

MITTEILUNGEN

DES

INSTITUTS

FÜR WASSERBAU UND WASSERWIRTSCHAFT

der

Rheinisch-Westfälischen

Technischen Hochschule Aachen

herausgegeben

von

Univ.-Professor Dr.-Ing. Jürgen Königter

Band 101



R W T H
A A C H E N

Roland Leucker

**Analyse instationärer Strömungsphänomene
zur
Vorhersage des Kavitationsbeginns**

Bibliothek

INSTITUT FÜR WASSERBAU
UND WASSERWIRTSCHAFT
TECHNISCHE HOCHSCHULE DARMSTADT
PETERSENSTR. 13, 64287 DARMSTADT
Tel. 0 61 51 / 16 21 43 · Fax: 16 32 43

Zuv.-Nr.: 3149

10 JWB 10A

Academia Verlag  Sankt Augustin

Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis der Formelzeichen	XII
Lateinische Zeichen	XII
Griechische Zeichen	XVII
Verzeichnis der Abbildungen	XVIII
Verzeichnis der Tabellen	XXIII
1 Einleitung	1
1.1 Einführung in die Thematik	1
1.2 Zielsetzung der Kavitationsforschung	6
2 Aufgabenstellung und Vorgehensweise	9
3 Stand der Erforschung des Kavitationsbeginns	13
3.1 Physikalische Modellierung	13
3.2 Hybride Modellierung	24
3.2.1 Vorbemerkung	24
3.2.2 Aufbau des Hybrid-Modells	24
3.2.3 Physikalischer Teil – Messung der Strömungsgeschwindigkeiten	25
3.2.4 Schnittstelle – Druckberechnung	26
4 Verfahren zur Messung instationärer Strömungsfelder	29
4.1 Optisch-quantitative Verfahren zur Messung instationärer Fließgeschwindigkeiten	29
4.1.1 Allgemeines	29
4.1.2 Particle Tracking Velocimetry (PTV)	30
4.1.3 Particle Image Velocimetry (PIV)	31
4.1.4 Laser Speckle Photography (LSP)	32
4.2 Problemspezifische Aufnahmetechnik	33
4.2.1 Vorbemerkung	33
4.2.2 Beleuchtung	34
4.2.3 Strömungsvisualisierung	39
4.2.4 Datenaufzeichnung	45
4.3 Auswahl eines Meßverfahrens	48
4.4 Methoden zur Geschwindigkeitsbestimmung mit PIV	50
4.4.1 PIV-Auswertemethoden	50
4.4.2 Analoge Auswertung	51
4.4.3 Analog-Digitale Auswertung	52
4.4.4 Digitale Auswertung	54
4.4.5 Gegenüberstellung der Auswertemethoden	54

5 Implementierung der PIV-Technik	57
5.1 Algorithmen zur Geschwindigkeitsbestimmung	57
5.1.1 Kreuzkorrelation	57
5.1.2 Darstellung im Frequenzraum	59
5.1.3 Unterschiede bei Verwendung der Autokorrelation	62
5.1.4 Vergleich der Berechnungszeiten	63
5.2 Praktische Umsetzung	65
5.2.1 Eingesetzte Hardware	65
5.2.2 Eingesetzte Software	65
5.2.3 Kalibrierung	66
5.2.4 Partikel- oder Rasterbezogene Bildabtastung	66
5.2.5 Ermittlung einer Partikelverschiebung	67
5.3 Eliminierung fehlerhafter Vektoren	69
5.3.1 Ursachen für fehlerhafte Vektoren	69
5.3.2 Kriterien für die Filterung	70
5.3.3 Optimierung der Filterung	74
5.4 Bewertung des Meßsystems	77
5.4.1 Lokale Auflösung	77
5.4.2 Genauigkeit der Geschwindigkeitsvektoren	79
5.4.3 Subpixel-Genauigkeit	81
5.4.4 Auswertegeschwindigkeit	81
5.5 Verifikation des Meßsystems	82
5.5.1 Auswahl des Meßorts	82
5.5.2 LDV-Messungen	83
5.5.3 PIV-Messungen	83
5.5.4 Vergleich der LDV- und PIV-Messungen	85
5.5.5 Schlußfolgerung	88
6 Physikalische Grundlagen instationärer Strömungsphänomene	89
6.1 Momentane Geschwindigkeit in einer Strömung	89
6.1.1 Anteile der momentanen Geschwindigkeit	89
6.1.2 Ermittlung der stationären Geschwindigkeitsanteile	90
6.1.3 Berechnung der momentanen Geschwindigkeitsabweichung	91
6.2 Berechnung des momentanen Drucks	92
6.2.1 Strömungsbeschreibende Differentialgleichungen	92
6.2.2 Zeitgemittelte Betrachtung	93
6.2.3 Berechnung einer Druckabsenkung mit einem Wirbelmodell	96
6.2.4 Integration der Druckgradienten	97
6.2.5 Dimensionslose Darstellung	98
6.3 Deterministisch beschreibbare Strömungsphänomene	99
6.3.1 Grundformen von Wirbeln	99
6.3.2 Kennzeichen des Wirbelzentrums	102

7 Untersuchungsgegenstand und Versuchsaufbau	105
7.1 Untersuchte Strömungskonfiguration	105
7.2 Versuchs- und Meßeinrichtungen	106
7.2.1 Kavitationskanal	106
7.2.2 Verwendeter Tracer für PIV-Messungen	106
7.2.3 Aufstiegsverhalten der Tracer-Blasen	108
7.2.4 Beleuchtung der Teststrecke	109
7.2.5 Aufnahmesystem	110
7.2.6 PIV-Auswertung	111
8 Analyse instationärer Strömungsphänomene	113
8.1 Vorbemerkungen	113
8.2 Analyse der Kavitationsentstehung	114
8.2.1 Entstehung von Kavitationsstrukturen	114
8.2.2 Zeitliche Entwicklung von Kavitationsstrukturen	116
8.3 Analyse der Hydrodynamik der Strömung	120
8.3.1 Qualitativer Vergleich von zeitgemittelter und instationärer Geschwindigkeitsmessung	120
8.3.2 Analyse der Strömungsphänomene	122
8.3.3 Zeitliches Verhalten der Wirbel	127
8.3.4 Korrelation zwischen Kavitationsentstehungsort und Wirbelzentrum	128
8.4 Druck im Wirbelzentrum	129
8.4.1 Druckberechnung nach Navier-Stokes	129
8.4.2 Druckberechnung mit Wirbelmodell nach Rankine	131
8.4.3 Vergleich mit zeitgemitteltem Druck	132
8.5 Schlußfolgerung	136
9 Zukünftiger Forschungs- und Entwicklungsbedarf	139
10 Zusammenfassung	143
Literaturverzeichnis	145