

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	7
2	Grundlagen	11
2.1	Turbulenter Transport	11
2.1.1	Transport- und Bewegungsgleichungen	11
2.1.2	Turbulenz	12
2.1.3	Turbulenter Transport (Eddy-Diffusion)	15
2.1.4	Reynoldsstress und Schubspannungsgeschwindigkeit	16
2.2	Freie Wasseroberflächen	17
2.2.1	Wasseroberflächenwellen	17
2.2.2	Beschreibung der Orbitalbewegung	18
2.2.3	Turbulenz im Wellenfeld	21
2.3	Turbulenzgrad	22
3	Strömungsvisualisierung	24
3.1	Einleitung	24
3.2	Visualisierungsverfahren	25
3.2.1	Sichtbarmachung	25
3.2.2	Beleuchtung	28
3.3	Strömungsvisualisierung mit Partikeln	30
3.3.1	Wahl des Tracers	30
3.3.2	Sichtbarkeit	31
3.3.3	Bewegungsgleichungen kleiner, runder Teilchen	31
3.3.4	Schwebevermögen	33
3.3.5	Teilchenfolgevermögen	33
4	Aufbau und Durchführung	36
4.1	Wind/Wasserkanal	36
4.2	Tracerteilchen und Beleuchtung	37
4.3	Aufnahme und Digitalisierung	38
4.4	Binärisierung und Segmentierung	42
4.5	Abbildungsfehler	47
4.5.1	Eichung	50
4.5.2	3D-Projektionsfehler (<i>out-of-plane motion</i>)	52
5	Vorverarbeitung mit morphologischen Bildoperatoren	54

5.1	Morphologische Operatoren	54
5.2	Realisierung	57
5.3	Bildzeilentransformation	59
5.4	Trennung von Partikelspuren und Wasseroberfläche	59
6	Particle Tracking Velocimetrie	62
6.1	Geschwindigkeitsmessung in Bildfolgen	62
6.2	Partikel-Tracking-Algorithmus	64
6.2.1	Objektsuche	64
6.2.2	Objekterfassung (Segmentierung)	66
6.2.3	Geschwindigkeitsfilterung	66
6.2.4	Beschleunigungsfilter	68
6.2.5	Abbruchskriterium	69
6.2.6	Geschwindigkeitsberechnung	69
6.2.7	Bestimmung der Lage der Wasseroberfläche	70
6.3	Zuverlässigkeit	72
6.3.1	Korrespondenzfehlerquellen	72
6.3.2	Postoperative Gütekriterien und Teilchendichte	74
7	Geschwindigkeitsrekonstruktion	77
7.1	Einleitung	77
7.2	Bewegungsunschärfe	79
7.3	Bewegungsmodell des Teilchens im Grauwertbild	79
7.3.1	Teilchenmodell	79
7.3.2	Rekonstruktion der Teilchenposition	81
7.3.3	Rekonstruktion der Teilchengeschwindigkeit und Biasingfehler	82
7.4	Nyquist-Theorem und Geschwindigkeitsauflösung im kontinuierlichen Grauwertbild	85
7.5	Teilchenbewegung im kontinuierlichen Binärbild	86
7.5.1	Schwerpunkt und Geschwindigkeitsbestimmung	86
7.5.2	Nyquist-Theorem für binäre Bildfolgen	89
8	Subpixelgenauigkeit	92
8.1	Quantisierung	92
8.2	Quantisierungsfehler	94
8.3	Lokalitäten	95
8.4	Einfluß der Grauwertschwellenlage in Binärbildern	102
9	Ergebnisse und Diskussion	104
9.1	Meßergebnisse	104
9.2	Auflösung und Meßgenauigkeit	105
9.2.1	Geschwindigkeitsauflösung	110
9.2.2	Örtliche Auflösung	111
9.2.3	Frequenzauflösung	112
9.3	Statistische Geschwindigkeitsanalyse	113
9.3.1	Geschwindigkeitsprofil	113
9.3.2	Geschwindigkeitsverteilung	114
9.4	Untersuchung der Turbulenz	117

9.4.1	Schubspannungsgeschwindigkeit	117
9.4.2	Turbulenzfeld und Orbitalbewegung	119
9.5	Lagrange'sche Drift (Transport)	121
9.6	Rekonstruktion des Euler'schen Feldes	124
9.6.1	Zufallsverteilte Abtastung (<i>Random Grid</i>)	124
9.6.2	Visuelle Darstellung und Animation	125
10	Resümee und Ausblick	129
11	Danksagung	131
A	Tabellen	132
A.1	Zusammenstellung der Meßreihen	132
B	Berechnungen und Herleitungen	133
B.1	Schwerpunktverschiebung in Grauwertbildern gleichmäßig beschleunigter Bewegung	133
B.2	Orbitale Beschleunigung	135
B.3	Diskrete Berechnung der Geschwindigkeitswichtung	137
C	Anmerkungen zur verwendeten Software	138