

Inhaltsverzeichnis

1. Einführung	1
1.1. Meilensteine der Geschichte	1
1.2. Lichtmodelle	2
2. Linsen	3
2.1. Brechung	3
2.1.1. Lichtgeschwindigkeit	3
2.1.2. Brechungsgesetz	4
2.2. Matrixdarstellung	6
2.2.1. Definitionen, Annahmen und Näherungen	6
2.2.2. Transformationen	9
2.2.3. Linse	11
2.3. Dünne Linse	12
2.3.1. Voraussetzungen	12
2.3.2. Konstruktionsregeln	13
2.3.3. Abbildung	17
2.4. Dicke Linse	23
2.5. Linsenkombinationen	27
2.5.1. Zwei dünne Linsen kurz hintereinander	27
2.5.2. Zwei dünne Linsen mit Abstand d	28
2.5.3. Ähnlichkeit von zwei dünnen Linsen und einer dicken Linse	33
2.5.4. Zwei dicke Linsen mit Abstand d	34
2.5.5. Ersatzlinsen	36
2.6. Optische Geräte	36
2.6.1. Einfache optische Geräte	36
2.6.2. Zusammengesetzte optische Geräte	38
2.6.3. Vergrößerung	40
2.6.4. Sehwinkel	42
2.6.5. Numerische Apertur	43
2.7. Linsenfehler	44
2.7.1. Sphärische Aberration (Öffnungsfehler)	44
2.7.2. Koma (Asymmetriefehler)	45
2.7.3. Astigmatismus	46
2.7.4. Bildfeldwölbung	47
2.7.5. Verzeichnung	48

Inhaltsverzeichnis

2.7.6. Chromatische Aberration	48
2.7.7. Modell paraxialer Strahlen	50
2.8. Raytracing	50
2.8.1. Definitionen und Vereinbarungen	50
2.8.2. Berechnungen	51
2.8.3. Programm	54
2.9. Okulare und Objektive	60
2.9.1. Okulare	61
2.9.2. Objektive	62
3. Positions-, Lage- und Formmessung	63
3.1. Lochkamera	63
3.1.1. Ideale Lochkamera	63
3.1.2. Reale Lochkamera	65
3.1.3. Camera Obscura	68
3.2. Triangulation	69
3.3. Bildsensoren	70
3.3.1. Punktsensoren	70
3.3.2. Spalt- und Quadrantensensoren	72
3.3.3. Lateraleffektdiode (Position Sensitive Device / Detector, PSD)	73
3.3.4. Multidetektorzeile (Zeilenkamera)	75
3.3.5. Matrixkamera	81
3.4. Scheimpflug-Anordnung	85
3.5. Streifenprojektion	88
3.6. Moiré-Verfahren	90
3.7. Koordinatentransformation	102
3.7.1. Koordinatensysteme	102
3.7.2. Verschiebung	103
3.7.3. Rotation	103
3.7.4. Zentralprojektion	104
3.7.5. Bildsensor	105
3.7.6. Zusammenfassung	105
3.8. Kalibrierung	106
3.8.1. Direkte Lineare Transformation	106
3.8.2. Polynomapproximation	114
3.8.3. Kalibrierungsbilder	115
3.9. Positions- und Lagebestimmung der Kamera	116
3.10. Positionsbestimmung von Objekten	117
3.10.1. Projektion einer Objektebene	117
3.10.2. Projektion des Raumes	117
3.10.3. Stereoskopie	119
3.10.4. Alternative Methoden zum Erhalt der Tiefeninformation	119

3.11. Photogrammetrie	120
3.12. Autofokus	121
4. Bewegungsmessung	123
4.1. Prinzip	123
4.1.1. Hochgeschwindigkeitskameras	123
4.1.2. Doppelaufnahmekamera	124
4.1.3. Abbildende Bewegungsbestimmung	124
4.2. Bewegungsvisualisierung	126
4.3. Particle Tracking Velocimetry (PTV)	127
4.4. 3D Particle Tracking	130
4.5. Particle Image Velocimetry (PIV)	133
4.6. Optischer Fluss	137
4.7. Laser Speckle Velocimetry (LSV)	138
4.8. Image Pattern Correlation Technique (IPCT)	140
5. Elektromagnetische Welle	141
5.1. Elektrodynamik	141
5.1.1. Maxwell-Gleichungen	141
5.1.2. Materialgleichungen (für lineare, räumlich und zeitlich homogene Medien)	141
5.1.3. Wellen	142
5.1.4. Ausbreitung	142
5.1.5. Intensität	142
5.2. Ebene harmonische elektromagnetische Welle	143
5.2.1. Zeitliche oder räumliche harmonische Schwingung	143
5.2.2. Propagierende Welle	144
5.2.3. Dreidimensionale ebene harmonische elektromagnetische Welle	145
5.2.4. Komplexe Erweiterung	146
5.3. Brechungsgesetz	147
5.4. Polarisation	148
5.4.1. Polarisation einer ebenen harmonischen elektromagnetischen Welle	148
5.4.2. Darstellungskonventionen	153
5.4.3. Stokes-Parameter	153
5.4.4. Absorptionspolarisationsfilter	156
5.5. Fresnel-Gleichungen	158
5.5.1. Amplitudenkoeffizienten	158
5.5.2. Intensitätskoeffizienten	167
5.5.3. Bilanzen der Intensitäten	170
5.5.4. Strahlteilerplatte	172
5.5.5. Antireflexbeschichtung	172

Inhaltsverzeichnis

5.5.6. Reflexionspolarisationsfilter	177
5.5.7. Ellipsometrie	178
5.6. Totalreflexion	179
5.6.1. Grenzwinkel der Totalreflexion	179
5.6.2. Evanescente Welle	179
5.6.3. Strahlteilerwürfel	181
5.6.4. Attenuated Total Reflection (ATR) Infrared Spectroscopy	182
5.6.5. Total Internal Reflection Fluorescence (TIRF) Microscopy	183
5.7. Doppelbrechung	184
5.7.1. Polarisationsstrahlteiler	185
5.7.2. Verzögerungsplatten	186
5.7.3. Polarisationserhaltender Lichtarm	196
5.7.4. Optischer Isolator	197
5.7.5. Polarisationsmodulatoren	197
5.8. Interferenz	201
5.8.1. Superposition von Lichtwellen	201
5.8.2. Bedingungen für Interferenz	203
5.8.3. Interferometer	204
6. Dichtemessung	207
6.1. Strahlengang	207
6.1.1. Lokaler Brechungsindex	207
6.1.2. Strahlablenkung	208
6.2. Shadowgraphy	210
6.3. Schlieren	215
6.4. Interferometrische Dichtemessung	219
6.4.1. Mach-Zehnder-Interferometer	219
6.4.2. Schlieren-Interferometer / Differentialinterferometer	224
6.5. Background Oriented Schlieren (BOS)	225
6.6. Übersicht	227
7. Entfernungsmessung	229
7.1. Interferometer	229
7.1.1. Messprinzip	229
7.1.2. Richtungserkennung und Subwellenlängenauflösung	232
7.1.3. Überwindung der 2π -Mehrdeutigkeit	233
7.2. LIDAR (Light Detection and Ranging)	237
7.2.1. Messprinzip	237
7.2.2. Aufbau	238
7.2.3. LIDAR-Scanner	239
7.2.4. Laufzeitmessung	240
7.3. Intensitätsmodulation	242
7.3.1. Messprinzip	242

7.3.2. Phasendifferenzmessung	243
7.4. TOF-Kamera (Time of Flight)	244
7.5. Profilometer	250
7.5.1. Konfokalmikroskop	251
7.5.2. Richtungserkennung mit astigmatischer Linse	252
7.5.3. Foucault'sches Schneidenverfahren	253
7.5.4. Weißlichtinterferometer	254
7.6. Übersicht Entfernungsmessung	255
8. Geschwindigkeitsmessung	257
8.1. Doppler-Verschiebung	257
8.1.1. Bewegter Empfänger	257
8.1.2. Bewegter Sender	257
8.1.3. Streuung an Störstelle/Teilchen	257
8.1.4. Senkrechte Reflexion an bewegtem Objekt	259
8.1.5. Vektorielle Darstellung	259
8.2. Vibrometer	261
8.2.1. Messprinzip	261
8.2.2. Bragg-Zelle (AOM, Acousto-Optic Modulator)	263
8.2.3. Frequenzmessung	267
8.3. DGV/PDV	273
8.3.1. Prinzip	273
8.3.2. Jod-Absorptionszelle	274
8.3.3. Kalibrierung und Referenzmessung	279
8.3.4. Weiterentwicklungen	280
8.4. Gauß-Strahl	282
8.4.1. Huygenssches Prinzip	282
8.4.2. Wellenausbreitung und -überlagerung	284
8.4.3. Explizite Formulierung	287
8.4.4. Abbildung durch Linsen	295
8.5. Laser-2-Focus (L2F) Anemometry / Velocimetry	298
8.6. Laser Doppler Anemometry / Velocimetry (LDA / LDV)	300
8.6.1. Aufbau	300
8.6.2. Signalentstehung	300
8.6.3. LDA-Messvolumen	302
8.6.4. Signal (Burst)	304
8.6.5. Signalverarbeitung	305
8.6.6. Frequenzverschiebung	309
8.6.7. Weiterentwicklungen	313
8.6.8. Eigenschaften des Datensatzes	314

Inhaltsverzeichnis

A. Subpixelschätzung	317
A.1. Modellfunktionen	317
A.1.1. Modellfunktion der Teilchenabbildung	317
A.1.2. Modellfunktion der Bildwandlung	319
A.1.3. Testmodell	320
A.2. Positionsschätzung mit Subpixelgenauigkeit (PTV)	321
A.2.1. Eindimensionale Positionsschätzung mit Subpixelgenauigkeit	321
A.2.2. Zweidimensionale Positionsschätzung mit Subpixelgenauigkeit	330
A.3. Bewegungsschätzung mit Subpixelgenauigkeit (PIV)	347
A.3.1. Bewegung von Einzelteilchen	347
A.3.2. Bewegung eines Teilchenensembles	357
B. Iterative Verfahren und räumliche Auflösung bei PIV	383
B.1. Deformation der Abfragefenster	383
B.1.1. Verfahren	383
B.1.2. Subpixelbildinterpolation	386
B.1.3. Vergleich der Verfahren	393
B.1.4. Bewegung senkrecht zur Lichtschnittebene (out-of-plane)	393
B.2. Räumliche Auflösung	395
B.2.1. Überlappung der Abfragefenster	395
B.2.2. Interpolation des Bewegungsfeldes	396
B.2.3. Amplitudenfrequenzgang	397
B.2.4. Grenzen der räumlichen Auflösung	399
B.3. Iterative Subpixelbildverschiebung und -deformation	404
B.3.1. Verfahren	404
B.3.2. Bandbreite und Schätzfehler	412
C. LDA-Datenverarbeitung	415
C.1. Statistische Analyse stochastisch abgetasteter Daten	415
C.1.1. Wahrscheinlichkeitsdichte	415
C.1.2. Kumulative Verteilungsfunktion, statistische Momente	416
C.1.3. Autokorrelationsfunktion und spektrale Leistungsdichte	421
C.2. Statistische Fehler (Geschwindigkeitsbias)	438
C.2.1. Wahrscheinlichkeitsdichte	438
C.2.2. Kumulative Verteilungsfunktion, statistische Momente	440
C.2.3. Gewichtung	442
C.2.4. Autokorrelationsfunktion und spektrale Leistungsdichte	452