammenhänge *übergreifender* Mechanismen, die insgesamt nach den Navier-Stokes-Gleichungen ablaufen.

Die nun folgende Darstellung geht davon aus, dass sich in einem Inertialsystem die Stromlinien des Wirbelfeldes so zeigen, dass sie in sich geschlossen sind und einen gemeinsamen Symmetriepunkt haben. Dadurch wird z.B. die Rotation der Strömung innerhalb der Grenzschicht *nicht* als Wirbel definiert. Alle weiteren Betrachtungen beziehen sich auf die durch diese Festlegung definierten Wirbelströmungen.

Beim Studium der Literatur über Wirbelströmung wird deutlich, dass es unterschiedliche Definitionen eines Wirbels gibt. Die Unterscheidung zwischen Turbulenz und Wirbelströmung scheint willkürlicher Art zu sein. Meier [2003] beispielsweise *verknüpft* diese beiden Strömungen und erwartet, dass das Phänomen der Turbulenz aus dem Wissen über das Phänomen der Wirbelströmung erklärt werden wird, welches er als eine Art makroskopische und dadurch leichter vermessbare Turbulenz ansieht.

Eine sichere Möglichkeit der Unterscheidung, ob eine Strömung wirbelbehaftet ist - im Sinne der Definition dieses Abschnitts - ist die von Vollmers *et al.* [1983] dargestellte Methode. Die Bestimmung der Spur und der Determinante der folgenden Matrix A, die einen Punkt

eines zweidimensionalen Strömungsfeldes beschreibt.

$$A = \begin{pmatrix} \frac{du}{dx} & \frac{du}{dy} \\ \frac{dv}{dx} & \frac{dv}{dy} \end{pmatrix}$$

und Einordnung der Werte in das Diagramm (Abb.2.1). Die Grenze zwischen wirbelbehafteter und wirbelunbehafteter Strömung wird durch den Parameter  $d_2$  gebildet, der ein Indikator für das Vorhandensein nichtreeller Eigenwerte ist. Liegt der durch die Determi-

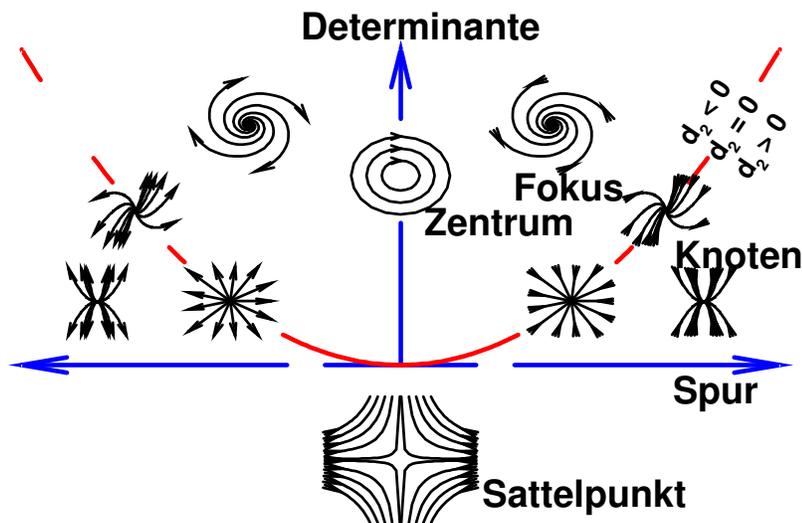


Abbildung 2.1: Unterscheidung zwischen wirbelbehafteter und wirbelunbehafteter Strömung [Vollmers *et al.* 2001]

nante und Spur der Matrix  $A$  bestimmte Punkt im Diagramm der Abb. 2.1 *innerhalb* der Parabel, so liegt Wirbelströmung an dem durch die Matrix  $A$  beschriebenen Punkt gemäß der Definition dieses Abschnitts vor.

### 2.1.1 Wirbelmodelle

Die exakte Beschreibung der Wirbelströmung mit Hilfe der Navier-Stokes-Gleichungen ist aufgrund der genannten Komplexität nicht geschlossen lösbar möglich. Die Definition und Benutzung von Wirbelmodellen erlaubt aber trotzdem die oft annähernd richtige Vorhersage des Strömungsfeldes.

Strömungen lassen sich gemäß einer einfachen Definition in zwei Klassen aufteilen, die sich hinsichtlich ihrer Kinematik und deshalb auch ihrer Physik unterscheiden. Die Potentialströmung beschreibt die Bewegung des Fluids ohne Drehung, während die Wirbelströmung die Bewegung des Fluids mit Drehung beschreibt (zuerst von F.W. Lanchester [1909] und Lord Kelvin (W. Thomson) [Kelvin 1910] beschrieben). Das Maß für die Stärke des Wirbels ist dessen Zirkulationsverteilung  $\Gamma$ . Darunter ist ein Maß für die Bewegung des Fluids um einen Drehpunkt in Abhängigkeit des Abstandes  $r$  von dem Drehpunkt zu verstehen.

Der Potentialwirbel (Rankine-Wirbelmodell) bildet das einfachste Wirbelmodell. Hierbei wird die Strömung in zwei Bereiche aufgeteilt: den Wirbelkern und Außenbereich. Innerhalb des Wirbelkerns rotiert die Strömung gleichförmig wie ein Festkörper, außerhalb dreht

die Strömung nicht, es herrscht Potentialströmung. Energetische Betrachtungen zeigen, dass dieses Modell nur sehr bedingt in der Lage ist, die physikalischen Vorgänge sinngemäß darzustellen. Andere Wirbelmodelle stellen das Phänomen des Wirbels besser dar (Tab.2.1) [Fell *et al.* 1995], weisen aber trotzdem Diskrepanzen zwischen der tatsächlichen Strömung und der durch das jeweilige Modell beschriebenen (oder vorhergesagten) auf.

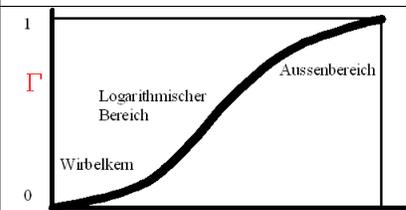
Wirbelmodelle	Beschreibung	Bemerkung
<b>Rankine</b>	$\Gamma = \Gamma_0 \cdot \left(\frac{r}{r_p}\right)^2 \leq \Gamma_0$	Festkörperrotation im Wirbelzentrum
<b>Oseen (1911)</b> <b>Lamb (1932) (1-L Modell)</b>	$\Gamma = \Gamma_0 \cdot \left[1 - e^{-\left(\frac{r}{r_p}\right)^2}\right]$	Lösung der N.-S.-Gl. für achsensymmetrische, inkompressible und laminare Strömungen
<b>Rosenhead (1931)</b>	$\Gamma = \Gamma_0 \cdot \frac{r^2}{r^2 + r_p^2}$	
<b>Betz (1932)</b>	$r(\Gamma) = \frac{1}{\Gamma(y)} \cdot \int_y^1 \Gamma(y') \cdot dy' = F(\Gamma)$	Parameterfreie und sichere Lösung der N.-S.-Gl., aber keine Lösung für das Wirbelzentrum, da Singularität für $r \rightarrow 0$
<b>Hoffmann / Joubert (1963)</b>		Wirbelmodell mit Berücksichtigung der Turbulenz
<b>Lamb / Williams (1974) (n-L-Modell)</b>	$\Gamma = \sum_{i=1}^n \left[1 - e^{-\left(\frac{r}{r_{pi}}\right)^2}\right]$	Einfache Bestimmung der Wirbelaltermung

Tabelle 2.1: Wirbelmodelle

## Wirbelposition und Wirbelverhalten

Grundsätzlich bleibt der Ort des Mittelpunktes eines einzelnen Wirbels unverändert, solange keine Kräfte auf ihn einwirken [Betz 1932]. Bei der Bewegung einer endlichen Tragfläche durch ein Fluid entsteht nicht nur der durch den Druckausgleich an den Flächenspitzen induzierte Randwirbel, sondern nach Prandtl [1918] eine Wirbelfläche, die sich hinter dem Tragflügel zu einem Wirbelsystem zusammenrollt. Diese Wirbelfläche, die auch Unstetigkeitsfläche oder Scherschicht genannt wird, zeichnet sich dadurch aus, dass sich Druck- und Geschwindigkeitsunterschiede zwischen der oberen und unteren Tragflächenseite in zwei Strömungsschichten ausdrücken, die interagieren. Der theoretische Ansatz dafür leitet sich z.B. aus der Tragflügeltheorie von Prandtl ab, die besagt, dass mit zu den Flügelspitzen

abfallender Zirkulation hufeisenförmige Wirbel auch an der geraden Flügelhinterkante entstehen. Die Richtungsänderung der freien Anströmung durch einen Flügel [Kutta 1902, Joukowski 1911], müsste auch den Wirbel mit dieser Richtung absinken lassen. Da der Wirbel sich aber erst aus der beschriebenen Wirbelfläche bildet, wird der Abstand des Wirbels von der Rumpfmittellinie vorerst kleiner, was Prandtl [1918] theoretisch bestimmt hat. Dieses Wirbelverhalten ist experimentell bestätigt worden, z.B. [Verstynen *et al.* 1973]. Entsprechend ist die Vorhersage des Wirbelortes schwieriger.

Experimentelle Untersuchungen haben ergeben, dass die laterale Bewegung des Wirbels durch die Flügelgeometrie und/oder Anbauteile an den Flügel verändert werden kann [Donaldson *et al.* 1975]. Das hochstationäre Verhalten von Wirbeln, charakterisiert u.a. durch die Parameter Wirbelposition, örtliche Zirkulation, axiale Geschwindigkeit, etc., kann anhand der bisher bekannten Modelle z.B. [Crow 1970], [Ludwig 1970] nicht vollständig erklärt werden. Tatsächlich liegt für dieses instationäre Verhalten bisher noch keine abgeschlossene strömungsmechanische Erklärung vor [Green *et al.* 1991]. Die bisherigen Untersuchungen des Wirbelverhaltens haben ergeben, dass sich insbesondere Wirbel, die durch Luftfahrzeuge mit ausgeschlagenen Landeklappen generiert wurden, nicht mit einem einfachen zwei-Wirbel-Modell erklären lassen. Die Strömung ist erheblich komplexer [Donaldson *et al.* 1975].

Grundsätzlich kann eine Annäherung des rechnerisch bestimmten Strömungsfeldes an die reale Strömung nur erreicht werden, wenn die Geometrie und damit die Auftriebs- und Widerstandsverteilung des wirbelgenerierenden Luftfahrzeuges (Tragflügel, Leitwerk und Antriebssystem) *unter Flugbedingungen* (!) bekannt ist. Der erste Schritt ist dabei die Bestimmung der Position der Mittelpunkte der Wirbel, die sich aus dem Aufrollvorgang der Wirbelfläche hinter dem Luftfahrzeug ergeben. Da dieser Vorgang relativ schnell abläuft, kann eine gute Näherung durch die Berechnung der Strömung unter Vernachlässigung der Reibung erfolgen [Donaldson *et al.* 1975]. Erst wenn der Aufrollvorgang realistisch ermittelt worden ist, kann das weitere Verhalten der Strömung untersucht werden. Dabei spielen die Stabilität und Interaktionen der Wirbelzentren eine wichtige Rolle. Wie stabil reagieren die Wirbel auf Störungen und wie verhalten sich die Wirbel? Drehen sie sich umeinander oder bewegen sie sich auseinander? Unter bestimmten Voraussetzungen kann ein Wirbel infolge einer relativ kleinen Störung aufplatzen, d.h. die vorher räumlich kleine (und deshalb starke) Zirkulationsverteilung wandelt sich in sehr kurzer Zeit in eine weit gestreute (und deshalb schwache) um. Ein weiterer Effekt ist das "Altern" des Wirbels. Darunter wird i.A. die langsame räumliche Vergrößerung der Zirkulationsverteilung (verbunden mit Abschwächung) verstanden. Die sichere Beschreibung der realen Wirbelströmung im Fernfeld des Flugzeuges setzt desweiteren die Kenntnis der meteorologischen Effekte (Seitenwind, etc.) voraus, die auf die Strömung einwirken.

### Aufrollvorgang der Unstetigkeitsfläche

Das Wirbelverhalten hängt neben den Randbedingungen der Strömung von der Entstehung des Wirbels, dem sogenannten Aufrollvorgang, ab. Wann kann der Aufrollvorgang der Wirbelfläche, als Konsequenz aus der über einen realen Tragflügel nicht gleichförmigen Auftriebsverteilung, als abgeschlossen angesehen werden? In Verbindung mit der Traglinientheorie ergibt sich nach der Theorie von Lanchester für einen Flügel mit einem Seitenverhältnis von  $\Lambda = 7$  und einem Auftriebskoeffizienten von  $c_L = 0,4$  der Aufrollvorgang zu einer Gesamtlänge von ca. 20 Spannweiten. Experimentelle Untersuchungen haben gezeigt, dass dieses Ergebnis nicht realistisch sein kann z.B. [Verstynen *et al.* 1973]. Einfache

Berechnungsansätze bestimmen die Strömung in mehreren, zur Flügelquerachse senkrecht stehenden Ebenen mit Hilfe z.B. des Oseen-Wirbelmodells.

Ein weiterführender Ansatz zur Bestimmung des Aufrollvorgangs basiert auf den Überlegungen von Prandtl [1922], der von der Energieerhaltung der Strömung ausgeht. Betz [1932] führt diese Überlegungen weiter und löst die darin enthaltenen Probleme, resultierend aus der nicht definierten Turbulenzgeschwindigkeitsverteilung, durch Gleichsetzung der Zirkulation des Wirbels mit der der Wirbelfläche und der Definition der Wirbelmittellinie als Stromlinie. Die sich damit ergebenden Wirbelorte stimmen besser mit der Realität überein. Da auch komplexe Auftriebsverteilungen mit diesem Ansatz realistisch modelliert werden können, wird dieser noch heute benutzt und weiterentwickelt. Nach diesem Modell ist nach einer Spannweitenlänge der Wirbel einer elliptischen Auftriebsverteilung zu mehr als 85% aufgerollt. Dieses Ergebnis stimmt mit der Realität weit besser überein, als das o.g. nach Lanchester. Allgemein läßt sich das Verhalten der Wirbelströmung mit diesem Modell recht gut bestimmen, was z.B. durch McCormick *et al.* [1968] bestätigt worden ist, wenn die Auftriebsverteilung des Tragflügels bekannt ist. Die Anwendung dieses Modells erlaubt auch die Bestimmung der Strömungsbeeinflussung durch zusätzliche Anbauten an den Flügel (Klappen, Winglets, etc.), die die Widerstands- und Auftriebsverteilung verändern. Entsprechend kann damit ein Optimierungsprozeß des Wirbelverhaltens für reale Konfigurationen durchgeführt werden, solange diese Anbauten nicht ausschließlich die Widerstandsverteilung verändern, ohne die Auftriebsverteilung zu beeinflussen.

Zur Bestimmung des Ortes eines Wirbels kann u.a. das “Lumped Vorticity” Modell benutzt werden, das den (aufgerollten) Wirbel durch eine zweidimensionale, punktförmige Wirbelströmung darstellt [Donaldson *et al.* 1975]. Die Anwendung dieses Modells ist auf die Fälle beschränkt, in denen ein Wirbelpaar auftritt, das zur Rumpfhauptebene symmetrisch liegt und keine (große) Änderung der Zirkulation des Wirbels in Stromlinienrichtung auftritt. Für viele Fälle, insbesondere bei einfachen Auftriebsverteilungen, ermöglicht dieses Modell eine gute Vorhersage des Wirbelortes, unter der Voraussetzung, dass ein Wirbel sich nicht mit einem anderen vermischt. Das hochfrequent instationäre Verhalten der Wirbel kann durch dieses Modell nicht erfasst werden.

### 2.1.2 Wirbelbestimmung mit Hilfe der Navier-Stokes-Gleichungen

Wirbelmodelle sind, da sie auf einem bestimmten Erfahrungsrahmen aufbauen, für den sie bereits bestätigt sind, nicht allgemein und vollständig gültig. Eine andere Möglichkeit, das Verhalten der Strömung zu berechnen, ist die Anwendung der allgemeinen Navier-Stokes-Gleichungen in einem finite-Volumen-Modell. Mit der schnellen Entwicklung der Rechner sind heute Strömungsfeldberechnungen auf dieser Basis in immer besserer Weise möglich. Es existieren bereits kommerzielle Programme, sogenannte Flowsolver wie z.B. “Fluent”, zur Strömungsberechnung. Ein effizientes Strömungsberechnungsprogramm, das auf den Navier-Stokes-Gleichungen basiert, ist der am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) entwickelte TAU-CODE [DLR 2002]. Diese Programme unterteilen die Strömung in kleine Volumeneinheiten und bestimmen die physikalischen Zustände in jeder Einheit aus den Zuständen der umliegenden Volumeneinheiten. Solange keine extreme Dreidimensionalität des Strömungszustandes vorliegt, keine unerwarteten Transitionsvorgänge erfolgen, der Turbulenzgrad bekannt ist und die Strömung sich nicht ablöst, können Strömungsdaten berechnet werden, deren Genauigkeit in der Größenordnung der Genauigkeit experimentell ermittelter Strömungsdaten liegt [Raffel 2002]. Die klassischen Navier-Stokes-Gleichungen bilden die Kräftegleichgewichte für jedes Volumenelement, z.B. [Truckenbrodt 1968]. Zu-

sammen mit dem Massenerhalt und den Energiegleichungen für kompressible Strömungen können diese Bilanzgleichungen zur numerischen Bestimmung des Strömungsfeldes (-volumens) benutzt werden. Dieses System von partiellen, nichtlinearen Differentialgleichungen zweiter Ordnung läßt sich analytisch nur für wenige Strömungszustände lösen. Entsprechend kommen physikalische und mathematische Vereinfachungen, wie z.B. Drehungsfreiheit der Strömung, Vernachlässigung der Reibungskräfte, Turbulenzmodelle, etc. zur Anwendung, die die Lösung ermöglichen. Die numerische Berechnung einer Strömung nach der kompletten Navier-Stokes-Gleichung ohne Vereinfachungen (Direkte Numerische Simulation = DNS) ist heute (2003) trotz weitentwickelter Rechner nur in sehr begrenzter Weise möglich. Die Genauigkeit der numerischen Modelle hängt sehr stark von der Unterteilung der Strömung in finite Elemente ab. Eine feinere Unterteilung ermöglicht eine genauere Berechnung der Strömung.

Die Natur einer Strömung wird in kompakter Form u.a. durch die Reynoldszahl  $Re$  charakterisiert. Sie beschreibt das Verhältnis zwischen den Trägheits- und den Reibungskräften. Hierbei ist  $v$  die Strömungsgeschwindigkeit,  $l$  die Länge des umströmten Gegenstandes und  $\nu$  die kinematische Viskosität, die vom Fluid abhängt.

$$Re = \frac{v \cdot l}{\nu} \quad (2.1)$$

An Gleichung (2.1) erkennt man, dass die Reynoldszahl sowohl proportional zu  $v$  als auch zu  $l$  ist. Außerdem sieht man deutlich, dass bei geringer Viskosität die Reynolds-Zahl sehr groß ist, also starke Turbulenz vorhanden ist. Das Größenverhältnis zwischen den größten und den kleinsten Miniaturwirbeln (= nur eine Modellvorstellung: engl. "Eddies") entspricht ungefähr  $Re^{3/4}$ . Somit skaliert die Anzahl der Gitterpunkte (= Eckpunkte der finiten Volumina) zur genauen Simulation, d.h die Turbulenz ist modelliert, mit ca.  $Re^{9/4}$  in drei Raumdimensionen [Canuto *et al.* 1988]. Höhere Reynoldszahlen erfordern i. A. eine feinere Unterteilung der Strömung. Entsprechend ist die Anwendbarkeit der numerischen Strömungsfeldberechnungsmöglichkeiten direkt von der Reynoldszahl abhängig. Zur Zeit ist die vollständige Bestimmung von Strömungsfeldern von ca.  $10 \times 10 \times 10$  cm über einer ebenen Platte bei Reynoldszahlen von 1000 das maximale, was von einem DNS-Löser in vertretbarem Zeitaufwand (kleiner als 4 Wochen) bestimmt werden kann [Theofilis 2003]. Entsprechend müssen bei der Berechnung komplexerer Strömungsfelder mit höheren Reynoldszahlen die o.g. vereinfachenden Annahmen benutzt werden. Dadurch ist die Lösung dieser Berechnungsprogramme nicht mehr allgemeingültig und bedarf der Bestätigung durch experimentelle Ergebnisse. Höhere Reynoldszahlen erfordern i.A. eine feinere Unterteilung der Strömung, entsprechend hängt die Anwendbarkeit der numerischen Strömungsfeldberechnungsmöglichkeiten von der Reynoldszahl ab. In Tab. 2.2 sind die wichtigsten Berechnungsmöglichkeiten der Strömung dargestellt.

### 2.1.3 Abschlußbemerkung zur Wirbelberechnung

Ein Wirbel kann durch die Zirkulationsverteilung  $\Gamma(r)$  in Abhängigkeit der Entfernung  $r$  zum Mittelpunkt charakterisiert werden. Die Zirkulation wirkt sich in einer Geschwindigkeitsverteilung und einer Dichteverteilung aus. Je größer die Zirkulation und je kleiner der

Bezeichnung	Wirbelleitervverfahren	Eulerverfahren	RANS-Verfahren	DNS-Verfahren
Vereinfachende Annahmen	reibungslos, inkompressibel und drehungsfrei	reibungsfrei	Energetische Turbulenz-Modellierung	Keine
Art der Grundgleichungen	linear erster Ordnung (Laplace)	nichtlinear, partiell, erster Ordnung (Euler)	nichtlinear, partiell, zweiter Ordnung (RANS)	nichtlinear, partiell, zweiter Ordnung (Navier-Stokes)
Lösungsmittel	Superposition analytischer Lösungen	Lösung der Euler- und Kontinuitätsgleichung in Integrators	Lösung der RANS- der Kontinuitäts- und der Turbulenzgleichung in Differenzen- oder Intergralform	Lösung der N.-S.- und der Kontinuitätsgleichungen in Differenzenform
Numerischer Lösungsvorgang	Iterative Lösung des result. Systems von linearen Integralgleichungen	Iterative Lösung des resultierenden Systems von linearen Integralgleichungen nach FD-, FV- oder FE- Verfahren	Siehe Euler-Verfahren	Iterative Lösung des result. Systems von linearen Integralgleichungen nach dem FD-Verfahren
Geometrische Diskretisierung	Objektoberfläche	Objektoberfläche und umgebender Rechenraum	Siehe Euler-Verfahren	Siehe Euler-Verfahren

Tabelle 2.2: Strömungsberechnungsmöglichkeiten mit Hilfe der Navier-Stokes-Gleichungen [Raffel 2002]

Abstand  $r$ , desto größer sind die Geschwindigkeits- und Dichtegradienten innerhalb dieser Strömung. Eine geschlossene *und* lösbare Theorie zur Beschreibung des Wirbelphänomens, insbesondere in Hinsicht auf deren Position und Dissipation, existiert nicht. Das ungenügende Verständnis der strömungsmechanischen Vorgänge bezüglich der Wirbel erlaubt deshalb *keine* allgemeingültige Bestimmung der Strömung. Da Transition, Turbulenz und Ablösung mit den allgemeinen Gleichungen der Strömungsmechanik nur bei kleinen Reynoldszahlen absolut fassbar sind, sind die Ergebnisse auf Grundlage dieser Gleichungen für große Reynoldszahlen jeweils durch experimentelle Untersuchungen zu bestätigen. Je umfassender die experimentell ermittelten Daten sind, desto besser kann das Berechnungsprogramm angepasst und das strömungsmechanische Verständnis weiterentwickelt werden. Auch wenn innerhalb dieses 'Erfahrungsrahmens' eine generelle Vorhersage des Wirbelströmungsfeldes mit Hilfe der genannten Methoden gelingt, ist die rechnerische Bestimmung des *instationären* Verhaltens von Wirbeln, insbesondere bezüglich der Position und der Dichteverteilung, mit den bestehenden Möglichkeiten in nur eingeschränkter Weise möglich. Diese z.T. hochfrequenten Vorgänge sind bisher noch nicht verstanden. Es wird vermutet, dass in der Klärung dieser instationären Vorgänge der Schlüssel zum Verständnis des Mechanismus der Wirbelströmung allgemein liegt [Green *et al.* 1991].

## 2.2 Messtechnik zur Wirbelvermessung

Im folgenden Abschnitt wird eine kurze Übersicht über die wesentlichen Messtechniken gegeben, mit denen Wirbel vermessen werden können. Es werden neben dem Prinzip, den Eigenschaften und den erforderlichen Komponenten für den Aufbau die physikalischen Größen angegeben, die mit der jeweiligen Messtechnik erfasst werden können.

Im letzten Abschnitt ist die Zirkulation als das Hauptcharakteristikum eines Wirbels dargestellt worden. Die experimentelle Bestimmung der Zirkulationsverteilung im allgemeinen und der Wirbelmittelachse im besonderen, kann grundsätzlich durch die Bestimmung zweier unterschiedlicher physikalischer Auswirkungen der Zirkulation realisiert werden: Geschwindigkeits- und Dichtefeldmessungen. Im folgenden werden die für diese Anwendung am sinnvollsten verwendbaren Methoden zur Geschwindigkeits- und Dichtefeldmessung vorgestellt. Die Anforderungen an die Messtechniken zur Wirbelvermessung mit dem Ziel weiterführende Intensitäts- und Stabilitätsuntersuchungen durchzuführen, resultieren aus den Besonderheiten der Wirbelströmung und sind schon in der Einleitung genannt worden. Sie lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- berührungslos: das zu vermessende Strömungsfeld darf durch die Messung nicht verändert und gestört werden
- kurzzeitige Messungen ermöglichen die Auflösung von Effekten, die von dem instationären Charakter der Wirbelströmung herrühren
- feldvermessend: Aufnahme jeweils eines ganzen Strömungsfeldes

Auf die Darstellung von Sichtbarmachungsverfahren zur Wirbelbeobachtung wird hier bewusst verzichtet, da diese weder die Bestimmung der Stärke des Wirbels (der Zirkulation), noch der exakten Position ermöglichen.

Auf Methoden, die z.B. durch besondere Erschwernisse bei der Anwendung (UV-Laserlicht) nur eine geringe Verbreitung erfahren haben, wie beispielsweise die quantitative Dichtefeldmessungen mit der Rayleigh-Streulicht-Methode [Sieber 1996] wird im Folgenden nicht eingegangen.

### 2.2.1 Geschwindigkeitsmessverfahren

Die in diesem Abschnitt beschriebenen Strömungsmesstechniken zur Geschwindigkeitsbestimmung haben eine Gemeinsamkeit: Es wird nicht die Geschwindigkeit der sich bewegenden Moleküle selbst gemessen, sondern die Geschwindigkeit von kleinen Partikeln, die auf Grund ihrer geringen Masse der Strömung gut folgen. Es ist gezeigt worden z.B. [Raffel 1993], [Melling 1997], dass selbst bei großen Geschwindigkeitsgradienten, wie sie z.B. in Verdichtungsstößen auftreten, diese Partikel der Strömung mit nur geringem Schlupf folgen, sofern die Partikel hinreichend klein sind. Mit Schlupf wird hier die Differenz zwischen Strömungsgeschwindigkeit und Partikelgeschwindigkeit beschrieben.

#### 2.2.1.1 Particle Image Velocimetry

Seit ca. 1990 hat sich dieses Messverfahren zum bedeutendsten Geschwindigkeitsfeldmessverfahren in der Strömungsanalyse entwickelt: Durch besondere Versuchsaufbauten (z.B. Mehrebenen PIV, Holographisches PIV) ist es prinzipiell möglich, die lokalen

Strömungsgeschwindigkeiten quantitativ in allen 3 Dimensionen zeitaufgelöst zu bestimmen [Kompenhans *et al.* 2000]. Eine gute Darstellung aller für die Durchführung und das Verständnis von PIV wichtigen Informationen ist in dem Buch: “Particle Image Velocimetry” [Raffel *et al.* 1998] zusammengefasst.

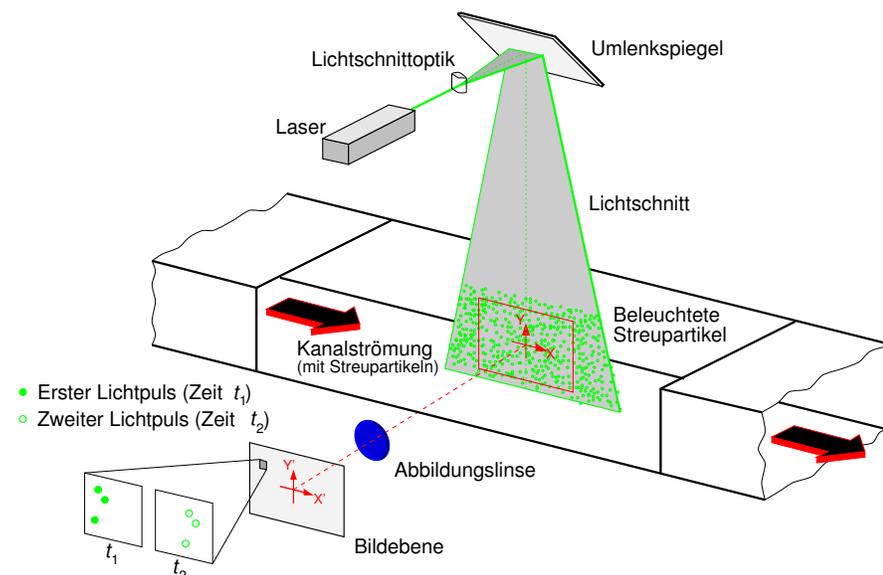


Abbildung 2.2: Übersichtsskizze einer PIV-Messung mit den Hauptkomponenten (Laser, Kamera, Partikeln) und einer Darstellung der Auswertefenster zweier Bilder [Raffel *et al.* 1998]

## Messprinzip

Im Folgenden werden zunächst die einzelnen Komponenten und deren Zusammenspiel für eine PIV-Messung und Auswertung getrennt dargestellt.

**Partikel:** Der Strömung werden Partikel beigemischt. Die Optimierung der Partikel hinsichtlich Masse und Größe ermöglicht

- eine vernachlässigbare Differenz zwischen Partikelgeschwindigkeit und Strömungsgeschwindigkeit, d.h. kein Schlupf und
- ein mit der verfügbaren Laserleistung ausreichend großes Partikelbild, d.h. es wird genug Licht gestreut, sodass die Aufzeichnung des Partikelbildes mit Hilfe der Kamera und Objektiv möglich ist.

Erfahrungen vieler Anwender zeigen, dass Partikeldurchmesser von ca.  $\approx 1 \mu\text{m}$  das Optimum für die Anwendung des Verfahrens in der Aerodynamik darstellen. Die Partikelbilddurchmesser auf dem Kamerasensor sind entsprechend der Beugungsbegrenzung (Gl. 2.2) infolge der geometrischen Abbildung und der optischen Aberrationen größer (z.B. ca.  $\approx 20 \mu\text{m}$ ).

$$d_{min} = 2,44f_{\#}(M + 1)\lambda \quad (2.2)$$

**Beleuchtung der Partikel:** Die Beleuchtung der Partikel innerhalb einer Ebene (Licht-schnittebene) ermöglicht die Aufnahme der Partikelbilder durch das Aufnahmesystem i.A. Kamera mit Objektiv. Für eine PIV-Messung werden die Partikel *zweimal* beleuchtet und i.A. *zwei* Aufnahmen gemacht. Indem die Beleuchtungszeit der Partikel sehr kurz ist, kann die Abbildung der Partikelbilder scharf erfolgen. Um bei kurzer Belichtungszeit helle Partikelbilder zu erhalten, ist Licht hoher Intensität erforderlich. Entsprechend besteht die Beleuchtungsquelle des PIV-Systems der DLR Göttingen aus Neodym Yttrium-Aluminium-Granat (Nd-YAG)-Pulslasern, die eine Pulsdauer von ca. 6 ns haben. Bei einem Puls wird eine Energie von ca. 320 mJ freigesetzt.

**Aufnahmesystem:** Die Aufnahme des durch die Partikel gestreuten Lichtes wird durch eine Kamera mit Objektiv realisiert. Heute werden dafür i.A. CCD (Charge Coupled Device)-Kameras benutzt, die zwei unterschiedliche Bilder schnell hintereinander aufnehmen können (= Doppelbild).

**Auswertung:** Die Auswertung des Doppelbildes geschieht indem die Aufnahmen in kleinere Auswertefenster unterteilt werden. Innerhalb der Auswertefenster wird die bezüglich ihrer Implementation auf *Fast-Fourier-Transformationen* (FFT's) basierende zweidimensionale Kreuzkorrelation zwischen den Intensitätsverteilungen der einzelnen Partikelbilder durchgeführt. Die jeweilige Lage des Maximums der Ergebnisfunktion der Kreuzkorrelation bestimmt die Verschiebung der Partikelbilder von der ersten zur zweiten Aufnahme des Doppelbildes innerhalb des Auswertefensters. Durch eine geeignete Anpassung einer Kurve (z.B. 3-Punkt-Gauss-Fit) an die Graustufenverteilung des Ergebnisses kann das Maximum mit einer Genauigkeit von etwa einem Zehntel Pixel (engl. kurz für Picture Element) bestimmt werden. Die so ermittelte Partikelbildverschiebung kann mit Hilfe der Zeit zwischen den beiden Aufnahmen und des Aufnahmemaßstabes in örtliche Geschwindigkeiten umgerechnet werden, wenn die Dauer des Laserlichtblitzes klein gegenüber dem Belichtungsabstand der beiden Bilder ist.

### Eigenschaften der Messtechnik

Da die Ermittlung der lokalen Geschwindigkeiten innerhalb der ganzen durch den Lichtschnitt beleuchteten und die Kamera aufgezeichneten Ebene erfolgt, wird ein Geschwindigkeitsfeld ermittelt.

Wegen der bei der Verwendung von Pulslasern erzielbaren kurzen Messzeit in der Größenordnung von Mikrosekunden, hat sich diese Messtechnik besonders für die Untersuchung von instationären Strömungen bewährt.

Im einfachsten Fall besteht der Aufbau nur aus den folgenden Elementen:

- Partikel in der zu untersuchenden Strömung (entweder beigefügt oder natürlich vorhanden)
- Vorrichtung zur Beleuchtung der Partikel i.A. mit einem gepulsten Laser und einer Aufweitung des Laserstrahls zu einer Lichtschnittebene mit einer geeigneten Lichtschnittoptik
- Kamera zur Aufnahme des durch die Partikel gestreuten Lichtes in einem Doppelbild oder einem doppelt belichteten Bild

- Rechner zur Auswertung der beiden Bilder durch die Kreuzkorrelation einzelner Auswertefenster

Einfach gesprochen legt der Algorithmus der Kreuzkorrelation die beiden Auswertefenster der ersten und zweiten Aufnahme übereinander und bestimmt, ausgehend von jedem einzelnen Partikelbild, die Abstände zu allen anderen Partikelbildern innerhalb des Auswertefensters. Der am häufigsten auftretende Entfernungsabstand ist die allgemeine Verschiebung der Partikelbilder und damit die Ausgabe des Algorithmus: Für jedes Auswertefenster wird so ein Verschiebungsvektor bestimmt. Die Auflösung dieses Messsystems ist dadurch nach unten auf die Größe der Auswertefenster nach oben durch den gesamten Aufnahmeausschnitt begrenzt. Der Algorithmus der Kreuzkorrelation ist tatsächlich aufwendiger, eine umfassende Darstellung der Theorie ist z.B. bei Raffel *et al.* [1998] zu finden.

Bei einer CCD-Kamera besteht die Bildebene aus einem zweidimensionalen Feld von Pixeln, die jeweils die einfallende Lichtintensität als Graustufenwert registrieren.

### Stereo-PIV

Die Aufnahme *eines* Ausschnittes des Lichtschnitts durch *zwei* Kameras mit unterschiedlicher Position erlaubt die Bestimmung der dritten Geschwindigkeitskomponente der Strömung (Stereo-PIV). Das Vorgehen bei der Auswertung wird im Folgenden kurz dargestellt.

**Kalibrierung des Systems** Ein Kalibriergitter wird genau an die Position des Lichtschnitts gebracht und von beiden Kameras aufgenommen. Mit Hilfe dieser Aufnahmen kann die Kalibrierung des Systems hinsichtlich der genauen Anpassung der beiden Stereo-Kamerabildausschnitte und der Bestimmung der lokalen Aufnahmemaßstäbe erfolgen. Diese Schritte sind in dem Programm: T01 von Ehrenfried [2002] zusammengefasst.

**Transformation der Aufnahmen** Mit Hilfe der lokalen Aufnahmemaßstäbe können die Partikel-Aufnahmen entzerrt werden. Die Definition der Transformationsmatrix geschieht für jede Kamera getrennt entsprechend der Kalibrieraufnahme

**Kontrolle der Transformation** Indem die jeweils ersten Partikel-Aufnahmen der beiden Kameras mit sehr großen Auswertefenstern korreliert werden, kann die Transformation kontrolliert werden: Ergibt sich eine Verschiebung, ist das Kalibriergitter *nicht* an der Position des Lichtschnitts aufgezeichnet worden. Entsprechend der ermittelten Verschiebung der Aufnahmen muss die Transformationsmatrix korrigiert werden.

**Korrelation der Doppelbilder** Nachdem die Doppelbilder so transformiert sind, dass die sich ergebenden Bildausschnitte und Maßstäbe der beiden Kameras übereinstimmen, werden alle Doppelbilder mit Hilfe der jeweiligen kontrollierten Transformation entzerrt. Die Korrelation des jeweils ersten Bildes einer Kamera mit deren zweiten ergibt die lokalen Verschiebungsvektoren, die in die Ermittlung der örtlichen Geschwindigkeit eingehen. Die Auswertefenstergröße ist dabei so klein wie möglich zu definieren, um die Auflösung des System zu optimieren. Die untere Grenze wird dabei durch die Anzahl der Partikelbildpaare gesetzt, die noch erforderlich ist, um eine statistische Auswertung zu ermöglichen.

**Bestimmung der drei räumlichen Geschwindigkeitskomponenten** Mit Hilfe der Aufnahmewinkel, der Lichtschnittposition und der Kamerapositionen kann aus den

beiden entzerrten zweidimensionalen Vektorfeldern ein Vektorfeld mit drei Komponenten in der Lichtschnittebene bestimmt werden. Mit Kenntnis der Zeit zwischen den beiden Aufnahmen des Doppelbildes lassen sich die drei lokalen Geschwindigkeitskomponenten der Partikel innerhalb der Ebene berechnen, z.B. [Raffel *et al.* 1998], [Schröder 2001].

Die PIV-Messtechnik wird z.Zt. dahingehend erweitert, dass die Partikelbilder nicht mehr auf einem Sensor gespeichert werden, sondern in einem Hologramm. Wenn entsprechend nicht nur eine Ebene, sondern ein ganzes Volumen beleuchtet wird, können mit dieser Messtechnik die lokalen Geschwindigkeiten eines ganzen Strömungsvolumens bestimmt werden, z.B. [Green *et al.* 1991], [Schröder 2001].

### Beispiel einer Anwendung von PIV zur Wirbelvermessung

Im Folgenden wird eine Anwendung dargestellt, die belegt, dass PIV auch bei Flugreynoldszahlen anwendbar ist [Klinge *et al.* 2001]. Untersucht wurde ein Hubschrauber des DLR

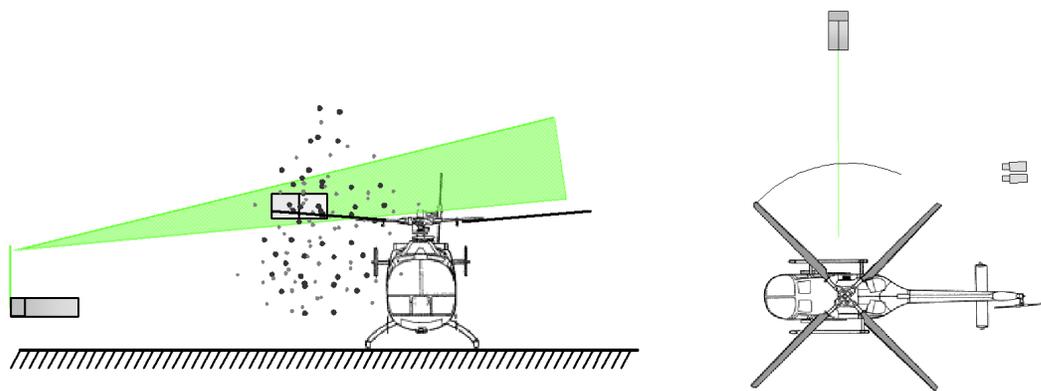


Abbildung 2.3: Skizze des PIV-Aufbaus

Braunschweig vom Typ MBB 105 mit vier Rotorblättern (NACA 23012, Durchmesser 9,82 m, Flügelfläche 5,25 m<sup>2</sup>, Flügeltiefe 0,27 m) im Schwebeflug (Auftrieb 2000 kg). Um die Lage der Untersuchungsebene relativ zum Rotor einfach bestimmen zu können, war der Hubschrauber während dieses Versuchs fest mit dem Boden verbunden. Die Rotordrehzahl betrug 424 U/min, die Geschwindigkeit der Blattspitzen war 218 m/s. Abbildung 2.4 zeigt ein Ergebnis dieser Messung: Das Geschwindigkeitsfeld bei einem Schnitt senkrecht zur Wirbelmittelachse. Diese Messung ist unter schwierigen Verhältnissen durchgeführt worden: Bei Tageslicht und im Freien. Die daraus entstandenen Probleme hinsichtlich der Partikelführung und der geregelten Belichtung der Kameras ausschließlich durch das von den Partikeln gestreute Laserlicht und deren Lösung können bei Raffel *et al.* [2001] nachgelesen werden.

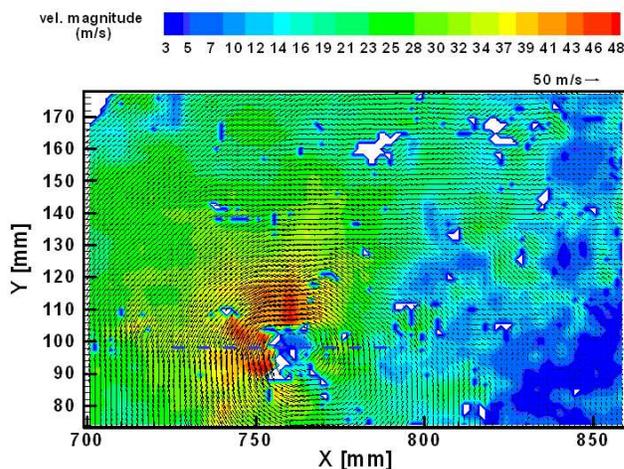


Abbildung 2.4: Beispiel einer PIV-Messung: Schnitt senkrecht zur Wirbelachse eines Hubschrauberblattspitzenwirbels [Raffel *et al.* 2001]

### 2.2.1.2 Geschwindigkeitsbestimmung mit LIDAR

LIDAR steht für **L**Ight **D**etection **A**nd **R**anging. Das Prinzip von LIDAR ist vergleichbar mit RADAR, nur dass hier eine andere Frequenz des Senders benutzt wird: Ein Laserlichtstrahl wird ausgesendet. Die Reflektion dieses Lichtstrahls an Partikeln, z.B. Kondensationskernen, die sich immer in der Luft befinden, kann durch einen Detektor aufgenommen werden. Die Frequenz des ausgesendeten Lichtstrahls wird durch die Streuung an den Partikeln verändert, wenn diese sich bewegen. Ähnlich wie bei der Laser Doppler Anemometrie (LDA) kann aus der Doppler-Frequenz die Geschwindigkeit des Partikels bestimmt werden. Indem die Zeit zwischen der Aussendung des Laserstrahles und der Detektion der Reflektion bestimmt wird, kann zusätzlich die Entfernung des reflektierenden Partikels bestimmt werden. Mit LIDAR wird entsprechend ein strahlförmiges Volumen vermessen, das mehrere hundert Meter lang sein kann. Um das Geschwindigkeitsfeld eines Volumens zu vermessen, muss dieses Raumrichtung für Raumrichtung abgetastet werden. Aus den Geschwindigkeitsinformationen einer Richtung kann anschließend das Geschwindigkeitsfeld des untersuchten Volumens zusammengesetzt werden. Indem die Abtastung des Volumens innerhalb hinreichend kurzer Zeit durchgeführt wird, können auch instationäre Strömungsfelder mit Einschränkungen aufgelöst werden.

Erforderliche Komponenten:

- Laser
- Empfänger
- elektromotorisch angetriebene Spiegelkombination, die das schnelle Abtasten des Untersuchungsvolumens ermöglicht

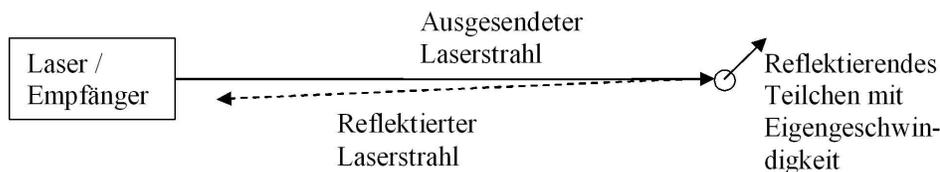


Abbildung 2.5: LIDAR-Prinzipbild

### Eigenschaften

Diese Messtechnik wird erst seit kurzem für Geschwindigkeitsmessungen eingesetzt. Die zum Abtasten der zu vermessenden Fläche notwendige schnelle Bewegung des Lichtstrahls stellt besondere Anforderungen an den Aufbau. Entsprechend sind die heute (2003) erreichbaren Messgenauigkeiten Gegenstand erheblicher Verbesserungsbemühungen. Mit diesem Verfahren wurden z.B. die Wirbelschleppen von landenden Flugzeugen bestimmt [Harris *et al.* 2002]. Insbesondere die erfolgreich durchgeführte Untersuchung des Flughafens Frankfurt a.M. auf Wirbelschleppen haben die Verwendbarkeit dieses Messsystems für die Wirbelvermessung gezeigt. Die Ausgabe dieser Messtechnik ist ein komplettes Geschwindigkeitsfeld: Für jeden abgetasteten Punkt kann ein zweidimensionaler Geschwindigkeitsvektor bestimmt werden.

### 2.2.2 Dichtemessverfahren

Die Besonderheit der Wirbelströmung kann, gemäß dem vorstehenden Abschnitt als ein um einen Punkt rotierendes Fluid verstanden werden. Aufgrund der Drehung wirken innerhalb des Fluids Zentrifugalkräfte, die im Wirbelmittelpunkt zu einer geringeren Dichte führen. Die daraus resultierende Dichteverteilung, lässt Rückschlüsse auf die Wirbelstärke und Wirbelposition zu.

Die Untersuchung der Position und Stärke von kompressiblen Wirbeln kann entsprechend sehr effektiv durch Dichtemesstechniken realisiert werden: Feldvermessende Messmethoden bieten einen guten Überblick über die Gesamtstruktur der Strömung.

### Verbindung zwischen der Lichtstrahlablenkung und dem Brechungsindex

Die hier vorgestellten Verfahren basieren auf der Ablenkung von Lichtstrahlen aufgrund von Brechungsindex-Variationen. Das bekannte Wissen auf diesem Gebiet wird z.B. in Liepmann *et al.* [1957] sehr umfassend dargestellt. Der Brechungsindex eines Materials ist eine physikalische Eigenschaft, die Lichtausbreitungsgeschwindigkeit innerhalb dieses Materials im Vergleich zur Lichtgeschwindigkeit im Vakuum beschreibt:

$$n_1 = \frac{c_0}{c_1} \quad (2.3)$$

$n_1$  Brechungsindex des zu untersuchenden Mediums

$c_0$  Lichtgeschwindigkeit im Vakuum ( $c_0 \cong 3,01 \cdot 10^8 m/s$ )

$c_1$  Lichtgeschwindigkeit innerhalb des Materials

Der Brechungsindex aller Materialien ist von deren thermodynamischem Zustand (Druck, Dichte, Temperatur) und der Wellenlänge des Lichtes  $\lambda$  abhängig und kann für die meisten Fälle z.B. bei Liepmann *et al.* [1957] nachgelesen werden. Mit Hilfe der Lorenz-Lorentz

Gleichung (Gl. 2.4) kann die Brechzahl anderer thermodynamischer Zustände bestimmt werden.

$$\frac{1}{\rho} \cdot \frac{n^2 - 1}{n^2 - 1} = \frac{1}{\rho_0} \cdot \frac{n_0^2 - 1}{n_0^2 + 2} = konst. \quad (2.4)$$

Für Gase ist die Brechzahl  $n \approx 1$ , somit lässt sich diese Gleichung linearisieren (Gl.2.5 definiert durch Gladstone-Dale):

$$\frac{n - 1}{\rho} = \frac{n_0 - 1}{\rho_0} = konst. = G(\lambda) \quad (2.5)$$

Die Konstante G ist damit, wie die Brechzahl, eine Materialkonstante, die zusätzlich zu dem thermodynamischen Zustand des Materials von der Wellenlänge des Lichts abhängt. Bei bekannter Wellenlänge sind damit Brechzahl und Dichte eindeutig verknüpft. Indem das Brechungsindexfeld bekannt ist, kann mit Hilfe des allgemeinen Gasgesetzes (Gl.2.6) die Druck- oder Temperaturverteilung bestimmt werden, wenn der jeweils andere Parameter bekannt ist.

$$p = \rho \cdot R \cdot T \quad (2.6)$$

Treten Lichtstrahlen durch Regionen mit inhomogenen Brechungsindizes senkrecht zur Lichtausbreitungsrichtung, ändert sich aufgrund der unterschiedlichen Lichtausbreitungsgeschwindigkeiten die Lichtausbreitungsrichtung: Das Licht wird gebrochen. Der Ablenkungswinkel kann dadurch in Abhängigkeit der Brechungsindex-Inhomogenität  $\frac{dn}{dy}$  und dessen Länge L beschrieben werden [Liepmann *et al.* 1957],:

$$\tan \varepsilon = \int_0^L \left( \frac{1}{n} \frac{dn}{dy} \right) dx \quad (2.7)$$

Gleichung 2.7 erklärt die Ablenkung von Lichtstrahlen aufgrund von Brechzahländerungen. Entsprechend ist auch die umgekehrte Anwendung dieses Verhältnisses möglich, die für die quantitative Auswertung von Messergebnissen benutzt wird: Bei bekanntem Ablenkungsort und bekannter Ablenkungslänge kann aus dem Ablenkungsbetrag der Lichtstrahlen der Brechungsindexgradient bestimmt werden. Mit Hilfe dessen kann bei bekannter Temperatur auf die Dichteverteilung geschlossen werden. Die Ablenkung des Lichtstrahles kann nur durch *die* Brechungsindexgradienten erfolgen, die senkrecht zur Lichtausbreitungsrichtung sind. *Alle* Brechungsindex-Variationen auf dem Lichtweg, die diese Bedingung erfüllen, brechen damit den Lichtstrahl. Die Information, *wo* der Lichtstrahl gebrochen wurde, ist aus der Ablenkung *nicht* zu entnehmen. Die Benutzung tomographischer Systeme umgeht dieses Problem, indem das zu untersuchende Objekt unter mehreren unterschiedlichen Blickwinkeln aufgenommen wird. Mit der integralen Lösung der dabei gewonnenen, unterschiedlichen Lichtstrahlverschiebungen lässt sich das Dichtefeld rekonstruieren, z.B. [Dillmann 1997], [Lira 1995].

### 2.2.2.1 Schlierenverfahren

Ein Schlierenverfahren wurde bereits 1864 von A. Toepler entwickelt und zählt noch heute zu den Standardmesstechniken der Strömungsmechanik. Ein umfassendes Werk über das Schlierenverfahren und die Schattenphotographie ist "Schlieren and Shadowgraph techniques" von Settles [2001].

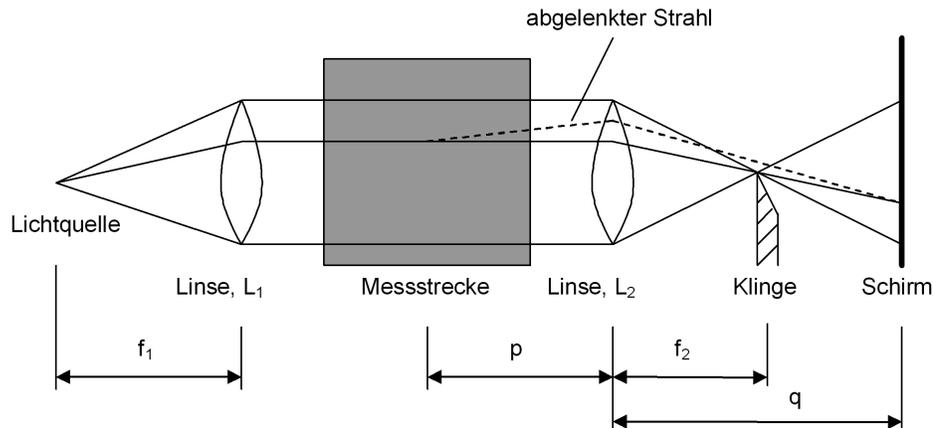


Abb. 1.8: Schlierensystem mit Linsen

Abbildung 2.6: Anordnung einer Schlieren – Messapparatur

### Prinzip

Die Lichtstrahlen einer Lichtquelle werden mit Hilfe einer Linse oder eines Hohlspiegels gleichgerichtet und fallen durch die Meßstrecke. Dichtegradienten in der Strömung führen zu Brechungsindexgradienten, die die Lichtstrahlen ablenken. Auf der anderen Seite der Meßstrecke werden die Lichtstrahlen durch eine weitere Linse auf einen Punkt fokussiert und fallen dann beispielsweise auf eine Mattscheibe. Um die abgelenkten Lichtstrahlen sichtbar zu machen, kann eine Halbblende (scharfe Klinge), z.B. von unten in den Fokuspunkt eingebracht werden, sodass etwa die Hälfte der Lichtstrahlen geblockt werden. Die nach unten abgelenkten Lichtstrahlen können dadurch nicht mehr auf die Mattscheibe fallen, es entstehen dunkle Bereiche. Die nach oben abgelenkten Lichtstrahlen passieren die Klinge und ergeben so auf der Mattscheibe hellere Bereiche. Wenn der Aufbau (Gl.2.8) erfüllt, visualisieren die Helligkeitsunterschiede die erste Ableitung der Brechungsindizes.

$$\frac{1}{q} + \frac{1}{p} = \frac{1}{f_2} \quad (2.8)$$

Für diese Messtechnik sind folgende Komponenten erforderlich:

- Lichtquelle
- Linsen
- Halbblende
- Mattscheibe oder Sensor

### Eigenschaften

Der aufwendige Aufbau, der eine genaue Ausrichtung der optischen Komponenten erfordert, lässt eine Anwendung dieser Meßtechnik außerhalb des Labors oder des Windkanals nur schwer zu.

Die exakt auswertbare Aussage über den Ort der Dichteänderung stellt *ein* quantitatives Ergebnis der Messtechnik dar, wobei diese Aussage nur in der Ebene senkrecht zur Lichtausbreitungsrichtung getroffen werden kann. Die quantitative Auswertung der *Dichteänderungen* von Schlieren-Messungen erfolgte z.B. durch Schardin [1934].

### 2.2.2.2 Laser Speckle Photographie

Laser Speckle Photographie wurde an verschiedenen Stellen gleichzeitig als Verfahren zur Messung von Verformungen in der Festkörper-Mechanik, aber auch zur Bestimmung von Dichtegradienten eingesetzt [Debrus *et al.* 1972, Köpf 1972]. Intensives Laserlicht, wird z.B. durch eine Linse parallelisiert und fällt auf eine Mattscheibe. Die unterschiedliche Streuung der Lichtstrahlen an der rauhen Glasseite ergibt Interferenzen. Diese machen sich in einer ungleichmäßigen Helligkeitsverteilung bemerkbar, es entstehen hellere und dunklere Flecken (engl.: Speckle) der Mattscheibe. Wird zwischen Kamera und Mattscheibe das zu untersuchende Brechungsindexgradientenfeld eingefügt, werden die Lichtstrahlen abgelenkt: die Speckle verschieben sich. Das Brechungsindexfeld kann auch, wie Liu und Merzkirch [1989] gezeigt haben, zwischen Parallelisierungslinse und Mattscheibe eingefügt sein (Abb. 2.7). Diese Verschiebung kann durch besondere Hilfsmittel quantifiziert werden,

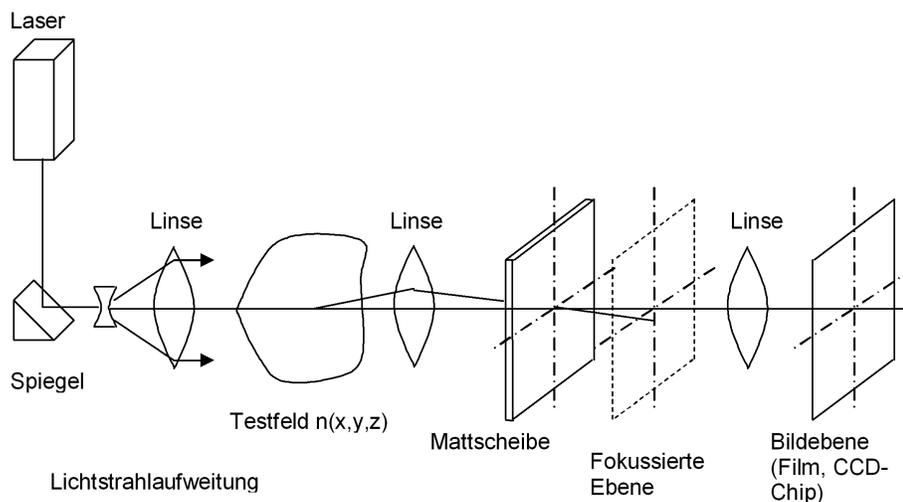


Abbildung 2.7: Prinzip eines Aufbaus für Speckle Photographie nach Liu und Merzkirch [1989] mit parallelem Strahlengang

da die Speckle aufgrund ihrer unregelmäßigen Form wiedererkennbar sind. Mit der Entwicklung der Korrelationstechniken und der Unterteilung des Bildes in Auswertefenster, ist die Quantifizierung generell (für Speckle genauso wie für Partikel) möglich geworden. Der effektivste Algorithmus ist auch hier die Kreuzkorrelation.

Mit dieser Messtechnik sind in den letzten Jahren auch quantitative Strömungsuntersuchungen an dreidimensional achsensymmetrischen Dichtefeldern durchgeführt worden, z.B. [Liu *et al.* 1989]. Entsprechend kann die Lichtstrahlablenkung mit Gl. 2.7 in eine integrale Dichteinformation umgerechnet werden. Dadurch ist allgemein die Bestimmung der Dichte

möglich. Fomin [1998] gibt in seinem Buch “Speckle Photography for Fluid Mechanics Measurements” einen guten Überblick über das bekannte Wissen.

Erforderliche Komponenten:

- Laser
- Linsen
- Mattscheibe
- Kamera

### **Eigenschaften**

Bei diesem Verfahren werden die ersten Ableitungen der Brechungsindizes bestimmt. Die Verschiebungen der Speckle können damit zu lokalen quantitativen Brechungsindizes aufintegriert werden, wenn im Brechungsindexfeld oder an dessen Rand ein Referenzwert bekannt ist. Zusätzlich muss die Position der Lichtstrahlableitung bekannt sein. Die Anstrengungen bezüglich der Verbesserung der Korrelationstechniken auf die Bestimmung der Speckle- und Partikelbildverschiebungen haben die Entwicklung z.B. der PIV-Messtechnik ermöglicht.

#### **2.2.2.3 Hintergrundschlieren Methode (engl.: BOS = Background Oriented Schlieren method)**

Erstmalig durch Meier [1999], Raffel *et al.* [2000] und Richard *et al.* [2000] vorgestellt, ist diese Messtechnik relativ neu. Das Prinzip ähnelt dem Toeplerschen Schlieren-Verfahren oder Laser Speckle Photographie, weist aber einen entscheidenden Unterschied auf: Statt parallelen Lichtes wird normales, divergentes Licht benutzt. Dieser Unterschied vereinfacht den Versuchsaufbau erheblich: Es ist nur noch eine Kamera und ein Hintergrund erforderlich. Der zu untersuchende Dichtegradient (= die Schliere) bricht die vom Hintergrund gestreuten Lichtstrahlen. Dadurch werden die Hintergrundpunkte beim Messbild an einer anderen Stelle des Bildes als ohne Dichtegradienten, d.h. auf dem Referenzbild, abgebildet. Die Verschiebung dieser Punkte kann mit einem der üblichen PIV-Auswertelgorithmen mit Hilfe der Kreuzkorrelation bestimmt werden; die für PIV gemachten Anstrengungen bezüglich der Verbesserung von Genauigkeit, Peaklocking und Auflösung können direkt genutzt werden. Diese Vorteile haben u.a. Raffel *et al.* [2000] und Richard *et al.* [2000] genutzt, als sie die Hintergrundschlieren-Methode zum ersten Mal anwendeten. Die mit relativ einfachem Aufbau ermittelten, qualitativ hochwertigen Ergebnisse z.B. die Dichtegradienten-Sichtbarmachung sind der beste Beweis für das Potential dieses Messsystems [Raffel *et al.* 2000].

Erforderliche Komponenten: Kamera und Hintergrund.

### **Eigenschaften**

Die Kreuzkorrelation des Referenzbildes mit dem Messbild liefert die Richtung *und* den Betrag der Verschiebung. Damit bietet diese Messtechnik hinreichend Potential, das eine Erweiterung zu einem quantitativen System interessant macht [Klinge 2001].

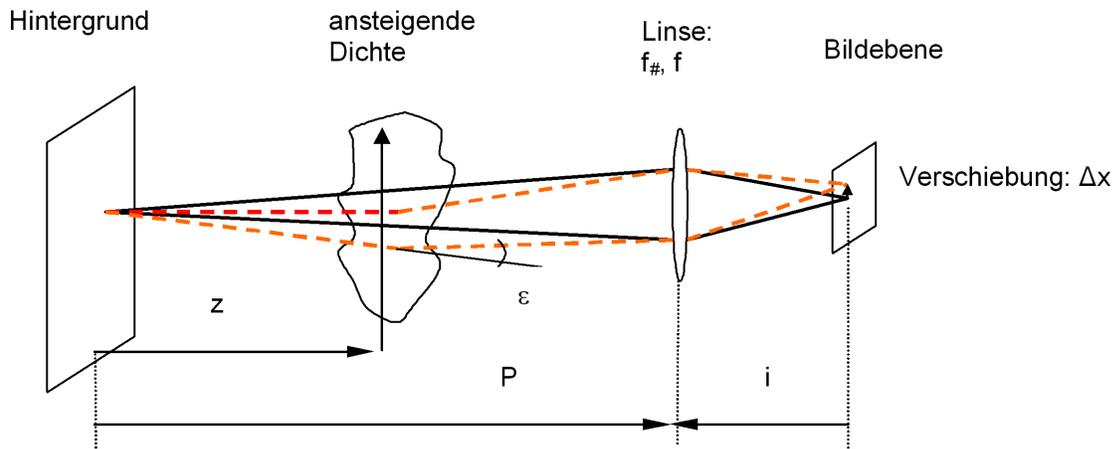


Abbildung 2.8: Prinzipskizze Hintergrundschlieren-Methode

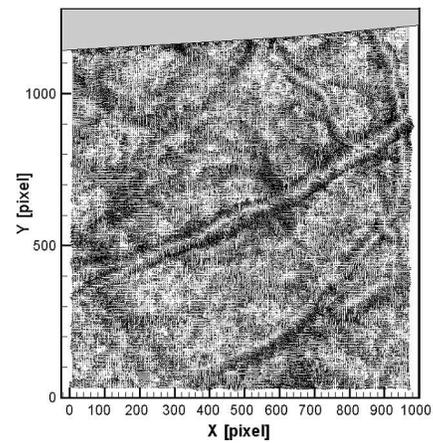


Abbildung 2.9: Visualisierung von Blattspitzenwirbel eines Hubschraubers mit der Hintergrundschlieren-Methode: Links: Der Versuchsaufbau aus der Kameraposition betrachtet, rechts: Blattspitzenwirbel (erkennbar als zylinderförmige Objekte), am oberen Bildrand: Das Rotorblatt [Raffel *et al.* 2000]

Der einfache Aufbau prädestiniert diese Messtechnik für die Messung und Sichtbarmachungen von Brechungsindexgradientenfeldern auch bei komplexen Versuchen. Als Hintergrund können allgemein optisch unregelmäßige Flächen mit zum optischen System passender Raumfrequenz (z.B. Asphalt- oder Grasflächen) dienen. Bei einigen Anordnungen kann ganz auf das Referenzbild verzichtet werden [Raffel *et al.* 2000]. Dabei bildet das Bild der ersten Kamera das Referenzbild der zweiten und umgekehrt.

M. Rein [Richard *et al.* 2000] hat bereits gezeigt, dass sich aus den lokalen Hintergrundpunkt-Verschiebungen lokale Dichteinformationen mit Hilfe der Poisson-Gleichung bestimmen lassen. Lourenco wendete dieser Gleichung erfolgreich für die Auswertung von Laser Speckle Aufnahmen an und kalibrierte die so gewonnenen Ergebnisse mit zusätzlichen Messungen [Lourenco *et al.* 2002].

### 2.3 Abschlußbemerkung zur Literaturübersicht: Aufgabenstellung der Arbeit

Die im ersten Abschnitt dieses Kapitels dargestellten Probleme bei der rechnerischen Bestimmung des Wirbelverhaltens bestehen u.a.:

- in der bisher nicht befriedigend entwickelten Theorie des Wirbelverhaltens allgemein
- in der Unsicherheit numerischer Verfahren auf Basis der Navier-Stokes-Gleichungen, wegen der fehlenden Möglichkeit Einflüsse von Transition, Turbulenz und Ablösung sicher zu berechnen
- in dem fehlenden Verständnis bezüglich des hochfrequenten instationären Verhaltens der Strömung aufgrund fehlender experimenteller Ergebnisse

Experimentell ermittelte Strömungsdaten sind infolgedessen nicht nur zur Überprüfung der rechnerisch bestimmten Strömungsfelder notwendig, sondern auch um das Verständnis der Strömungsmechanik hinsichtlich instationärer Wirbelfelder allgemein zu erweitern.

Die im zweiten Abschnitt dieses Kapitels dargestellten Strömungsmesstechniken erlauben die genaue Bestimmung des Geschwindigkeitsfeldes der Wirbelströmung. Geschwindigkeitsmessungen erfordern das Einbringen von Partikeln in die Strömung. Nur wenn diese Partikel der Strömung hinreichend folgen, entsprechen die gemessenen lokalen Geschwindigkeiten denen der Strömung.

Bei den Dichtemesstechniken kann nur die *gesamte* Brechung des Lichtes auf dem Weg zwischen Quelle und Sensor bestimmt werden. Dieser integrale Wert lässt apriori weder die Bestimmung der *lokalen* Dichteänderung noch des Ablenkungsortes zu. Eine quantitative Vermessung des Dichtefeldes der Wirbelströmung kann nur mit Einschränkung erfolgen. Die instationäre quantitative Vermessung dreidimensionaler Strömungsfelder erfordert die Erweiterung der bekannten Dichtemesstechniken.

Die Hintergrundschlieren-Methode ist zwar in den bisher vorgestellten Beispielen noch nicht als quantitatives Messverfahren zur Ermittlung absoluter Dichten eingesetzt worden, weist aber von allen vorgestellten Dichtemesstechniken das größte Potential zur Weiterentwicklung hinsichtlich der Genauigkeit und der Anwendbarkeit bei komplexen experimentellen Konfigurationen bei der Untersuchung von Wirbeln auf.

In Kombination mit PIV kann mit Hilfe der erweiterten Hintergrundschlieren-Methode das Verhalten eines Wirbels experimentell genauer als bisher ermittelt werden. Die *gleichzeitige*

Vermessung des Geschwindigkeits- und Dichtefeldes wird ermöglicht. Entsprechend wären dann unter einschränkenden Annahmen isotherme Strömungsfelder vollständig beschrieben. Die bisher durchgeführten Vermessungen von Wirbelströmungen zeigen instationäre Effekte auf, die nicht mit den bisherigen Theorien erklärt werden können. Dazu zählen insbesondere die hochfrequente Veränderung der Wirbelachse und der Zirkulationsverteilung. Es wurde bisher davon ausgegangen, dass dieses Mäanderverhalten auf Windkanaleinflüssen basiert und keine Relevanz für das Fernfeld der Wirbelströmung hat [Green 1996]. Da das Mäanderverhalten inzwischen auch in der realen Strömung außerhalb von Windkanälen nachgewiesen wurde [Harris *et al.* 2002] und Wechselwirkungen dieser instationären Zustände mit plötzlichen Zirkulationsverteilungsänderungen angenommen werden müssen, ist diese Erforschung von besonderem Interesse. Messungen von z.B. Orloff *et al.* [1971] konnten nachweisen, wie empfindlich die Wirbelströmung auf Störungen durch Hitzdraht- oder Drucksonden reagiert. Es wird vermutet, dass insbesondere dieses instationäre Wirbelverhalten die effektive Viskosität entscheidend beeinflusst und eine Erforschung dieser Effekte Aufschluss über die innerhalb dieser Strömung wirkenden Mechanismen gibt [Green *et al.* 1991]. Z.B. existiert bisher keine Erklärung dafür, dass das Mäanderverhalten des Wirbelkerns eine Abhängigkeit zur Reynoldszahl aufweist. Die zeitlich hochaufgelöste Vermessung von Wirbelströmungen, insbesondere hinsichtlich des Wirbelortes und der Zirkulationsverteilung, ermöglicht die Erforschung der Ursache dieser instationären Zustände und damit die Erweiterung des strömungsmechanischen Verständnisses des Themenkomplexes “Wirbelströmung”.

Die in der vorliegenden Arbeit dargestellte Erweiterung der Hintergrundschlieren-Methode zielt dementsprechend auf eine kurzzeitige Vermessung der Wirbelposition und der Zirkulationsverteilung. Die gleichzeitige Vermessung des Wirbels mit Stereo-PIV soll die Ergebnisse aus der Hintergrundschlieren-Methode hinsichtlich des Wirbelortes bestätigen und einen allgemeinen Vergleich der Strömungsdaten mit den rechnerisch ermittelten Daten ermöglichen.

## Kapitel 3

# Erweiterung der Hintergrundsclieren-Methode

Das im vorherigen Kapitel dargestellte Beispiel hat das Potential der Hintergrundsclieren-Methode aufgezeigt. Die wesentlichsten Parameter, die einen Hintergrundsclieren-Aufbau charakterisieren, sind in Tabelle 3.1 zusammengestellt.

Kurzzeichen	Einheit	Bezeichnung	im Versuchsaufbau variabel
<b>A</b>	mm	Auflösung des Systems	X
<b>AFGp</b>	Pixel	Auswertefenstergröße (in Pixel)	X
<b>AM</b>	mm	Abstand der Lichtkegelmittellinien	X
<b>e</b>	–	Verhältnis zwischen z und P	X
<b>e<sub>opt</sub>, e<sub>optimal</sub></b>	–	mit dem Abstand zwischen Hintergrund und Objektebene P normalisierte Entfernung $z_{opt}$	X
<b>E (= tan ε)</b>	rad	Empfindlichkeit des Systems	X
<b>f</b>	mm	Brennweite des Kameraobjektivs	X
<b>f<sub>#</sub></b>	–	Blendenzahl, relative Blendenöffnung	X
<b>FAH</b>	mm	Auswertefenstergröße auf dem Hintergrund	X
<b>i</b>	mm	Entfernung zwischen Objektivhauptebene und Bildebene	X
<b>M</b>	–	Vergrößerung des Systems	X
<b>n</b>	–	Brechzahl	–
$\frac{dn}{dx}$	–	Dichtegradient	–
<b>P</b>	mm	Abstand zwischen Objektivhauptebene und Hintergrund	X
<b>PGK</b>	mm	Pixelgröße auf der Kamerabildebene	–
<b>R</b>	mm	Durchmesser des - einen Punkt abbildenden - Lichtkegels	X
$\Delta x$	pixel	Hintergrundpunktverschiebung in x-Richtung	X
<b>z</b>	mm	Abstand zwischen Hintergrund und dem zu untersuchenden Objekt	X
<b>z<sub>gewählt</sub></b>	mm	gewählter Abstand zwischen Hintergrund und zu untersuchendem Objekt	X
<b>z<sub>opt</sub>, z<sub>optimal</sub></b>	mm	optimaler Abstand zwischen Hintergrund und zu untersuchendem Objekt	X

Tabelle 3.1: Parameter der Hintergrundsclieren-Methode

Die für die quantitative Vermessung der Wirbelströmung erforderliche Erweiterung der Messtechnik wird im Folgenden beschrieben. Nach der Entwicklung der theoretischen Grundlagen erfolgt jeweils die Überprüfung durch ein Experiment.

### 3.1 Auflösung und Empfindlichkeit

#### Abbildung der Hintergrundpunkte

Der Betrag der mit der Hintergrundschlieren-Methode ermittelten Verschiebungsvektoren hängt von den in Tab. 3.1 aufgelisteten Parametern ab. Einige dieser Parameter lassen sich durch den Versuchsaufbau verändern, andere sind durch die benutzten Komponenten festgelegt. Fast alle Parameter sind voneinander abhängig und beeinflussen sich gegenseitig und damit auch das Messergebnis.

Die räumliche Auflösung  $A$  des Messsystems ist definiert als der Abstand zweier Objekte mit unterschiedlichen Brechungsindizes die noch unterschieden werden können. Die Empfindlichkeit  $E$  des Messsystems ist definiert als der kleinste Ablenkungswinkel, der noch dargestellt werden kann. Dabei wird die Genauigkeit des verwendeten Kreuzkorrelationsalgorithmus mit einbezogen. Für die im vorliegenden Fall benutzte Software (PIVView) [Willert *et al.* 1991] kann ein ermittelter Verschiebungsvektor von 0,1 pixel noch als Messwert sicher erkannt werden, entsprechend wird die Empfindlichkeit gebildet (s.u.).

Ein heller Punkt auf dem Hintergrund streut auf ihn fallende Lichtstrahlen in alle Richtungen. Allerdings bilden nur *die* Lichtstrahlen, die durch das Objektiv (und die Blende) fallen, den Punkt auf der Bildebene (Aufnahmesensor) ab. Diese Lichtstrahlen liegen innerhalb eines Volumens, das sich von dem Punkt auf dem Hintergrund kegelförmig zur Blende aufweitet. Ein einzelner Punkt wird damit durch unendlich viele Lichtstrahlen auf der Bildebene abgebildet. Die Abbildung eines Hintergrundpunktes geschieht nur dann punktförmig auf der Bildebene, wenn das optische System der Linsengleichung (Gl. 3.1) entspricht.

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{P} + \frac{1}{i} \quad (3.1)$$

In diesem Fall ist der Hintergrund scharfgestellt. Erläuterungen, sowie theoretische Hintergründe über die Abbildung von kleinen Objekten sind bei Born *et al.* [1980] allgemein und bei Raffel [2002] speziell zu der Abbildung von Hintergrundpunkten zu finden. Lichtstrahlen, die von einem Punkt des Hintergrundes stammen, treffen ein Objekt, das sich zwischen Hintergrund und dem Kameraobjektiv befindet, immer an mehr Stellen als einem einzigen Punkt. In Abb. 3.1 sind die äußeren Lichtstrahlen des Lichtkegels dargestellt, die einen Punkt des Hintergrundes auf der Bildebene abbilden. Das optische System “Kamera mit Objektiv” ist durch eine Linse dargestellt, charakterisiert durch die Brennweite  $f$  und die relative Blendenöffnung  $f_{\#}$  und die Bildebene.

Indem das optische System nicht auf den Hintergrund, sondern auf das Objekt scharfgestellt wird, kann ein Punkt desselben einzeln untersucht werden (vergl. Abb. 3.2 unten). Diese Lösung ist nur in den Sonderfällen möglich, in denen die Tiefenschärfe des optischen Systems genügend groß ist, sodass der Hintergrund scharf abgebildet wird. Für die Hintergrundschlieren-Methode ist die scharfe Abbildung des Hintergrundes eine Voraussetzung: Mit abnehmender Schärfe nimmt die Korrelierbarkeit der Hintergrundpunkte ab. Faktisch ist das Fokussieren einer Schliere besonders schwierig, weil es keine Linien, Kanten, etc. gibt, deren Kontrast sich sichtbar verändert.

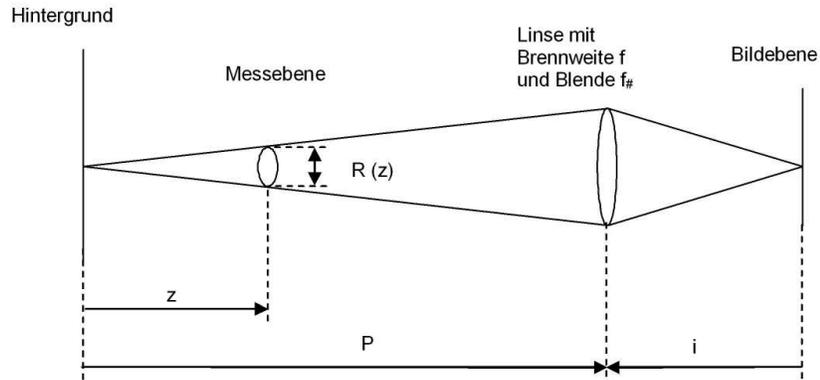


Abbildung 3.1: Abbildung *eines* Punktes durch Lichtstrahlen

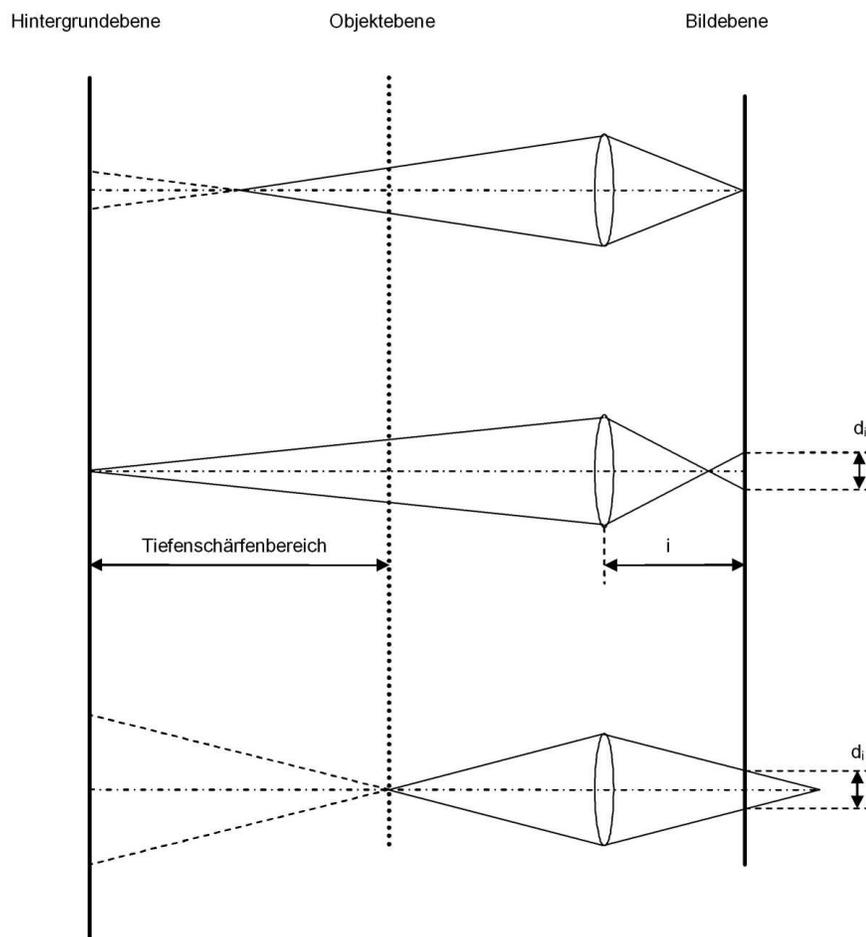


Abbildung 3.2: Fokussierung eines optischen Systems

Fokussieren eines Punktes heisst allgemein, diesen Punkt auf der Bildebene als Punkt abzubilden. Tatsächlich ist die Abbildung eines beliebig kleinen Punktes mit einem optischen System unmöglich: Die Beugungsbegrenzung als Funktion des Objektivs, der Wellenlänge und des Blendendurchmessers stellt die kleinste abbildbare Größe dar [Raffel 2002]. Der Bilddurchmesser  $d_i$  eines Punktes auf dem Hintergrund kann bis zu dieser Größe wachsen, ohne dass eine Unschärfe festgestellt werden kann. Infolgedessen liegt es nahe, die fokussierte Ebene zwischen Hintergrund und Objektebene zu legen, um dadurch sowohl Schliere als auch Hintergrund scharf abzubilden (Abb. 3.2 oben). Tatsächlich ist dieser Bereich sehr klein. Mit Hilfe des Strahlensatzes kann der Durchmesser  $d_i$  eines Punktes der *nicht* fokussierten Schliere auf dem Hintergrund bestimmt werden (Gl. 3.2). Dabei ist  $d$  der Durchmesser der Blende,  $f$  die Brennweite des Objektivs,  $M$  die Vergrößerung des optischen Systems und  $z$  der Abstand der Schliere zur fokussierten Ebene, dem Hintergrund.

$$d_i = d \cdot M \cdot \left( \frac{f \cdot (M + 1)}{f(M + 1) - M \cdot z} - 1 \right) \quad (3.2)$$

Im nächsten Abschnitt dieses Kapitels wird ein Versuch vorgestellt, bei dem u.a. auch Brechungsindexgradientenfelder untersucht wurden, die sich weit außerhalb des Tiefenschärfereiches befanden. Abbildung 3.3 zeigt die Aufnahme *einer* zweidimensionalen Brechungs-

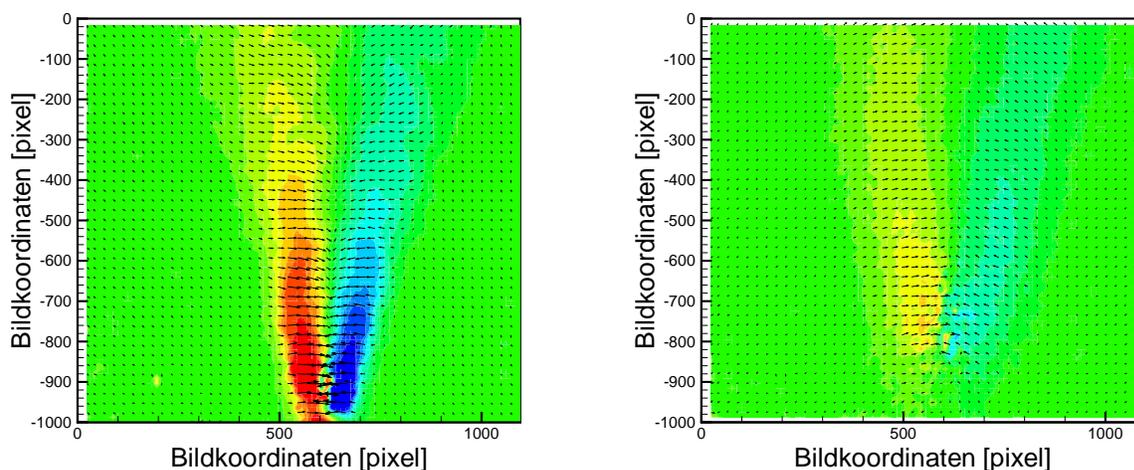


Abbildung 3.3: Hintergrundpunkt-Verschiebungsfelder *einer* zweidimensionalen Brechungsindexverteilung, die Verschiebungen in Abszissenrichtung sind farbcodiert (links:  $f_{\#} = 22$ , rechts:  $f_{\#} = 4$ )

indexfeldes aufgenommen mit kleiner und großer Blendenöffnung. Die Entfernung  $P$  zwischen Hintergrund und Linsenhauptebene beträgt 6 m, die Entfernung  $z = 3,5$  m, die Brennweite des verwendeten Objektivs ist  $f = 300$  mm. Erläuterungen zum Versuchsaufbau und dem untersuchten Objekt dieser Abbildungen kann dem nächsten Abschnitt bzw. im Detail Klinge [2001] entnommen werden. In beiden Fällen befindet sich die untersuchte Schliere außerhalb der Tiefenschärfe. In der linken Abbildung sind die Verschiebungen schwächer als in der rechten. Der Grund dafür ist darin zu sehen, dass ein Punkt des Objekts in der rechten Abbildung mit einem gegenüber der linken Abbildung ca. 6 mal größeren Durchmesser

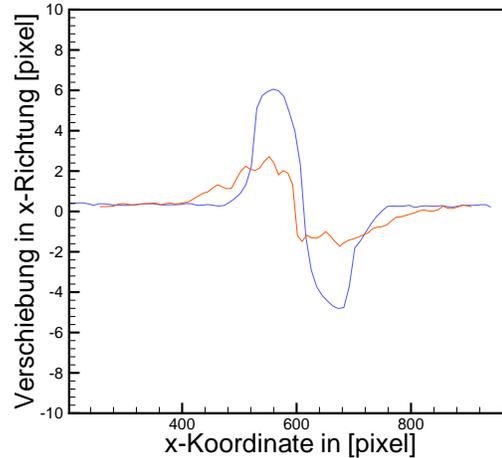


Abbildung 3.4: Blendeneinfluss: horizontale Linien aus Abb. 3.3. (Verschiebungen aus Abb. 3.3 links: blaue Linie für  $f_{\#} = 22$ , rechts: rote Linie für  $f_{\#} = 4$ )

$d_i$  auf der Bildebene abgebildet wird. Die direkt nebeneinander liegenden unterschiedlichen Brechungsindexgradienten können nicht mehr aufgelöst werden; das Verschiebungsfeld kann die real auftretenden Lichtstrahlableitung nicht wiedergeben. Offensichtlich ist die Auflösung des Systems im rechten Bild ungenügend. Da die beiden Aufbauten zu unterschiedlichen Ergebnissen führen, muss eine Regel geschaffen werden, die die Bewertung des Aufbaus hinsichtlich Auflösung und Empfindlichkeit erlaubt. Aus beiden Verschiebungsfeldern (Abb. 3.3) ist jeweils eine horizontale Linie bei  $y$ -Koordinate = -800 [pixel] entnommen worden, die in Abb. 3.4 vergleichend dargestellt ist. Es ist erkennbar, dass die aufgezeichneten Lichtstrahl-Verschiebungen bei den unterschiedlichen Blendenöffnungen stark differieren.

Die Untersuchung von Dichtegradienten, die sich nicht innerhalb der Tiefenschärfe des optischen Aufbaus befinden, muss entsprechend dieser Erfahrungen Restriktionen unterworfen werden, wenn das Verschiebungsfeld quantitativ ausgewertet werden soll.

### 3.1.1 Kriterium zur Auslegung des optischen Aufbaus

Die quantitative Auswertbarkeit der ermittelten Verschiebungsvektoren ist nur dann gewährleistet, wenn zwei nebeneinanderliegende Vektoren gerade zwei unabhängige Bereiche innerhalb des zu untersuchenden Objektes repräsentieren. Mit Hilfe des Strahlensatzes kann der Abstand der Mittellinien  $AM$  zweier Lichtkegel (Gl. 3.3) bestimmt werden (vergl. Abb. 3.5).

$$AM(z) = \left( \frac{PGK \cdot AFGp}{M} \right) \cdot \left( 1 - \frac{z}{P} \right) \quad (3.3)$$

mit

$$e = \frac{z}{P}$$

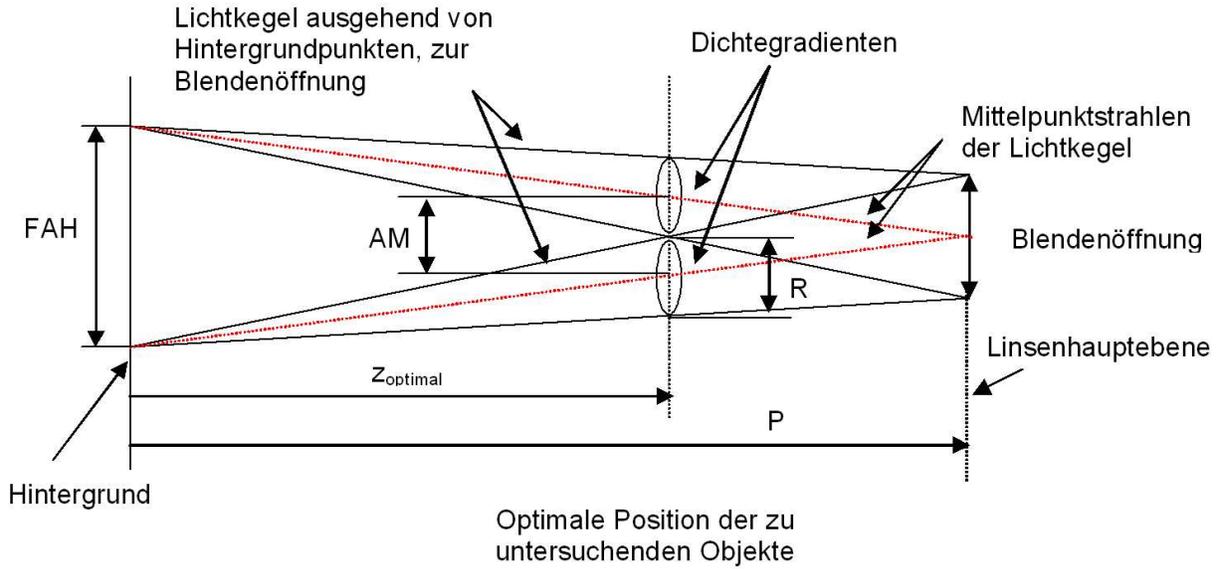


Abbildung 3.5: Kriterium für die quantitative Auswertbarkeit von Hintergrundschiere-Messungen:  $AM = R$

und

$$FAH = \frac{PGKp \cdot AFG}{M}$$

ergibt sich AM zu

$$AM(z) = FAH \cdot (1 - e) \quad (3.4)$$

Mit Hilfe des Strahlensatzes kann der Durchmesser des Lichtkegels innerhalb der zu untersuchenden Objektebene nach Gl. 3.5 bestimmt werden (vergl. Abb. 3.1).

$$R(z) = \frac{z \cdot f}{f_{\#} \cdot P} \quad (3.5)$$

Zwei unterschiedliche Brechungsindexgradienten des zu untersuchenden Objektes können nur dann als unterschiedliche Daten mit der Hintergrundschiere-Methode ermittelt werden, wenn die Lichtkegel zweier Punkte auf dem Hintergrund sich gerade im Objekt berühren, d.h.  $AM = R$  eingehalten wird. Der Abstand dieser beiden Punkte auf dem Hintergrund muss dabei der Größe eines Auswertefensters der Kreuzkorrelation entsprechen (vergl. Abb. 3.5). Mit der Voraussetzung  $AM = R$  ergibt sich eine Lösung für A (Gl. 3.7) und E (Gl. 3.8) in Abhängigkeit von  $f$ ,  $e_{optimal}$ ,  $P$  und  $f_{\#}$ .  $e_{optimal}$  ist dabei der Abstand zwischen Hintergrund und Objekt, der dem oben genannten Kriterium entspricht.

$$e_{opt} = \left( \frac{FAH}{\left(\frac{f}{f_{\#}} + FAH\right)} \right) \quad (3.6)$$

$$A = e_{opt} \cdot \frac{f}{f_{\#}} \quad (3.7)$$

$$E = \tan \varepsilon = \frac{0,1 \cdot PGK}{M \cdot e_{opt} \cdot P} \quad (3.8)$$

Gleichung 3.8 bestimmt die Empfindlichkeit als Funktion der Genauigkeit der Kreuzkorrelation. Der eingesetzte Wert 0,1 beschreibt den kleinsten Verschiebungswert, der mit der Kreuzkorrelation ermittelt wird (vergl. Erklärung am Anfang des Kapitels). Die Anwendung dieses Kriteriums ( $R = AM$ ), d.h. die Einstellung des korrekten  $z_{opt}$ , stellt sicher, dass sich in jedem Auswertefenster Punkte befinden, die durch Lichtstrahlen abgebildet worden sind, die jeweils durch eine *andere* Fläche des Objektes gefallen sind. Wenn  $z_{gewählt} > z_{opt}$ , enthalten zwei benachbarte Auswertefenster Anteile der gleichen Information des zu untersuchenden Objektes. Die bestimmten Verschiebungen enthalten in diesem Fall zumindest *Anteile* gleicher Lichtbrechungen des Objektes.

Wenn  $z_{gewählt} < z_{opt}$ , dann werden völlig verschiedene Bereiche des zu untersuchenden Objektes von Lichtstrahlen durchlaufen, die auf dem Kamerachip Punkte abbilden, die sich in einem Auswertefenster befinden. Für ein Auswertefenster wird durch die Kreuzkorrelation immer nur *ein* Verschiebungsvektor bestimmt, d.h. die Unterschiede in den Lichtstrahlablenkungen können nicht aufgelöst werden. Die Verschiebungen am Rande des Auswertefensters können dazu führen, dass Punkte nicht mehr innerhalb des Fensters liegen und dadurch bei der Kreuzkorrelation keinen Einfluss haben. Dieser Effekt lässt sich bei der Auswertung allgemein durch die Überlappung der Auswertefenster umgehen. Bei der Betrachtung der quantitativen Auswertbarkeit hingegen nicht. Da diese Hintergrundpunkt-Verschiebungen am Rand des Auswertefensters weniger, bzw. gar keinen Einfluss haben, ist eine gewisse Überschneidung tolerierbar. Wird  $z_{gewählt}$  größer als  $z_{opt}$  gewählt, ohne das  $d_i$  größer als AFGp wird, sind korrekte quantitative Ergebnisse erreichbar [Klinge 2000]. Diese Beobachtung stimmt mit der Vermutung von Richard *et al.* [2001] überein. Mit noch größeren  $z_{gewählt}$  und  $d_i > AFGp$ , sinkt die erreichbare Auflösung des Systems. Quantitative Messungen sind dann nur noch möglich, wenn die zu untersuchenden Dichtegradienten eine erheblich niedrigere Raumfrequenz aufweisen, als das System detektieren könnte. Werden Lichtstrahlen am Rande des Lichtkegels anders abgelenkt, als in dessen Mitte, wird der Hintergrundpunkt auf der Bildebene zu einer Fläche verzerrt. Da mit der Kreuzkorrelation der Mittelpunkt dieser Fläche bestimmt wird (siehe vorheriges Kapitel), ist der Einfluss der “Randlichtstrahlen” geringer als der der “Mittellichtstrahlen”. Entsprechend bleibt die Auflösung  $A$  für  $z_{gewählt} > z_{opt}$  kleiner als  $R$ .

### 3.1.1.1 Anwendung des Kriteriums ( $R = AM$ ) für quantitative Messungen

Mit größer werdendem  $z_{opt}$  wird auch die Empfindlichkeit des Systems größer, d.h. der kleinste abbildbare Winkel kleiner. Die Empfindlichkeit  $E$  gibt den kleinsten Ablenkungswinkel an, der noch detektiert werden kann. Dies hängt neben der Raumfrequenz des Hintergrundes und der Vergrößerung des Systems auch von der Qualität des Kreuzkorrelationsalgorithmus ab. Wenn durch ein gutes Hintergrundbild und eine geeignete Hüllkurve in der Korrelationsebene (z.B. 3-Punkt-Gauss-Fit) wesentliche Fehlerquellen wie beispielsweise das sogenannte “Peaklocking” (vergl. Kap.2.2.2.2) ausgeschlossen werden kann und Auswertefensterdeformationsalgorithmen eingesetzt werden, die eine weitere Fehlerminimierung ermöglichen, kann ein minimaler Versatz von 0,1pixel noch als echter Messwert ausgewertet werden. Mit Peaklocking wird ein Effekt bei PIV bezeichnet, der sich darin äußert, dass die Beträge der Verschiebungsvektoren überproportional oft natürliche Zahlen von Pixelwerten annehmen. Für ein Fallbeispiel mit den Versuchsparametern  $f = 135$  mm und  $f_{\#} = 22$  berechnet sich  $e_{opt}$  mit der dazugehörigen Auflösung und Empfindlichkeit in Abhängigkeit zur Entfernung  $P$  zu den in Abbildung 3.6 angegebenen Werten. Die drei Kurven in Abb. 3.6 sind *nicht* in ein Diagramm gezeichnet worden, um die Übersicht über die drei unterschiedlichen Or-

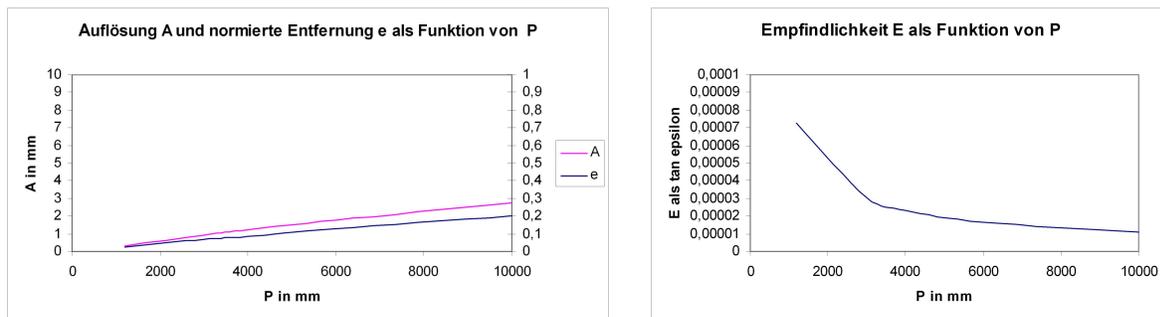


Abbildung 3.6: Auflösung und Empfindlichkeit eines Aufbaus für die Hintergrundsclieren-Methode (für  $f = 135 \text{ mm}$ ,  $f_{\#} = 22$ ,  $AFGp = 16 \text{ pixel}$ ,  $PGK = 0,0067 \text{ mm}$ )

dinaten zu wahren. Die beiden Parameter Auflösung und Empfindlichkeit wirken genau entgegengesetzt. Je kleiner  $z_{opt}$  wird, desto besser wird die Auflösung, d.h. der Wert für A kleiner und desto größer wird die Empfindlichkeit des Systems, d.h. die Ablenkungswinkel müssen größer sein, damit sie noch detektiert werden können. Die Empfindlichkeit

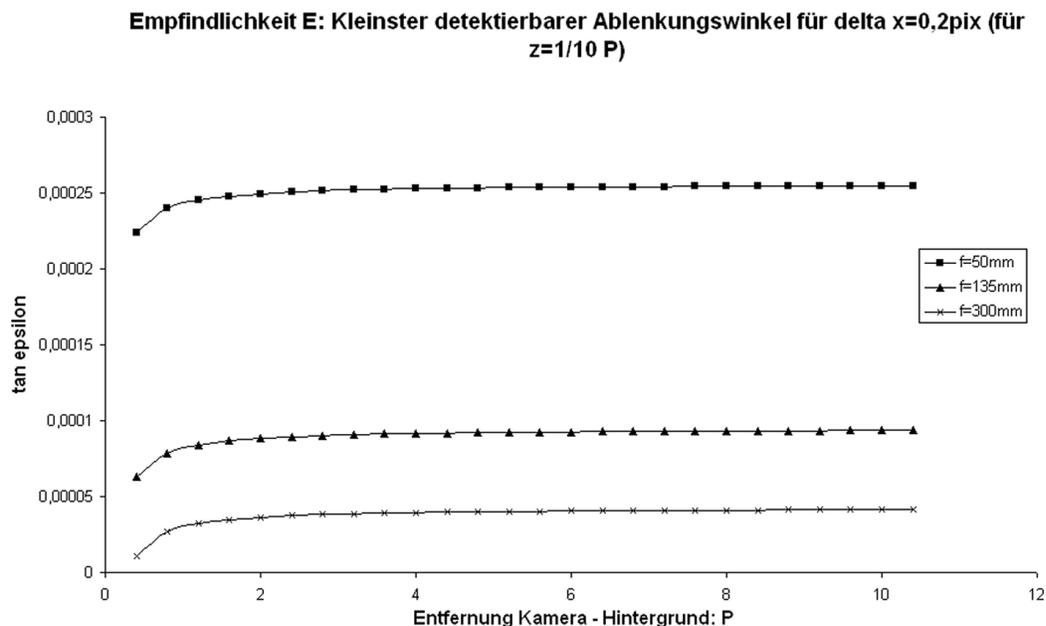


Abbildung 3.7: Die Empfindlichkeit sinkt mit zunehmender Entfernung P: der kleinste abbildbare Winkel wird größer.

des Systems wird gesteigert, wenn ein Objektiv mit größerer Brennweite benutzt wird, da die Auflösung des Hintergrundes direkt mit der kleinsten auflösbaren Verschiebung gekoppelt ist. Eine generelle Vorschrift, nach der die Parameter für einen optimalen Messaufbau definiert sind, kann nicht gegeben werden, da jeweils eine Anpassung an die gegebene Fragestellung (Brechungsindexgradienten-Raumfrequenz, Platz, Auflösung) erfolgen muss. Die

Zahl der veränderbaren Parameter (vergl. Tab. 3.1) nimmt mit der Benutzung des Kriteriums ( $R = AM$ ) ab und konzentriert sich auf  $f$ ,  $P$  und  $f_{\#}$ .

Mit abnehmender Blendenöffnung, d.h. steigender Blendenzahl  $f_{\#}$ , lässt sich die Empfindlichkeit und Auflösung des Systems steigern. Die Vergrößerung der Entfernung  $P$  zwischen Hintergrund und Kamera führt bei konstantem Verhältnis  $e = z/P$  nicht zu einer erhöhten Empfindlichkeit des Meßsystems, sondern zu einer *Vergrößerung*, da hierbei auch die Auflösung des Hintergrundbildes verschlechtert wird (Abb. 3.7).

Wenn zwei nebeneinanderliegende Verschiebungsvektoren zwei unterschiedliche und nebeneinanderliegende Bereiche der Brechungsindexvariation eines Objektes repräsentieren, kann der absolute lokale Brechungsindex durch Summation der einzelnen Verschiebungsvektoren bestimmt werden. Dieser Fall ist bei der Einhaltung des Kriteriums ( $R = AM$ ) garantiert.

### 3.1.2 Ablenkungsrichtung

Die Ablenkung von Lichtstrahlen durch Dichtegradientenfelder geschieht immer in Richtung der höheren Dichte, also des höheren Brechungsindex. Da die Verschiebungsvektoren, die mit Hilfe der Hintergrundschlieren-Methode ermittelt werden, die Verschiebung der Bilder der Hintergrundpunkte darstellen und der Hintergrund von der Kamera aus gesehen *hinter* dem Brechungsindexfeld liegt, weisen die Verschiebungsvektoren in Richtung des kleineren Brechungsindex. D.h. ein mit der Hintergrundschlieren-Methode ermittelter Verschiebungsvektor weist in die Richtung, in die der untersuchte Brechungsindexgradient *kleiner* wird, also in Richtung der kleineren Dichte. Abb. 3.8 stellt die Ablenkungsrichtung eines Lichtstrahls dar: Die gepunktete Linie (nach oben abgelenkter Lichtstrahl) fällt weiter oben in das Objektiv der Kamera. Infolgedessen scheint sich der Hintergrundpunkt nach unten bewegt zu haben (gestrichelte Linie). Die Ablenkung eines Lichtstrahls zur größeren Dichte bewirkt damit von der Kamera aus betrachtet eine Verschiebung der Hintergrundpunkte zur kleineren Dichte.

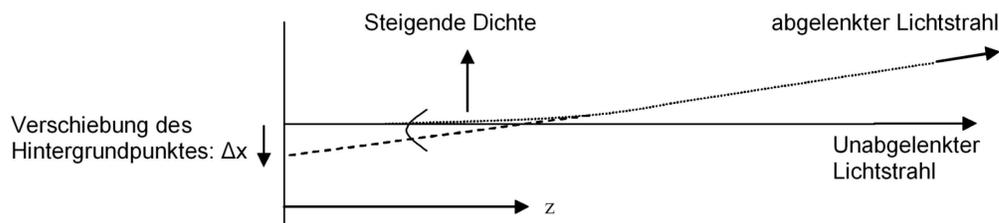


Abbildung 3.8: Ablenkungsrichtung der Hintergrundpunkte

### 3.2 Quantitative Bestimmung von zweidimensionalen Dichtefeldern

Die Hintergrundsclieren-Methode ist bisher nur als Brechungsindex-Sichtbarmachungs-Meßsystem eingesetzt worden. Um Dichtefelder quantitativ bestimmen zu können, ist der Nachweis zu führen, dass sich die Messtechnik auch für diese Anwendung eignet.

Zweidimensionale Dichtefelder ermöglichen eine einfache Auswertung der Hintergrundpunktverschiebungen. Infolgedessen wurde für diesen ersten quantitativen Versuch eine Schlitzdüse gewählt, deren Hauptachse parallel zur Kamerasichtlinie ausgerichtet ist. Der genaue Versuchsaufbau ist bei Klinge *et al.* [2001] geschildert. Abbildung 3.9 zeigt ein Bild der Düse. Die Verwendung einer Gasmischung aus Luft und Helium, die aus der Düse strömt,

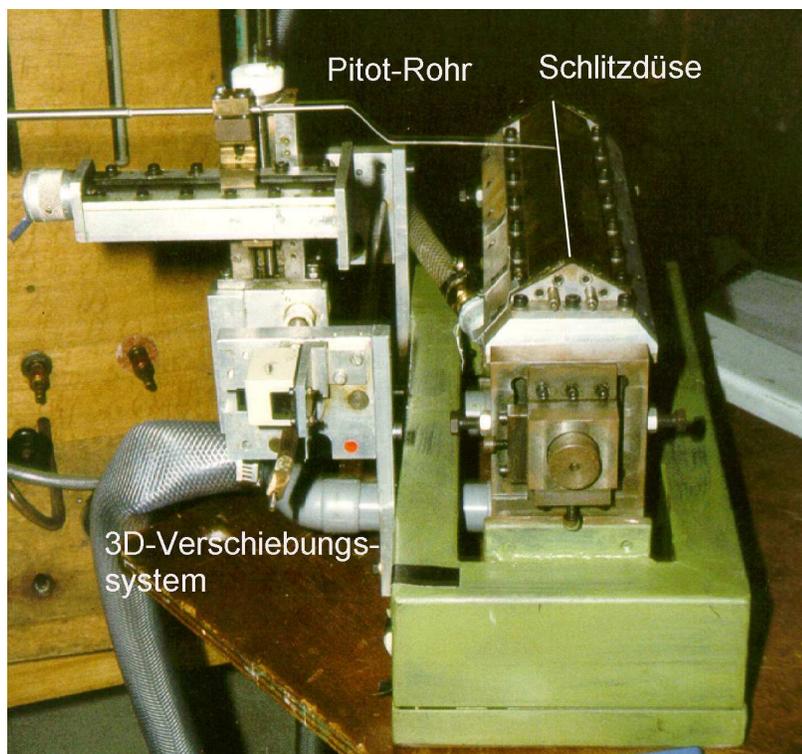


Abbildung 3.9: Schlitzdüse, Düsenauslass:  $256 \times 1$  mm

ermöglicht eine Strömung mit zeitlich konstanter Dichteverteilung, die zusätzlich genau und einfach mit Catharometrie (Erklärung: s.u.) bestimmbar ist. Die Ergebnisse dieses Messverfahren erlauben eine Bewertung der mit der Hintergrundsclieren-Methode ermittelten Heliumkonzentrationsfelder.

#### 3.2.1 Aufbau der Hintergrundsclieren-Methode

Der Aufbau besteht aus einer CCD-Kamera mit einer Auflösung von  $1024 \times 1280$  pixel auf einem  $6,86 \times 8,6$  mm großen Sensor und dem Hintergrund. Dazwischen ist die Schlitzdüse angeordnet. Die Punktegröße ist auf die Vergrößerung der Kamera optimiert, sodass ein Punkt auf 2-3 Pixel des Kamerasensors abgebildet wird. Abbildung 3.10 zeigt ein Bild des gesamten Aufbaus.

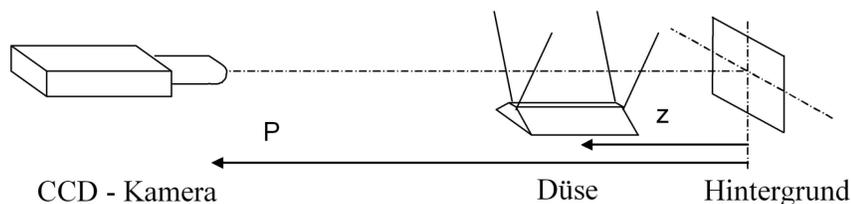
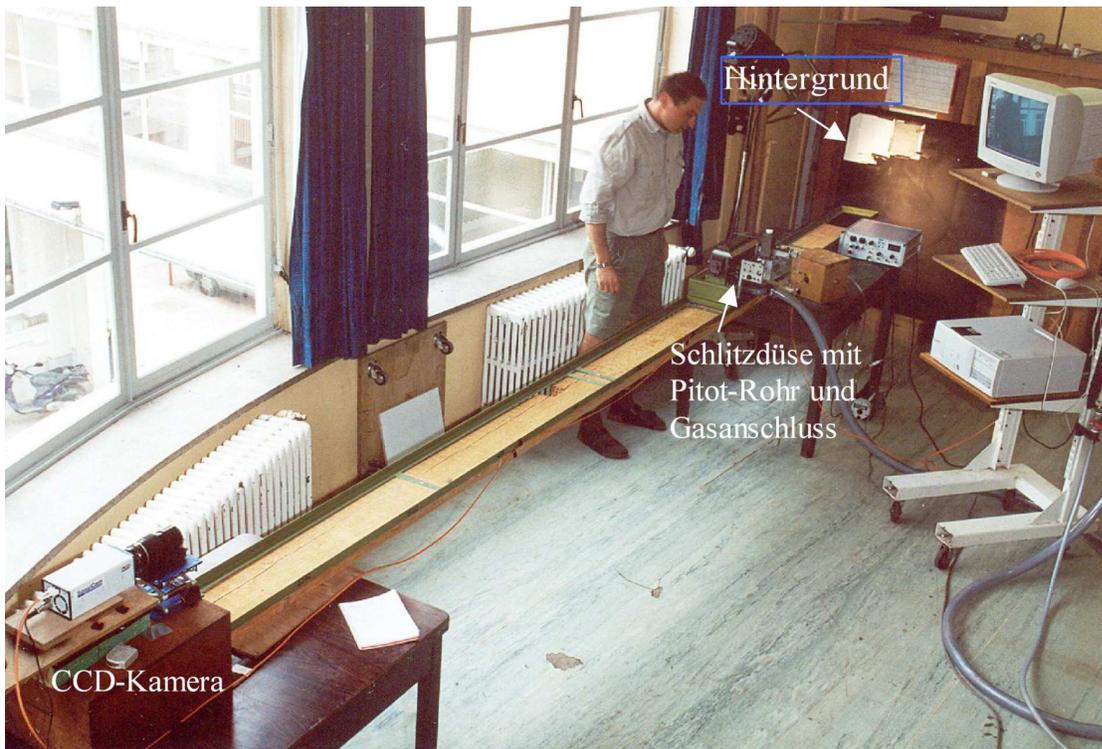


Abbildung 3.10: Aufbau des Hintergrundschlierensystems im Labor, unten: Skizze des Versuchsaufbaus

### 3.2.2 Funktion und Aufbau: Catharometrie

Catharometrie funktioniert nach dem gleichen Prinzip wie Hitzdrahtanemometrie (Abb. 3.11) [Maroteaux *et al.* 1991]. Es wird die Widerstandsänderung eines dünnen, geheizten Drahtes infolge der Abkühlung durch einen Gasstrom gemessen. Die Widerstandsänderung wird dabei mit Hilfe einer Wheatstoneschen Brückenschaltung ermittelt. Im Gegensatz zur Hitzdrahtanemometrie, in der von der Draht-Abkühlung auf eine Strömungsgeschwindigkeit unter der Annahme konstanter Dichte geschlossen wird, gewährleistet bei Catharometrie eine Überschalldüse vor dem geheizten Draht eine konstante Geschwindigkeit des untersuchten Gases. Die Abkühlung und damit Widerstandsänderung des Hitzdrahtes ist damit nur noch von der Dichte des untersuchten Gases abhängig. Indem über besonders geeichte Durchflußmessgeräte Gasmische mit verschiedenen Heliumkonzentrationen aufbereitet werden und diese mit Hilfe des eben beschriebenen Verfahrens vermessen werden, kann das Meßsystem Catharometrie für Helium-Konzentrationsmessungen kalibriert wer-

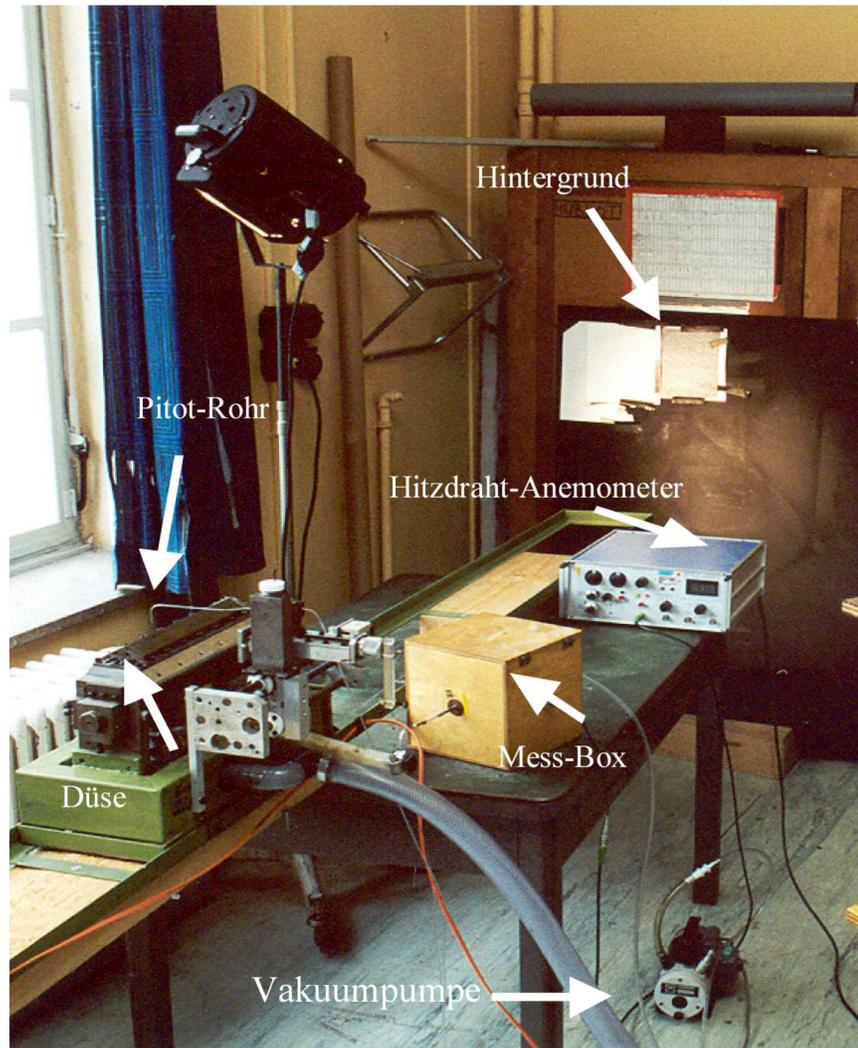


Abbildung 3.11: Aufbau des Catharometrie-Messsystems am VKI

den. Der Aufbau für die Catharometrie-Messung besteht aus einem Pitotrohr (Durchmesser 0,7 mm außen und 0,5 mm innen), durch welches mit Hilfe einer Vakuumpumpe das Messgas an einem definierten Punkt der Strömung über der Düse abgesaugt wird (Abb. 3.12). Die Entnahme des Messgases aus der Düsenströmung erfolgt isokinetisch mit Hilfe eines Entnahmerohres, für das ein Pitot-Rohr benutzt wird. Zwischen der Vakuumpumpe und dem Entnahmerohr liegt die Catharometrie-Messbox, in der die Überschalldüse und der Hitdraht temperaturisoliert gelagert sind. Nachdem die gewünschte Konzentration von Helium im Messgas eingestellt ist, wird das gesamte Volumen über und neben der Düse mit dem Pitotrohr durchgeföhren. Die in Düsenhaupttrichtung festgestellten Änderungen der Heliumkonzentrationen sind klein gegenüber den lateral ermittelten Variationen der Heliumverteilung. An den Düsenrändern außerhalb des Düsenbereichs können nur sehr kleine (weniger als 0,2 %He) Heliumkonzentrationen festgestellt werden. Das mit Hilfe von Catharometrie erhaltene Helium-Konzentrationsfeld ist infolgedessen als zweidimensional anzusehen (Abb. 3.13).

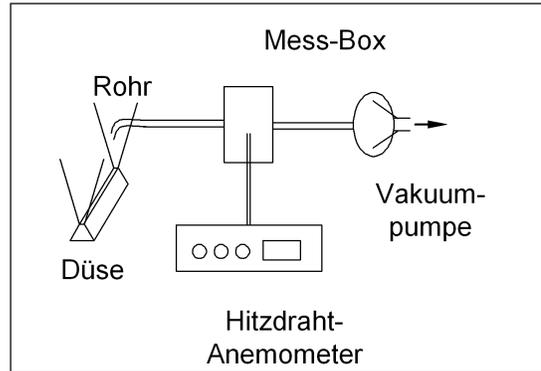


Abbildung 3.12: Skizze des Catharometrie-Aufbaus

### Versuchsdurchführung und Auswertung: Hintergrundschlieren-Methode

Das Referenzbild des Hintergrundes wird ohne das zu untersuchende Dichtefeld aufgezeichnet. Nach Einstellen der gewünschten Strömung, wird das Messbild aufgenommen. Die Auswertung geschieht nach dem in Abb. 3.14 dargestellten Schema. Für die Kreuzkorrelation der Bilder wird die Auswertefenstergröße mit  $20 \times 20$  pixel und die Überlappung der Auswertefenster mit 50% festgelegt.

### 3.2.3 Verknüpfung von Brechzahl und Ablenkungswinkel

Die Integration von Gl. 2.7 unter Bestimmung des Ablenkungswinkels  $\tan(\varepsilon) = \frac{\Delta x(x)}{z}$  ergibt die Brechungsindexverteilung in Abhängigkeit von  $\frac{dn}{dx}$  (Gl. 3.9).

$$\tan \varepsilon = \frac{\Delta x}{z} = \int_{z_1}^{z_2} \frac{1}{n(x)} \cdot \frac{dn}{dx} \cdot dz$$

Unter der Annahme einer in z-Richtung konstanten  $\frac{dn}{dx}$  Verteilung ergibt sich:

$$\frac{\Delta x}{z} = \frac{1}{n(x)} \cdot \frac{dn}{dx} \cdot \Delta z = \frac{1}{n(x)} \cdot n' \cdot \Delta z$$

Integration liefert dann:

$$\frac{1}{z \cdot \Delta z} \cdot \int \Delta x \cdot dx = \ln [n(x)]$$

Dieser Ausdruck kann nach der Brechzahl  $n(x)$  aufgelöst werden. Das Hinzufügen einer Integrationskonstante  $n_0$ , die den Brechungsindex der Umgebung repräsentiert, ergibt:

$$n(x) = n_0 \cdot e^{\frac{1}{z \cdot \Delta z} \int \Delta x \cdot dx} \quad (3.9)$$

Gl. 3.9 bestimmt nur die Brechungsindexverteilung, die sich aus Hintergrundpunktverschiebungen in x-Richtung ergibt, was für diesen Auswertefall ausreichend ist. Die Auswertung zweidimensionaler Verschiebungsfelder kann nach der in Gl. 3.9 gezeigten Weise durchgeführt werden, wenn iterativ in beiden Richtungen vorgegangen wird.

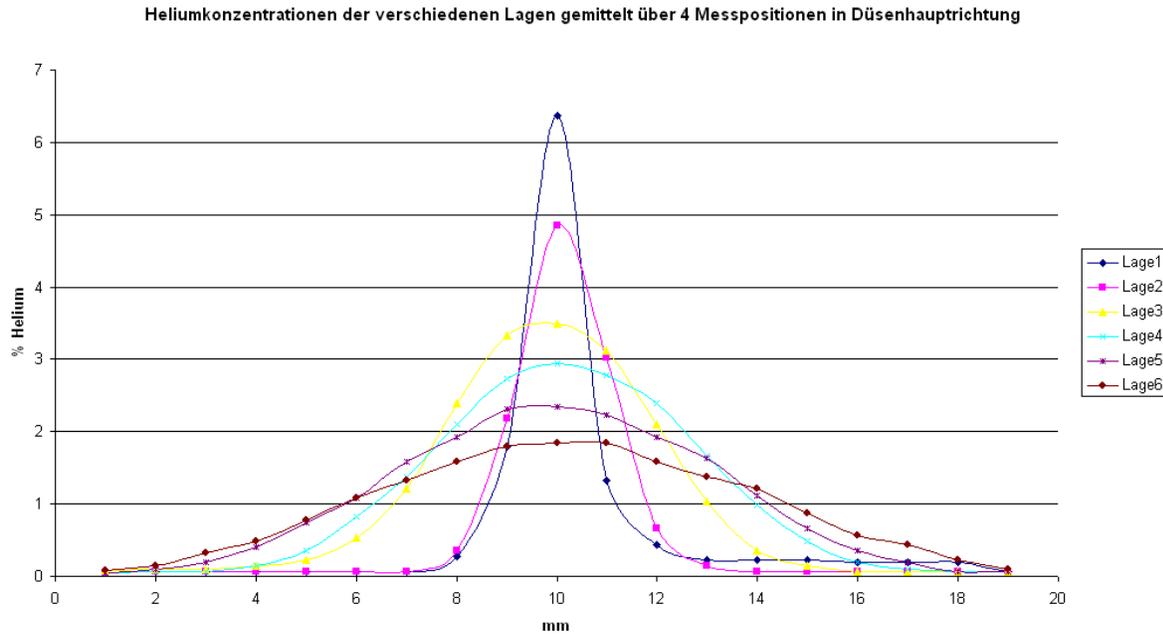


Abbildung 3.13: Mit Catharometrie bestimmte Heliumkonzentrationsverteilung über der Düse (lateral und vertikal) in 6 Höhen (Lagen) über der Düse

Die Integration der einzelnen Hintergrundpunktverschiebungen kann erst durchgeführt werden, nachdem mit Hilfe einer Interpolationsfunktion (z.B. Spline) eine geschlossene Funktion erstellt worden ist. Wenn, wie in diesem Fall, ein *symmetrisches* Brechungsindexfeld bestimmt wird und die Werte an beiden Rändern bekannt sind, kann eine Korrektur der integrierten Werte erfolgen (z.B. Verschiebung der Nulllinie, Vergleich der Ergebnisse bei der Integration von links und von rechts, etc.).

Entsprechend einer linearen Interpolation lassen sich die mit Gl. 3.9 ermittelten Brechungsindizes in lokale Heliumkonzentrationen anhand Gl. 3.10 umrechnen.  $n_m$  stellt den gemessenen,  $n_0$  den Umgebungs- und  $n_{He}$  den Brechungsindex von Helium bei den gegebenen thermodynamischen Verhältnissen dar.

$$Kon_{Helium} = \frac{100 \cdot (n_m - n_0)}{n_{He} - n_0} \quad (3.10)$$

### 3.2.3.1 Ergebnisse der quantitativen Untersuchungen mit Hilfe der Hintergrundschlieren-Methode

Die Anwendung der oben genannten Auswertungsschritte ermöglicht die Bestimmung der örtlichen Dichtewerte. Die Randbedingungen sind:  $p = 1008$  hpa,  $T = 19^\circ\text{C}$ . Im Vorliegenden Fall ( $f_{\#} = 22$ ,  $P = 2700$  mm,  $z = 800$  mm,  $PGK = 0,0067$  mm,  $AFGp = 20$  pixel) ergeben sich der Maßstab des Systems mit  $M = 0,125$ , der Durchmesser des Lichtkegels eines Punktes  $R = 4,04$  mm,  $d_i = 0,71$  mm,  $AM = 0,75$  mm und die Breite eines Aus-

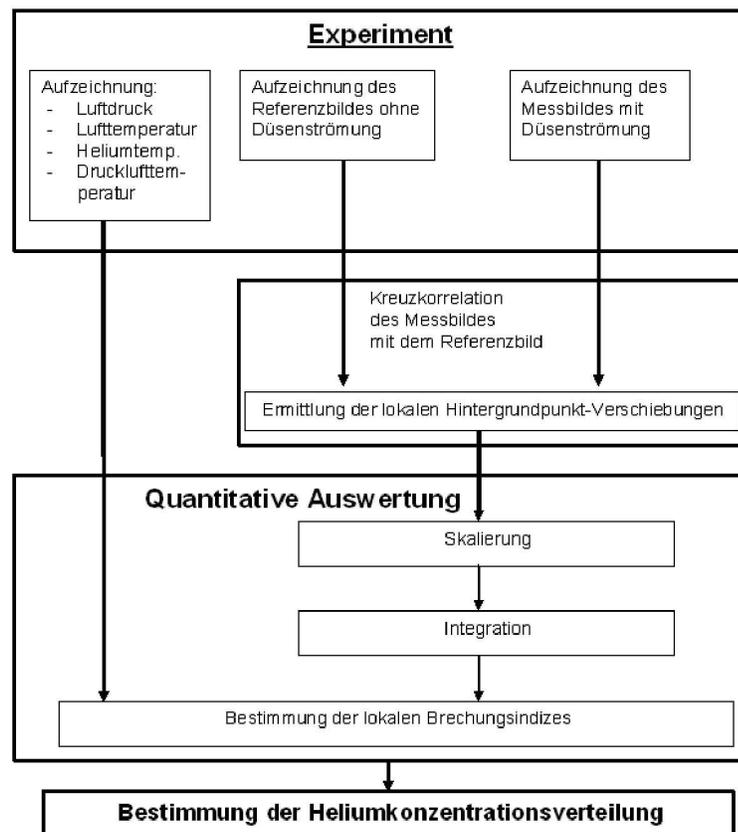


Abbildung 3.14: Quantitative Auswertung, Hintergrundschlieren-Methode

wertefensters auf der Bildebene zu 0,107 mm (Erklärung siehe Tab. 3.1).  $z$  ist bewusst ca. 4 mal größer als  $z_{opt} = 195$  mm gewählt worden, um die Empfindlichkeit des Systems zu optimieren. Da  $d_i$  ca. 7 mal größer als der Durchmesser des Auswertefensters ist, ist die Auflösung des Systems schlechter geworden: Statt  $A_{berechnet} = 0,99$  mm liegt die Auflösung bei ca.  $A = 2,5$  mm.

Abbildung 3.15 zeigt die mit der Hintergrundschlieren-Methode ermittelten Heliumkonzentrationen innerhalb der Objektebene. Für den direkten Vergleich der mit Hilfe der Hintergrundschlieren-Methode und Catharometrie ermittelten Daten ist aus Abb. 3.15 eine Linie mit den Messwerten in Höhe von 33 mm über der Düse, dies entspricht in der Catharometrie-Messung Lage 5, extrahiert worden.

Abb. 3.16 stellt die Ergebnisse beider Messtechniken dar. Die Abweichungen zwischen den beiden Kurven fallen höher als erwartet aus. Zur Vermessung der Helium-Konzentrationen mit Catharometrie wurden 12 Stunden aufgewendet, während die Aufnahmen (Referenz- und Messbild) der Hintergrundschlieren-Methode nur wenige Sekunden dauerte. Die entsprechend zu unterschiedlichen Zeiten aufgenommenen Daten können einem Drift unterlegen haben.

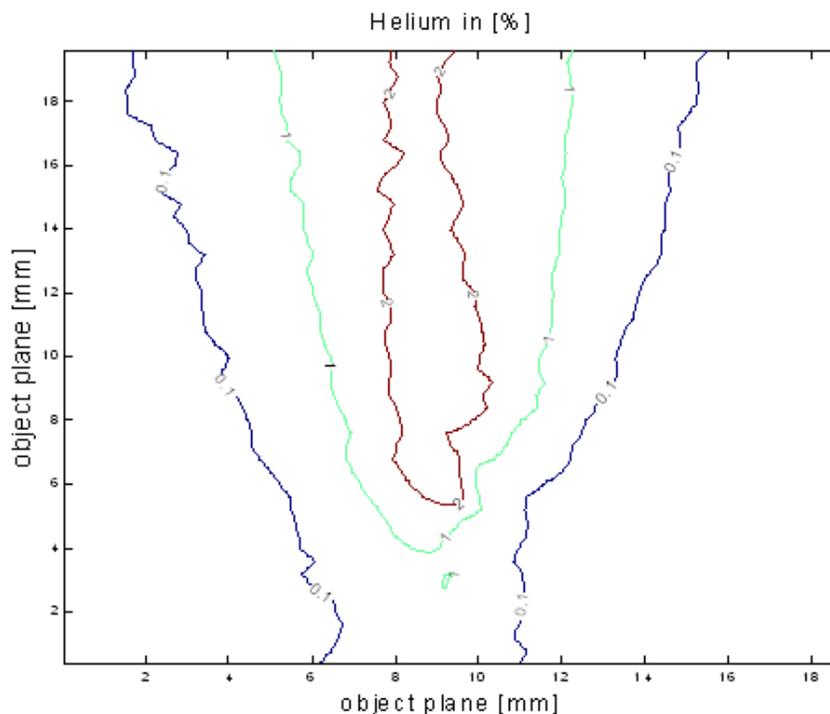


Abbildung 3.15: Heliumkonzentrationen (Hintergrundsclieren-Methode:  $P = 2700$  mm,  $z = 800$ mm,  $f = 300$  mm,  $f_{\#} = 22$ )

Brechzahl	Erklärung	Wert
$n_0$	Umgebungsluft	1,00012926
$n_{He}$ (100%)	Helium	1,000036
$n_m$ (3% He)	gemessener Messwert	1,00012646

Tabelle 3.2: Brechzahlen von Luft und Helium für  $0^\circ\text{C}$  und  $p = 1013,2$  hPa

Mit der Hintergrundsclieren-Methode ist die Brechungsindexvariation des zu untersuchenden Volumens bestimmt worden. Die Änderung der absoluten Brechzahl betrug dabei  $\Delta n = 2,8 \cdot 10^{-6}$  (!) (vergl. Tab. 3.2). Die aufgetragenen Heliumkonzentrationen sind mit den Entfernungen innerhalb der Objektebene skaliert. Die gute Übereinstimmung der mit Catharometrie und der Hintergrundsclieren-Methode ermittelten Helium-Konzentrationen bestätigen die Eignung derselben zur quantitativen lokalen Brechungsindexbestimmung für diesen Anwendungsfall.

Mit der Umwandlung der lokalen Brechungsindexgradienten zu absoluten Brechungsindizes in einer Raumrichtung ist das grundsätzliche Verständnis dieser Transformation gegeben. Die Anwendung der Poisson-Gleichung [Richard *et al.* 2000] zur Verbesserung der Integrationsergebnisse erscheint speziell für die Auswertung von Ablenkungen in zwei Raumrichtungen sinnvoll.

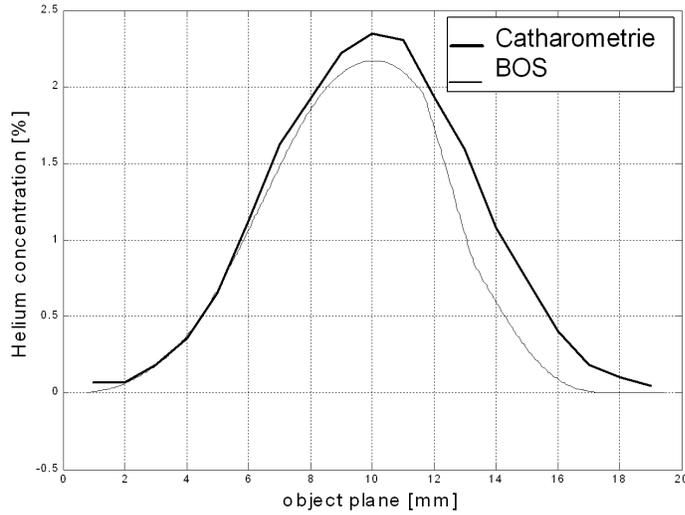


Abbildung 3.16: Heliumkonzentrationen (Catharometrie und Hintergrundschlieren-Methode)

### 3.2.4 Fehlerabschätzung

#### Zweidimensionale Dichtemessungen mit der Hintergrundschlieren-Methode und Catharometrie

Bei der quantitativen Bestimmung von Dichtefeldern können verschiedene Fehler auftreten, die sich in zwei Hauptgruppen unterteilen lassen: Fehler bei der *Aufnahme* und der *Auswertung* der Daten. Bei der *Aufnahme* bestehen die Hauptfehler einer nicht angepassten Abtastrate. Dieser Fehler kann durch die Anwendung des o.g. Kriteriums ( $R = AM$ ) minimiert werden. Ein weiterer Fehler ist die Mittelung einzelner Hintergrundpunktverschiebungen innerhalb eines Auswertefensters (vergl. Abb. 3.3). Da die Anwendung des Kriteriums ( $R = AM$ ) nicht entsprechend den Vorgaben möglich war, ist mit einem größeren Abstand  $z$  gemessen worden. Entsprechend schlecht ist die Abbildung der starken Dichtegradienten direkt am Düsenauslass durch die Hintergrundschlieren-Methode. Die Untersuchung der schwächeren Dichtegradienten, die weiter vom Düsenauslass entfernt sind, ergibt gute Ergebnisse: Hier ist die Auflösung des Systems ausreichend.

Bei der *Auswertung* der Daten entstehen Fehler durch die Kreuzkorrelation der Bilder und die Integration der Verschiebungen. Die Kreuzkorrelation stellt eine Mittelung über ein Auswertefenster dar, der dabei auftretende Fehler beträgt maximal 0,05 pixel, da eine Verschiebung von 0,1 pixel noch als Messwert gewertet werden kann [Raffel *et al.* 1998], [Schröder 2001]. Im vorliegenden Fall der Hintergrundschlieren-Methode ergeben sich nach Gl. 3.11 aus der Mittelung der Kreuzkorrelation und der Integration ein maximaler Gesamtfehler der ermittelten Heliumkonzentrationen von  $\delta c_{He} = 0,1\%$  [Beitz *et al.* 1995].

$$\delta c_{iHe} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \delta c_{iHe}^2} \quad (3.11)$$

Mit  $\delta c_{1 He} =$  (aus der Kreuzkorrelation)  $= 0,096\%He$  und  $\delta c_{2 He} =$  (aus der Integration)  $= 0,03\%He$ .

Die bei der Benutzung der Catharometrie-Messtechnik aufgetretenen Fehler lassen sich wie folgt abschätzen:

Ungenauigkeit der Eich-Durchflussmessgeräte	0,01%He
Ableseungenauigkeit der Eich-Durchflussmessgeräte	0,06%He
Ungenauigkeit des Hitzdrahtanemometers	0,01%He
Ableseungenauigkeiten des Hitzdrahtanemometers	0,09%He

Insgesamt kann damit nach Gl. 3.11 bei der Catharometrie-Messung von einem Messfehler kleiner als 0,09%He ausgegangen werden.

Die quantitative Bestimmung eines Brechungsindexfeldes ist nur möglich, wenn die *Position* des zu untersuchenden Objektes bekannt ist. Im vorliegenden Fall ist die Position der Düse leicht bestimmbar.

Wenn das zu untersuchende Objekt zeitlich nicht ortsfest ist (z.B. Wirbel), ist die Möglichkeit der Positionsbestimmung apriori *nicht* gegeben. Wie das im vorherigen Kapitel dargestellte Beispiel zeigt (Blattspitzenwirbel eines Hubschraubers, Abb. 2.9), ist die Untersuchung von instationären Objekten mit der Hintergrundschlieren-Methode sehr effektiv. Entsprechend wird im Folgenden ein Algorithmus entwickelt und vorgestellt, der die Positionsbestimmung filamentartiger Dichtefelder ermöglicht.

### 3.3 Bestimmung des Ablenkungsortes

Die Bestimmung des Ortes der Lichtstrahl-Ablenkung ist von besonderem Interesse, wenn die Position des zu vermessenden Objektes nicht aus dem Aufbau selbst bestimmt werden kann, da sonst der Hintergrundpunkt-Verschiebung kein Brechungswinkel zugeordnet werden kann und damit ein Bezug der gemessenen Daten zu Brechungsindizes unmöglich ist. Bei der Untersuchung von Hubschrauberblattspitzenwirbeln (Beispiel in Kapitel 2.2) wird dies besonders deutlich. Da die Wirbel keine besonderen Punkte aufweisen, die mit einer anderen Kamera gleichzeitig nachgewiesen werden können, ist die Möglichkeit der Positionsbestimmung der Wirbel mit Hilfe eines einfachen Triangulationsverfahrens nicht gegeben. Dadurch kann die Stärke der Wirbel nicht berechnet werden, weil der o.g. Bezug zur Bestimmung des Ablenkungswinkels fehlt. Um dieses Problem zu lösen, ist eine besondere Rechenvorschrift entwickelt worden, die in dem Programm VRIEDER implementiert wurde. VRIEDER steht für **V**ektoriell**e** **R**ekonstruktions**v**erfahren von **I**negalprojektionen zur **E**rmittlung **D**erer **E**chten **R**aum**k**oordinaten. Dieser Algorithmus kann die Positionen von langen, fadenförmigen Objekten mit den im Folgenden beschriebenen Merkmalen aus deren Projektionen bestimmen [Klinge 2003].

- entlang der Hauptachse gebogen oder gerade
- durchsichtig (wenn eine Brechungsindexänderung vorhanden ist) oder undurchsichtig
- mehrere sich überkreuzend
- zeitlich veränderlich

Der dafür erforderliche Versuchsaufbau besteht aus zwei Kameras und zwei dazugehörigen Hintergründen (Abb. 3.17). Die Eingabeinformationen für VRIEDER sind die Positionen

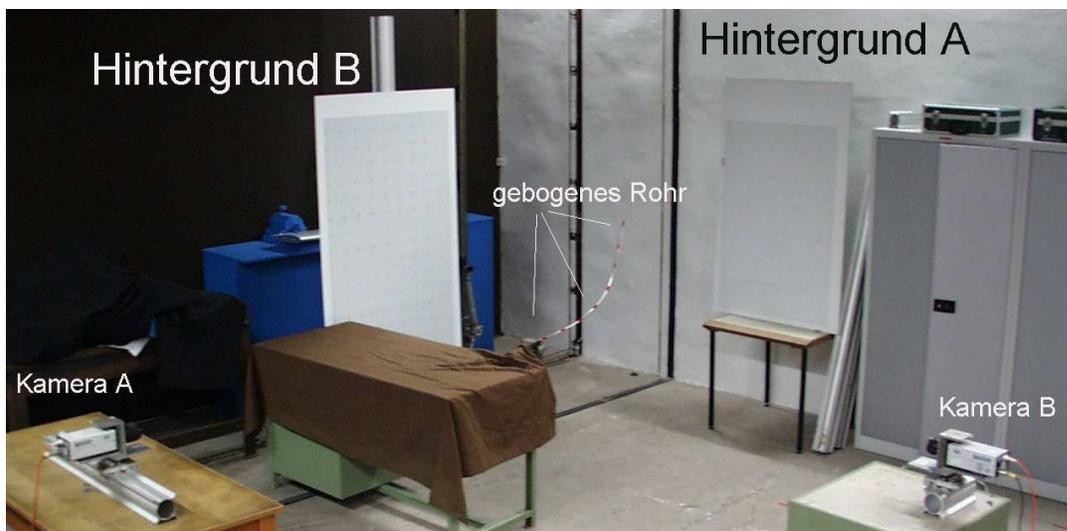


Abbildung 3.17: Messaufbau für den Test von VRIEDER

der Kameras und, solange ebene Hintergründe benutzt werden, jeweils drei Punkte auf dem jeweiligen Hintergrund. Aus diesen Informationen und den Objektbildern, kann mit dem genannten Programm die Raumposition des Wirbels ermittelt werden.

Die Funktionsweise des Programms wird im Folgenden anhand eines Fallbeispiels dargestellt. Ein ca. 1 m langes, unregelmäßig gebogenes Stahlrohr wird bezüglich seiner Position in Raumkoordinaten vermessen. Um die Position des Rohres im Raum relativ zu einem vorher definierten Koordinatensystem zu bestimmen, wurde es mit Hilfe eines Baulasers und Massbändern vermessen. Die Genauigkeit dieser berührenden Messtechnik liegt bei dem vorliegenden Aufbau mit Entfernungen von bis zu 4 m in drei Koordinatenrichtungen bei  $\pm 6$  mm.

Der Aufbau für VRIEDER besteht aus zwei Kameras und dem jeweils dazugehörigen Hintergrund. Die Kameras sind beide so ausgerichtet, dass die jeweilige Projektion des Objektes auf den der Kamera zugeordneten Hintergrund fällt (vergl. Abb. 3.19 und Abb. 3.18). Für

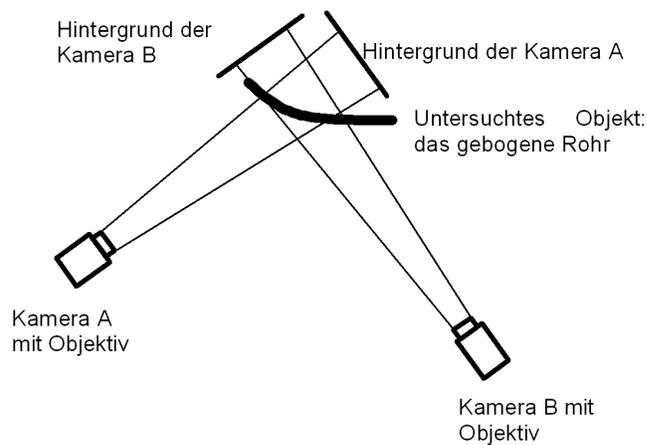


Abbildung 3.18: Skizze des Versuchsaufbaus für VRIEDER

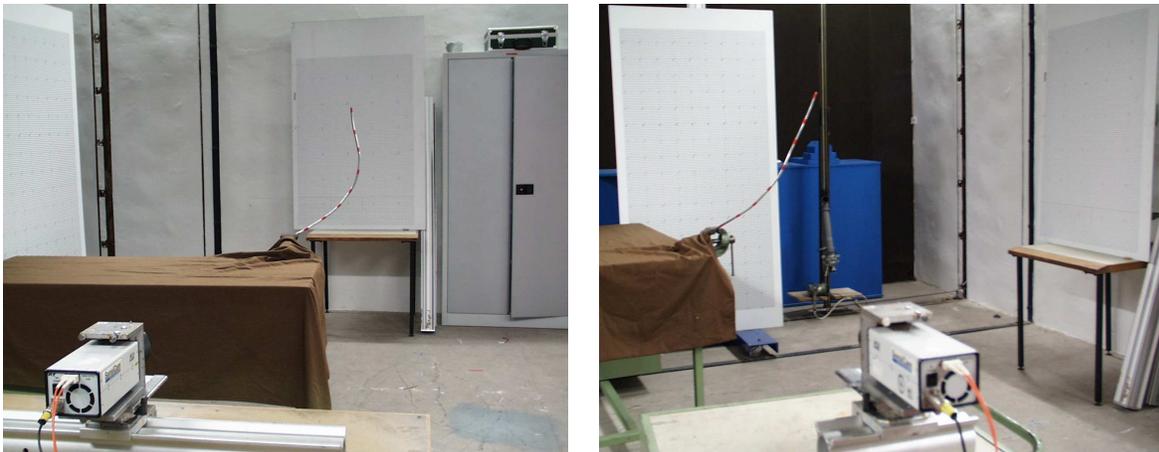


Abbildung 3.19: Blickwinkel der beiden Kameras: links: Kamera A, rechts: Kamera B

die Vermessung des Rohres mit einem konventionellen Messverfahren, hier Laser und Maßband, ist das Bekleben des Rohres mit Markern notwendig, um Messpunkte zu definieren. Es sei an dieser Stelle betont, dass die Marker die Positionsbestimmung mit dem entwickelten Programm weder unterstützen noch beeinflussen, sie stellen lediglich die Möglichkeit

dar, die Ergebnisse durch das konventionelle Messverfahren nachzuprüfen. Abbildung 3.17 zeigt den Messaufbau mit den beiden Kameras (A und B), mit den dazugehörigen Hintergründen (A und B) und das Testobjekt: das gebogene Rohr. Einen besseren Überblick über den Versuchsaufbau gibt die Skizze in Abb. 3.18. Den Sichtbereich der beiden Kameras zeigt die Abbildung 3.19. Die Anordnung der Kameras in einem rechten Winkel zueinander garantiert die höchste Messgenauigkeit, allerdings sind auch mit erheblich kleineren Winkeln sehr gute Ergebnisse möglich. Die Anforderungen an die Positionsbestimmung der Bildebenen-Raumkoordinaten der Kameras sind dann höher, da kleine Fehler zu größeren Bestimmungsfehlern führen können. Die Anordnung der jeweiligen Hintergründe rechtwinklig zu den optischen Achsen der Kameras empfiehlt sich, da dadurch das Bild scharf gestellt werden kann, ohne dass eine große Tiefenschärfe oder ein Scheimpflugadapter erforderlich wird. Ein Scheimpflugadapter ermöglicht die Verkippung der Objektivhauptebene relativ zur Bildebene. Mit dieser Vorrichtung ist die Einstellung des 'Scheimpflug-Kriteriums' möglich. Dies geschieht durch die Neigung des Objektivs gegenüber dem Kamerasensor: Objekt-, Linsenhaupt- und Bildebene müssen sich in einer Linie schneiden, damit das Bild insgesamt scharf fokussierbar ist [Raffel *et al.* 1998], [Schröder 2001].

### 3.3.1 Funktionsbeschreibung des Programms VRIEDER

Der im Folgenden dargestellte Algorithmus bildet den Kern des entwickelten Programms. Die beschriebenen Schritte erlauben die Lösung des allgemeinen Problems der Projektionspunktzuordnung und damit die Positionsbestimmung der oben spezifizierten Objekte. Die Struktur des Programms ist in Abbildung 3.20 dargestellt. Damit ist der Durchlauf für alle Punkte PB und PA gezeigt.

#### 1. Bestimmung der Raumkoordinaten der Projektionen auf dem Hintergrund

Aus den Raumkoordinaten der drei bekannten Hintergrundpunkte wird pro Kamera eine Matrix bestimmt, die die Umrechnung der Bildkoordinaten der Projektionen in Raumkoordinaten erlaubt.

#### 2. Definition der Geraden $A_x$

Mit Hilfe der Kamerachip-Position der Kamera A und dem ersten (die Nummerierungsrichtung ist frei wählbar) Projektionspunkt PA1 des Objektes auf dem Hintergrund A wird eine Gerade A1 definiert (Abb. 3.21). Die Bezeichnungen repräsentieren:

A1 Gerade durch den Kamerachip A und den ersten Projektionspunkt

PA1 auf dem Hintergrund A

E1 Ebene, die von den Geraden EG1 und EG2 aufgespannt wird

EG1 Gerade zwischen dem Kamerachip B und dem ersten Projektionspunkt PB1

EG2 Gerade zwischen dem Kamerachip B und dem zweiten Projektionspunkt PB2

PA1 erster Projektionspunkt des Objekts auf den Hintergrund A

PB1 erster Projektionspunkt des Objekts auf den Hintergrund B

PB2 zweiter Projektionspunkt des Objekts auf den Hintergrund B

DSPA1 Schnittpunkt zwischen der Gerade A1 und der Ebene E1

Das Stahlrohr ist in Abb. 3.21 nicht dargestellt, sondern nur dessen Projektionen auf die jeweiligen Hintergründe.

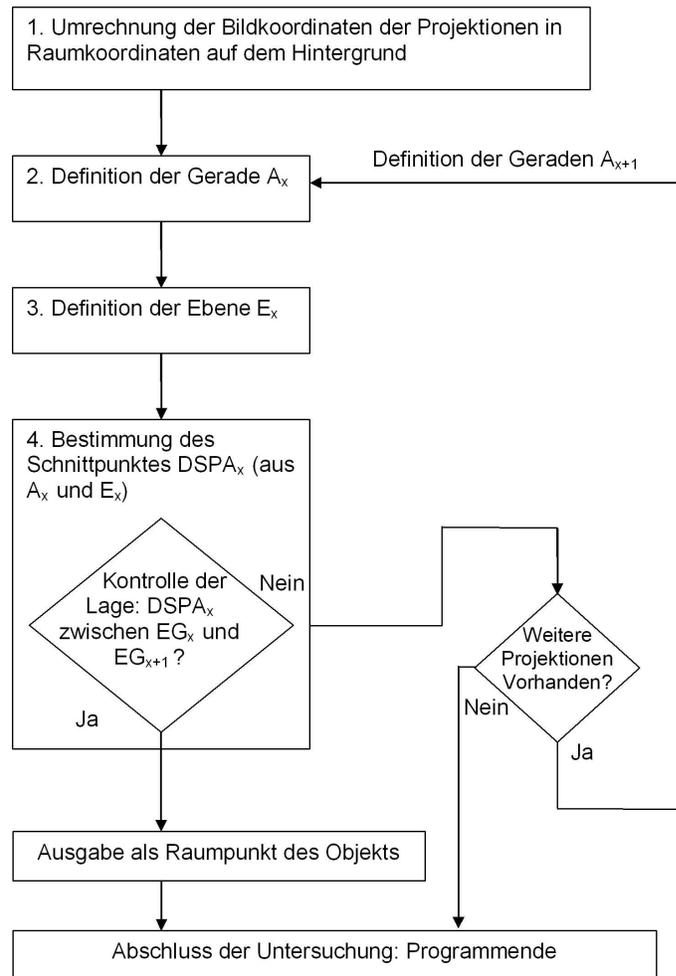


Abbildung 3.20: Ablaufplan des Programms VRIEDER

### 3. Definition der Ebene E

Mit Hilfe der Kamerachip-Position der Kamera B und den ersten beiden Projektionspunkten (PB1 und PB2) auf dem Hintergrund B wird eine - durch zwei Geraden EG1 (= Verbindung zwischen Kamerachip und Projektionspunkt PB1) und EG2 (= Verbindung zwischen Kamerachip und Projektionspunkt PB2) aufgespannte - Ebene E1 definiert (Abb. 3.21). Die Bezeichnungen repräsentieren:

V1 Normalenvektor der Ebene D1 – gebildet als Verbindungsvektor zwischen DSPA1 und Kamera B

D1 Ebene, die den Punkt DSPA1 enthält und normal zu dem Vektor V1 ausgerichtet ist

DEG1 Schnittpunkt der Gerade EG1 mit der Ebene D1

DEG2 Schnittpunkt der Gerade EG2 mit der Ebene D2

DG1 Gerade die aus den beiden Schnittpunkten DEG1 und DEG2 gebildet worden ist

DSPA1 Schnittpunkt der Gerade A1 mit der Ebene E1 (vergl. Abb. 3.21)

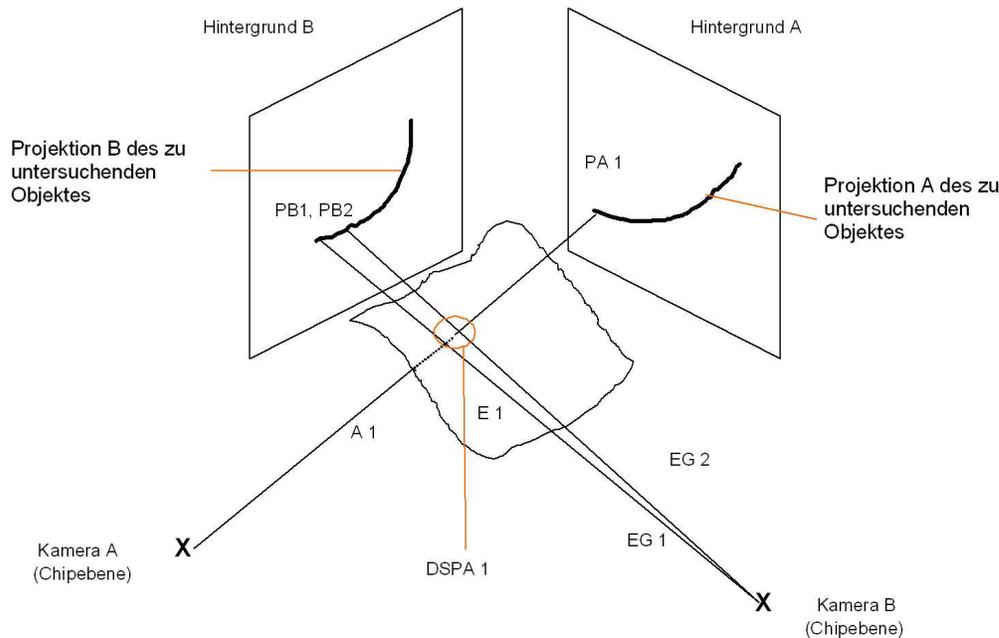


Abbildung 3.21: Funktionsweise VRIEDER I: Skizze zu Schritt 2 und 3

#### 4. Bestimmung und Kontrolle des Schnittpunktes DSPA

Nachdem der Schnittpunkt DSPA1 zwischen Gerade A1 und Ebene E1 bestimmt worden ist, muss verifiziert werden, dass derselbe zwischen den die Ebene E1 aufspannenden Geraden EG1 und EG2 liegt. Das geschieht, indem die Ebene D1 bestimmt wird, die den Schnittpunkt DSPA1 enthält und als Normalenvektor den normierten Verbindungsvektor  $V_1$  zwischen dem Schnittpunkt DSPA1 und der Position der Kamera B besitzt. Aus den Schnittpunkten der Geraden EG1 und EG2 mit der Ebene D1 (die Schnittpunkte haben die Bezeichnung DEG1 und DEG2) wird dann eine Gerade DG1 ermittelt (Abb. 3.22).

Liegt der vorher bestimmte Schnittpunkt DSPA1 zwischen den Schnittpunkten DEG1 und DEG2 so ist Schnittpunkt DSPA1 gültig und stellt die erste bestimmte Position des Objektes im Raum dar. Ist dies nicht der Fall wird das Verfahren ab Schritt 4 mit dem nächsten Projektionspunkt PB3 von Kamera B wiederholt. Die Ebene E2 wird dann aus den Geraden EG 2 (zwischen Kamera B und PB2) und EG 3 (zwischen Kamera B und PB3) aufgestellt. Es wird wieder der Schnittpunkt zwischen der Gerade A1 und nun der Ebene E2 bestimmt, der nun nach Schritt 4 überprüft werden muss. Erst wenn ein gültiger Schnittpunkt gefunden oder die Schritte 3 und 4 für alle Projektionspunkte der Kamera B erfolglos durchlaufen worden sind, wird die nächste Gerade A2 zwischen der Kamera A und deren nächsten Projektionspunkt PA2 gebildet und dann das Verfahren ab Schritt 3 wiederholt. Die gültigen Schnittpunkte DSPA werden gespeichert und als Resultat ausgegeben, da sie die ermittelten Positionsdaten des Objektes darstellen.

#### 5. Kontrolle mit $A \rightarrow B$ und $B \rightarrow A$

Zur Kontrolle wird abschließend das Verfahren ab Schritt 2 mit umgekehrter Rollen-

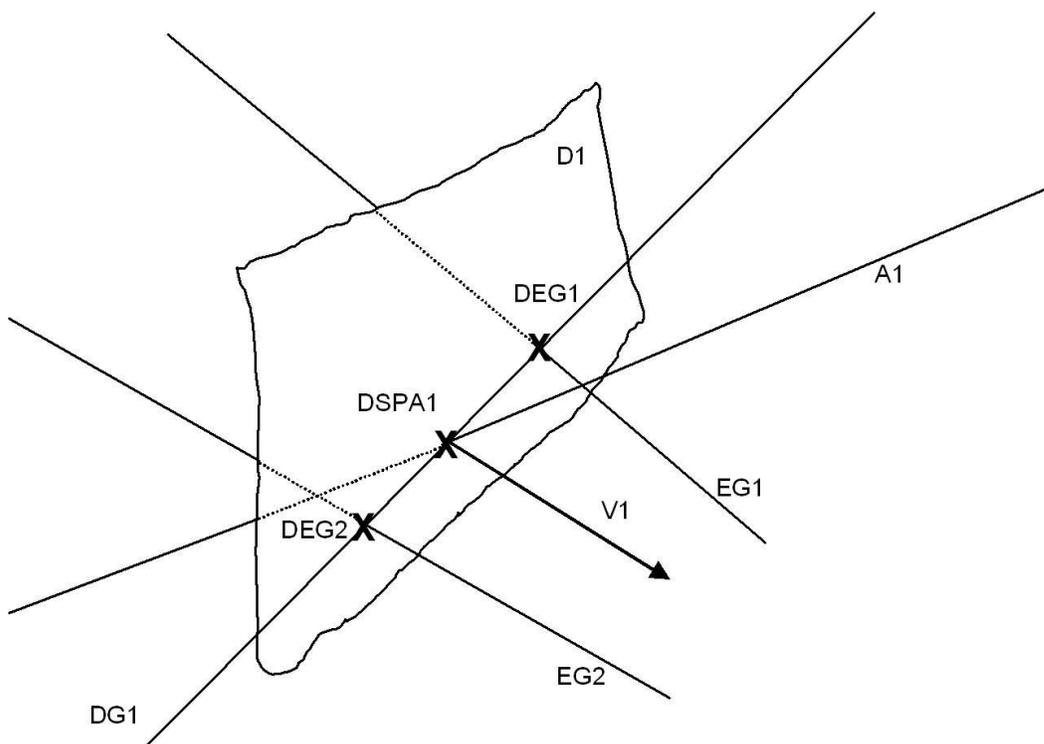


Abbildung 3.22: Funktionsweise VRIEDER II: Skizze zu Schritt 4

verteilung wiederholt: Mit den Projektionen, die die Kamera B aufgezeichnet hat, wird die Gerade A1 und mit den Werten der Kamera A die Ebene E1 gebildet. Die Differenz zwischen den bestimmten Raumkoordinaten des Objektes ergibt eine Information über die Genauigkeit des Verfahrens. Sie ermöglicht die Anpassung der Abtastungsschrittweite. (Abtastungsschrittweite = Abstand zwischen zwei Projektionspunkten)

Anmerkung zu den Abbildungen 3.21 und 3.22: Von den Geraden und Ebenen, die in ihrer räumlichen Ausbreitung unendlich sind, werden hier nur die für das Verständnis relevanten Teile gezeichnet. Deshalb sind die Ränder der Ebenen unregelmäßig dargestellt.

### 3.3.2 Ergebnis der Auswertung

Die Ergebnisse der Auswertung werden separat gespeichert und stehen in elektronischer Form für die weitere Verarbeitung zur Verfügung. Zur besseren Übersicht werden die Kamerapositionen, Projektionen des Objektes auf den Hintergründen, die Hintergrundfestpunkte und die ermittelten Objektpositionen zusätzlich visuell ausgegeben. In Abbildung 3.23 ist der gesamte Versuchsaufbau und das Ergebnis dargestellt. In Abbildung 3.24 ist das Ergebnis größer dargestellt. Die blauen Kreuze markieren dabei die konventionell vermessenen Markerpositionen, die schwarze Linie repräsentiert das Ergebnis von VRIEDER. Die maximale Differenz zwischen den konventionell gemessenen und den mit VRIEDER ermittelten Objektpositionen ist mit 4,9 mm ähnlich dem bei der konventionellen Messmethode auftretenden Messfehler. Damit ist die Anwendbarkeit und Funktionalität des benutzten Auswertalgorithmus nachgewiesen.

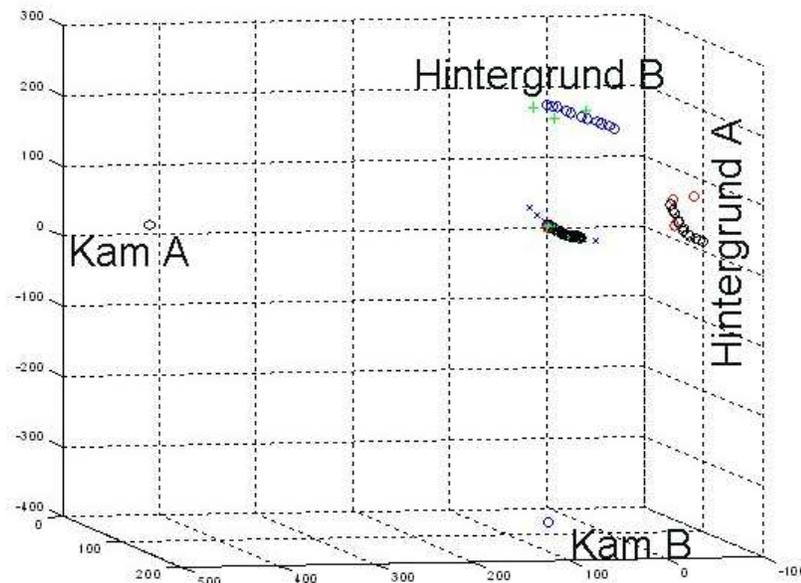


Abbildung 3.23: Ergebnisdarstellung VRIEDER: Übersicht des Messaufbaus (Blick von oben)

### 3.3.3 Grenzen der vorgestellten Messmethode

Die Sichtlinien der Kameras müssen einen endlichen, von Null verschiedenen Winkel zueinander haben, damit die Auswertung möglich wird. Optimal ist  $90^\circ$ , bei einem zu kleinen Winkel (kleiner als  $5^\circ$ ) werden die Ergebnisse ungenau, da dann die Messfehler bei der Bestimmung der Kamerapositionen ein zu großes Gewicht erhalten. Es sei erwähnt, dass die Auswertung mit VRIEDER selbst in diesen Grenzfällen korrekt funktioniert, da durch die Kontrolle nur die tatsächlich ermittelten Schnittpunkte als Ergebnis akzeptiert werden; mit anderen Worten: Sind die Eingangsdaten *zu* fehlerhaft, ermittelt VRIEDER *keine* Objektpositionen.

### 3.3.4 Fehlerabschätzung

Die mit VRIEDER errechneten Objektpositionen basieren auf den Koordinaten der Bildebenen (Kamerasensoren) und der Hintergrundpunkte. Die Messfehler, die bei der Bestimmung dieser Raumpositionen auftreten, sind infolgedessen als systematische Fehler in der Weiterverarbeitung der Daten enthalten. Entsprechend der Genauigkeit der für die Positionsbestimmung benutzten Messtechnik bestimmt sich dieser systematische Fehler. Der Algorithmus ist so aufgebaut, dass nur tatsächliche Objektpositionen ermittelt werden können. Fehler können also nur bei der Ortsbestimmung der Kameras und der Hintergrundpunkte eingebracht werden. Je kleiner der Winkel zwischen den Kamerasichtlinien ist, desto größeres Gewicht haben Messfehler in der Ortsbestimmung und desto weniger "richtige" Punkte können durch den Algorithmus gefunden werden. In diesem Fall liegt der Messfehler der Positionsbestimmung der Kameras und der Hintergrundpunkte durch das konventionelle Messverfahren bei ca. 5 mm. Dieser relativ große Fehler resultiert aus der Bestimmung

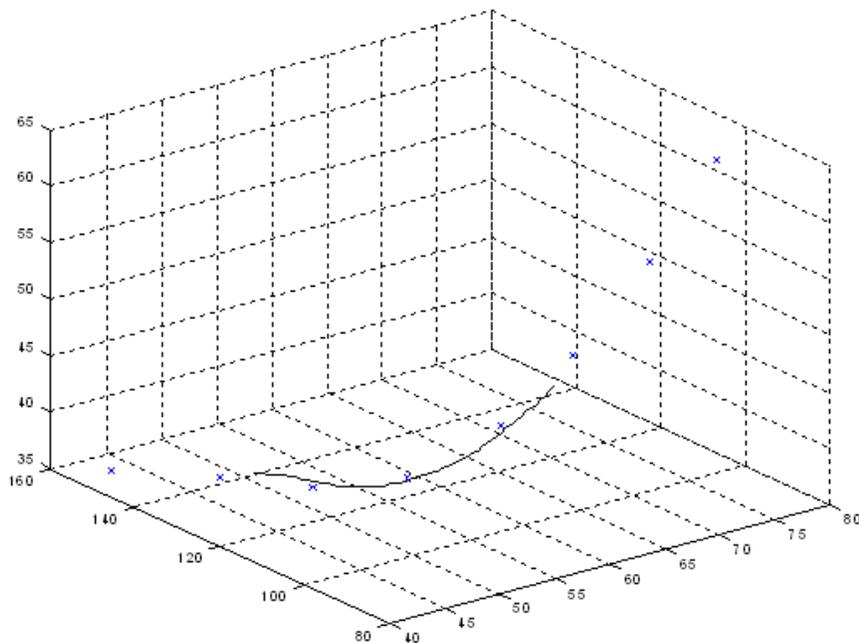


Abbildung 3.24: Vergrößerung der errechneten Objektpositionen aus Abb. 3.23: Mit VRIEDER errechnete Rohrpositionen (schwarze Kurve) im Vergleich zu den konventionell gemessenen Markerpositionen (blaue Kreuze)

von Punkten im Raum, die nicht berührt werden können: der *Mittellinie* des Stahlrohres. Bezogen auf die Abstände der Kameras und Hintergründe (ca. 4 m) entspricht dies einem Messfehler von weniger als 0,15%, d.h die reale Position der Marker kann von der gemessenen Position  $\pm 5$  mm abweichen. Da dies auch für die Kamerapositionen zutrifft, können die durch VRIEDER ermittelten Werte max.  $\pm 7,10$  mm (nach Gl. 3.11) von den tatsächlichen Markerpositionen abweichen, wenn kein weiterer Fehler eingebracht wird. Der Vergleich mit den ermittelten Daten zeigt, dass die durch die konventionelle Messtechnik eingebrachten Fehler kleiner waren. Die ermittelten Raumkoordinaten der Marker weichen *weniger* als 4,9 mm voneinander ab.

Neben den Kamera- und Hintergrundpunkt-Raumkoordinaten besteht die zweite Eingangsgröße aus den Projektionen des Objekts auf den Bildern. Die Auflösung der Bildebene (Kamerachip) beschränkt entsprechend die Positionsbestimmung mit VRIEDER, bzw. fügt einen weiteren Fehler hinzu. Die Ablesegenauigkeit kann, je nach Kontrast, bis zu 0,1 pixel betragen. Die für diesen Fall daraus resultierenden Fehler sind vernachlässigbar.

### 3.4 Quantitative Bestimmung dreidimensional-achsensymmetrischer Dichtefelder

Die mathematische Zusammenhänge, die die Berechnung der örtlichen Lichtstrahlablenkung beim Durchtritt durch ein achsensymmetrisches Feld aus deren allgemeinen Verschiebungen

ermöglichen wurden in der Vergangenheit zur Auswertung experimenteller Untersuchungen bereits häufig genutzt und detailliert beschrieben, z.B. [Liu *et al.* 1989], [Hermann 1989]. Die Kenntnis des *Ortes* der Lichtstrahlableitungen ist dabei für die Bestimmung der lokalen Brechzahlen erforderlich (vergl. vorherigen Abschnitt). Diese Gleichungen sind insbesondere für die Auswertung von Dichtemessungen von achsensymmetrischen Brechungsindexfeldern mit der Laser-Speckle-Photographie entwickelt und benutzt worden z.B. [Lira 1995], [Wernekinck 1985] oder [Shu *et al.* 1987]. Sie beruhen im Wesentlichen auf der Anwendung der Abel-Transformation, die eine Invertierung des dabei zu lösenden Integrals erlaubt und dadurch eine Lösung ergibt. Gl. 3.12 stellt eine Lösung dar.

$$n(r) = n_a - \frac{n_a}{\pi} \int_r^{r_a} \frac{\varepsilon(y)}{\sqrt{y^2 - r^2}} dy \quad (3.12)$$

Die numerische Lösung dieser Gleichung für Brechungsindexfelder mit sehr kleinen Änderungen, z.B. kompressible Wirbel, wirft Probleme auf: Die untere Integrationsgrenze und damit der Nenner innerhalb des Integrals wird Null. Die Gleichung kann nur gelöst werden, wenn eine sehr kleine Zahl ( $\varepsilon$ ) für diese Null eingesetzt wird. Der Fehler, der durch diese Veränderung im Ergebnis erzeugt wird, läßt sich durch die Verkleinerung der eingesetzten Zahl *nicht* minimieren. Dieses Problem ist bekannt [Maruyama *et al.* 1976]. Es macht die Anwendung der Abel-Transformation für die Bestimmung von Brechungsindexfeldern mit *sehr* kleinen Änderungen unsicher.

Kirmse [2003] hat eine weitere Methode (Ring-Methode) an die Hintergrundschlieren-Methode angepasst, die sich von den genannten unterscheidet. Der dabei benutzte Algorithmus soll im Folgenden kurz dargestellt werden. Die Untersuchung dreidimensional-achsensymmetrischer Brechungsindexfelder mit Hilfe der Hintergrundschlieren-Methode erzeugt Verschiebungsfelder. Diese Verschiebungsfelder können mit Kenntnis des Ablenkungsortes unter Anwendung dieser Ringmethode in quantitative Dichteverteilungen umgerechnet werden. Die folgende Darstellung der Ring-Methode erfolgt in Anlehnung an Kirmse [2003]. Das Brechungsindexfeld wird entsprechend der Anzahl der ermittelten Verschiebungsvektoren in eine bestimmte Anzahl von Ringen diskretisiert. Innerhalb eines einzelnen Ringes wird der Brechungsindex dabei als konstant angenommen. Der Gesamtablenkungswinkel der Lichtstrahlen wird als Summe aller Ablenkungswinkel an den einzelnen Ringgrenzen definiert.

$$\alpha = \alpha_1 + \alpha_2 + \dots + \alpha_m \quad (3.13)$$

Mit Hilfe des äußersten Lichtstrahles, der das Brechungsindexfeld gerade berührt (erster abgelenkter Lichtstrahl), wird der Brechungsindex des äußersten Ringes berechnet (Gl. 3.14 und Gl. 3.15). Dadurch kann mit der zweiten Verschiebung und der Kenntnis des Brechungsindex des ersten Ringes die Brechzahl des zweiten Ringes bestimmt werden. Die Bestimmung der gesamten Brechungsindexverteilung erfolgt in dieser Reihenfolge vom Rand des Brechungsindexfeldes zum Kern, Ring für Ring.

$$n' = n \cdot \frac{\sin \phi}{\cos \phi'} \quad (3.14)$$

mit

$$\phi' = \phi - \frac{1}{2}\alpha \quad (3.15)$$

Als Eingangsgrößen der Ring-Methode sind die Einfallshöhen der Lichtstrahlen und deren Ablenkungswinkel erforderlich. Ein großer Vorteil der Hintergrundschlieren-Methode ist die

Verwendung von normalem, divergentem Licht, das *nicht* parallel ist. Dadurch ist die Bestimmung der jeweiligen Einfallshöhe erforderlich, damit der *richtige* Brechungswinkel in der richtigen Höhe eingesetzt wird. Für jeden Lichtstrahl wird entsprechend der Kamera-, Objekt- und Hintergrundposition der Einfallswinkel und die Einfallshöhe bestimmt. Um die Ringmethode auch für die Hintergrundschlieren-Methode anwenden zu können, sind die ermittelten Verschiebungen so umzurechnen, dass die unterschiedlichen Winkel der einfallenden Lichtstrahlen berücksichtigt werden (Abb. 3.25). Dieses Verfahren kann nur *einen*

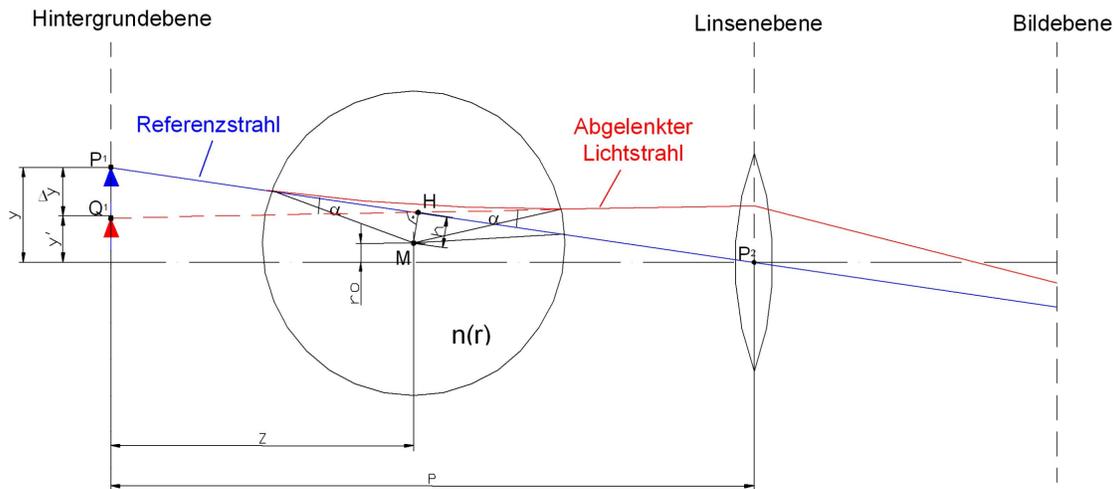


Abbildung 3.25: Bestimmung der Winkel für den Mittelstrahl

Lichtstrahl berücksichtigen, entsprechend wird für die Berechnung der Einfallshöhe der Mittelstrahl benutzt. Der hier eingebrachte Fehler ist gering, wenn die benutzte Blende einen kleinen Durchmesser aufweist.

## Kapitel 4

# Randwirbelbestimmung im Windkanal

### Randwirbelvermessung des Außenflügelmodells eines modernen Transportflugzeuges

Die Bedeutung der Untersuchung von Tragflächenspitzenwirbeln für die Luftfahrt ist bereits in der Einleitung beschrieben worden. Die erforderliche experimentelle Bestätigung der theoretischen Berechnungsmodelle und die Erweiterung des generellen Verständnisses der Wirbelströmung sind durch die umfassende experimentelle Bestimmung der Wirbelcharakteristika (Position, Zirkulations- und Dichteverteilung) mittels des im letzten Kapitel beschriebenen Messsystems möglich. In Verbindung mit PIV kann gleichzeitig zusätzlich die Geschwindigkeitsverteilung und redundant zur Hintergrundschlieren-Methode die Wirbelposition bestimmt werden.

Im Sommer 2002 wurde im transsonischen Windkanal (TWG) des Deutsch-Niederländischen Windkanalverbundes (DNW) in Göttingen die AEROSTABIL 5.0 Messkampagne durchgeführt. Dabei stand die Untersuchung des *Außenflügels* (AEROSTABIL 3D-B) eines modernen Transportflugzeuges im Vordergrund. Im Rahmen dieser Messkampagne wurde dem Autor ermöglicht, gleichzeitig mit der Hintergrundschlieren-Methode in Stereo-Anordnung (Stereo-BOS) und Stereo-PIV, den *Randwirbel* des Flügels hinsichtlich seiner Position und Stärke zu vermessen. Voraussetzung dabei war, dass die eigentlichen Ziele der Messkampagne nicht beeinträchtigt wurden. Dadurch entstand zwar die außergewöhnliche Möglichkeit, die erweiterte Hintergrundschlieren-Methode im transsonischen Windkanal bei Reisefluggeschwindigkeiten anzuwenden, allerdings konnten die Versuchsparameter (Anstellwinkel, Machzahl, statischer Druck, etc.) nur in sehr geringem Umfang durch den Autor beeinflusst werden. Grundsätzliche Änderungen am Versuchsaufbau (Position des Flügelmodells, etc.), sowie der allgemeinen Versuchsdurchführung (Machzahlen, Messreihen, etc.), waren *nicht* möglich.

Dieser Versuch bildet für das entwickelte Messsystem deshalb einerseits zwar einen Tauglichkeitstest unter den rauen Bedingungen eines transsonischen Windkanals, andererseits erlaubte er aber nur *eine* exemplarische Untersuchung eines Randwirbels. Eine spezielle theoretisch motivierte strömungsmechanische Fragestellung über die in Kapitel 2.3 dargestellten Grundsatzfragen der Strömungsmechanik des Wirbels hinaus konnte deshalb nicht verfolgt werden.

Durch die Struktur des Windkanals, wie z.B. Anordnung der Fenster, optische Erreichbarkeit der Messstrecke, etc. und die Montageposition des Modells ist die Beobachtungsebene vorgegeben. Etwa 800 mm hinter dem Modell befinden sich in der Messstrecke auf beiden Seiten Fenster. Diese Fensterposition wird 3D-Position genannt.

## 4.1 Experimenteller Aufbau

### 4.1.1 Der transsonische Windkanal in Göttingen

Der Windkanal (TWG) weist einen geschlossenen Kreislauf auf (Göttinger Bauart) und wird über einen Axialkompressor mit 2 mal 4 Stufen mit einer Leistung von insgesamt 12 MW kontinuierlich angetrieben. Die Meßstrecke hat einen Querschnitt von  $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ . In der Beruhigungskammer ist ein Kühler installiert, der das Aufheizen des Fluids kompensiert. Weitere Einzelheiten über den TWG sind z.B. bei Binder *et al.* [1992] nachzulesen. Es stehen

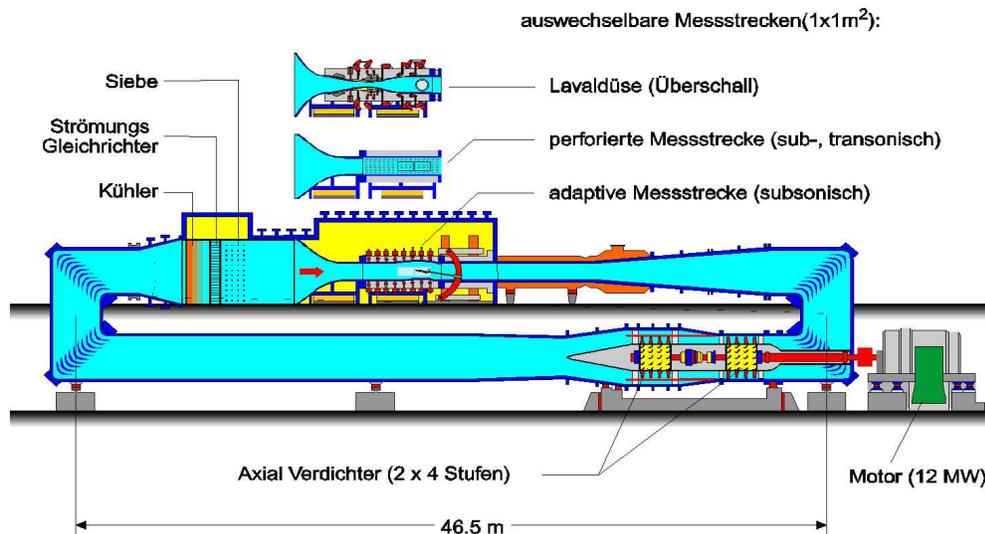


Abbildung 4.1: Übersichtsskizze des Windkanals

unterschiedliche Meßstrecken zur Verfügung, die je nach geforderter Strömungsgeschwindigkeit eingesetzt werden können. Die Meßstrecke ist von dem “Plenum” umgeben, innerhalb

Messstrecke	Geschwindigkeit (Machzahl)
Adaptive Messstrecke	0,3 ... 0,9
Perforierte Messstrecke	0,3 ... 1,2
flexible Lavaldüse	1,3 ... 2,2

Tabelle 4.1: Meßstrecke des Windkanals

dessen der gleiche statische Druck wie in der Meßstrecke herrscht. Durch Variation des statischen Druckes ( $0,3 \dots 1,5 \times 10^5 \text{ Pa}$ ) können verschiedene Reynoldszahlen eingestellt werden.

Für die Durchführung der AEROSTABIL Messkampagne 5.0 wurde die adaptive Meßstrecke gewählt, die die Anpassung der Meßstreckenoberseite und Meßstreckenunterseite gemäß des Druckverlaufs der Strömung gestattet. Um das Modell nicht zu großen Kräften auszusetzen, werden alle Versuche mit gegenüber dem Umgebungsdruck vermindertem statischen Druck durchgeführt. Entsprechend ist das Plenum während der Versuche und der Zeit, die vor und nach dem Versuch für die Druckveränderung benötigt wird, nicht begehbar.

#### 4.1.2 Das untersuchte Modell AEROSTABIL 3D-B

Das Modell stellt den Außenflügel (53,8% der Halbspannweite ohne Winglet) eines modernen Transportflugzeuges dar. Der Flügel ist aeroelastisch und statisch dem Originalflügel ähnlich nachgebildet (Abb. 4.2). Das Modell weist eine Breite von 600,9 mm und eine Flügelfläche von ca. 0,1 m<sup>2</sup> auf (Abb. 4.3). Die Bezugsprofiltiefe beträgt 183 mm. Das verwendete Profil ist superkritisch. Die Flügelstreckung beträgt  $\Lambda = 3,68$  und die Pfeilung der Flügel Nase  $32^\circ$ . Einzelheiten zu dem Flügel und der Messkampagne AEROSTABIL sind bei Dietz *et al.* [2003] zu finden.

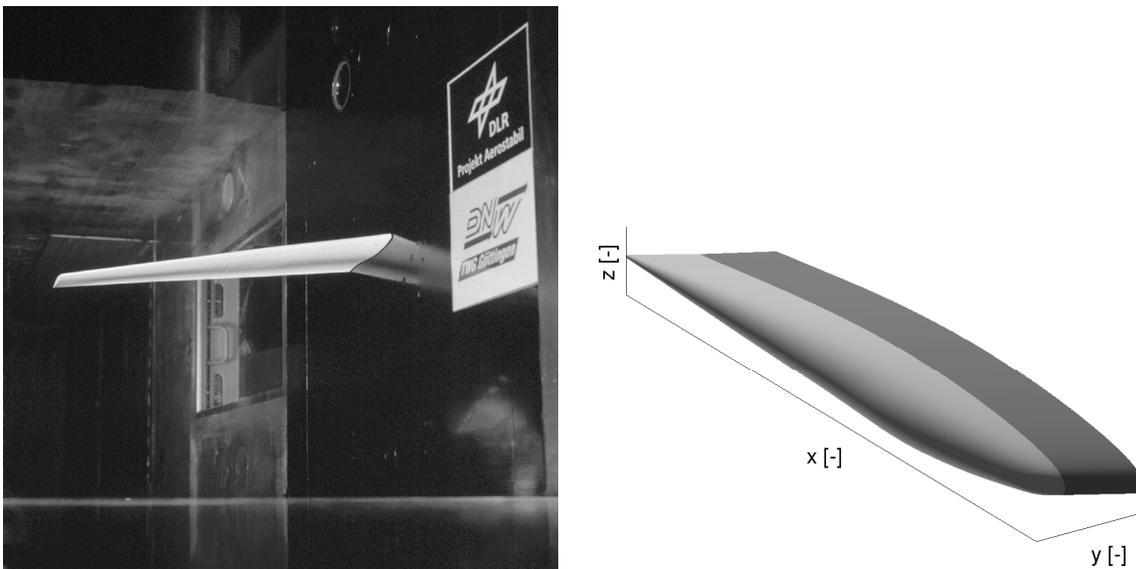


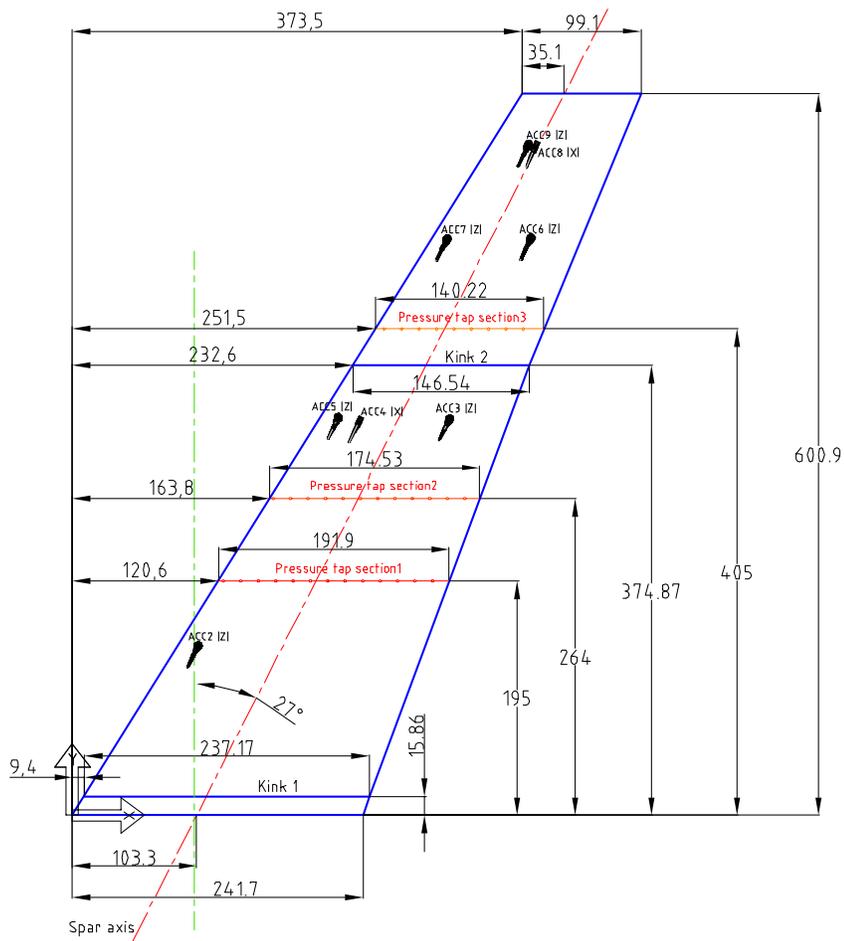
Abbildung 4.2: Flügelmodell in der Messstrecke des TWG (links); rechts: Bild der Flügelspitze [Dietz *et al.* 2003]

#### 4.1.3 Versuchsaufbau der optischen Messtechnik

##### Anforderungen an den Aufbau

Innerhalb dieses Experimentes soll *eine* Stelle der Wirbelströmung mit der Hintergrundschlieren-Methode in Stereo-Anordnung (Stereo-BOS) *und* Stereo-PIV untersucht werden.

Der Einsatz optischer Messtechniken im TWG unterliegt besonderen Restriktionen, da das Plenum bis auf zwei Schlierenscheiben keine Fenster aufweist, die einen Einblick (oder Durchblick) in die Meßstrecke erlauben. Entsprechend muss die Messtechnik hauptsächlich *innerhalb* des Plenums montiert werden. In diesem Raum herrscht der gleiche statische

Abbildung 4.3: Geometrie des untersuchten Modellflügels [Dietz *et al* 2003]

Druck und die gleiche Ruhetemperatur wie in der Messstrecke (300 ... 800 mbar und 25 ... 45°C). Die Messgeräte müssen bei diesen Verhältnissen sicher arbeiten. Vorversuche haben ergeben, dass dies nicht grundsätzlich der Fall ist, infolgedessen sind besondere Vorkehrungen getroffen worden. Die Anpassung der für das Experiment benötigten Geräte an die Umgebungsverhältnisse des TWG werden im Folgenden dargestellt.

- Der Laser reagiert sensibel auf die Druckschwankungen, eine Umrüstung ist aufwendig. Um das zu umgehen, wird der Laser außerhalb des Plenums montiert und der Laserstrahl über ein Fenster in das Plenum eingekoppelt.
- Die Kameras sind gegenüber Druckveränderungen unempfindlich. Die hohe Raumtemperatur und der geringe Druck im Plenum führen aber zur Überhitzung der Kameras. Durch eine spezielle Kühlluftzufuhr wird dieses Problem gelöst.
- Die Blitzlampen (Stroboskope), die zur kurzzeitigen Beleuchtung der Hintergrundfolien benutzt werden, sind bei den kleinen Drücken im Plenum nicht betreibbar. Entsprechend erfolgt die Montage in druckfesten Metallboxen (vgl. Abb. 4.11), die über eine Druckluftverbindung mit Kühlluft versorgt werden.

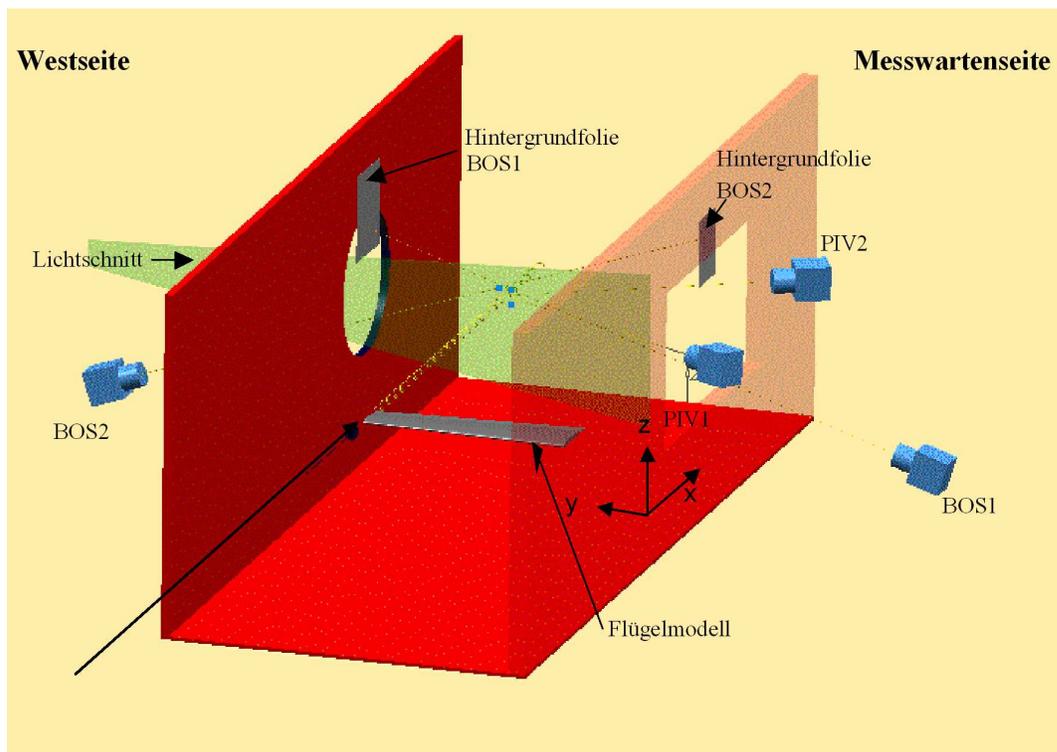


Abbildung 4.4: Skizze der Messstrecke mit Ursprung des Koordinatensystems

Eine Übersicht des gesamten Versuchsaufbaus gibt Abb. 4.4. In der rechten Seitenwand (Messwartenseite) ist der Ursprung des im Folgenden benutzten Koordinatensystems eingezeichnet. Der Aufbau der beiden optischen Messsysteme "Hintergrundsclieren-Methode" und "Particle Image Velocimetry" wird im Folgenden getrennt beschrieben.

#### 4.1.3.1 Aufbau der Hintergrundsclieren-Methode

Aus den bereits beschriebenen Wirkmechanismen der Hintergrundsclieren-Methode ergeben sich folgende Anforderungen an einen experimentellen Aufbau:

- großer Winkel zwischen den Kamerasichtlinien; das Optimum liegt bei  $90^\circ$
- kleiner Abstand zwischen Hintergrund und Wirbel (Objekt)
- Gute Beleuchtbarkeit der Hintergrundfolien durch Stroboskope (Blitzlampen)
- Definition des Messvolumens in Anpassung an die baulichen Gegebenheiten der Messstrecke; die Untersuchung mit der Hintergrundsclieren-Methode und PIV soll gleichzeitig in *einem* Messvolumen durchgeführt werden
- starre Befestigung der Kameras und Hintergrundfolien an der *Windkanalmessstrecke*, damit deren Vibrationen möglichst wenig Störungen einbringt.

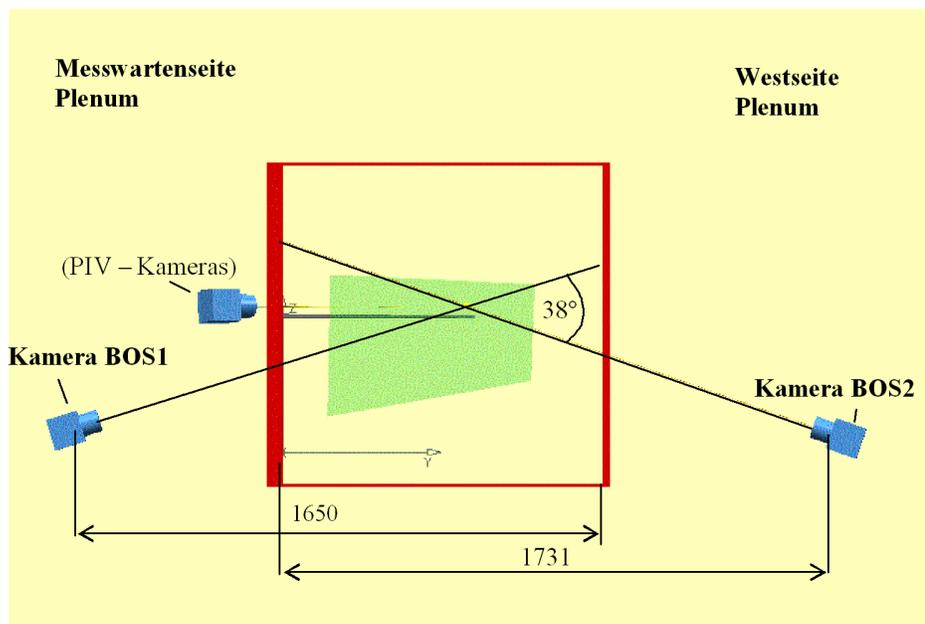


Abbildung 4.5: Übersichtsskizze des Versuchsaufbaus der Hintergrundsclieren-Methode: Schnitt senkrecht zur Strömungsrichtung durch das Plenum, Blickrichtung entgegen der Strömungsrichtung

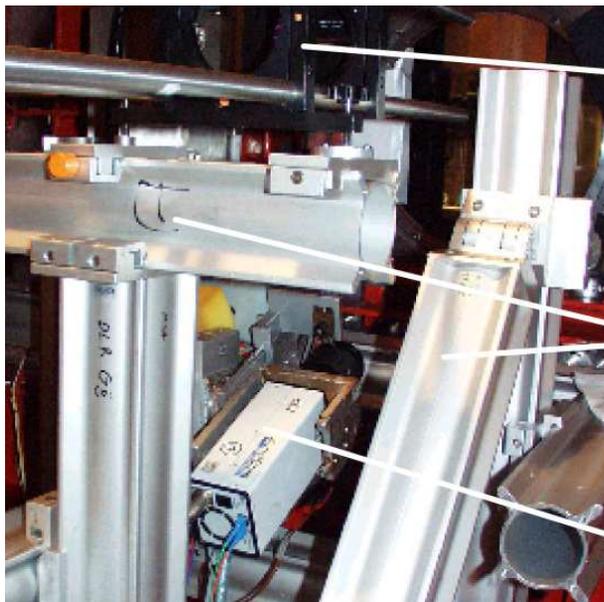
Abbildung 4.5 gibt einen Überblick über den Aufbau der Hintergrundsclieren-Methode. Die Mittellinien der Sichtlinien der Kameras sind in einem vertikalen Schnitt senkrecht zur Strömungsrichtung der Messstrecke eingezeichnet. Aufgrund des beschränkten optischen Zugangs der Messstrecke kann kein größerer Winkel zwischen den Kamerasichtlinien eingestellt werden. Zusätzlich sind die Laserlichtschnittebene und die Kameras für die PIV-Untersuchung dargestellt. Die Blickrichtung ist entgegen der Strömungsrichtung durch das Messvolumen auf das Modell. Abbildung 4.7 zeigt den Aufbau des Messsystems für die Hintergrundsclieren-Methode auf der Ost- und Westseite der Messstrecke.



Stroboskop in  
Druckbox

Kamera  
BOS1

Abbildung 4.6: Versuchsaufbau der Hintergrundschlieren-Methode im Plenum auf der Ostseite



Lichtschnittoptik  
Stereo - PIV

Gestell für  
Lichtschnittoptik

Kamera BOS2

Abbildung 4.7: Versuchsaufbau der Hintergrundschlieren-Methode im Plenum auf der Westseite

Der Versuchsaufbau für die Hintergrundschlieren-Methode besteht im Wesentlichen aus den folgenden Modulen:

**Kameras:** CCD-Kameras mit 135 mm *Zeiss* Objektiven, montiert auf Scheimpflugadaptern mit elektrischen Scharfstellern und Kühlluftschläuchen. Die Kameras haben eine Auflösung von  $1024 \times 1280$  pixel und eine Sensor-Kühlung, die den dynamischen Heligkeitsbereich vergrößert, der mit 12 bit digitalisiert wird. Die Kameras sind auf einem Rahmen aus X-95 Profilen montiert, der an der Windkanalwand (Meßstrecke) fixiert ist. Die Kameras sind über Glasfaserkabel mit den Messrechnern verbunden, auf denen die aufgezeichneten Bilder gespeichert werden. Die Hintergrundebene ist in keinem Fall parallel zu der Bildebene der Kameras. Um dennoch ein Bild zu erhalten, das keine unscharfen Ränder aufweist, wird der Scheimpflugadapter eingesetzt und die Bildebene (= Kamerachip) gegenüber der Objektivhauptebene gekippt. Dadurch kann dem Scheimpflug-Kriterium (siehe z.B. [Schröder 2001]) entsprochen werden: Treffen sich die Verlängerungen der Objekt-, Bild- und Linsenhauptebene in einem Punkt (bzw. im dreidimensionalen Raum: Schnittlinie), so kann das Objekt fokussiert werden, *obwohl* die Bildebene einen Winkel zur Objektebene aufweist. Die Benutzung der elektrischen Scharfsteller ermöglicht das Nachfokussieren des Hintergrundes auch während der Messung, wenn das Plenum nicht zugänglich ist.

**Stroboskope:** Die Hintergrundfolien werden durch Stroboskoplampen beleuchtet. Da diese bei den niedrigen Drücken im Plenum nicht sicher arbeiten, werden sie in druckfeste Boxen eingebaut, die über einen Schlauch mit dem normalen Umgebungsdruck in Verbindung stehen. Über diese Schläuche wird auch die notwendige Kühlluft zugeführt. Ein flexibler Lichtleiter (Durchmesser 10 mm) leitet den Lichtblitz aus der Druckbox an die Meßstreckenwand (Glasscheibe). Durch diese fällt das Licht frei auf die jeweilige Hintergrundfolie, die an der jeweils gegenüberliegenden Meßstreckenwand angebracht ist.

**Hintergrundfolien:** Für den Hintergrund wird eine Folie benutzt, die die erforderliche Haftung aufweist und ein Ablösen der Folie bei den hohen Strömungsgeschwindigkeiten verhindert. Die Erzeugung eines Hintergrundes, der in jedem Fall gute Korrelationen ermöglicht, erfordert die Erstellung durch einen Laserdrucker. Die Hintergrundpunkte haben einen Durchmesser von weniger als 0,1 mm. Obwohl die Farbechtheit der Hintergrundfolie in Bezug auf das Öl mit dem die Partikel für PIV gebildet werden, vorher erfolgreich getestet wurde, sind während des Versuchs an Stellen, an denen sich besonders viel Partikel niederschlagen konnten, Streifen entstanden.

#### 4.1.3.2 Particle Image Velocimetry – Aufbau

Anforderungen an den PIV-Aufbau ergeben sich wie folgt:

- großer Winkel zwischen den Kamerasichtlinien, da die 3-Komponenten-Geschwindigkeits-Auswertung durch kleine Winkel erschwert wird
- gute Überlappung der Bildbereiche der beiden Kameras, da nur im Überlappungsbereich Geschwindigkeitsvektoren bestimmt werden können
- vollständige Aufzeichnung des Wirbelfeldes innerhalb der Lichtschnittebene bis in die Randbereiche der Wirbelströmung

- Messebene (Lichtschnittebene) in direkter Nähe zum Messvolumen der Hintergrundschlieren-Methode
- starre Befestigung der Kameras an der Messstrecke, damit deren Vibrationen möglichst wenig Störungen einbringt
- Messung in 'Vorwärtsstreuung', d.h. das von den Kameras aufgezeichnete Streulicht der Partikel kommt aus einer ähnlichen Richtung, wie der Laserstrahl in die Lichtschnittebene gefallen ist. Die zu untersuchende Bildebene liegt entsprechend *zwischen* Lichtschnittoptik und Kamera.

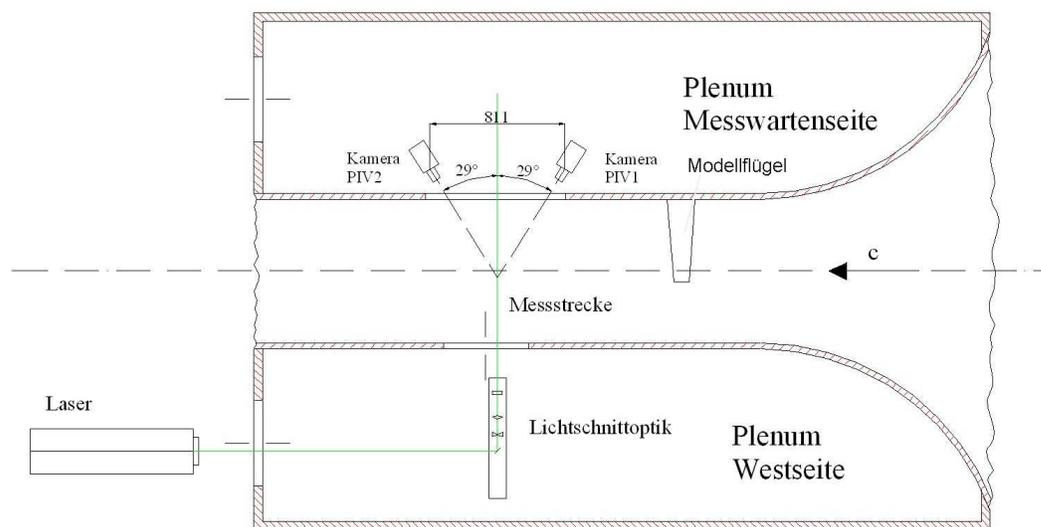


Abbildung 4.8: Draufsicht auf die Meßstrecke und das Plenum: Übersichtsskizze des PIV-Versuchsaufbaus im TWG

Abbildung 4.8 zeigt einen Überblick über den PIV-Aufbau. Abbildung 4.9 zeigt die aufwendige Montage des Laseraufbaus außerhalb des Plenums. Die Einkoppelung des Laserlichts in das Plenum geschieht durch die Schlierenscheibe. Innerhalb des Plenums wird (Abb.4.8) der Laserstrahl um  $90^\circ$  umgelenkt und tritt dann in die Lichtschnittoptik ein. Die Befestigung der Lichtschnittoptik ist innerhalb des Plenums dicht an der Scheibe notwendig, damit die Aufweitung des Lichtschnitts innerhalb der Messstrecke genügend divergiert, so dass das ganze Geschwindigkeitsfeld der Wirbelströmung beleuchtet wird. Der Abstand der Zylinderlinse vom Meßstrecken-Fenster beträgt 300 mm. Die gesamte Lichtschnittanordnung ist in Abb. 4.10 dargestellt. Die Dicke des Lichtschnitts im Bereich des Wirbels betrug in Strömungsrichtung ca. 0,8 mm. Für die PIV-Messung wird das Stereo-PIV-System der DLR-Göttingen des Instituts für Aerodynamik und Strömungstechnik Abteilung Experimentelle Verfahren angewendet. Genauere Informationen dazu sind bei u.a. [Kompenhans *et al.* 2000] und [Schröder 2001] zu finden. Entsprechend werden hier nur die Eckdaten der Komponenten genannt. Der Aufbau besteht aus den folgenden Modulen:

**Partikel:** Die Strömung wird kontinuierlich mit Partikeln, (Größe der Öltropfen ca.  $1 \mu\text{m}$ ) geimpft, die in zwei Partikelgeneratoren [Raffel 1993] mit Hilfe von Laskin-Düsen

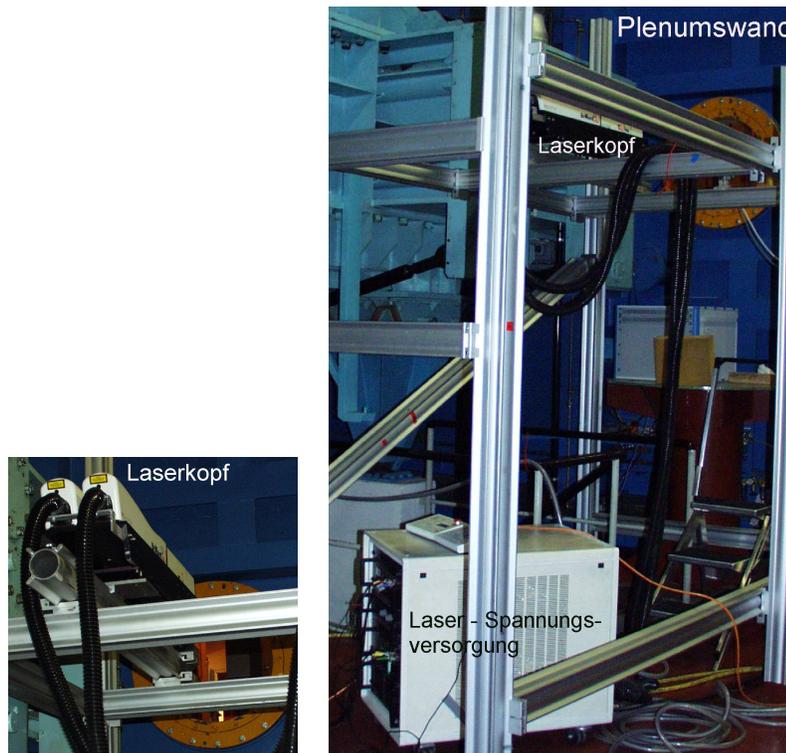


Abbildung 4.9: links: Laserkopf vor der Schlierenscheibe, rechts: Spannungsversorgungseinheit und Montagegestell

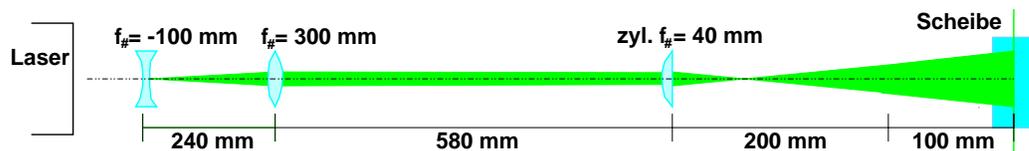


Abbildung 4.10: Skizze des Laserlichtschnitts, ohne Umlenkspiegel

erzeugt werden. Zwei Zyclone sind den Partikelgeneratoren nachgeschaltet, um die zu großen Partikel auszufiltern und eine Verölung des Kanals zu verhindern. Über einen Rechen, der in der Vorkammer des Windkanals montiert ist, werden die Partikel der Strömung beigemischt.

**Laser:** Die Partikel werden über einen gepulsten Nd:YAG Laser mit zwei getrennten Oszillatoren beleuchtet. Dieser Laseraufbau ermöglicht einen sehr kurzen Abstand zwischen den beiden Partikelbelichtungen. Die Laserblitze sind jeweils ca. 6 ns lang und haben eine Energie von jeweils ca. 320 mJ. Der Laserkopf ist außerhalb des Plenums montiert (Abb. 4.9).

**Lichtschnittoptik:** Die Lichtschnittoptik, die den Laserstrahl zu einem Lichtschnitt aufweitet, ist innerhalb des Plenums, direkt vor der Glasscheibe der Messstrecke montiert und fest mit der Messstrecke verbunden.

**Kameras:** Für die Aufzeichnung der Partikelbilder werden die gleichen Kameras, ausgerüstet mit einem 60 mm *Zeiss* Objektiv, wie für die Hintergrundschlieren-Messungen benutzt. Die PIV-Kameras sind jeweils mit einem Scheimpflugadapter und einem elektrischen Scharfsteller versehen. Die Verbindung der Kameras zu den Messrechnern ist über Lichtleiter gewährleistet.

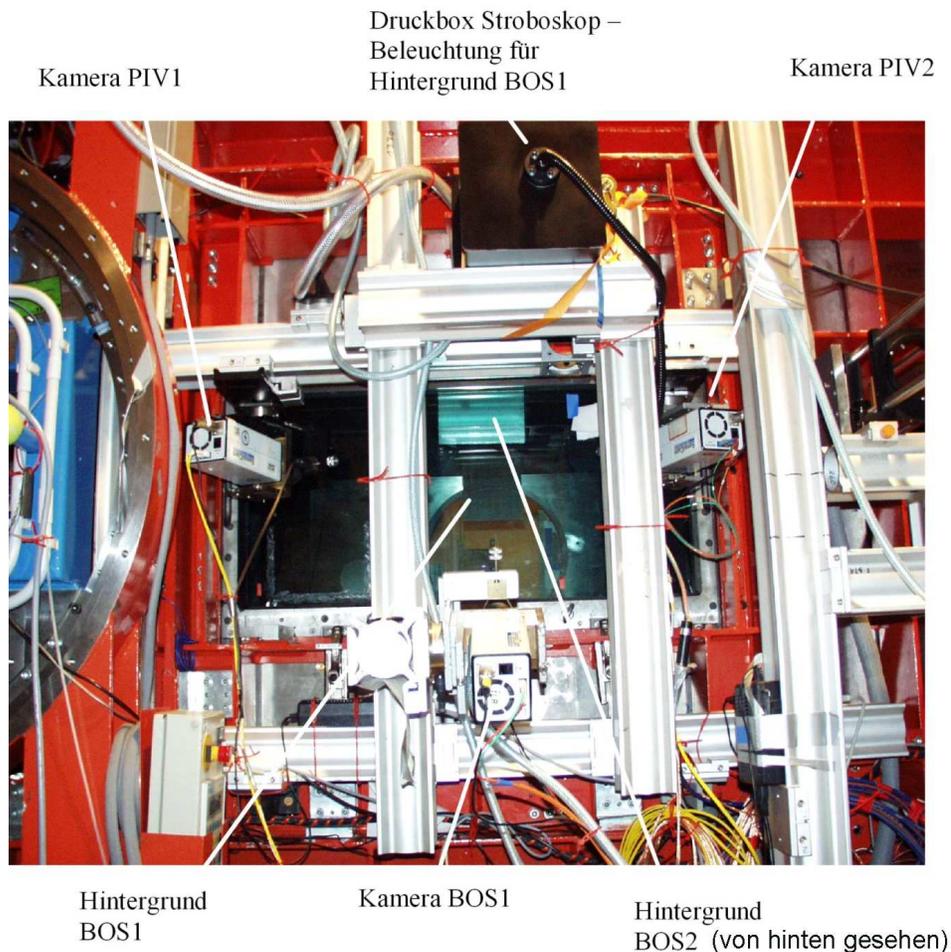


Abbildung 4.11: Versuchsaufbau auf der Ost-Seite (Messwartenseite) des TWG: Blick auf das Fenster der 3D-Position. Die Strömung kommt von links. Das Modell ist “links neben dem Bild”, stromaufwärts eingebaut.

## 4.2 Versuchsdurchführung und Auswertung

### Versuchsdurchführung

Die Synchronisierung der einzelnen Komponenten (Laser, Kamera, Stroboskop) *beider* Messtechniken wird durch eine Ablaufsteuerung (“Sequenzler”) realisiert. Der Sequenzler steuert mit Hilfe eines speziell für diesen Versuch geschriebenen Programms das Zeitmanagement

aller Versuchskomponenten. Dadurch wird sichergestellt, dass z.B. die Beleuchtung der Hintergrundfolien durch die Stroboskope nicht die PIV-Messung stört und umgekehrt. Die Aufnahmefrequenz der Bilder beider Messtechniken beträgt 3 Hz. In diesem Zeitintervall wird mit beiden BOS-Kameras jeweils eine Aufnahme aufgezeichnet, mit den PIV-Kameras jeweils ein *Doppelbild* mit einem Zeitabstand von  $2\mu\text{s}$ . Eine Übersicht über den Ablauf der Sequenz gibt Abb. 4.12.

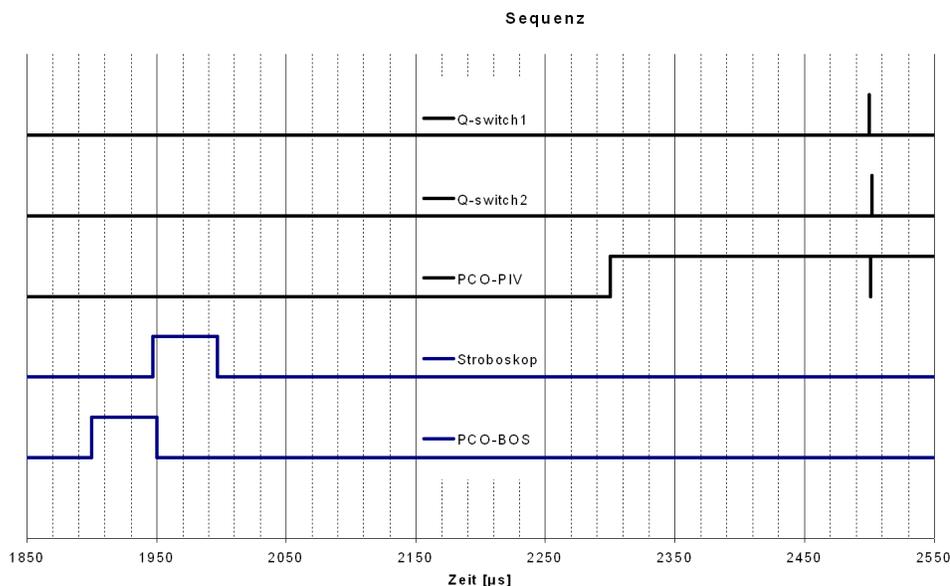


Abbildung 4.12: Sequenz des Versuchablaufs

Die violetten Linien bezeichnen die Signale für die Hintergrundschlieren-Methode. Die einzelnen Elemente der Abbildung bedeuten:

**Q-Switch 1:** mit diesem Signal wird der Laserlichtblitz des ersten Lasers ausgelöst

**Q-Switch 2:** mit diesem Signal wird der Laserlichtblitz des zweiten Lasers ausgelöst

**PCO-PIV:** mit diesem Signal werden die Verschlüsse der beiden PIV Kameras (PIV-Kamera 1 und 2) gesteuert. Der Strich nach unten beschreibt den Wechsel zwischen dem ersten und zweiten Bild des Doppelbildes

**Stroboskop:** mit diesem Signal werden die beiden Stroboskope gesteuert

**PCO-BOS:** mit diesem Signal wird der Verschluss der beiden Kameras für die Hintergrundschlieren-Methode gesteuert (BOS-Kamera 1 und 2)

Beide Messtechniken benötigen unterschiedliche Lichtquellen. Bei PIV beleuchtet ein Laserlichtschnitt die Partikel in der Strömung. Der Abstand zwischen den Laserblitzen für PIV beträgt  $2\mu\text{s}$ . Bei der Hintergrundschlieren-Methode beleuchten Blitzlampen den Hintergrund. Eine Trennung der benutzten Lichtwellenlängen (PIV: 523 nm; Hintergrundschlieren-Methode: Weisslicht) mittels Filter kann bei diesem Versuch nicht durchgeführt werden, deshalb muss der Aufnahmezeitpunkt für die beiden Messsysteme um  $500\mu\text{s}$  gegeneinander verschoben werden. Die durchgeführten Messungen sind in Tabelle 4.2 aufgeführt. Pro

Messreihe. Messpunkt	Anstellwinkel	statischer Druck	Machzahl	Reynoldszahl [in Mio]
1430.6	-3°	50kPa	0,5	0,89
1440.5	+1°	50kPa	0,5	0,89
1440.10	+2°	50kPa	0,5	0,89
1440.13	+3°	50kPa	0,5	0,89
1450.7	-3°	50kPa	0,6	1,00
1450.12	+1°	50kPa	0,6	1,00
1450.15	+2°	50kPa	0,6	1,00
1450.18	+3°	50kPa	0,6	1,00
1460.11	-3°	50kPa	0,7	1,13
1460.8	+1°	50kPa	0,7	1,13
1460.5	+2°	50kPa	0,7	1,13
1460.2	+3°	50kPa	0,7	1,13

Tabelle 4.2: Messpunkte des Versuchs

Hintergrundpunkt	x [mm]	y [mm]	z [mm]
1.1	111	1000	630
1.2	180	1000	634
1.3	111	1000	545
2.1	134	0	707
2.2	204	0	714,5
2.3	202,5	0	617

Tabelle 4.3: Koordinaten der Hintergrundpunkte

Kamera	x	y	z
BOS 1	126,5	-650	77
BOS 2	172	1731	55
PIV 1	-318	-175	456
PIV 2	493	-167	460

Tabelle 4.4: Kamerakoordinaten

Messpunkt sind 50 Bilder mit den Kameras für die Hintergrundschlieren-Methode und 30 Doppelbilder mit den PIV-Kameras aufgezeichnet worden.

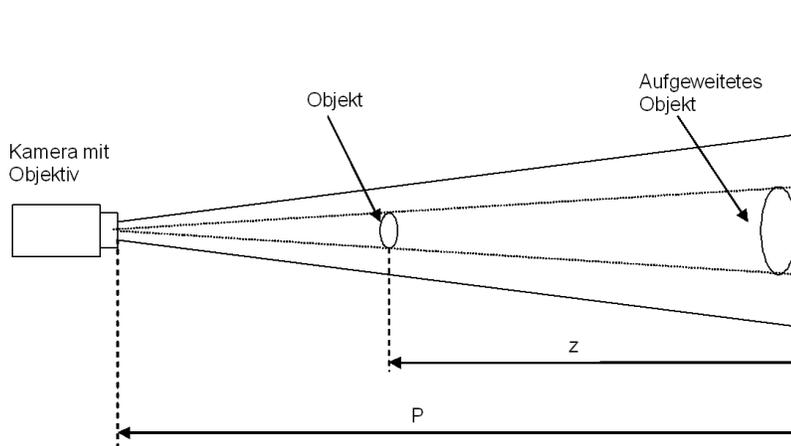


Abbildung 4.13: Aufweitung des Blickfeldes bei der Hintergrundschlieren-Methode

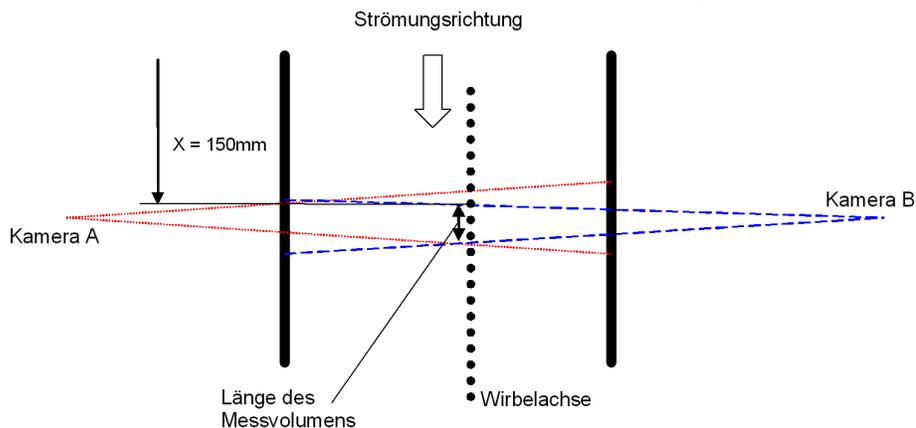


Abbildung 4.14: Draufsicht auf die Messstrecke: Messvolumen der Hintergrundschlieren-Methode, der Pfeil gibt die Länge des Messvolumens von VRIEDER an

Mit Hilfe der Kalibrieraufnahmen der beiden Hintergründe, auf denen jeweils drei (vergl. Tab. 4.3) Punkte markiert sind und den Kamerakordinaten (Tab. 4.4), lassen sich die Bildkoordinaten [pixel] in Raumkoordinaten [mm] umrechnen. Der Nullpunkt des hier verwendeten Koordinatensystems ist der Mittelpunkt des runden Einsatzes auf der rechten Seite (in Strömungsrichtung gesehen) unter dem Fenster der 3D-Position an der Messstreckeninnenwand (vergl. Abb. 4.4). Dieser Einsatz ist bewusst als Nullpunkt gewählt worden. Dadurch können direkt Entfernungen zu Punkten *innerhalb* wie *außerhalb* der Messstrecke relativ zum Nullpunkt bestimmt werden. Die mit der Hintergrundschlieren-Methode aufgezeichneten Objekte erscheinen aufgeweitet (Abb. 4.13). Das Messvolumen, das mit der Hintergrundschlieren-Methode untersucht wird, beginnt bei ca.  $x = 140\text{ mm}$  und hat in Strömungsrichtung eine Tiefe von ca.  $20\text{ mm}$ . Die Abbildung 4.14 zeigt den Blick von oben

auf die Messstrecke des TWG. Eingezeichnet sind die Kameras für die Hintergrundschlieren-Methode und deren Blickfeld in Strömungsrichtung (x-Koordinate). Innerhalb des Volumens, in dem sich die Sichtbereiche der Kamerablickfelder überschneiden, kann mit VRIEDER die Wirbelposition bestimmt werden. Die gepunktete Linie stellt die Wirbelachse dar. Die Lichtschnittebene befindet sich bei  $x = 86$  mm. Die Entfernung zwischen Flügelwurzel und Flügelspitze beträgt ca. 472,6 mm (vergl. Abb. 4.3). Mit 725,6 mm ist das Messvolumen ca. 1/3 (32%) einer Spannweitenlänge (2233,8 mm) vom Flügelende entfernt. Die Kamerapositionen sind in Tabelle 4.4 dargestellt. Das Ende der Flügelspitze befindet sich bei  $x = -585,6$  mm, die Flügelwurzel bei  $x = -1068,2$  mm.

#### 4.2.1 Versuchsauswertung Hintergrundschlieren-Methode

Die Auswertung der Messdaten geschieht grundsätzlich nach dem in Abb. 4.15 dargestellten Schema. Zur Verbesserung der Ergebnisse der Kreuzkorrelation werden auf die Bilder vor

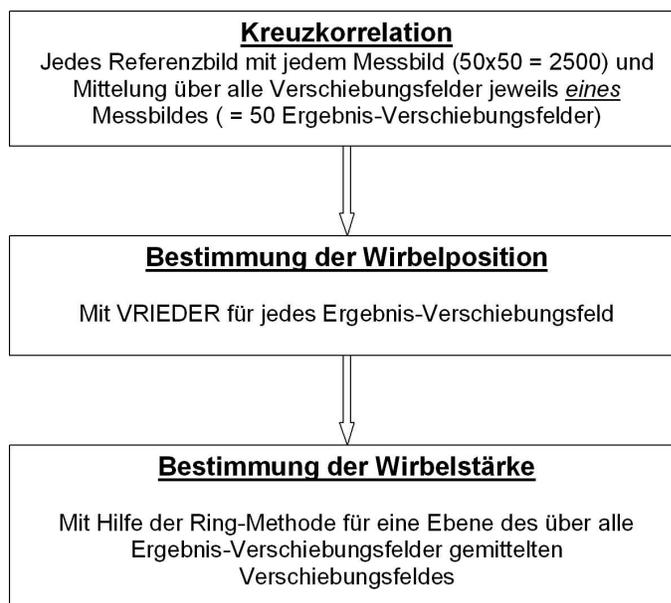


Abbildung 4.15: Auswertung der Messdaten: Hintergrundschlieren-Methode

der Auswertung die folgenden Filter angewandt:

- Hoch-Pass-Filter: Die Kernel-Größe der Raumfrequenzen wird mit  $7 \times 7$  pixel<sup>2</sup> festgelegt, d.h. Graustufenvariationen, die größere Bereiche als  $7 \times 7$  pixel<sup>2</sup> umfassen, werden vom Bild entfernt.
- Binärisierung: Die Graustufen der Pixel, über dem mit Grauwert = 7 festgelegten Durchschnittsgrauwert werden zu weiss (Grauwert = 4096), die darunterliegenden zu schwarz (Grauwert = 1) definiert.
- Anti-Alias-Filter: ein zu  $2 \times 2$  pixel definierter Tiefpassfilter wird benutzt, um hochfrequentes Rauschen aus den Bildern zu filtern.

Die Kreuzkorrelation der Referenz- und Messbilder (Abb. 4.16) geschieht mit einer Auswertefenstergröße von  $16 \times 16$  pixel, die Überlappung der Auswertefenster ist mit 8 pixel zu

50% gewählt. Die Strömungsgeschwindigkeit beträgt für diesen Beispielfall  $\text{Mach} = 0,7$ , der Anstellwinkel des Flügels ist  $-3^\circ$  für das Referenz- und  $+3^\circ$  für das Messbild. Das Ergebnis der Kreuzkorrelation ist ein Feld von Verschiebungsvektoren (Abb. 4.17). Die Vibration des

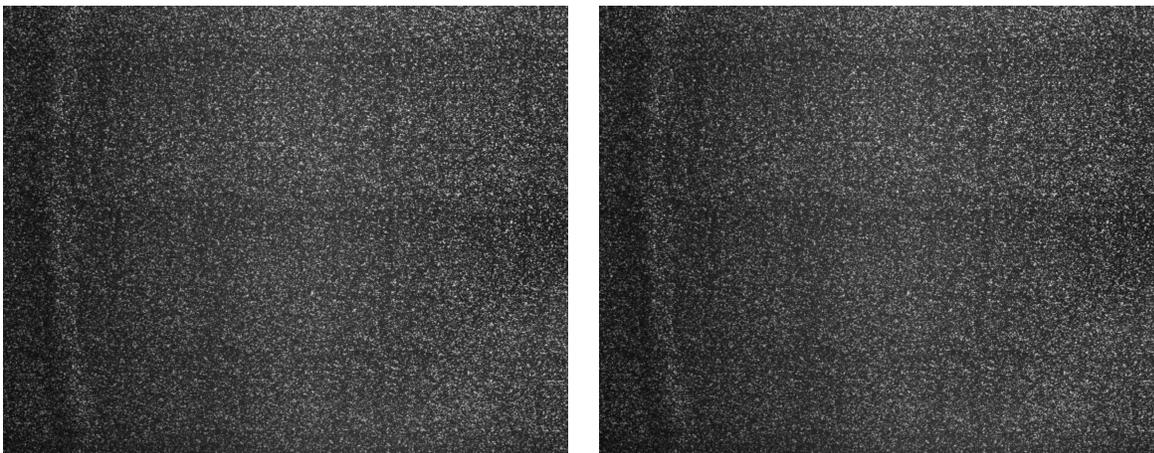


Abbildung 4.16: Beispiel eines Referenz- (links) und eines Messbildes (rechts): Mit dem bloßen Auge ist keine Differenz feststellbar

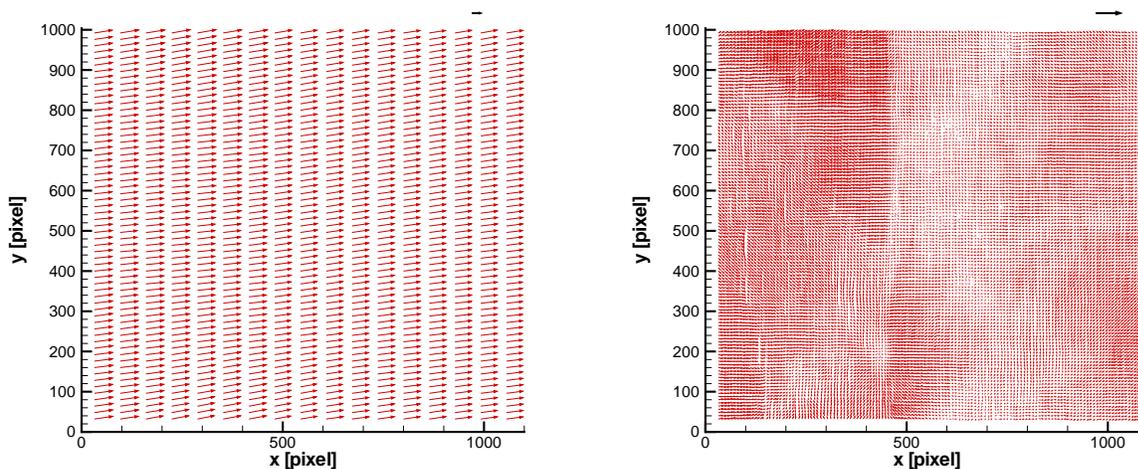


Abbildung 4.17: Vektorfeld mit (links) und ohne (rechts) Allgemeinverschiebung; im linken Bild ist die vertikale Wirbelmittellinie *nicht* erkennbar (Erklärung, siehe Text)

Windkanals führt dazu, dass die Kameras (bzw. das Objektiv) sich gegenüber dem Windkanal bewegen. Durch eine starre Befestigung kann diese Bewegung minimiert werden, eine völlige Vermeidung ist nicht möglich. Dadurch sind einige Bilder gegenüber anderen verschoben. Der Betrag dieser Verschiebungen liegt bei maximal  $\pm 0,1$  mm. Die Kamera- und/oder Hintergrundverschiebungen führen zu einer allgemeinen Verschiebung der Hintergrundpunkte in *eine* Richtung und können mit einer Kreuzkorrelation des gesamten Bildes bestimmt werden. Abbildung 4.17 stellt das Vektorfeld eines verschobenen Bildes (links) und des korrigierten Bildes (rechts) dar. Der besseren Übersichtlichkeit wegen ist im linken Bild nur jeder 8. Vektor in x-Richtung und jeder 2. Vektor in y-Richtung eingezeichnet. Im rechten

Bild sind *alle* Vektoren eingezeichnet. Der Betrag der Vektoren ist der besseren Sichtbarkeit wegen gegenüber der linken Abbildung mit dem Faktor drei multipliziert worden (vergl. die Länge des Referenzvektors jeweils oben rechts im Bild). Es kann das Referenzbild *und/oder* das Messbild verschoben sein.

Es ist ersichtlich, dass der Betrag der ermittelten Verschiebungsvektoren durch die Bildschwankung erheblich größer sein kann, als die Verschiebung aufgrund der Brechungsindexvariation: Erst im rechten Bild ist der Wirbel als vertikale Linie erkennbar. Der Einfluss der Bildbewegung kann abgezogen werden, indem die Durchschnittsverschiebung des Vektorfeldes bestimmt und von *allen* Vektoren abgezogen wird.

### Referenzbild

Das Referenzbild des Hintergrundes, das bei statischem Druck *ohne* Strömung aufgezeichnet worden ist, kann nicht als Referenzbild für die Auswertung benutzt werden, da es gegenüber dem Messbild *mit* Strömung verzerrt ist. Alle so ermittelten Verschiebungsvektoren zeigen in die Bildmitte (Abb. 4.18 links). Eine Erklärung für die Differenz zwischen der Refe-

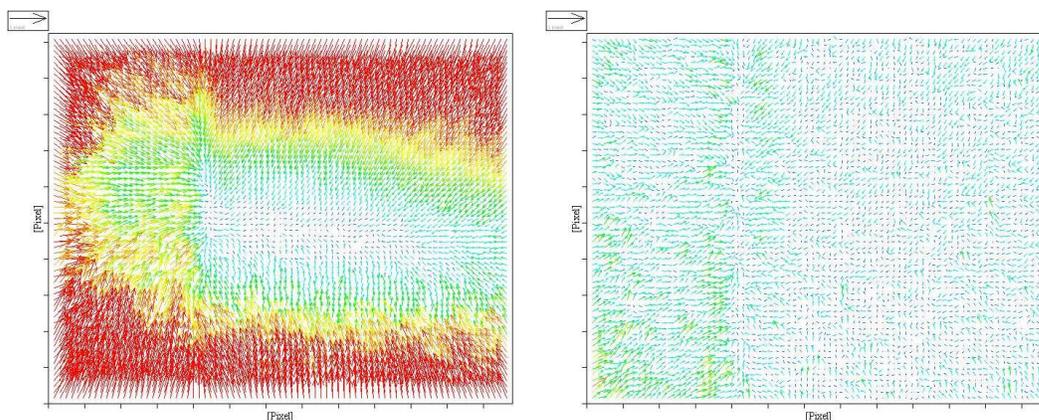


Abbildung 4.18: Verschiebungsfelder *eines* Messbildes ermittelt mit unterschiedlichen Referenzbildern; (links) ohne Strömung bei statischem Druck in der Messstrecke, (rechts): mit Strömung und einem Anstellwinkel des Flügels von  $-3^\circ$

renzaufnahme und der Messaufnahme kann der Druckunterschied sein, der sich auf das Linsensystem der Objektiv auswirkt. Ein anderer Erklärungsansatz geht davon aus, dass sich infolge der Strömung das Fenster zur Messstrecke leicht verbiegt und so einen Linseneffekt hervorruft. Der Unterschied zwischen Referenz- und Messbild ist gering, da aber der zu untersuchende Effekt noch schwächer ist, stört diese Verzerrung bei der Auswertung. Die Verzerrung weist keine Regelmäßigkeit auf. Im Folgenden ist deshalb ein anderes Referenzbild benutzt worden. Ein deutlich besseres Ergebnis lässt sich erzielen, wenn die Messbilder, die bei einem Anstellwinkel des Flügels von  $-3^\circ$  aufgenommen worden sind, als Referenzbilder benutzt werden (Abb. 4.18 rechts), da diese unter den gleichen thermodynamischen Zuständen aufgenommen worden sind wie die Messbilder, die bei einem positiven Flügelanstellwinkel aufgenommen worden sind. Für alle im Folgenden gezeigten Ergebnisse wurden die jeweils bei den gleichen Strömungsbedingungen aufgenommenen Bilder bei einem Flügelanstellwinkel von  $-3^\circ$  als Referenzbild benutzt. Bei einem Anstellwinkel von  $\alpha = -3^\circ$  wird kein auf einen Wirbel zurückzuführendes Dichtefeld erfasst. Die Beeinflussung

des Messergebnisses durch den Auftrieb, den der Flügel bei einem Anstellwinkel von  $-3^\circ$  hat, ist aus zwei Gründen vernachlässigbar:

- Die Anstellwinkelvariation von  $\alpha = -3^\circ, 1^\circ, 2^\circ, 3^\circ$  führt zu unterschiedlichen Auftriebskräften des Flügels. Entsprechend verändert sich auch die äußere Geometrie: Der Flügel ist statisch dem Original nachgebildet, infolgedessen treten unterschiedliche Verbiegungen bei den unterschiedlichen Anstellwinkeln auf. Der Randwirbel wird infolge der unterschiedlichen Flügelspitzenposition an verschiedenen Positionen gebildet.
- Die Wirbelbildung ist maßgeblich von der Auftriebsverteilung des Flügels abhängig. Die bereits vor dem Versuch bekannte Auftriebspolare [Dietz *et al.* 2003] des Flügels bestimmt den Auftriebskoeffizienten für einen Anstellwinkel von  $-3^\circ$  zu  $c_L \leq 0,1$  (Abb. 4.19). Der Auftriebsbeiwert ist ein integraler Wert, der den Auftrieb des *Gesamtflügels* beschreibt. Aufgrund der Schränkung des Flügels tritt bei  $\alpha = -3^\circ$  im Außenbereich des Flügels *kein* Auftrieb mehr auf (Beobachtungsbereich: vergl. Koordinaten in Abb. 4.30).

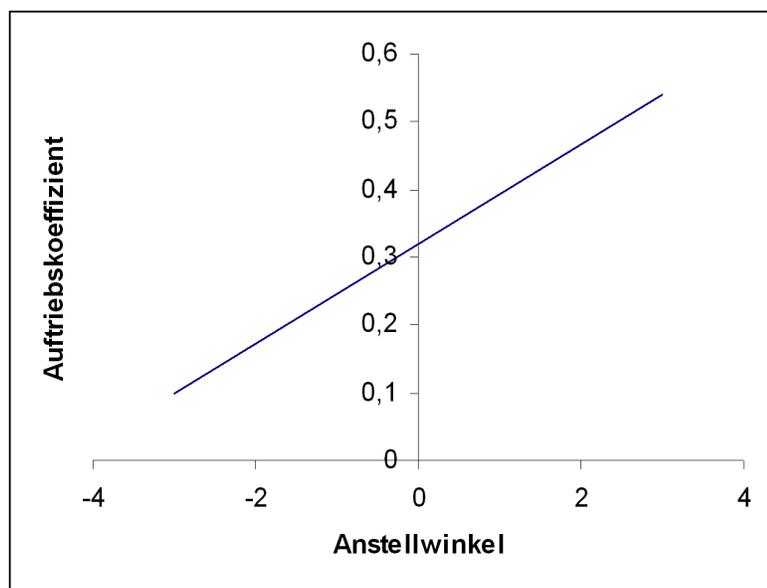


Abbildung 4.19: Auftriebskoeffizient  $c_L$  des Modellflügels über dem Anstellwinkel

### Mittlung der Ergebnisse

Die der Strömung beigemischten Öltropfen für PIV schlagen sich an den Fenstern der Messstrecke nieder. Durch die so an den Fenstern entstehenden Mikrolinsen ergeben sich für die Kameras scheinbare Hintergrundpunkt-Verschiebungen, die *nicht* aufgrund von Brechungsindexvariationen erfolgt sind. Da sich dieser Niederschlag mit der Zeit verändert, kann der Einfluss korrigiert werden. Die Korrelation aller Referenzbilder eines Messpunktes mit jeweils einem Messbild und die Mittelung der dadurch erhaltenen Ergebnisvektorfelder minimiert diesen Effekt. Dadurch müssen für jeden Messpunkt insgesamt 2500 (50 Referenzbilder mit 50 Messbildern) Bilder korreliert werden.

### Bestimmung der Wirbelmittellinie

In dem Vektorfeld (Abb. 4.17) läßt sich visuell die Wirbelmittellinie als die Stelle feststellen, an der sich die Richtung der Verschiebungsvektoren umdreht. Dieses grobe Ablesen der Wirbelmittellinie kann maximal mit einer Genauigkeit von 8 pixel geschehen, da nur alle 8 pixel ein Vektor als Ergebnis der Kreuzkorrelation vorliegt. Die Bestimmung dieser Position mit einer höheren Genauigkeit läßt sich erreichen, indem das ganze Vektorfeld untersucht wird: Die Integration der Hintergrundpunkt-Verschiebungen einer Linie, die für  $y = 500$  pixel aus Abb. 4.17 entnommen wurde, muß auf beiden Seiten der Wirbelmittellinie die *gleiche* Fläche zur Nulllinie einschließen (Abb. 4.20), wenn an den Bildrändern die gleiche Dichte herrscht. Dies gilt auch für die Fälle, in denen ein *nicht*-achsensymmetrisches Brechungsindexfeld untersucht wird, wenn auf beiden Bildrändern der gleiche Brechungsindex herrscht. Indem die Nulllinie vertikal verschoben wird, kann dieses Kriterium erfüllt werden und die Position der Wirbelmittellinie als Schnittpunkt der Integrationskurve mit der Nulllinie, mit einer höheren Genauigkeit als 8 pixel bestimmt werden. Die Nulllinienverschiebung kann durch die Betrachtung der umliegenden Verschiebungen bestätigt werden: Wenn die darüber und die darunter gebildeten Integrationslinien ähnliche Flächenverteilungen aufweisen, ist die Verschiebung der Nulllinie bestätigt.

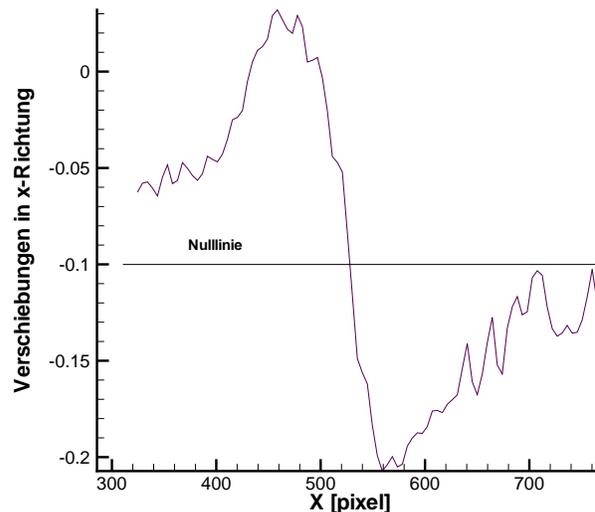


Abbildung 4.20: Verschiebungen in x-Richtung aufgetragen über der x-Achse (Werte aus Abb. 4.17 bei  $y = 500$  pixel entnommen). Die Nulllinie ist um -0,1 pixel verschoben.

### Korrektur des Glasscheibeneinflusses

Für die Auswertung der Verschiebungsfelder werden den Bildkoordinaten in [pixel] mit Hilfe einer Umrechnungsmatrix Raumkoordinaten zugeordnet. Der Sichtwinkel beider Kameras bildet einen Winkel  $\neq 90^\circ$  zu den Fensteroberflächen der Messtrecke. Da die Glasscheiben eine nicht zu vernachlässigende Dicke aufweisen (24 mm und 50 mm), ist eine Korrektur der optischen Kamerapositionen erforderlich.

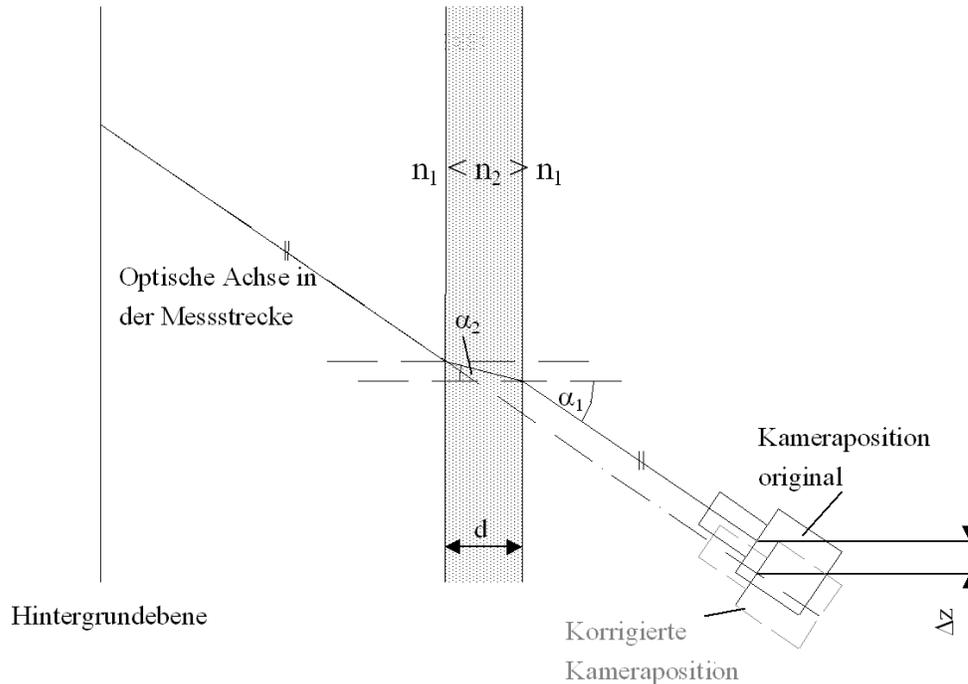


Abbildung 4.21: Bestimmung der optischen Kamerapositionen infolge der Glasscheibe

Die Verschiebung der Kameraposition zur Korrektur der Lichtbrechung innerhalb der Glasscheiben berechnet sich nach Gl. 4.1 zu  $\Delta z$ , als Funktion der Winkel  $\alpha_1$  und  $\alpha_2$  und der Dicke der Glasscheibe  $d$ .

$$\Delta z = (\tan \alpha_1 - \tan \alpha_2) \cdot d \quad (4.1)$$

Der Winkel  $\alpha_1$  lässt sich aus den Kamera- und Bildkoordinaten bestimmen, der Winkel  $\alpha_2$  muss nach dem Brechungsgesetz von Snell (Gl. 4.2) bestimmt werden.

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \text{konst.} \quad (4.2)$$

Aus den Vektorfeldern lässt sich in der beschriebenen Weise die Position der Mittellinie in Bildkoordinaten [pixel] extrahieren. Mit VRIEDER kann daraus die räumliche Wirbelposition bestimmt werden.

Die Kenntnis der Wirbelposition ermöglicht in Verbindung mit der Ring-Methode die quantitative Auswertung der Vektorfelder hinsichtlich der Dichteverteilung des Wirbels.

#### 4.2.2 Versuchsauswertung Particle Image Velocimetry

Die Stereo-Auswertung der Messdaten geschieht nach dem z.B. bei Raffel *et al.* [2002] oder Schröder [2001] dargestellten Verfahren.

1. Die Entzerrung der Kalibrierbilder (Abb. 4.22) von Kamera A und Kamera B definiert eine Matrix, mit deren Hilfe jeweils die PIV-Aufnahmen der beiden Kameras entzerrt

werden (Abb. 4.23) [Ehrenfried 2002].

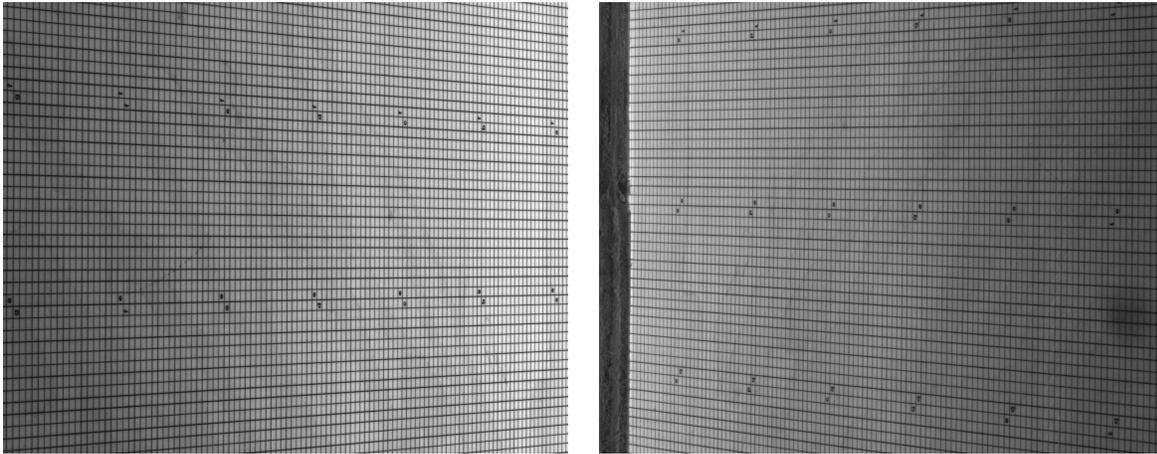


Abbildung 4.22: Kalibrierbilder Particle Image Velocimetry: Kamera PIV 1 (links), Kamera PIV 2 (rechts)

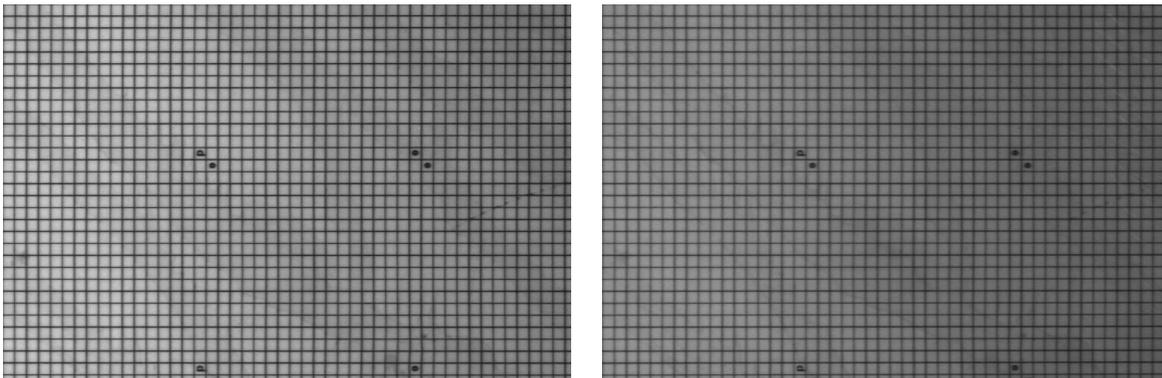


Abbildung 4.23: Entzerrte Kalibrierbilder: Kamera PIV 1 (links), Kamera PIV 2 (rechts)

2. Die Korrelation der jeweils ersten Bilder beider Kameras mit sehr großen Auswertefenstern ( $252 \times 252$  pixel) ermöglicht eine Kontrolle, wie gut die beiden Bilder übereinanderliegen. Wenn das Kalibriergitter genau in der Position der Lichtschnittebene aufgezeichnet worden ist, ergibt sich *kein* Versatz der Bilder, da beide Bilder zur gleichen Zeit aufgenommen wurden. Bei dieser Messung *ergibt* die Korrelation einen Versatz von 216 pixel. Infolgedessen hat sich die Lichtschnittposition unter den Messbedingungen verändert. Vermutlich hat die Druckänderung im Plenum zu einer veränderten Brechzahl und damit zu einem anderen Lichteintrittspunkt des Lasers in die Lichtschnittoptik geführt. Im vorliegenden Fall kann aus dem Versatz der Bilder und dem Kamerasichtwinkel die Lichtschnittwanderung zu 6 mm bestimmt werden. Entsprechend müssen die im ersten Schritt ermittelten Entzerrungsmatrizen korrigiert werden.
3. Mit Hilfe der, in ihrer Funktion gemäß Schritt 2 korrigierten Matrizen werden die

Rohdaten (Bild 1 und 2) entzerrt.

4. Die Korrelation der beiden Bilder (erster und zweiter Laserblitz) jeder Kamera ergibt jeweils ein Vektorfeld.
5. Die Anwendung von Algorithmen zur Detektierung von Ausreißern ermöglicht die Reduzierung derselben.
6. Aus den beiden Vektorfeldern der beiden Kameras kann die dritte Geschwindigkeitskomponente bestimmt werden.
7. Unter der Annahme, dass die Belichtungszeit vernachlässigbar kurz im Verhältnis zur während dieser Zeit von der Strömung zurückgelegten Strecke ist, lassen sich aus dem Verschiebungsfeld die lokalen Strömungsgeschwindigkeiten bestimmen. Mit der Umwandlung der Einheiten [pixel/zeit] in [m/s] ist die PIV-Bearbeitung abgeschlossen. Das ermittelte 3-Komponenten-Geschwindigkeitsfeld steht als Ergebnis zur Verfügung.

Die Besonderheit bei diesem Verfahren besteht darin, dass anstatt der fertigen Vektorfelder die *Partikelaufnahmen* entzerrt werden. Entsprechend sind die Abstände zwischen den ermittelten Vektoren gleich und die Bestimmung der dritten Geschwindigkeitskomponente kann mit höherer Genauigkeit geschehen, da keine Mittelung der Geschwindigkeiten erforderlich ist.

Die endgültige Korrelation der Bilder wird mit Auswertefenstern der Größe  $32 \times 32$  pixel durchgeführt. Die Überlappung beträgt mit 16 pixel 50%.

Die Ermittlung der dritten Geschwindigkeitskomponente kann nur dort durchgeführt werden, wo sich die Sichtbereiche der beiden Kameras überschneiden. Das von Ehrenfried [2002] entwickelte Programm ermöglicht sowohl die Anwahl des Auswertebereiches als auch des Maßstabes. Um eine Verzerrung der Partikelbilder zu vermeiden, die die Korrelierbarkeit verschlechtern könnte, ist das Seitenverhältnis des Bildes zu wahren. Im vorliegenden Fall wird eine Vergrößerung von 20 gewählt (10 pixel = 1 mm). Die Bildgröße beträgt damit  $76 \times 62$  mm.

## 4.3 Ergebnisse

### 4.3.1 Ergebnisse der Hintergrundschlieren-Methode

Abbildung 4.24 zeigt die ausgewerteten und gemittelten Vektorfelder beider Kameras für drei Strömungsgeschwindigkeiten  $\text{Mach} = 0,5 / 0,6 / 0,7$ . Die Vektorfelder stellen jeweils die Mittelung über 2500 Ergebnisvektorfelder dar. In der linken Spalte sind die Ergebnisse der Bilder der Kamera 1, in der rechten Spalte die der Bilder der Kamera 2 dargestellt. Die Bilder sind so gedreht, dass die Strömung von *links* kommt. Der Anstellwinkel des Flügels ist in allen Fällen  $+3^\circ$ . Als Referenzbild werden die unter gleichen Strömungsbedingungen mit einem Flügelanstellwinkel von  $\alpha = -3^\circ$  aufgezeichneten Bilder benutzt. Die Mittellinie des Wirbels läßt sich in Abb. 4.24 visuell einfach bestimmen: Der Bereich, in dem *keine* Hintergrundpunktverschiebungen auftreten, repräsentiert die Punkte, die hauptsächlich durch *unabgelenkte* Lichtstrahlen abgebildet wurden. Es tritt keine Lichtstrahlableitung ein, wenn die durchlaufenen Dichtegradienten parallel zur Lichtausbreitungsrichtung sind. Sobald die daneben liegenden Bereiche in *unterschiedliche* Richtungen abgelenkt werden, ist mit dem Nullverschiebungsbereich die Wirbelmitte definiert.

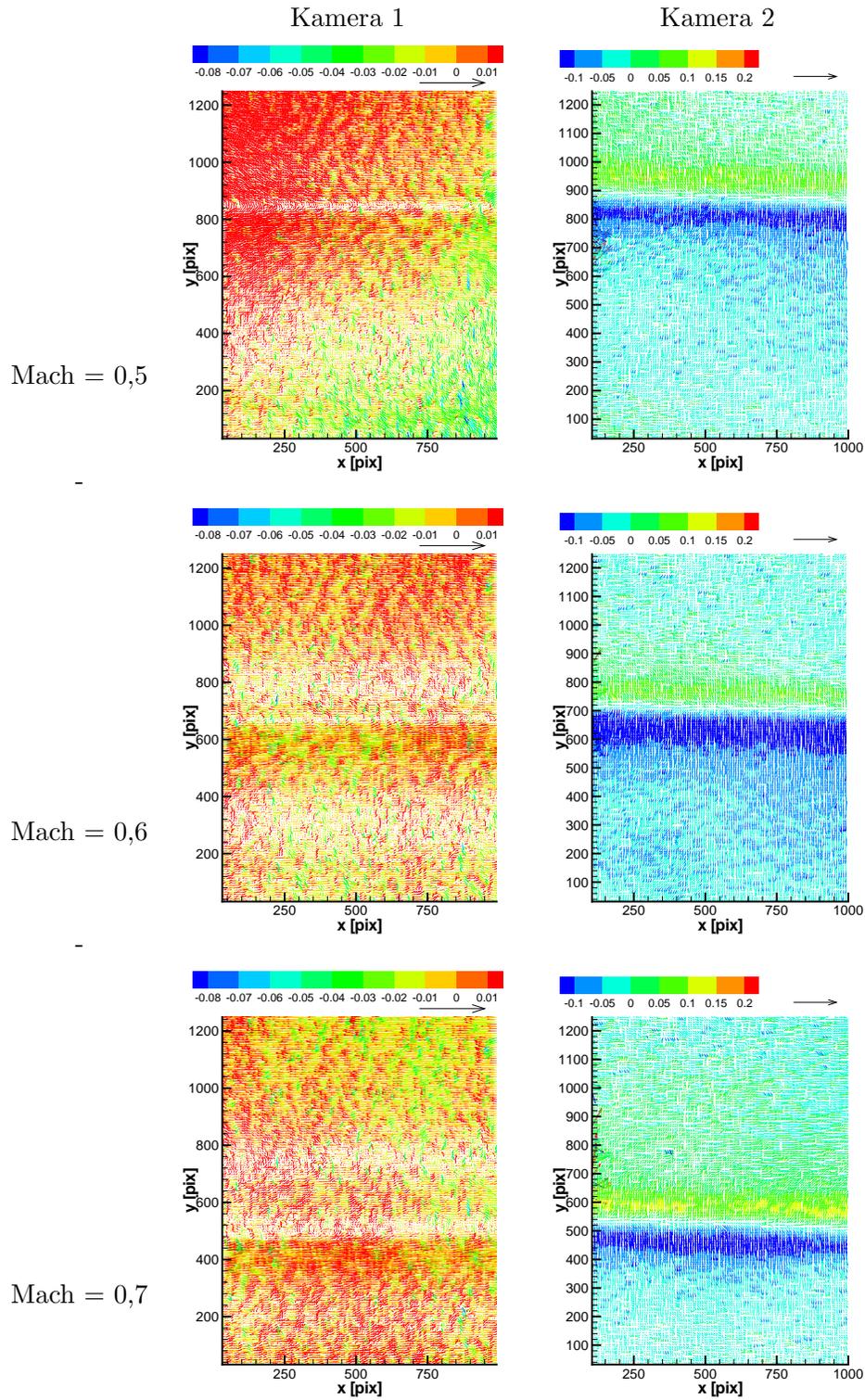


Abbildung 4.24: Randwirbelbestimmung mit der Hintergrundschlieren-Methode: Geschwindigkeitsreihe (Anstellwinkel  $\alpha = +3^\circ$ )

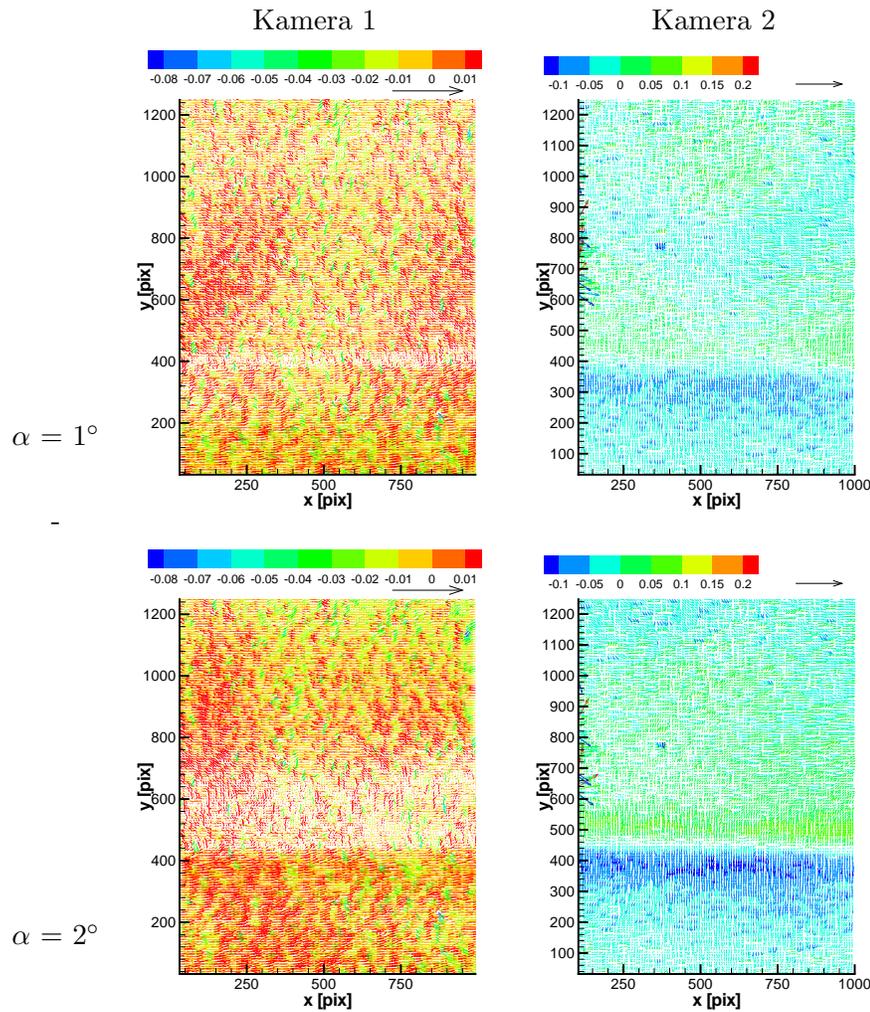


Abbildung 4.25: Randwirbelbestimmung mit der Hintergrundschlieren-Methode: Anstellwinkelreihe (Anströmgeschwindigkeit:  $Mach = 0,7$ )

In Abbildung 4.25 sind die Ergebnisse einer Anstellwinkelreihe dokumentiert. Die linke Spalte zeigt die Ergebnisse der Kamera 1, die rechte die der Kamera 2. Die obere Zeile repräsentiert die Strömung bei einem Flügelanstellwinkel von  $1^\circ$ , die untere von  $2^\circ$  bei einer Anströmgeschwindigkeit von  $Mach = 0,7$ . Die Wirbelpositionen in Bildkoordinaten, die als Eingangsdaten für die räumliche Positionsbestimmung benutzt werden, sind in Tabelle 4.5 angegeben.

Machzahl	Anstellwinkel	Bildkoordinaten in [pixel]			
		Kamera 1		Kamera 2	
		x	y	x	y
0,5	+1	671,4 680	980 64,1	660,1 660,0	965,1 127,9
	+2	761 753	977,4 58,6	752,9 780	962,4 160,5
	+3	839,9 839,89	982,8 51,2	867,0 888,4	981,4 130,1
0,6	+1	538,2 549,0	982,8 39,6	532,7 549	976 147,2
	+2	608,9 625	980,0 64	630,6 649,6	984 201
	+3	676,8 682,2	977,4 72	703,9 720	981,4 133,3
0,7	+1	407,7 396,8	985,6 45	383 402	981 133
	+2	462,1 456,6	985,6 39,6	437,6 457	981 136
	+3	508,3 497,7	985,6 70	513,7 530,6	984 127,9

Tabelle 4.5: Wirbelpositionen in Bildkoordinaten aus den Verschiebungsvektorfeldern

Machzahl	Anstellwinkel	Wirbelpositionen in Raumkoordinaten [mm]		
		x	y	z
0,5	+1	150,19 169,07	580,68 580,60	456,03 456,60
	+2	150,07 169,00	580,29 579,73	451,40 451,48
	+3	149,18 169,36	578,09 577,52	446,29 446,56
0,6	+1	149,02 168,98	579,80 579,07	462,82 463,26
	+2	149,03 168,85	578,17 577,20	458,38 458,84
	+3	149,18 168,77	577,62 577,06	454,82 455,20
0,7	+1	149,05 168,97	580,06 579,94	470,39 470,55
	+2	149,01 169,05	580,40 580,09	467,45 467,68
	+3	149,19 169,06	578,11 578,15	464,40 464,58

Tabelle 4.6: Wirbelpositionen in Raumkoordinaten bestimmt mit VRIEDER: Anfangs- und Endpunkt im Messvolumen

Mit Hilfe von VRIEDER lassen sich aus den in Tabelle 4.5 aufgeführten Bildkoordinaten der Wirbelprojektion auf den beiden Hintergrundfolien die räumlichen Wirbelpositionen als jeweils Anfangs- und Endpunkt des Wirbels innerhalb des Messvolumens bestimmen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 4.6 aufgeführt und in Abb. 4.26 dargestellt. Die dunkelblauen Linien und Symbole stellen die Mittellinien der Randwirbel bei Mach = 0,5 dar. Die roten Linien und Symbole repräsentieren die Mittellinien der Randwirbel bei Mach = 0,6, die hellblauen bei Mach = 0,7. Die unterschiedlichen Symbole bezeichnen die unterschiedlichen Anstellwinkel. Das Quadrat  $\square$  steht jeweils für  $+1^\circ$ , das Dreieck  $\triangle$  für  $+2^\circ$  und der Kreis  $\circ$  für  $+3^\circ$ . Die hellblaue Ebene stellt den Beginn, die gelbe Ebene das Ende des Messvolumens dar, innerhalb dessen mit VRIEDER die Raumposition der Wirbel bestimmt wird. Die Kenntnis der räumlichen Wirbelpositionen ermöglicht die *quantitative* Auswertung der

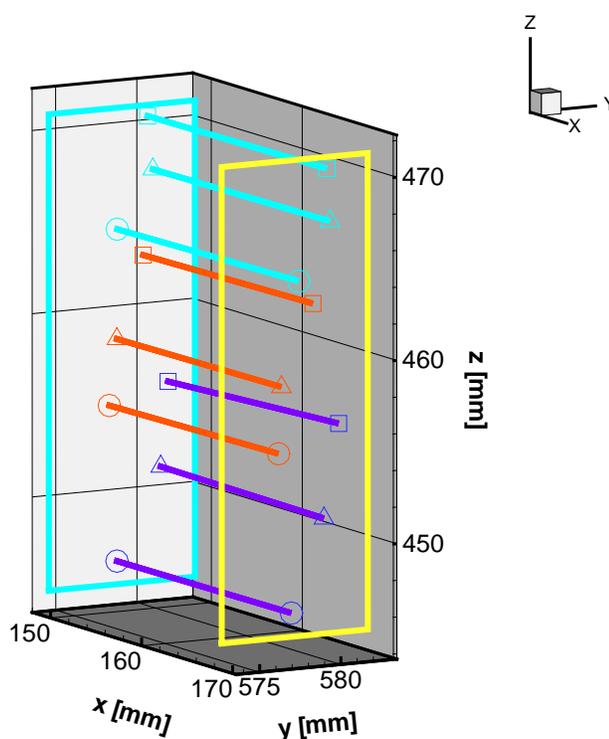


Abbildung 4.26: Wirbelpositionen bestimmt mit VRIEDER

Hintergrundpunktverschiebungen. Mit Hilfe des im vorherigen Kapitel beschriebenen Ring-Verfahrens kann bei bekannten Randwerten die Dichteverteilung der untersuchten Strömung bestimmt werden. Die Ergebnisse sind als normierte Dichteverteilungen in Abb. 4.27 und Abb. 4.28 dargestellt [Kirmse 2003].

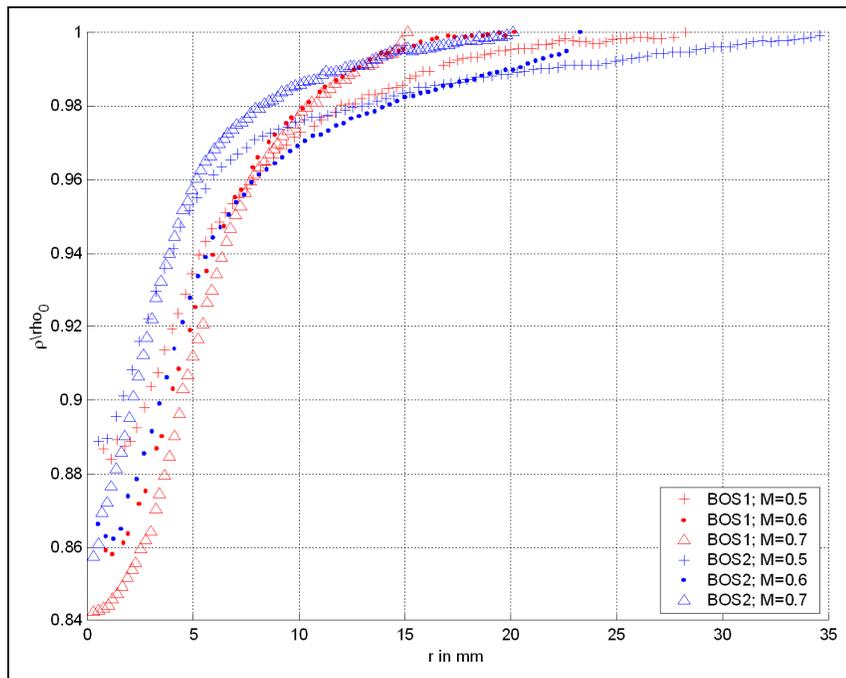


Abbildung 4.27: Dichteverteilung des Wirbels: Geschwindigkeitsreihe (Mach = 0,5 / 0,6 / 0,7) bei  $\alpha = 3^\circ$  [Kirmse 2003]

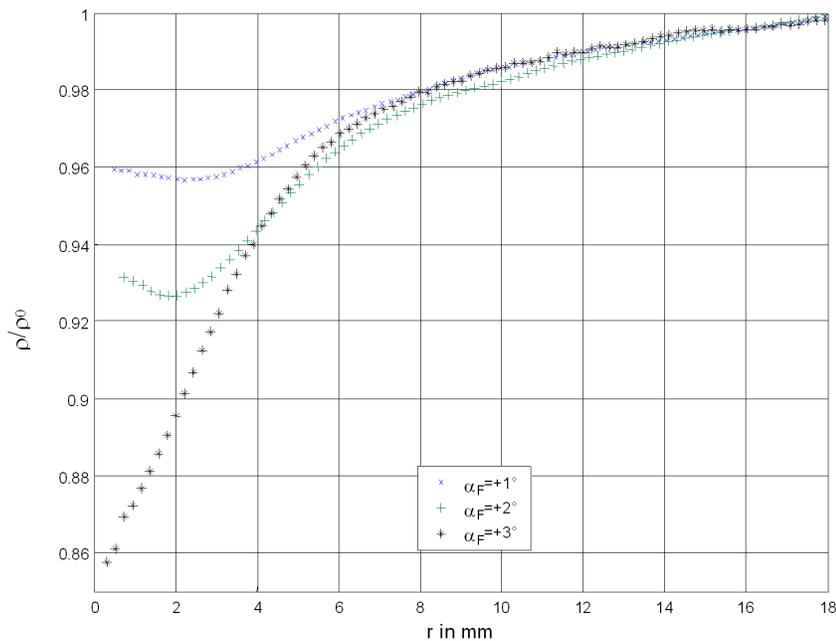


Abbildung 4.28: Dichteverteilung des Wirbels: Anstellwinkelreihe bei Mach = 0,7 und  $\alpha = 1, 2, 3^\circ$  [Kirmse 2003]

### 4.3.2 Ergebnisse der Particle Image Velocimetry-Messung

Das Geschwindigkeitsfeld mit den Anströmgeschwindigkeiten von Mach = 0,5 und 0,7 bei einem Anstellwinkel des Flügels von  $\alpha = -3^\circ$  ist in Abbildung 4.29 dargestellt. Die Blickrichtung ist *in* Strömungsrichtung (= Richtung der x-Achse), die dritte Geschwindigkeitskomponente ( $u$  [m/s]) geht in die Bildebene hinein. Die Achsenbezeichnung ermöglicht die Einordnung der Beobachtungsebene in das benutzte Koordinatensystem.

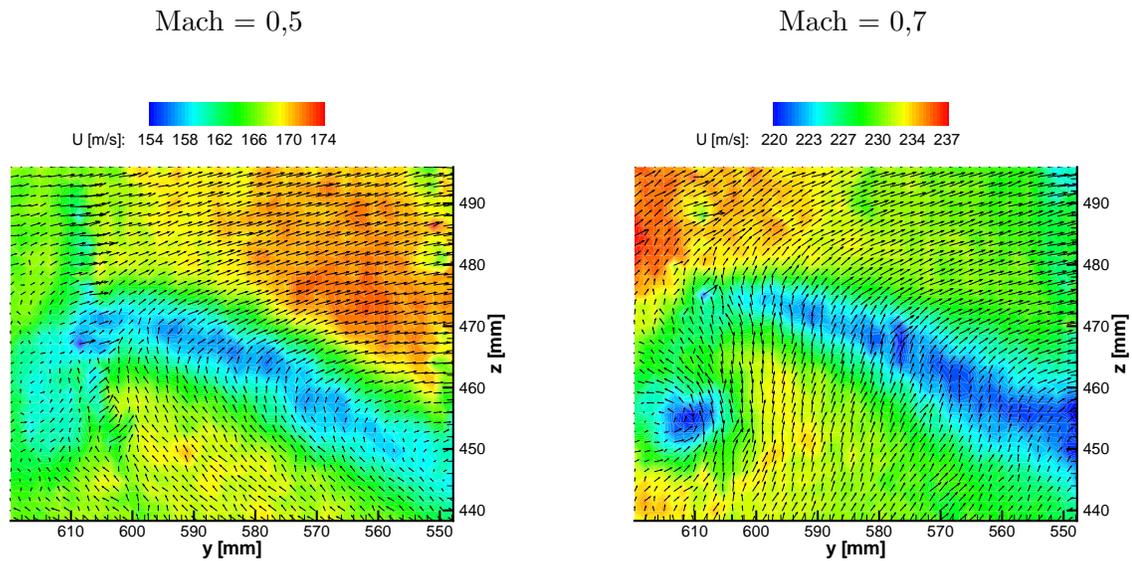


Abbildung 4.29: 3-Komponenten-Geschwindigkeitsfelder der Strömung bei Anstellwinkel  $\alpha = -3^\circ$

Machzahl	Anstellwinkel	Wirbelpositionen in Raumkoordinaten [mm]		
		x	y	z
<b>0,5</b>	+1	86	583,9	453,8
	+2	86	579,8	449,8
	+3	86	577,6	445,4
<b>0,6</b>	+1	86	582,4	460,8
	+2	86	579,1	458,1
	+3	86	576,5	454,8
<b>0,7</b>	+1	86	582,4	469,4
	+2	86	578,6	467,2
	+3	86	575,7	464,3

Tabelle 4.7: Wirbelpositionen in Raumkoordinaten bestimmt aus den PIV-Messdaten

Abbildung 4.30 zeigt eine Auswahl der gemessenen 3-Komponenten-Geschwindigkeitsfelder.

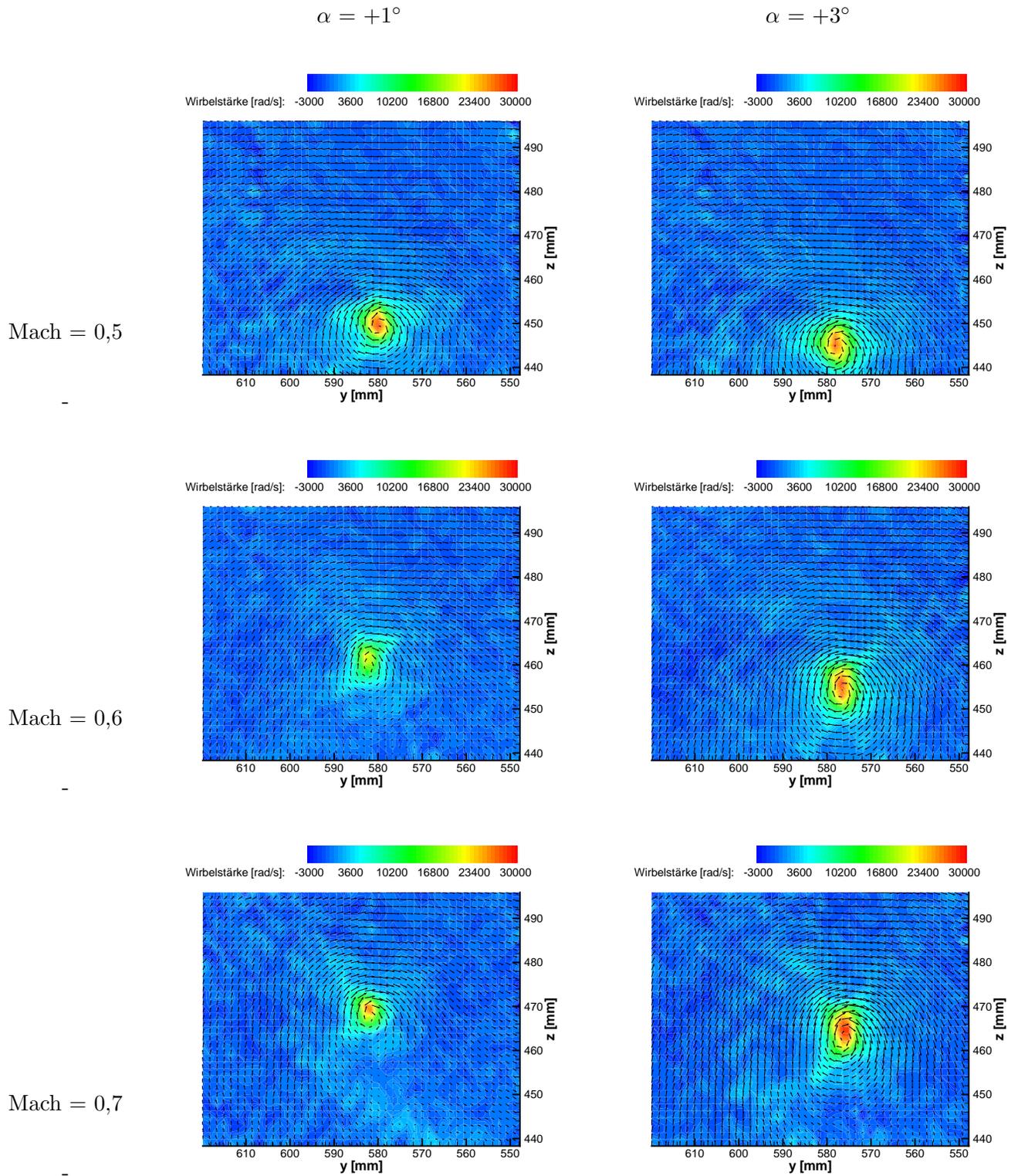


Abbildung 4.30: Geschwindigkeitsfelder des Randwirbels, die Wirbelstärke ist farbcodiert

Die linke Spalte zeigt jeweils das Geschwindigkeitsfeld bei einem Anstellwinkel von  $+1^\circ$ , die rechte Spalte bei  $\alpha = +3^\circ$ . Die Anströmgeschwindigkeiten betragen  $\text{Mach} = 0,5 / 0,6 / 0,7$ . Der Blickwinkel ist der gleiche wie für Abb. 4.30. Anstatt der dritten Geschwindigkeitskomponente ist hier die Wirbelstärke farbcodiert. Die Wirbelstärke berechnet sich in den Einheiten der Strömung nach Gl. 4.3.

$$\omega = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \quad (4.3)$$

Aus den in Abb. 4.30 dargestellten Geschwindigkeitsfeldern lässt sich der Mittelpunkt des Wirbels in der Lichtschnittebene bestimmen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 4.7 zusammengefasst. Auf eine weiterführende Weise der Wirbelmittelpunktsbestimmung nach z.B. Vollmers [2001] kann verzichtet werden, da pro Vektorfeld nur *eine* Wirbelposition zu bestimmen ist.

### 4.3.3 Kombination der Ergebnisse

Die Kombination der Messergebnisse von PIV und der Hintergrundsclieren-Methode ergibt die Möglichkeit, die ermittelten Wirbelpositionen zu vergleichen. Die Messebene für PIV liegt ca. 54 mm vor (stromauf) dem Messvolumen der Hintergrundsclieren-Methode. Um trotzdem einen Vergleich der ermittelten Wirbelpositionen zu ermöglichen, werden die mit VRIEDER bestimmten Wirbelmittellinien linear extrapoliert. Die Ergebnisse der Hintergrundsclieren-Methode (vergl. Abb. 4.24 unten rechts) weisen nach, dass auch Krümmungen in den untersuchten Wirbelabschnitten auftreten können. Entsprechend stellt die Extrapolation der ermittelten Wirbelpositionen auf die Lichtschnittebene nur eine Näherung dar. Abbildung 4.31 zeigt den Vergleich der Ergebnisse beider Messtechniken. Das Messvolumen der Hintergrundsclieren-Methode beginnt an der weißen Ebene und endet innerhalb des gelben Rechtecks. Die gelbe Ebene im Hintergrund stellt die Lichtschnittebene der PIV-Messung dar. Eingezeichnet sind *alle* untersuchten Strömungsverhältnisse. Blaue Linien kennzeichnen eine Anströmgeschwindigkeit von  $\text{Mach} = 0,5$ ; rote von  $\text{Mach} = 0,6$ ; hellblaue von  $\text{Mach} = 0,7$ . Die unterschiedlichen Symbole bezeichnen die unterschiedlichen Anstellwinkel. Das Quadrat  $\square$  steht jeweils für  $+1^\circ$ , das Dreieck  $\triangle$  für  $+2^\circ$  und der Kreis  $\circ$  für  $+3^\circ$ . Die maximale Distanz zwischen den mit PIV gemessenen Wirbelpositionen und den linear extrapolierten Wirbelpositionen ermittelt mit der Hintergrundsclieren-Methode beträgt  $\Delta = \sqrt{\Delta y^2 + \Delta z^2} \leq 2,3 \text{ mm}$ .

## 4.4 Fehlerabschätzung

Durch die Umgebungsverhältnisse ist die Anwendung von optischen Messtechniken im TWG allgemein schwierig. Neben dem wechselnden Druck im Plenum stellen die Scheiben eine Fehlerquelle dar. Für die quantitative Auswertung der Messergebnisse ist die Kenntnis der Kamerapositionen als Ausgangspunkt der Berechnungen von besonderer Bedeutung. Die kleinen Abstände, verbunden mit der Schwierigkeit der optischen Zugänglichkeit des Kanals, erhöhen den prozentualen Fehler bei der Vermessung.

### 4.4.1 Hintergrundsclieren-Methode: Fehlerbetrachtung

Die mit Hilfe der Hintergrundsclieren-Methode ermittelten Ergebnisse bezüglich der Position und Dichteverteilung des Wirbels beinhalten die in Tabelle 4.8 angegebenen Fehler-

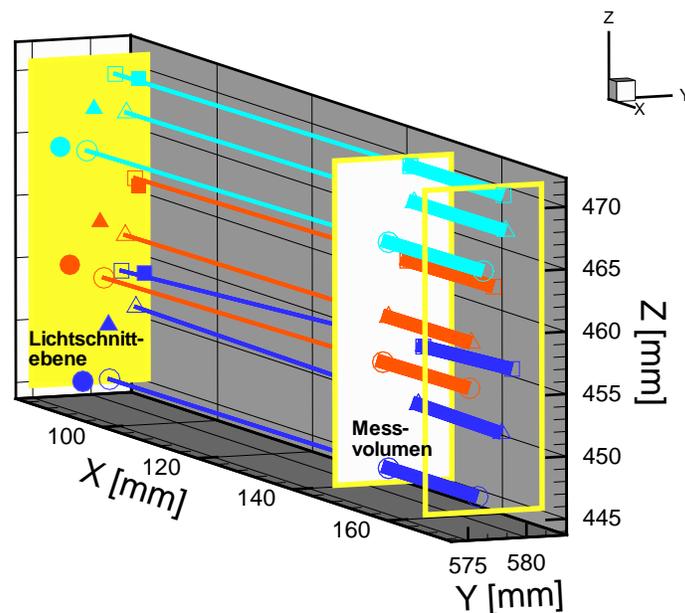


Abbildung 4.31: Wirbelpositionen: Überblick über die Kombination der Ergebnisse mit der Hintergrundschlieren-Methode und Particle Image Velocimetry (vergl. Abb. 4.26)

quellen.

Ein Auswertefenster hat in der Objektebene eine Breite von ca. 0,98 mm. Dichtegradienten die dichter zusammenliegen, können entsprechend nicht mehr getrennt aufgelöst werden.

Die Entfernung  $z_{\text{gewählt}} = 600$  mm liegt leicht über der mit  $R = AM$  bestimmten optimalen Entfernung  $z_{\text{optimal}} = 505$  mm (vergl. Abb. 3.5).

In Abb. 4.24 und 4.25 (jeweils linke Bildspalte) zeigen die Verschiebungsvektorfelder der Kamera 1 jeweils unsymmetrische Verschiebungsverteilungen. Die Ursache dieses Effektes ist in der Scherschicht des Flügels zu sehen. In Abb. 4.30 sind Geschwindigkeitsbereiche erkennbar, die einen kleineren Betrag in x-Richtung aufweisen. Dieser Bereich stellt die Scherschicht dar, ein durch die Berührung mit dem Flügel oder dessen Grenzschicht verlangsamt Geschwindigkeitsfeld.

**Positionsbestimmung der Kameras** Die Vermessung der Kamerachip-Positionen geschieht mit einem Fehler von max. 2 mm

**Verschiebungsfelder** Der Fehler durch optisches Überabtasten ist vernachlässigbar. Der durch die Mittelung der Bilder aufgetretene Fehler lässt sich schwer abschätzen, muss aber als insgesamt gering angesehen werden

**VRIEDER** Die Bestimmung der Verschiebungen geschieht gröber als 1 pixel, die Auflösung der Kameras stellt entsprechend *keine* Begrenzung dar. Die Bestimmung der Wirbelmittellinie durch Verschiebung der Nulllinie kann entsprechend dem Winkel zwischen den Kameras einen Fehler von max.  $\pm 0,2$  mm in der Positionsbestimmung der Wirbelmittellinie durch VRIEDER einbringen.

Ursache des Fehlers	Wertung des Fehlers
optische Überabtastung des untersuchten Volumens; das o.g. Kriterium ( $R = AM$ ) wurde nicht eingehalten	vernachlässigbar, da die zu untersuchenden Dichtegradienten <i>schwach</i> sind
Bestimmung der Mittellinie des Wirbels durch Verschiebung der Nulllinie	$\pm 0,2$ mm
Auflösungsgrenze der Kameras	vernachlässigbar
Positionsbestimmung der Kameras	$\pm 2$ mm
Bestimmung des thermodynamischen Zustandes innerhalb der Messstrecke	vernachlässigbar
Kreuzkorrelation der Messbilder	vernachlässigbar; Auflösung unter 1 mm
Mittelung der Messbilder	insbesondere bei instationären Strömungen schwer abschätzbar
Bestimmung der optisch korrekten Kameraposition; unterschiedliche Scheibenarten (Schlierenscheibe und Verbundglasscheibe)	vernachlässigbar
Quantitative Auswertung der Dichteverteilung mit dem Ring-Verfahren: diskrete Ringanzahl	rechnerisch vernachlässigbar, real unbekannt

Tabelle 4.8: Fehlerquellen bei der Hintergrundschlieren-Methode

**Ring-Verfahren** Die Genauigkeit des Verfahrens ist bisher nur theoretisch bestimmt, der Vergleich mit einem anderen Messverfahren steht noch aus.

Insgesamt kann bei der Positionsbestimmung des Wirbelmittelpunktes von einem Fehler kleiner als 2,2 mm ausgegangen werden.

#### 4.4.2 Particle Image Velocimetry: Fehlerbetrachtung

Die Auswertung der Messaufnahmen mit einer Abfragefenstergröße von  $32 \times 32$  pixel ergibt theoretisch eine Auflösung von  $3,2 \times 3,2$  mm. Durch die Überlappung der Auswertefenster von 50% wird alle 1,6 mm ein Verschiebungsvektor bestimmt. Die reale Auflösung des Systems differiert jedoch von diesen theoretischen Werten, da der Winkel zwischen Lichtschnittebene und Kamerasichtlinie *nicht*  $90^\circ$  beträgt. Tatsächlich sind die Lichtschnittbereiche, die der Kamera näher liegen mit einer höheren Auflösung untersucht worden, die weiter entfernten mit einer geringeren (vergl. Abb. 4.22).

Mit Hilfe der Kreuzkorrelation wird für jedes Auswertefenster nur *ein* Verschiebungsvektor ermittelt. Geschwindigkeitsgradienten *innerhalb* des Auswertefensters können nicht dargestellt werden.

Diese Messtechnik ist in den letzten Jahren kontinuierlich entwickelt und verbessert worden. Dadurch sind die Fehlerquellen durch die Komponenten (Laser, Kameras, Ablaufsteuerung, Auswerteprogramme, etc.) minimiert worden.

Entsprechend resultieren die Fehler im vorliegenden Fall hauptsächlich aus äußeren Einflüssen. Die bestimmten Geschwindigkeitsfelder des Wirbels beinhalten die in Tabelle 4.9 angegebenen Fehlerquellen. Der Vergleich der aus den bekannten Windkanaldaten bestimmten Anströmgeschwindigkeiten mit den gemessenen Geschwindigkeiten (PIV) ist in Tabelle 4.10

Ursache des Fehlers	Wertung des Fehlers
Lichtschnittverschiebung bei Druckveränderung im Plenum	großer Fehler, lässt sich aber exakt korrigieren
Ungenauigkeit der Positionsbestimmung der Kameras	$\pm 2$ mm
Ungenauigkeit der Positionsbestimmung der Referenzpunkte auf dem Kalibriergitter	$\pm 0,25$ mm
Verzerrung der Partikelbilder durch die Meßstreckeninnenwand, diese besteht aus dreischichtigem Verbundglas mit 2 Zwischenfolien	vernachlässigbarer Fehler durch optimierten Blickwinkel und Anwendung von Bildfiltern
Lichtschnitt steht senkrecht zur Strömungsgeschwindigkeit entsprechend wird großer Partikelverlust erwartet	kein Partikelpaarverlust sichtbar: die Bilder zeigen eine gute Korrelation

Tabelle 4.9: Fehlerquellen bei den PIV-Messungen

Strömungsgeschwindigkeit			
Machzahl	errechnet	bestimmt mit PIV [m/s]	
	ungestörte Strömung vor dem Flügel [m/s]	in der Scherschicht	in der Außenströmung ( $\neq$ ungestörte Strömung!)
0,5	169,6	154	174
0,6	201,5	194	206
0,7	232,4	220	237

Tabelle 4.10: Vergleich der Strömungsgeschwindigkeiten

dargestellt. Die Rechnung nach Gl 4.4 und Gl. 4.5 beruht auf isentroper Zustandsänderung, bezieht sich entsprechend auf die Strömung *vor* dem Modellflügel.

$$\frac{T_0}{T} = 1 + \frac{\kappa - 1}{2} \cdot Mach^2 \quad (4.4)$$

$$u = Mach \cdot \sqrt{\kappa RT} \quad (4.5)$$

Im Nachlauf des Modells ist die Strömungsgeschwindigkeit geringer als errechnet, die verzögerte Scherschicht ist sichtbar (vergl. Abb. 4.30). In der ungestörten Strömung ist die Strömungsgeschwindigkeit aufgrund der Verdrängung durch das Modell höher. Die gute Übereinstimmung der mit PIV *bestimmten* mit den *errechneten* Strömungswerten beweist die hohe Präzision der PIV-Messung.

## 4.5 Diskussion der Ergebnisse

### 4.5.1 Messtechnik

Die gleichzeitige Untersuchung eines Randwirbels mit der stereoskopischen Hintergrundschlieren-Methode und Stereo-PIV wurde hier erstmals durchgeführt.

Die Genauigkeit der Ergebnisse zeigt, dass Fehlerquellen bei der Aufnahme und Auswertung der Messbilder der Hintergrundschlieren-Methode und PIV reduziert werden konnten.

Das geschilderte Experiment ist unter den harten Versuchsbedingungen des transsonischen Windkanals durchgeführt worden, stellt also keinen Laborversuch dar.

Die Kosten für die Betreibung des Windkanals ließen eine Wiederholung der Messungen *nicht* zu. Entsprechend musste der Versuchsaufbau *während* des Experimentes, d.h. in den Nächten zwischen den Messtagen optimiert werden.

Im Folgenden soll auf die Besonderheiten der Versuchsdurchführung, Auswertung und Ergebnisse der beiden Messtechniken (Hintergrundschlieren-Methode und PIV) eingegangen werden.

#### 4.5.1.1 Hintergrundschlieren-Methode

Die effektive Bestimmung der Wirbelorte und -stärke unter den genannten minimierten Fehlerquellen resultiert aus der im Folgenden dargestellten Optimierung der Auswertung der Messdaten.

**Referenzbilder:** Die Referenzbilder ohne Strömung konnten *nicht* zur Auswertung benutzt werden, weil sie gegenüber den Bildern mit Strömung verzerrt sind. Stattdessen hat die Korrelation der Messaufnahmen bei positiven Flügelanstellwinkeln mit denen bei  $\alpha = -3^\circ$  als Referenzbild gute Ergebnisse gebracht. In diesem Fall sind die Messaufnahmen bei Strömungen mit *gleichen* thermodynamischen Zuständen entstanden. In Abbildung 4.30 wird die Verteilung der u-Geschwindigkeitskomponente ersichtlich. Die Scherschicht wird durch eine, relativ zu dem Rest reduzierte u-Geschwindigkeitskomponente deutlich. Die äußere Form der Scherschicht weist eine Verformung *entgegen* der Drehrichtung des Randwirbels auf. Entsprechend wurde am äußeren Rand des Modells kein Auftrieb erzeugt. Da das v- und w-Geschwindigkeitsfeld *keine* Bewegung der Strömung entsprechend dieser Scherschichtform aufweist, kann zusätzlich davon ausgegangen werden, dass an der Tragflächenspitze aber auch kein bemerkenswerter Abtrieb entwickelt worden ist. Die Verwendung der Messaufnahmen bei einem Anstellwinkel von  $\alpha = -3^\circ$  als Referenzbilder ist damit gerechtfertigt.

**Scherschichteinfluss:** Die Mittelsichtlinie der Kamera 1 liegt etwa parallel zur ausgebildeten Scherschicht des Flügelmodells bei positiven Anstellwinkeln. Die Lichtbrechung hat zwei Haupteinflussgrößen: Stärke des Dichtegradienten *und* Länge des Integrationsweges innerhalb des zur Lichtausbreitung senkrechten Dichtegradienten. Durch den sich für Kamera 1 ergebenden *langen* Integrationsweg innerhalb der Scherschicht werden schwache Dichtegradienten in der gleichen Größenordnung durch Hintergrundpunktverschiebungen dargestellt, wie die Dichtegradienten innerhalb des Wirbels. Die Symmetrie der Verschiebungen für diesen Bereich (in Abb. 4.24 oberhalb der Wirbelmittellinie) ist daher nicht gegeben. Das Nulllinien-Verschiebungsverfahren zur exakten Wirbelmittellinienbestimmung kann entsprechend nur bedingt angewendet werden. Die Wirbelposition muss deshalb in diesem Fall mit Hilfe der Position der

Linie bestimmt werden, die *keine* Verschiebungen aufweist. Da diese Linie in den Messbildern deutlich ist und daneben wieder ein, wenn auch schwacher Anstieg der Verschiebungen abgelesen werden kann, lässt sich die Position der Nulllinie zwar nicht über das Flächen-Gleichheits-Kriterium korrigieren, aber trotzdem mit einem Fehler kleiner als 2 pixel (= 0,2 mm) bestimmen.

**Mittelung der Bilder:** Die Korrelation der während der Vortests entstandenen Messaufnahmen zeigen direkt den Randwirbel als Verschiebungsband wie in Abb. 4.24. Bei den Aufnahmen, die während der Hauptmessung entstanden sind, zeigt das Verschiebungsfeld als Ergebnis der Korrelation *eines* Referenzbildes mit *einem* Messbild kaum einen sichtbaren Effekt, der Randwirbel ist nicht erkennbar. Die Störungen durch das sich an den Scheiben niederschlagende Seeding sind zu groß. Die Bewegung dieser Störgebiete während der Messzeit eines Messpunktes (ca. 18 s) über das Meßstreckeninnenwand erlaubt die Mittelung der Ergebnisse *ohne* dass die Signifikanz des zu untersuchenden Effekts gestört wird, da die Störung statistisch verteilt ist. Der Vergleich der Verschiebungsfelder unterschiedlicher Messaufnahmen, gemittelt jeweils über alle Referenzaufnahmen, zeigt vernachlässigbare Unterschiede. Die Mittelung aller bestimmten Verschiebungsfelder ist somit als das Ergebnis unverfälschend anzusehen.

Das gleiche gilt für die Veränderung der Hintergrundfolien durch das Seeding. Durch die Mittelung der Ergebnisse wird erreicht, dass dieser Effekt auf das Ergebnis vernachlässigbar ist.

Die vorgestellte exakte Bestimmung der Ergebnisse bezüglich der Wirbelposition und -stärke weist die Möglichkeit nach, derartige Wirbeluntersuchungen mit Hilfe der im Rahmen dieser Arbeit erweiterten Hintergrundschlieren-Methode effizient durchzuführen.

#### 4.5.1.2 Particle Image Velocimetry

Obwohl in der Vergangenheit PIV-Untersuchungen in transsonischen Strömungen erfolgreich durchgeführt worden sind, wurden bei dem in diesem Kapitel beschriebenen Versuch in vielerlei Hinsicht neue Wege beschritten. An der Auswertbarkeit der Aufnahmen mit einer Fenstergröße von  $32^2$  pixel<sup>2</sup> kann die erreichte hohe Qualität der Aufnahmen abgelesen werden.

**Laser und Lichtschnitt:** Die Montage des Lasers außerhalb und die der Lichtschnittoptik innerhalb des Plenums stellt besondere Anforderungen an die Einkopplung des Laserstrahls: Die Veränderung der Lichtschnittposition bei der Druckveränderung innerhalb des Plenums zeigt dies. Um dieses Problem in Zukunft zu lösen, wird das PIV-System der Abteilung Experimentelle Verfahren des DLR Göttingen derzeit durch eine aufwendige Laserstrahlkorrekturereinrichtung erweitert.

Durch die angewandten Korrekturen der Messaufnahmen anhand der dargestellten Kontrollschritte wird die Auswertung der Bilder ermöglicht und die hohe Qualität der Ergebnisse gesichert.

**Partikel:** Die große Tangentialgeschwindigkeit der Strömung innerhalb des Wirbels verdrängt aufgrund der Zentrifugalkräfte insbesondere die schwereren der beigemischten Partikel aus der Wirbelmitte. Entsprechend ist die Wirbelmitte als Bereich geringerer Partikeldichte in den Aufnahmen zu erkennen. Aufgrund der gelungenen Konstruktion der Partikelgeneratoren werden aber trotzdem genügend kleine und deshalb leichte

Partikel erzeugt, sodass auf der Abbildung im Wirbelzentrum ausreichend korrelationsfähige Partikelbilder vorhanden sind.

**Kamerablickwinkel** Bei einem Winkel zwischen Mittelsichtlinie der Kameras und Oberfläche der Meßstreckeninnenwand von ca.  $60^\circ$  sind bei der Fensterdicke (50 mm) und der Glasqualität (3-lagige Verbundglasscheibe mit 2 Lagen Folie) starke, über den Bildbereich ungleichmäßige Partikelbildverzerrungen zu erwarten. Diese Verzerrungen erschweren die Korrelation, bzw. verhindern sie. Vorversuche haben ergeben, dass diese Verzerrungen von dem Abstand des Kameraobjektivs zur Glasscheibe abhängen. Ist dieser Abstand klein, sind die Verzerrungen gering. Entsprechend wurde der Versuchsaufbau gemäß dieser Prämisse ausgeführt.

Die Bestimmung der drei Geschwindigkeitskomponenten kann nur dann mit jeweils gleich hoher Genauigkeit geschehen, wenn die Kamerasichtlinien einen Winkel von nahezu  $45^\circ$  zur Lichtschnittebene haben. Bei kleineren Winkeln wird die Bestimmung der Geschwindigkeitskomponenten in der Lichtschnittebene aufwendiger und ungenauer (siehe vorherigen Abschnitt: Fehlerbetrachtung). Die Montage der Kameras direkt an den Meßstreckeninnenwand mit einem Abstand der Objektive zur Scheibe von wenigen Millimetern reduziert diese beiden Fehlerquellen nahezu völlig: Die Partikelbilder weisen keinerlei Verzerrungen auf, und die Ermittlung der dritten Geschwindigkeitskomponente kann sicher erfolgen.

Mit der Präzision der ermittelten Geschwindigkeitsfelder wird auch die Bestimmung des Wirbelmittelpunktes ermöglicht.

#### 4.5.2 Wirbelverhalten

Die Ergebnisse zeigen folgendes Wirbelverhalten:

1. Mit größer werdendem Anstellwinkel sinkt der Wirbel weiter ab (ca 5 mm) und wandert nach innen, zum virtuellen Rumpf (ca. 5 mm). Die bestimmten Variationen der Wirbelposition basieren auf Anstellwinkelveränderungen von  $\Delta\alpha = 2^\circ$  (!).
2. Mit steigender Geschwindigkeit steigt die Wirbelposition. Bei einer Variation der Geschwindigkeit von  $\Delta\text{Mach} = 0,2$  beträgt die Veränderung der Position in z-Richtung ca. 18 mm.

Da die tatsächliche Position der Tragflächenspitze während des Versuchs nicht bekannt ist, kann das genannte Verhalten nicht endgültig beurteilt werden. Informationen hierzu sollten im Rahmen des Aerostabil-Projektes mit der Moiré Modelldeformationsmessmethode gewonnen werden. Entgültige Daten liegen z.Zt. aber noch nicht vor.

Quantitativ ist mit der Modellbeobachtungskamera während des Versuchs festgestellt worden, dass sich die Flügelspitze in Abhängigkeit von der Strömungsgeschwindigkeit, dem Anstellwinkel und des statischen Druckes erheblich (insgesamt bis zu ca. 50 mm) nach oben verbogen hat. Die Genauigkeit dieser Beobachtungen ist nicht sehr hoch (ca.  $\pm 2$  mm). Die Methode bestand in der Markierung der Position der Flügelspitze auf dem Monitor und der Wiederherstellung dieser Position nach dem Test durch manuelles Verbiegen des Flügels. Die so ermittelten Veränderungen der Flügelspitzenposition bei einer Geschwindigkeitsvariation von  $\Delta\text{Mach} = 0,2$  beträgt ca. 17 mm. Diese Ergebnisse stimmen entsprechend gut

überein. Das Modell ist statisch und aeroelastisch dem realen Flügel nachgebildet, entsprechend ist hier ein Grund für das Wirbelverhalten nach Punkt 2 zu sehen. Das Absinken der Wirbelposition nach Punkt 1 ist mit der Bewegung der Flächenspitze durch die Anstellwinkeländerung zu begründen. Entsprechend der Pfeilung des Flügels beträgt die Bewegung der Spitze von  $1^\circ$  auf  $3^\circ$  ca. 12,33 mm. Die Differenz der Wirbelpositionen in z-Richtung bei *einer* Anströmgeschwindigkeit und einem Anstellwinkel von  $1^\circ$  bzw.  $3^\circ$  entspricht etwa diesem Wert (vergl. Tab. 4.6). Die Bewegung der Wirbel nach innen mit steigendem Anstellwinkel lässt sich mit der Theorie von Prandtl erklären, die besagt, dass mit steigender Gesamtzirkulation der Unstetigkeitsfläche sich der Mittelpunkt des aufgerollten Wirbels in Richtung Flugzeugrumpf verschiebt. Die Messwertseite der Messstrecke, an der das Modell befestigt ist, repräsentiert die Richtung “zum Flugzeugrumpf”. Die größere Gesamtzirkulation wird durch den größeren Anstellwinkel erzeugt.

Die quantitative Bestimmung der Dichte- und Geschwindigkeitsverteilung ermöglicht die Anpassung der theoretischen Modelle an die tatsächliche Strömung in einer neuen Art: Eine weitere thermodynamische Größe ist bekannt, das Strömungsfeld ist umfassender bestimmt.

Es gilt zwar allgemein “Keine Strömung ist stationär” [Meier 2003], im Falle dieses Versuchs konnte aber gezeigt werden, dass die Änderungen der Wirbelpositionen während der Messzeit kleiner als 0,1 mm sind.

Die Wirbelposition konnte mit beiden Messverfahren bestimmt werden. Die unterschiedliche Lage der Vermessungsorte (Lichtschneitebene und Messvolumen der Hintergrundschlieren-Methode liegen ca. 54 mm auseinander) war durch die Messkampagne vorgegeben und nicht veränderbar. Dass die *linearen* Extrapolationen der Ergebnisse der Hintergrundschlieren-Methode ähnliche Wirbelpositionen wie die PIV-Ergebnisse erzeugen, heisst, dass die Wirbelmittellinien geradlinig in Strömungsrichtung verlaufen sind. Die Abweichungen betragen bis zu 2,3 mm. Die in Abb. 4.24 erkennbare Krümmung der Wirbellinien ist entsprechend dieser kleinen Abweichungen gering (vergl. Tab. 4.7 und 4.6).

Die Dichteverteilungen der untersuchten Wirbel zeigen das aus der Literatur bekannte Verhalten. Je stärker die Zirkulation (steigender Anstellwinkel), desto kleiner wird der Wirbel-durchmesser und die Dichte in der Mitte des Wirbels.

# Kapitel 5

## Diskussion und Ausblick

Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Erweiterungen und durchgeführten Anwendungen der Hintergrundschlieren-Methode werden im Folgenden bewertet. Verbesserungspotentiale und -möglichkeiten werden als Ausblick dargestellt. Die durch diese Arbeit erweiterte Hintergrundschlieren-Methode wird anschließend mit konventionellen Messtechniken hinsichtlich der Anwendungsmöglichkeiten verglichen.

### 5.1 Diskussion der Erweiterungen der Hintergrundschlieren-Methode

#### 5.1.1 Auflösung und Empfindlichkeit

Das in Kapitel 3.1.1 definierte Kriterium ( $R = AM$ ) ermöglicht die Abschätzung der Parameter für den Aufbau eines Versuchs nach der Hintergrundschlieren-Methode. Dadurch wird die quantitative Auswertbarkeit der Messdaten verbessert. Gleichzeitig reduziert sich die Zahl der veränderlichen Parameter. Es ergibt sich ein guter Überblick über den Einfluss der unterschiedlichen Größen auf die Auflösung und Empfindlichkeit des Messsystems.

Eine abschließende Bestimmung der Auflösung und Empfindlichkeit des Versuchsaufbaus muss zusätzlich den Einfluss der Kreuzkorrelation der Referenzaufnahme mit der Messaufnahme auf das Ergebnis miteinbeziehen. Vernachlässigt werden kann der Einfluss der Kreuzkorrelation, wenn die folgenden Punkte erfüllt sind.

- Die Punktdichte (Fleckendichte) und -größe des Hintergrundes ist entsprechend dem Versuchsaufbau optimiert.
- Die Korrelation der Referenzaufnahme mit der Messaufnahme liefert sichere Ergebnisse (=hoher Korrelationskoeffizient).
- Die untersuchten Dichtegradienten sind so klein, dass keine Verzerrungen der Hintergrundpunkte auftreten.
- Die Verschiebungen sind ausreichend klein, um sich mit kleinen Auswertefenstern ( $16^2$  pixel<sup>2</sup>) bestimmen zu lassen.

Diese Bedingungen können bei der Durchführung einer Hintergrundschlieren-Messung in den meisten Fällen einfach erfüllt werden.

Das Kriterium ( $R = AM$ ) stellt eine Möglichkeit dar, die Versuchsaufbauparameter zu bestimmen und das System hinsichtlich seines Platzbedarfes, der Empfindlichkeit und Auflösung zu optimieren, *ohne* die zu untersuchende Dichteverteilung genau zu kennen. In Grenzfällen, wie z.B. bei großen Ablenkungen, Partikelbildverzerrungen, extremen Dichtegradienten, etc. kann *nach* einer Testmessung der Einfluss der Kreuzkorrelation und der zu vermessenden Dichteverteilung mit in den Versuchsaufbau einbezogen werden. Mit einem iterativen Prozess kann so der Aufbau optimiert und die Genauigkeit der quantitativen Messung verbessert werden.

Die Voraussetzung für die Bewertung des Aufbaus ist die Bestimmung der Auswirkungen der Kreuzkorrelation auf das quantitative Ergebnis von Dichtemessungen mit der Hintergrundsclieren-Methode.

### 5.1.2 Quantitative Untersuchung zweidimensionaler Brechzahlverteilungen

Das Ziel des in Kapitel 3.2 dargestellten Experiments ist die Klärung, ob generell mit der Hintergrundsclieren-Methode eine Dichteverteilung quantitativ, lokal und absolut bestimmt werden kann.

Die experimentelle Untersuchung einer zweidimensionalen Brechzahlverteilung, generiert durch eine Schlitzdüse, mit der Hintergrundsclieren-Methode und Catharometrie ergibt zwei ähnliche Dichteverteilungen über der Düse. Der Vergleich der durch Catharometrie und der Hintergrundsclieren-Methode ermittelten lokalen Dichteinformationen ergibt eine gute Übereinstimmung.

Die Genauigkeit der Hintergrundsclieren-Methode wird bei zweidimensionalen Untersuchungen u.a. von dem Verhältnis der Objektiefe (Länge in Richtung  $z$ ) zur Entfernung  $P$  und der Divergenz der Lichtstrahlen vorgegeben. Erst die Erweiterung der Auswertalgorithmen, insbesondere die Anpassung von Tomographie-Algorithmen an die Hintergrundsclieren-Methode, wird die Möglichkeit eröffnen, das ganze Potential dieser Messtechnik zu nutzen und beliebig dreidimensionale Dichteverteilungen zu bestimmen.

### 5.1.3 Positionsbestimmung von fadenförmigen Objekten

Das Programm VRIEDER ermöglicht die räumliche Ortsbestimmung von fadenförmigen Objekten aus deren Projektionen auf entsprechende Hintergründe. In Verbindung mit der Hintergrundsclieren-Methode, die z.B. kompressible Wirbel als fadenförmige Objekte auf Hintergründen abbildet, kann mit dem genannten Programm die räumliche Position z.B. kompressibler Wirbel bestimmt werden. Erst mit Kenntnis der Position der Wirbelmittellinie im Raum kann die Dichteverteilung des Wirbels quantitativ ausgewertet werden.

Die Positionsbestimmung des Objektes erfolgt sehr zuverlässig auf Basis der Kenntnis der Kamerapositionen.

### 5.1.4 Quantitative Untersuchung dreidimensional achsensymmetrischer Brechzahlverteilungen

Aus der Ablenkung von Lichtstrahlen durch dreidimensional-achsensymmetrische Dichtefelder kann direkt die Dichteverteilung bestimmt werden, z.B. mittels der Abel-Transformation.

Für sehr kleine Dichteänderungen hat sich die von Kirmse [2003] für die Anwendung bei der Hintergrundsclieren-Methode entwickelte Ring-Methode bewährt. Das zu untersuchende

Objekt wird in Ringe konstanter Dichte eingeteilt. Die Kenntnis der Lichtstrahlablenkungen über dem gesamten Feld ermöglicht die Bestimmung der Dichte dieser Ringe von außen nach innen.

Basierend auf den Ergebnissen von VRIEDER können die mit der Hintergrundschlieren-Methode bestimmten Verschiebungsfelder mit der Ring-Methode quantitativ ausgewertet werden, wenn es sich bei den untersuchten Objekten um dreidimensional achsensymmetrische Dichteverteilungen handelt.

Die Erweiterung und Verbesserung der Ring-Methode zur Untersuchung nicht-achsensymmetrischer Dichteverteilungen erfordert die Entwicklung und Adaption von Tomographie-Algorithmen für die Hintergrundschlieren-Methode. Da bereits derartige Algorithmen für z.B. Laser Speckle Photographie existieren, erscheint eine Erweiterung der Ring-Methode *nicht* sinnvoll.

## 5.2 Diskussion der Versuchsergebnisse

In dem in Kapitel 4 dargestellten Versuch im transsonischen Windkanal wurde mit der Hintergrundschlieren-Methode in Stereo-Anordnung und Stereo-PIV die Geschwindigkeits- und Dichteverteilung des Randwirbels mit hoher Genauigkeit und Auflösung bestimmt. Aus den Ergebnissen der PIV-Messung lässt sich der Wirbelmittelpunkt in der Lichtschnittebene bestimmen. Die Ergebnisse der Hintergrundschlieren-Methode ermöglichen unter Anwendung von VRIEDER die räumliche Bestimmung der Wirbelmittellinien innerhalb des untersuchten Messvolumens. Mit Kenntnis dieser Informationen, die neben der *Position* des Wirbels auch die Bestimmung der *Richtung* der Wirbeltrajektorie ermöglicht, kann z.B. die Wirbelposition auf der Lichtschnittebene linear aus den Daten der Hintergrundschlieren-Methode extrapoliert werden. Aufgrund der geringen Krümmung der Wirbelmittellinien stimmen die extrapolierten Ergebnisse der Hintergrundschlieren-Methode gut mit den durch PIV ermittelten überein.

Die grundsätzlichen Unterschiede in den Messtechniken werden bei der Bewertung der Ergebnisse deutlich.

- Die Ergebnisse der Hintergrundschlieren-Methode stellen die starken Dichtegradienten der Wirbelströmung nahe der Wirbelmittellinie gut dar.
- Die Ergebnisse der PIV-Messung zeigen mit hoher Genauigkeit das Geschwindigkeitsfeld außerhalb des Wirbelkerns bis in die Randbereiche des Beobachtungsfeldes.

Obwohl die Auswertung beider Messtechniken auf dem gleichen Algorithmus beruht, unterscheiden sich die Ergebnisse in Bezug auf die Auflösung. Die Hintergrundpunkte der Hintergrundschlieren-Methode sind hinsichtlich Verteilung und Größe optimiert. Entsprechend kann die Korrelation mit erheblich kleineren Fenstern (16×16 pixel) durchgeführt werden. Die dadurch höhere Auflösung des Systems zeigt sich in der detaillierteren Darstellung des Randwirbels.

Der deutliche Einfluss der Scherschicht auf die Ergebnisse der Kamera 1 hat die Genauigkeit der Auswertung geringfügig eingeschränkt. Gleichzeitig ist aber durch diese 'Störung' deutlich geworden, mit welcher *Empfindlichkeit* das Meßsystem arbeitet. Auch schwache Dichtegradienten können dargestellt werden.

### 5.3 Eigenschaften der Hintergrundsclieren-Methode

Die Hintergrundsclieren-Methode ermöglicht die Bestimmung von Dichtefeldern. Entsprechend der im Rahmen dieser Arbeit erweiterten Möglichkeiten der Hintergrundsclieren-Methode sind die Eigenschaften und Anwendungen wie folgt zusammenzufassen.

- Der Versuchsaufbau besteht im einfachsten Fall nur aus einer Kamera und einem Hintergrund.
- Es wird *gleichzeitig* das Brechungsindexfeld eines *Volumens* bestimmt.
- Die Hintergrundpunkt-Verschiebung repräsentiert die aufsummierte Auslenkung *aller* zur Lichtausbreitungsrichtung senkrechten Dichtegradienten.
- Die Empfindlichkeit des Verfahrens ist sehr hoch. Es ist beispielsweise möglich die Dichteverteilung der Luft, induziert durch natürliche Konvektion über der menschlichen Hand, darzustellen.
- Die Vermessung erfolgt berührungslos, die Strömung wird nicht gestört.
- Zweidimensionale und dreidimensional-achsensymmetrische Dichtefelder können quantitativ untersucht werden. Entsprechend der Auflösung des Systems ist die Bestimmung der lokalen und damit auch der absoluten Dichtewerte möglich.
- Die Benutzung kurzzeitiger Beleuchtungsquellen (Blitzlampen) ermöglicht die Vermessung instationärer Dichtefelder (vergl. [Augenstein *et al.* 2001], [Richard *et al.* 2000]).

Verglichen mit dem Schlieren-Verfahren, das ebenfalls die Untersuchung von Wirbeln hinsichtlich ihrer Position und Stärke ermöglicht, werden die Vorteile der erweiterten Hintergrundsclieren-Methode deutlich. Nachfolgend sind die Vorteile der Hintergrundsclieren-Methode gegenüber dem Toeplerschen Schlieren-Verfahren aufgeführt.

- Der einfache Aufbau ermöglicht im Gegensatz zum erheblich aufwendigeren Schlierenaufbau eine Anwendung dieses Verfahrens *außerhalb* des Labors und des Windkanals.
- Die Kalibrierung des Aufbaus der Hintergrundsclieren-Methode besteht nur in der Aufnahme eines Referenzbildes. Die Kalibrierung eines Schlierenaufbaus speziell für quantitative Dichteuntersuchungen dagegen ist sehr aufwendig.
- Die erweiterte Hintergrundsclieren-Methode ermöglicht die quantitative Auswertung von Dichtegradienten bekannter *und* unbekannter Position. Die quantitative Bestimmung von Dichtegradienten *bekannter* Position mit dem Schlieren-Verfahren ist nur eingeschränkt möglich.
- Die Anwendung der stereoskopischen Hintergrundsclieren-Methode ermöglicht die Bestimmung des Wirbelortes aufgrund der Daten der Hintergrundsclieren-Methode. Die Bestimmung des Wirbelortes in der Lichtstrahlrichtung ist mit dem Toeplerschen Schlieren-Verfahren nicht möglich, die Anwendung eines Stereo-Schlieren-Verfahrens ist aufgrund des Aufwandes auf sehr wenige Sonderfälle beschränkt. Infolgedessen ist *keine* quantitative Bestimmung der Dichteverteilung von Wirbeln unbekannter Position möglich.

Der Vergleich der Hintergrundschlieren-Methode mit der Schattenphotographie oder Speckle-Photographie führt zu ähnlichen Ergebnissen. Der Hauptnachteil anderer Messtechniken gegenüber der Hintergrundschlieren-Methode ist der erheblich aufwendigere Aufbau und die schwierigere Auswertung.

Diese Vorteile prädestinieren die Hintergrundschlieren-Methode für alle Anwendungen, bei denen lokale Dichteverteilungen einfach und quantitativ bestimmt werden sollen.

## 5.4 Abschlußbemerkung

Das Ziel dieser Arbeit war die Erweiterung der Hintergrundschlieren-Methode zu einer Messtechnik, die die quantitative Untersuchung von instationären kompressiblen Wirbelfeldern hinsichtlich ihrer Position und Dichteverteilung ermöglicht.

Der erste Entwicklungsschritt der Hintergrundschlieren-Methode von einer Sichtbarmachungstechnik zu einem quantitativen Messsystem bestand in der Definition eines Kriteriums zur Bestimmung der Auflösung und Empfindlichkeit der Messmethode.

Mit der Anwendung dieses Kriteriums wurde im zweiten Entwicklungsschritt die quantitative Bestimmung zweidimensionaler Dichtefelder bekannter Position ermöglicht.

Der dritte Entwicklungsschritt bestand aus der Entwicklung eines Programms zur Ermittlung des Ablenkungsortes. Das Programm VRIEDER ermöglicht die Bestimmung der Position eines fadenförmigen Objektes aus dessen Projektionen im Raum. In Verbindung mit diesem Programm kann mit der stereoskopischen Hintergrundschlieren-Methode die Raumpositionen kompressibler Wirbel bestimmt werden.

Der vierte Entwicklungsschritt bestand aus der Anwendung der Ring-Methode auf die Hintergrundschlieren-Methode, die die quantitative Bestimmung dreidimensionalachsensymmetrischer Dichteverteilungen ermöglicht.

Die vorliegende Arbeit bildet infolgedessen einen Abschluss der Entwicklung der Hintergrundschlieren-Methode bezüglich der einfachen Anwendungen: Mit nur zwei Kameras ist die Vermessung instationärer, kompressibler und achsensymmetrischer Wirbel in Bezug auf deren Position und Stärke möglich, *ohne* das Tomographie-Algorithmen angewendet werden müssen. Speziell im Vergleich mit anderen Messtechniken fällt auf, dass mit geringem Aufwand bezüglich des Aufbaus und der Auswertung gute Ergebnisse erzielbar sind.

Die einfache Durchführbarkeit der Messungen und die Praktikabilität der Methode insgesamt werden deutlich.

Mit der Erweiterung der Hintergrundschlieren-Methode steht damit insgesamt eine quantitative Dichtemesstechnik zur Vermessung von instationären Wirbeln hinsichtlich Position und Stärke zur Verfügung. Die Ergebnisse des Versuchs im transsonischen Windkanal zeigen die Präzision und Empfindlichkeit der Hintergrundschlieren-Methode.

Die nächste Entwicklungsstufe wird die Einbindung von Tomographie-Algorithmen in die Auswertung sein, um dreidimensionale Dichtefelder allgemein und ohne Einschränkung bestimmen zu können.

Bei künftigen Untersuchungen der kompressiblen Wirbel von z.B. Großflugzeugen und Hubschraubern können quantitative Daten in Bezug auf die Position und Dichteverteilung der Wirbel erwartet werden.



# Literaturverzeichnis

- [Aristoteles 340 v.Chr.] dtv-Atlas zur Philosophie. Tafeln und Texte. Peter Kunzmann/  
Franz-Peter Burkhard/ Franz Wiedmann. Deutscher Taschen-  
buch Verlag Würzburg 1991. Seite 47
- [Augenstein *et al.* 2001] Augenstein E., Leopold F., Richard H., Raffel M.,(2001): Schlie-  
ren Techniques in Comparison: The Background Oriented  
Schlieren Method versus Visualization with Holographic Fil-  
ters, 4th International Symposium on Particle Image Veloci-  
metry, Göttingen, September 17-19, 2001
- [Betz 1932] Betz A.: 1932 ZAMM, Vol. XII.3
- [Beaumier *et al.* 1994] Beumier P., Prieur J., Rahier G., Spiegel P., Demargne A.,  
Kube R., van der Wall B., Schultz B.G., Spettstößer W. Tung  
C., Gallman J., Yu Y.H., Brooks T.F., Burley C.L., Boyd D.D.,  
“Effect of higher harmonic control on helicopter rotor blade  
vortex interaction noise”, 75th Fluid Dynamics Symposium on  
Aerodynamics and Aeroacoustics of Rotorcraft, Berlin, October  
1994
- [Beitz *et al.* 1995] Beitz W., Küttner K.-H.: Dubbel, Taschenbuch für den Maschi-  
nenbau, 18. Auflage, Springer-Verlag Berlin, New York (1995)
- [Binder *et al.* 1992] Binder B, Riethmüller L., Tusche S., Wulf R.: Modernisierung  
des Transsonischen Windkanals in Göttingen, Jahrbuch 1992 I  
der DGLR (Seite 237-249) DGLR-Jahrestagung Bremen 1992
- [Born *et al.* 1980] Born M., Wolf E.: Principles of Optics, 6. Auflage, Pergamon  
Press, Oxford (1980)
- [Canuto *et al.* 1988] Canuto C., Hussaini M., Quarteroni A., Zang T., Spectral Me-  
thods in Fluid Dynamics, Springer Verlag (Berlin and New  
York), 1988 - zweite Auflage 1990
- [Crow 1970] Crow S.C.: Stability theory for a pair of trailing vortices. AIAA  
Journal 8, Seiten 2172-2179,(1970)
- [Debrus *et al.* 1972] Debrus S., Françon M., Grover C.P., May M., Robin M.L.:  
Ground Glass Differential Interferometer, Applied Optics, 11,  
Seite 853 (1972)

- [Descartes 1644] Armin Hermann 'Lexikon - Geschichte der Physik A-Z', Aulis-Verlag Deubner & Co KG 1978
- [DLR 2003] DLR Technische Dokumentation des Tau-Code 2003
- [Dietz 2003] Dietz G., Schewe G., Kießling F., Sinapius M.: Limit-Cycle-Oscillation Experiments at a transport aircraft wing model, International Forum on Aeroelasticity and Structural Dynamics IFASD (2003), Amsterdam June 4-6
- [Dillmann 1997] Dillmann A.: Ein schneller Algorithmus zur tomographischen Rekonstruktion dreidimensionaler Dichtefelder aus optischen Projektionen (1997) DLR-IB 223-97 A 09
- [Donaldson *et al.* 1975] Donaldson C., Bilanin A.J.: Vortex Wakes of Conventional Aircraft. AGARD - Bericht No. 204 (1975)
- [Ehrenfried 2002] Ehrenfried K.: Processing Calibration-grid images using the Hough-Correlation; Measurement Science and Technology Vol.13 (2002) Seiten 975-983
- [Farrel *et al.* 1984] Farrel P.V., Hofeldt D.L.: Temperature Measurement in Gases Using Speckle Photography, Applied Optics. 23, 1055, (1984)
- [Fell *et al.* 1995] Fell, St., Staufenbiel, R.: Formation and structure of vortex systems generated by unflapped and flapped wing configurations. Z. Flugwiss. Weltraumforsch. Vol. 19 (1995) Seiten 366-379, Springer Verlag
- [Fomin 1998] Fomin, N., A.: Speckle Photography for Fluid Mechanics Measurements, (1998), Springer Verlag Berlin Heidelberg, ISBN 3-540-63763-2
- [Gerz *et al.* 2001] Gerz T., Holzäpfel F., Darracq D.: Aircraft Wake Vortices – A position paper –, DLR 2001
- [Gieck 1995] Gieck K. + R., Technische Formelsammlung, (1995) Gieck Verlag Germering, ISBN 3 920379 21 7
- [Green *et al.* 1991] Green S. I., Acosta A. J.: Unsteady flow in trailing vortices J. Fluid Mech. (1991), vol. 227, pp.107-134
- [Green 1995] Green S. I.: Fluid Vortices, (1995), Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Boston
- [Harris *et al.* 2002] Harris M., Young R. I., Köpp F., Dolfi A., Cariou J.-P.: Wake vortex detection and monitoring, Aerospace Science and Technologie, (2002), 6, Seiten 325-331.

- [Joukowski 1910] Joukowski N.: Über die Konturen der Tragflächen der Drachenflieger. Z. Flugtechn. u. Motorluftschiff. 1. (1910) Seiten 281-284; 3 (1912) Seiten 81-86.
- [Kirmse 2003] Kirmse T.: Weiterentwicklung des Messsystems BOS (Background Oriented Schlieren) zur quantitativen Bestimmung axialsymmetrischer Dichtefelder, DLR-IB 224-2003 A 01, (2003)
- [Klinge 2001] Klinge F.: Investigation of Background Oriented Schlieren (BOS) towards a quantitative density measurement system, (2001) Project Report 2001-19, Von Karman Institute, Belgium
- [Klinge *et al.* 2001] Klinge F., Raffel M., Richard H.: Jahresbericht Arbeitsgemeinschaft "Strömungen mit Ablösungen", DLR Göttingen (2001)
- [Klinge *et al.* 2002] Klinge F., Riethmüller M.L.: Local density information obtained by means of the Background Oriented Schlieren (BOS) method, 11th Int. Symp. on Appl. of Laser Techniques to Fluid Mechanics, Lisbon. (2002) Paper number 15.3
- [Klinge 2003] Klinge F.: Patentanmeldung VRIEDER: Verfahren zur Bestimmung des Verlaufs einer beliebig geformten Linie im Raum, Deutsches Patentamt, Aktenzeichen: 103 08 042.2 (2003)
- [Klinge *et al.* 2003] Klinge F., Kirmse T., Kompenhans J.: Application of Quantitative Background Oriented Schlieren (BOS): Investigation of a Wing Tip Vortex in a Transonic Wind Tunnel, Proceedings of the 4th PSFVIP June 3-5, (2003) Chamonix, France, Paper Number: 4097
- [Ko *et al.* 1999] Ko H.S., Kihm K.D.: An extended algebraic reconstruction technique (ART) for density-gradient projections: laser speckle photographic tomography. Exp Fluids 27. Seiten 542-550 (1999)
- [Kolmogoroff 1942] Kolmogoroff A. N., Equations of Turbulent Motion of an Incompressible fluid. Izv. Akad. Nauk., SSSR, Ser. Fiz. VI, Nos. 1-2, 1942, Seiten 56-58
- [Kompenhans *et al.* 2000] Kompenhans J., Raffel M., Dieterle L., Dewhirst T., Vollmers H., Ehrenfried K., Willert C., Pengel K., Kähler C., Schröder A., Ronneberger O.: Particle Image Velocimetry in Aerodynamics: Technology and Applications in Wind Tunnels, The visualization Society of Japan and Ohmsha, Ltd. Journal of Visualization, Vol.2, Nos.3/4, (2000) Seiten 229-244

- [Köpf 1972] Köpf U.: Application of speckling for measuring the deflection of laser light by phase object. *Opt. Commun* 5 (1972) Seiten 347-350
- [Kutta 1902] Kutta W. M.: Auftriebskräfte in strömenden Flüssigkeiten. *Jb. aeronaut, Mitt.* 6 (1902) 133-135.
- [Lanchester 1909] Lanchester F.W.: *Aerodynamics*. Second Edition, London, Constable & Company Ltd., 1909, Seite: 178
- [Liepmann *et al.* 1957] Liepmann H. W., Roshko A.: *Elements of Gasdynamics*, Galcit Aeronautical Series, John Wiley, New York (1957)
- [Liu *et al.* 1989] Liu Z.C., Merzkirch W., Oberste-Lehn K.: Optical tomography applied to speckle photographic measurement of asymmetric flows with variable density. *Exp. Fluids* Vol. 7 (1989) Seiten 157-163
- [Lira 1995] Lira I.: Measurement of an axisymmetric temperature field by speckle photography methods. *Exp. Fluids* Vol. 20 (1995) Seiten 100-105
- [Lourenco *et al.* 2002] Lourenco L., Alkislar M., Krothapalli A.: Velocity and density field measurements in a supersonic jet, 11th Int. Symp. on Appl. of Laser Techniques to Fluid Mechanics, Lisbon. (2002) Paper number 36.5
- [Kelvin 1910] Lord Kelvin: *Vibrations of a Columnar Vortex*. *Mathematical and Physical Papers* 4, Cambridge University Press, 1910
- [Maruyama Y. *et al.* 1976] Maruyama Y., Iwata K., Nagata R.: A Method for Measuring Axially symmetrical refractive Index distribution using Eikonal Approximation, *Japanese Journal of Applied Physics*, (1976) Vol. 15, No. 10, Seiten 1921-1927
- [Maroteaux *et al.* 1991] Maroteaux D., Maroteaux F., Murat M.(1991): Experimental study of a hot wire, sonic nozzle probe for concentration measurements, *Rev. Sci. Instrum.* 62(4), April 1991, American Institute of Physics
- [McCormick *et al.* 1968] McCormick B.W., Tangler J.L., Sherrieb H.E.: Structure of Trailing Vortices. *J. Aircraft* 5, 3, Mai-Juni 1968, Seiten 260-267

- [Meier 1999] Meier G.E.A.: Patentanmeldung Hintergrund-Schlierenmessverfahren, Deutsches Patentamt, (1999) Aktenzeichen 199 42 856.5
- [Meier 2003] Meier G.E.A.: persönliche Mitteilung (2003)
- [Melling 1997] Melling A.: Tacer particles and seeding for particle image velocimetry, Measurement Science and Technology, Vol. 8, No. 12, Dec. 1997
- [Oseen 1911] Oseen C. W.: Arkiv för Mat., Astron., och Fysik, 7, 1911, Seiten 1-11
- [Orloff *et al.* 1973] Orloff K.L., Grant G.R.: The Application of a Scanning Laser Doppler Velocimeter to Trailing Vortex Definition and Alleviation. AIAA Paper No. 73-680, (1973) AIAA 6th Fluid and Plasma Dynamics Conference
- [Prandtl 1918] Prandtl L.: Tragflächentheorie. Nachr. Ges. Wiss. Göttingen, Math.-Phys. Kl., I. Mitt. (1918) Seiten 151-177.
- [Prandtl 1922] Prandtl L.: Über die Entstehung von Wirbeln in der idealen Flüssigkeit, mit Anwendung auf die Tragflügeltheorie und andere Aufgaben. Vortr. Geb. Hydro- u. Aerodynamik, Innsbruck (1922) Seiten 18-33.
- [Raffel 1993] Raffel, M.: PIV-Messungen instationärer Geschwindigkeitsfelder an einem schwingenden Rotorprofil (Dissertation), DLR-FB 93-50 (1993)
- [Raffel *et al.* 1998] Raffel M., Willert C., Kompenhans J.: Particle Image Velocimetry. Springer Verlag Berlin Heidelberg (1998) ISBN 3-540-63683-8
- [Raffel *et al.* 2000] Raffel M., Richard H., Meier G.E.A.: On the applicability of Background Oriented Optical Tomography, Experiments in Fluid, (2000) pp 447-481.
- [Raffel *et al.* 2000 a] Raffel M., Richard H., Meier G.E.A. (2000): Patentanmeldung, Verfahren zur Detektion räumlicher Dichtegradienten , Deutsches Patentamt, DE 100 10 045 A1
- [Raffel *et al.* 2001] Raffel M., Richard H., Agocs J., Otter D., Mattner H., Göhmann U.: Experimental aspects of PIV applied to a Bo 105 helicopter in hover-flight condition, 4th International Symposium on Particle Image Velocimetry Göttingen, Germany, September 17-19, 2001 PIV'01 Paper 1192

- [Raffel 2002] Raffel M.: Optische Untersuchungen in technischen Strömungen unter besonderer Berücksichtigung eines Verfahrens zur Detektion von Dichtegradienten (Habilitationsschrift) (2002), Papierflieger, Clausthal-Zellerfeld, 1. Auflage, ISBN 3-89720-582-3
- [Richard *et al.* 2000] Richard H., Raffel M., Rein M., Kompenhans J., Meier G.E.A.: Demonstration of the applicability of background oriented schlieren (BOS), 10. Int. Symp. On Appl. Of Laser techniques to fluid mechanics, Lisbon (2000)
- [Richard *et al.* 2001] Richard H., Raffel M.: Principle and applications of the background oriented schlieren (BOS) method, Measurement Science and Technology 12 (2001) Seiten 1576-1585
- [Scharadin 1934] Scharadin H.: Das Toeplersche Schlierenverfahren: Grundlagen für seine Anwendung und quantitative Auswertung. VDI-Forschungsheft Nr. 367, 5 (4) 1-32, 1934
- [Schröder 2001] Schröder A.: Dissertation, <http://webdoc.sub.gwdg.de/diss/2001/schroeder/>
- [Shu *et al.* 1987] Shu J.Z., Li J.Y. Speckle photography applied to the density field of a flame. (1987) Exp. Fluids 5 Seiten 422-424
- [Sieber 1996] Sieber O.: Quantitative Dichtefeldmessung mit Rayleigh-Streulicht am Laufschaufelprofil VKI-1 und Vergleich mit einer numerischen Simulation, Fortschr.-Ber. VDI-Reihe Nr. 7; Nr. 301. Düsseldorf: VDI-Verlag 1996.
- [Sivasubramanian *et al.* 1984] Sivasubramanian M. S., Cole R., Sukenek P.C.: Optical Temperature Gradient Measurements Using Speckle Photography, Int. J. Heat Mass Transfer 27, 773, (1984)
- [Theofilis 2003] Theofilis V.: persönliche Mitteilung (2003)
- [Truckenbrodt 1968] Truckenbrodt E., Strömungsmechanik, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1968
- [Verstynen *et al.* 1973] Verstynen H.A. Jr., Dunham R.E.: A Flight Investigation of the Trailing Vortices Generated by a Jumbo Jet Transport. NASA TN D-7172, April 1973
- [Vollmers 2003] Vollmers H.: persönliche Mitteilung (2003)
- [Vollmers *et al.* 1983] Vollmers H., Meier H.U., Kreplin H.P.: Wirbelunterscheidungsmöglichkeit, IB 1983 DLR

- [Vollmers 1999] Vollmers H.: Quantitative Bestimmung von Wirbelparametern aus experimentell ermittelten Geschwindigkeitsdaten. Proceedings of GALA-Fachtagung '99 in Saint-Louis, paper 28, France, Sept. 27-29, 1999, Shaker Verlag, Aachen, 1999
- [Vollmers 2001] Vollmers H.: Detection of Vortices and quantitative evaluation of their main parameters from experimental velocity data, Measurement science and technology, 12,(2001) Seiten 1199-1207
- [Wernekinck 1985] Wernekinck U.: Anwendung der Speckle - Photographie zur Sichtbarmachung und Messung von Strömungen mit veränderlicher Dichte, VDI-Fortschritt Bericht, Reihe 8, Nr. 95, VDI-Verlag Düsseldorf (1985)
- [Wernekinck *et al.* 1985] Wernekinck U., Merzkirch W., Fomin N.A.: Measurement of Light Deflection in a Turbulent Density Field, Exp. Fluids 3, 206 (1985)
- [Wernekinck *et al.* 1987] Wernekinck U., Merzkirch W.: Speckle photograph of spatially extended refractive index fields, APPLIED OPTICS Vol. 26, No.1, 1. Januar 1987, Seiten 31-32
- [Willert *et al.* 1991] Willert C.E., Gharib M.: Digital particle image velocimetry.(1991) Exp. Fluids 10 Seiten 181-193

## Danksagung

Die Möglichkeit zur Erstellung dieser Arbeit verdanke ich außergewöhnlichen Menschen: Ihnen ist das NEUE als Aufgabe und Ziel interessanter und wichtiger, als die persönliche Hervorhebung.

Durch diesen Geist entsteht ein Freiraum, der erst die Möglichkeit für etwas Neues schafft. Das Vorbild dieser Menschen bezüglich ihrer Einstellung zur Aufgabe, zum Fleiß und zur Genauigkeit hat mich angespornt und in allen Fällen ein freundschaftliches Verhältnis entstehen lassen.

Herr Prof. Dr.-Ing. H.-U. Meier (TU Clausthal) eröffnete mir die außergewöhnliche Möglichkeit für ein Jahr an das *Von Karman Institut* (VKI) in Brüssel zur Absolvierung des Diploma Courses zu gehen, wofür ich mich herzlich bedanke.

Herr Dr.-Ing. habil. M. Raffel (DLR Göttingen) verdanke ich die Koordination dieses Jahres in Brüssel mit der Promotion in Göttingen am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. und die wissenschaftlich - technische Ausrichtung. Die sowohl theoretische als auch praktische Betreuung und der freundschaftlich-menschliche Kontakt haben mich sehr positiv berührt.

Stellvertretend für das ganze, insgesamt interessierte und hilfsbereite Team des Von Karman Institutes bedanke ich mich bei Herrn Prof. Dr. M.L. Riethmuller und Herrn Prof. Dr. O. Chazot für die intensive und umfassende Betreuung.

Herrn Dipl.-Ing. H. Richard und Herrn Dipl.-Ing. S. Karl vom Institut für Aerodynamik und Strömungstechnik des DLR Göttingen danke ich besonders für ihre Hilfsbereitschaft und zahlreichen Anregungen.

Das Arbeitsklima innerhalb des DLR im Allgemeinen und in der Abteilung "Experimentelle Verfahren" im Besonderen ist durch eine hohe Motivation geprägt, die mich angespornt hat. Für die allgemeine Hilfsbereitschaft und die fruchtbaren Diskussionen bedanke ich mich herzlich.

Stellvertretend für die Abteilung danke ich besonders Herrn Dr. J. Kompenhans für seine Betreuung und Herrn Dr. A. Schröder für seine theoretischen wie praktischen Anregungen. Frau Dipl.-Ing. T. Kirmse danke ich für die Zusammenarbeit bei der Erweiterung der Messtechnik und Durchführung des Windkanalexperiments. Herrn Dr. G. Dietz vom Institut für Aeroelastik des DLR Göttingen danke ich für die Kooperation bei der Durchführung der Windkanalmessung im TWG. Sein Interesse an der Hintergrundschlieren-Methode hat wesentlich zum Erfolg des Experimentes beigetragen.

Herrn Prof. Dr. rer. nat. G.E.A. Meier, der die Entwicklung der BOS-Technik initiiert hat und Dr. K.-A. Bütetisch (DLR Göttingen) danke ich, dass sie mir die Gelegenheit eröffnet haben diese Arbeit anzufertigen.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. J. Seume (Institut für Strömungsmaschinen der Universität Hannover), der mir die Durchführung der Promotion mit der Annahme des Hauptreferates ermöglicht hat und mich mit zahlreichen wissenschaftlichen Diskussionen und Anregungen theoretisch und praktisch unterstützt hat.

Mein Dank gilt ebenso Herrn Prof. Dr.-Ing. A. Dillmann (TU Berlin) für seine spontane Hilfsbereitschaft und sein Interesse an dieser Messtechnik und Prof. Dr.-Ing. Reithmeier (Institut für Mess- und Regelungstechnik der Universität Hannover) für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

# Lebenslauf

## Persönliche Daten

Name: Falk R. Klinge  
Geburtsdatum: 22.05.1974  
Geburtsort: Bad Harzburg  
Staatsangehörigkeit: Deutsch  
Familienstand: ledig, 1 Tochter (geboren 2003)

## Schule

1980 - 1984 Grundschule Westerode  
1984 - 1986 Orientierungsstufe Deilich in Bad Harzburg  
1986 - 1993 Niedersächsisches Internatsgymnasium in Bad Harzburg, Abitur

## Berufsausbildung

1993 - 1995 Ausbildung bei Salzgitter Stahl AG zum Industriemechaniker, Fachrichtung Betriebstechnik

## Studium

1995 - 1999 Studium an der Universität Clausthal zum Diplom-Ingenieur der Fachrichtung Maschinenbau  
Schwerpunkte: Betriebsfestigkeit und Konstruktion, Diplomarbeit: Betriebsfestigkeitsuntersuchungen an einem Stahlwerkskran  
1997 Studium an der Norske Landbrukshogskole in Ås / Norwegen  
Erasmus-Austausch

## Praxis

1999 - 2000 Salzgitter AG  
Leiter der Gruppe/Kraninstandhaltung Mechanik  
seit 2000 Wissenschaftlicher Mitarbeit in der Abteilung Experimentelle Verfahren des Institutes für Aerodynamik und Strömungstechnik des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR)  
2000 - 2001 Diploma Course am Von Karman Institut in Brüssel, VKI-Diplom