

Quantitative Visualisierung  
komplexer verfahrenstechnischer Strömungsvorgänge  
mit der digitalen Particle Image Velocimetry

Vom Fachbereich Maschinenbau  
der Universität der Bundeswehr Hamburg  
zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs  
genehmigte

DISSERTATION

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Oliver Pust  
aus Helmstedt

Hamburg, im April 2001

Erster Gutachter: Prof. Dr. rer. nat. Gert Böhme  
Zweiter Gutachter: Prof. Dr. Dr. h. c. Franz Durst

Tag der mündlichen Prüfung: 17. April 2001

Gedruckt mit Unterstützung der Universität der Bundeswehr Hamburg.

Berichte aus der Strömungstechnik

**Oliver Pust**

**Quantitative Visualisierung komplexer  
verfahrenstechnischer Strömungsvorgänge mit der  
digitalen Particle Image Velocimetry**

Shaker Verlag  
Aachen 2001

Die Deutsche Bibliothek - CIP-Einheitsaufnahme

*Pust, Oliver:*

Quantitative Visualisierung komplexer verfahrenstechnischer  
Strömungsvorgänge mit der digitalen Particle Image Velocimetry / Oliver Pust.

Aachen : Shaker, 2001

(Berichte aus der Strömungstechnik)

Zugl.: Hamburg, Univ. der Bundeswehr, Diss., 2001

ISBN 3-8265-8863-0

Copyright Shaker Verlag 2001

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen  
oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungs-  
anlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 3-8265-8863-0

ISSN 0945-2230

Shaker Verlag GmbH • Postfach 1290 • 52013 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • eMail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

# Vorwort

Die vorliegende Arbeit ist das wesentliche Ergebnis meiner Forschungstätigkeit als Wissenschaftlicher Assistent am Institut für Strömungslehre und Strömungsmaschinen der Universität der Bundeswehr Hamburg.

Mein besonderer Dank gilt meinem Betreuer und Gutachter Herrn Prof. Dr. rer. nat. Gert Böhme, der mit ständigem Interesse die Fortschritte meiner Arbeit begleitete. Er räumte mir den Freiraum bei der Gestaltung meines Forschungsgebietes ein, der mir meine zweite Zeit an der Universität immer in bester Erinnerung bleiben lassen wird.

Weiterhin danke ich Herrn Prof. Dr. Dr. h. c. Franz Durst, der sich trotz seines prall gefüllten Terminkalenders bereit erklärte, das zweite Gutachten über meine Dissertation anzufertigen und meine Doktorprüfung mitzugestalten. Sein hoch geschätztes Fachwissen speziell über laseroptische Meßtechniken war mir steter Ansporn.

Die Durchführung meiner Versuche im Labor für Strömungslehre wäre ohne die dort tätigen Mitarbeiter Herrn Dipl.-Ing. Wolfgang Warnecke und Herrn Martin Kitzmann unmöglich gewesen. Ihnen gebührt mein besonderer Dank für ihre ideenreiche und selbständige Verwirklichung meiner meist nur grob skizzierten Ideen.

Des weiteren bedanke ich mich bei meiner Kollegin und meinen Kollegen für ihre Diskussionsbereitschaft und ihre Anregungen sowie bei denen, die es auf sich genommen hatten, meine Dissertationsschrift auf Allgemeinverständlichkeit und Fehler aller Art hin Korrektur zu lesen.

Das Verständnis meiner Lebenspartnerin Anja Hatscher und die Wiedersehensfreude meines Sohnes Paul Frédéric, der seinen Vater aufgrund der weiten Entfernung meist nur am Wochenende sah, haben sehr viel zum Gelingen meiner Arbeit beigetragen.



# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort</b>	<b>V</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2 Particle Image Velocimetry</b>	<b>5</b>
2.1 Einleitung . . . . .	5
2.2 Prinzip und Aufbau eines PIV-Systems . . . . .	5
2.3 Hinzufügen der Partikel . . . . .	6
2.4 Beleuchtung der Partikel . . . . .	10
2.5 Aufnahme des reflektierten Lichts . . . . .	16
2.6 Bestimmung der Partikelverschiebung . . . . .	17
2.6.1 Kreuzkorrelation . . . . .	18
2.6.2 Autokorrelation . . . . .	23
2.6.3 Einflüsse auf das Meßergebnis . . . . .	24
2.6.4 Lokalisation des Korrelationsmaximums . . . . .	25
2.7 Weiterverarbeitung der Meßdaten . . . . .	27
2.8 Zusammenfassung . . . . .	28
<b>3 Laser Doppler Velocimetry</b>	<b>29</b>
3.1 Einleitung . . . . .	29
3.2 Dopplereffekt . . . . .	30
3.2.1 Dopplereffekt beim LDV . . . . .	31
3.2.2 Zweistrahl-LDV-System . . . . .	33
3.2.3 Das Interferenzstreifenmodell . . . . .	34
3.2.4 Meßvolumen des Zweistrahl-LDV-Systems . . . . .	35
3.3 Optoelektronische Signalwandlung und Auswertung . . . . .	37

## *Inhaltsverzeichnis*

3.4	Richtungsbestimmung . . . . .	38
3.5	Meßsysteme . . . . .	39
3.6	Zusammenfassung . . . . .	40
<b>4</b>	<b>Bewertung und Vergleich von PIV und LDV</b>	<b>41</b>
4.1	Bewertung der LDV-Meßtechnik . . . . .	41
4.2	Bewertung der PIV-Meßtechnik . . . . .	43
4.3	Vergleich von PIV und LDV . . . . .	45
4.4	Einsatzgebiete von PIV und LDV . . . . .	46
4.5	DGV als Alternative zu PIV und LDV . . . . .	48
<b>5</b>	<b>Evaluierung der PIV mittels LDV und numerischer Simulation</b>	<b>53</b>
5.1	Einleitung . . . . .	53
5.2	Versuchsaufbau zur Zylinderumströmung . . . . .	54
5.3	Numerische Simulation . . . . .	56
5.4	Ergebnisse . . . . .	59
5.4.1	Ergebnisse für das Anfahren der Kármánschen Wirbelstraße . .	59
5.4.2	Ergebnisse für die periodische Kármánsche Wirbelstraße . . . .	62
5.5	Zusammenfassung . . . . .	63
<b>6</b>	<b>Qualitätssteigerung durch direkte Kreuzkorrelation</b>	<b>69</b>
6.1	Einleitung und Motivation . . . . .	69
6.2	Methoden zur Auswertung von Partikelbildern . . . . .	70
6.3	Implementierung der direkten Kreuzkorrelation . . . . .	73
6.4	Beschreibung der Auswerteparameter . . . . .	76
6.5	Ergebnisse der untersuchten Auswertemethoden . . . . .	77
6.6	Zusammenfassung . . . . .	79
<b>7</b>	<b>Geschwindigkeitsfeld in einem SMX-Mischer</b>	<b>87</b>
7.1	Mischen in der Verfahrenstechnik . . . . .	87
7.2	Der SMX-Mischer . . . . .	88
7.3	Versuchsaufbau und -durchführung . . . . .	91
7.3.1	Versuchsstand zum SMX-Mischer . . . . .	91



7.3.2	Stoffeigenschaften der Versuchsflüssigkeiten . . . . .	97
7.3.3	Lage der Meßebenen im Modell des SMX-Mischers . . . . .	102
7.4	Ergebnisse für Glycerin . . . . .	104
7.5	Ergebnisse für CMC . . . . .	116
7.6	Vergleich der Strömungen bei Glycerin und CMC . . . . .	122
7.7	Symmetriebetrachtungen . . . . .	127
7.7.1	Symmetrieuntersuchungen bei Glycerin . . . . .	128
7.7.2	Symmetrieuntersuchungen bei CMC . . . . .	130
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>133</b>
8.1	Zusammenfassung . . . . .	133
8.2	Ausblick . . . . .	134
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>137</b>
	<b>Glossar</b>	<b>143</b>
<b>A</b>	<b>Anhang</b>	<b>149</b>
A.1	Schleichende Umströmung einer Ecke . . . . .	149



## Verzeichnis der verwendeten Symbole

Symbol	Bedeutung	Dimension <sup>1</sup>	Seite
<b>Allgemeine Formelzeichen</b>			
$a$	Beschleunigung	$LZ^{-2}$	6
$a_k$	Relaxationsspannungen	$ML^{-1}Z^{-2}$	98
$b$	Stegdicke	L	95
$c$	Lichtgeschwindigkeit	$LZ^{-1}$	30
$d$	Abstand, Durchmesser	L	34
$d_p$	Partikeldurchmesser	L	6
$e$	Einheitsvektor		30
$f$	Ablösefrequenz	$Z^{-1}$	56
$f$	Vektor der Volumenkraftdichte	$ML^{-2}Z^{-2}$	56
$f(i,j), g(k,l)$	Graustufenverteilung der Teilbilder		17
$\bar{f}, \bar{g}$	mittlere Intensität der Teilbilder		74
$f_D$	Dopplerfrequenz	$Z^{-1}$	33
$f_E$	Empfängerfrequenz	$Z^{-1}$	30
$f_P$	Streuungsfrequenz	$Z^{-1}$	31
$f_0$	Laserlichtfrequenz	$Z^{-1}$	30
$g$	Fallbeschleunigung	$LZ^{-2}$	6
$i, j, k, l$	Positionen in der Bildebene	Pixel (px)	17
$i', j'$	Bildabmessungen der Teilbilder	Pixel (px)	17
$\hat{j}$	imaginäre Einheit, $\hat{j} = \sqrt{-1}$		72
$l$	Länge	L	89
$m, n$	räumliche Verschiebung	Pixel (px)	18
$n$	Brechzahl		100
$n$	Fließindex		122
$p$	Druck	$ML^{-1}Z^{-2}$	56
$t$	Zeit	Z	32
$t_0$	Anfangszeit	Z	17
$t_P$	Prozesszeit	Z	123
$\bar{t}$	entdimensionierte Zeit		56
$u, v, w$	kartesische Geschwindigkeitskomponenten	$LZ^{-1}$	32

Symbol	Bedeutung	Dimension <sup>1</sup>	Seite
$u_m$	mittlere Strömungsgeschwindigkeit	$LZ^{-1}$	55
$\mathbf{v}$	Geschwindigkeitsvektor	$LZ^{-1}$	30
$w_m$	mittlere Anströmgeschwindigkeit	$LZ^{-1}$	95
$\bar{w}$	mittlere Geschwindigkeit im Mischer	$LZ^{-1}$	95
$x, y, z$	kartesische Koordinaten	L	18
$A$	Querschnittsfläche	$L^2$	95
$D$	Zylinderdurchmesser	L	55
$\mathbf{D}$	Verzerrungsgeschwindigkeitstensor	$Z^{-1}$	58
De	Deborah-Zahl		123
$E$	elektrische Feldstärke	$MLZ^{-3}I^{-1}$	32
$F(M,N), G(M,N)$	Graustufenverteilung der Gesamtaufnahmen		17
$F(u, v), G(u, v)$	Fourier-Transformierte reellwertiger Funktionen		71
$G'(\omega)$	Speichermodul	$ML^{-1}Z^{-2}$	98
$G''(\omega)$	Verlustmodul	$ML^{-1}Z^{-2}$	98
$I$	elektrische Stromstärke	I	32
$L$	Länge eines Mischelementes	L	122
$\mathbf{L}$	Geschwindigkeitsgradiententensor	$Z^{-1}$	56
$M, N$	Position in der Bildebene	Pixel (px)	17
$M', N'$	Bildabmessungen der Gesamtaufnahmen	Pixel (px)	16
Re	Reynolds-Zahl		55
Sr	Strouhal-Zahl		56
$\mathbf{T}$	Tensor der Reibungsspannungen	$ML^{-1}Z^{-2}$	56
$U$	Fluidgeschwindigkeit	$LZ^{-1}$	6
$U_g$	Sinkgeschwindigkeit	$LZ^{-1}$	6
$U_P$	Partikelgeschwindigkeit	$LZ^{-1}$	6
$U_S$	Differenzgeschwindigkeit	$LZ^{-1}$	6
$\dot{V}$	Volumenstrom	$L^3Z^{-1}$	89
$Z$	Druckverlustfaktor		89
<b>Griechische Symbole</b>			
$\alpha, \Theta_B$	Winkel		31
$\dot{\gamma}$	Schergeschwindigkeit	$Z^{-1}$	98
$\dot{\epsilon}$	Dehngeschwindigkeit	$Z^{-1}$	122
$\eta$	dynamische Viskosität	$ML^{-1}Z^{-1}$	6
$\eta_0$	Nullviskosität	$ML^{-1}Z^{-1}$	99
$\lambda, \lambda_k$	Relaxationszeiten	Z	98
$\lambda_C$	Zeitkonstante im Carreau-Modell	Z	122

<b>Symbol</b>	<b>Bedeutung</b>	<b>Dimension<sup>1</sup></b>	<b>Seite</b>
$\lambda_0$	Lichtwellenlänge	L	34
$\nu$	kinematische Viskosität	$L^2Z^{-1}$	97
$\xi, \zeta$	kartesische Koordinaten	L	18
$\bar{\xi}, \bar{\psi}$	kartesische Koordinaten, dimensionslos		54
$\rho$	Fluiddichte	$ML^{-3}$	6
$\rho_P$	Partikeldichte	$ML^{-3}$	6
$\phi$	Kreuzkorrelationskoeffizientenfunktion		74
$\omega$	Kreisfrequenz	$Z^{-1}$	32
$\omega_x, \omega_y, \omega_z$	kartesische Komponenten des Wirbelvektors	$Z^{-1}$	105
$\Delta f$	Bandbreite der Absorptionslinie	$Z^{-1}$	51
$\Delta f_E$	Frequenzverschiebung	$Z^{-1}$	31
$\Delta n$	Brechzahlunterschied		100
$\Delta p$	Druckverlust	$ML^{-1}Z^{-2}$	89
$\Delta p_L$	Druckverlust eines Mischelementes	$ML^{-1}Z^{-2}$	122
$\Delta t$	Zeitabstand	Z	17
$\Phi$	Kreuzkorrelationsfunktion		18

<sup>1</sup> Im internationalen Einheitensystem mit Masse [M], Länge [L], Zeit [Z] und elektrischer Stromstärke [I] als Basisgrößen, sofern nicht anders genannt