

OPTISCHE STRÖMUNGSMESSTECHNIK

Dr. rer. nat. Herbert Oertel sen.
a. pl. Professor für Strömungslehre
Universität Karlsruhe

Leitender Regierungsdirektor a. D., Ehem. Wissenschaftlicher
Mitarbeiter am Deutsch-Französischen Forschungsinstitut
Saint Louis (ISL)

unter Mitarbeit von

Dr.-Ing. habil. Herbert Oertel jun.
a. pl. Professor für Strömungslehre
Universität Karlsruhe

Direktor des Instituts für Theoretische Strömungsmechanik
DFVLR-AVA Göttingen

mit 1121 Abbildungen, 51 Tabellen,
3039 Literaturhinweisen

G. BRAUN KARLSRUHE

1 GRUNDLAGEN

1.1 Licht

1.1.1 Beschreibungen

1.1.1.1 Elektromagnetische Wellen	9
1.1.1.2 Komplexe Schreibweise	15
1.1.1.3 Lichtstrahlen	23
1.1.1.4 Photonen	25

1.1.2 Lichtgrößen

1.1.2.1 Physikalische Größen	29
1.1.2.2 Physiologische Größen	31

1.2 Licht in Materie

1.2.1 Brechung und Reflexion

1.2.1.1 Brechzahlen	35
1.2.1.2 Fresnelformeln	43
1.2.1.3 Reflexion an Metall	48

1.2.2 Absorption und Emission

1.2.2.1 Elementarakte	51
1.2.2.2 Spektren	55
1.2.2.3 Hohlraumstrahlung	62
1.2.2.4 Kirchhoffsches Gesetz	64
1.2.2.5 Farben	67

1.3 Lichtquellen

1.3.1 Quellen inkohärenten Lichtes

1.3.1.1 Strahlerarten	71
1.3.1.2 Glühlampen	73
1.3.1.3 Gasentladungslampen	75
1.3.1.4 Blitzlicht	81

1.3.2 Laser

1.3.2.1 Laserprinzip	89
1.3.2.2 Dauerlaser	94
1.3.2.3 Impulslaser	99
1.3.2.4 Abstimmbare Laser	103
1.3.2.5 Laserlichtbündel	107

1.4 Lichtempfänger

1.4.1 Film

1.4.1.1 Photochemischer Effekt	111
1.4.1.2 Schwarzweißfilm	113
1.4.1.3 Farbfilm	118

1.4.2 Photodetektoren

1.4.2.1 Photoelektrische Effekte	119
1.4.2.2 Kathodendetektoren	125
1.4.2.3 Halbleiterdetektoren	129
1.4.2.4 Rauschen	134

1.4.3	Bildwandler	
1.4.3.1	Bildverstärker	139
1.4.3.2	Bildabtaster	141
1.5	Geometrische Optik	
1.5.1	Strahlenoptische Bauteile	
1.5.1.1	Spiegel	147
1.5.1.2	Planplatte und Prismen	149
1.5.1.3	Linsen	155
1.5.1.4	Lichtleiter	157
1.5.2	Abbildung	
1.5.2.1	Paraxiale Abbildung	161
1.5.2.2	Aberrationen	165
1.5.2.3	Blenden	169
1.5.3	Linsensysteme	
1.5.3.1	Zwei dünne Linsen	173
1.5.3.2	Zwischenabbildung	175
1.5.3.3	Verflochtene Abbildungen	178
1.5.3.4	Objektive	181
1.6	Wellenoptik	
1.6.1	Interferenz	
1.6.1.1	Zweiwelleninterferenz	185
1.6.1.2	Vielwelleninterferenz	191
1.6.1.3	Gleiche Neigung oder Dicke	197
1.6.1.4	Interferenzoptische Bauteile	201
1.6.1.5	Interferenzbedingungen	203
1.6.2	Beugung	
1.6.2.1	Beugungstheorie	209
1.6.2.2	Fresnelbeugung	213
1.6.2.3	Fraunhoferbeugung	217
1.6.2.4	Beugung bei Abbildung	223
1.6.2.5	Speckle	227
1.6.2.6	Beugungsoptische Bauteile	229
1.6.3	Laseroptik	
1.6.3.1	Aufweitung und Einschnürung	232
1.6.3.2	Laserlichtschnitt	237
1.7	Polarisationsoptik	
1.7.1	Polarisationseffekte	
1.7.1.1	Polarisationsarten	239
1.7.1.2	Polarisation an Grenzflächen	242
1.7.1.3	Doppelbrechung	243
1.7.1.4	Drehung der Schwingebene	249
1.7.2	Polarisationsoptische Bauteile	
1.7.2.1	Polarisatoren	251
1.7.2.2	Polarisationsstrahlteiler	253

1.7.2.3 Phasenschieber	259
1.7.2.4 Schwingungsdreher	263

1.8 Streuung

1.8.1 Streuung ohne Frequenzänderung	
1.8.1.1 Rayleighstreuung	265
1.8.1.2 Miestreuung	267
1.8.2 Streuung mit Frequenzänderung	
1.8.2.1 Dopplereffekt	269
1.8.2.2 Ramanstreuung	275

2 VISUALISIERUNG

2.1 Visualisierung der Strahlablenkung

2.1.1 Strahlablenkung in Strömungen	
2.1.1.1 Schlieren	279
2.1.1.2 Ablenkung am Brechzahl sprung	281
2.1.1.3 Ablenkung am Brechzahlgradienten	283
2.1.2 Schattenverfahren	
2.1.2.1 Projizierende Verfahren	287
2.1.2.2 Abbildung der Schattenebene	292
2.1.2.3 Anwendungsbeispiele	295
2.1.3 Schlierenverfahren	
2.1.3.1 Schlierenverfahren mit Schneide	303
2.1.3.2 Anwendungsbeispiele	307
2.1.3.3 Schlierenbildauswertung	309
2.1.3.4 Andere Schlierenblenden	311
2.1.3.5 Moiréverfahren	313

2.2 Visualisierung der Phasenverschiebung

2.2.1 Phasenverschiebung in Strömungen	
2.2.1.1 Phasenobjekte	315
2.2.1.2 Phasen am Brechzahl sprung	316
2.2.1.3 Phasen bei Brechzahlgradienten	318
2.2.2 Interferometrie	
2.2.2.1 Mach/Zehnder-Interferometer	319
2.2.2.2 Interferenzlokalisierung	323
2.2.2.3 Anwendungsbeispiele	325
2.2.2.4 Interferenzbildauswertung	328
2.2.2.5 Betrieb mit Buntlicht	331
2.2.2.6 Andere Zweiwelleninterferometer	333
2.2.2.7 Fabry/Perot-Interferometer	335
2.2.3 Differentialinterferometrie	
2.2.3.1 Mit Wollastonprismen	337
2.2.3.2 Anwendungsbeispiele	343
2.2.3.3 Interferenzbildauswertung	351

2.2.3.4	Komplementäre Doppelbelichtung	355
2.2.3.5	Komplementärbildspaltung	359
2.2.3.6	Andere Differentialinterferometer	363
2.2.4	Beugungsverfahren	
2.2.4.1	Beugung an Phasenobjekten	365
2.2.4.2	Eingriff in die kohärente Abbildung	367
2.2.4.3	Dunkelfeldverfahren	371
2.2.4.4	Feldabsorptionsverfahren	373
2.2.4.5	Phasenkontrastverfahren	375
2.2.4.6	Gegenfeldverfahren	381
2.2.4.7	Schneidenverfahren	382
2.2.5	Holographische Verfahren	
2.2.5.1	Holographie	385
2.2.5.2	Nachträgliche Visualisierung	392
2.2.5.3	Doppelbelichtungsverfahren	395
2.2.5.4	Echtzeitverfahren	398
2.2.5.5	Variierte Referenzphase	400
2.3	Visualisierung mit Beigaben	
2.3.1	Visualisierung durch Färbung	
2.3.1.1	Absorptionsbilder	403
2.3.1.2	Emissionsbilder	405
2.3.2	Visualisierung mit Fäden	
2.3.2.1	Textilfadenbilder	408
2.3.2.2	Flüssigfadenbilder	410
2.3.3	Visualisierung mit Tracern	
2.3.3.1	Tracer in Flüssigkeiten	413
2.3.3.2	Tracer in Gasen	417
2.3.3.3	Tracerbewegung	424
2.3.3.4	Konzentrationsbilder	430
2.3.3.5	Flitterbilder	436
2.3.3.6	Tracerwegbilder	436
2.3.3.7	Tracerholographie	442
2.3.3.8	Dopplerbilder	445
2.3.3.9	Tracerlinienbilder	451
2.3.4	Spuren an Oberflächen	—
2.3.4.1	Bewegungsspuren	461
2.3.4.2	Wärmespuren	466
2.4	Aufnahmetechnik	
2.4.1	Kurzzeitphotographie	
2.4.1.1	Blitzbelichtung	473
2.4.1.2	Verschlüsse	477
2.4.2	Kinematographie ohne optischen Ausgleich	
2.4.2.1	Periodische Belichtung	481
2.4.2.2	Chronophotographie	486
2.4.2.3	Optische Bildtrennung	489

2.4.2.4	Mechanische Bildtrennung	499
2.4.2.5	Elektrische Bildtrennung	509
2.4.3	Kinematographie mit optischem Ausgleich	
2.4.3.1	Ablaufkamera	511
2.4.3.2	Trommelkamera	514
2.4.3.3	Drehspiegelkamera	517
2.4.4	Streakregistrierung	
2.4.4.1	Weg/Zeit-Diagramme	521
2.4.4.2	Anwendungsbeispiele	523
2.4.5	Immobilisierung	
2.4.5.1	Mitbewegter Film	529
2.4.5.2	Stroboskopie	531
2.5	Bildauswertung	
2.5.1	Lokale aus integralen Größen	
2.5.1.1	Bei Rotationssymmetrie	533
2.5.1.2	Tomographie	537
2.5.2	Bildtransformation	
2.5.2.1	Optische Fouriertransformation	543
2.5.2.2	Eingriff in die Bildabbildung	547
2.5.2.3	Optische Bildsubtraktion	549
2.5.2.4	Äquidensiten	552
2.5.2.5	Bildumsetzung in Signale	553

3 OPTOELEKTRISCHE MESSUNGEN

3.1	Registrierung der Strahlablenkung	
3.1.1	Laserrefraktometer	
3.1.1.1	Mit einem Lichtbündel	554
3.1.1.2	Mit gekreuzten Lichtbündeln	556
3.1.2	Laserreflektometer	
3.1.2.1	Reflexion am Fenster	557
3.1.2.2	Reflexion am Verdichtungsstoß	558
3.2	Registrierung der Phasenverschiebung	
3.2.1	Laserinterferometer	
3.2.1.1	Mach/Zehnder-Interferometer	559
3.2.1.2	Heterodyninterferometer	566
3.2.2	Laserdifferentialinterferometer	
3.2.2.1	Mit einem Meßbündelpaar	569
3.2.2.2	Mit mehreren Meßbündelpaaren	573
3.2.2.3	Mit Schwingspiegel	575
3.3	Spektroskopische Verfahren	
3.3.1	Emissionsmessungen	
3.3.1.1	Thermische Emission	577

3.3.1.2	Elektronenstrahlumineszenz	579
3.3.1.3	Laserfluoreszenz	583
3.3.2	Extinktionsmessungen	
3.3.2.1	Mit einem Lichtbündel	585
3.3.2.2	Mit gekreuzten Lichtbündeln	587
3.3.3	Linienumkehrverfahren	
3.3.3.1	Mit Abgleich	587
3.3.3.2	Ohne Abgleich	589
3.3.4	Streulichtmessungen	
3.3.4.1	Rayleighstreuung	590
3.3.4.2	Spontane Ramanstreuung	591
3.3.4.3	Stimulierte Stokes/Ramanstreuung	596
3.3.4.4	Kohärente Antistokes/Ramanstreuung	599
3.4	Tracervelozimetrie	
3.4.1	Tracer im Laserfokus	
3.4.1.1	Tracerhäufigkeit	604
3.4.1.2	Streulichtimpulse	605
3.4.1.3	Meßtechnische Verwendung	606
3.4.2	Laufzeitvelozimeter	
3.4.2.1	Zweifokusvelozimeter	609
3.4.2.2	Blendenvelozimeter	611
3.4.3	Dopplerreferenzvelozimeter	
3.4.3.1	Streulicht/Referenzlichtüberlagerung	612
3.4.3.2	Signale	615
3.4.3.3	Sockelunterdrückung	617
3.4.3.4	Behebung der Vorzeichenunsicherheit	618
3.4.3.5	Vektormessung	619
3.4.4	Dopplerdifferenzvelozimeter	
3.4.4.1	Streulicht/Streulichtüberlagerung	620
3.4.4.2	Signale	622
3.4.4.3	Vektormessung	623
3.4.5	Zweibündelvelozimeter	
3.4.5.1	Streulicht aus zwei Lichtbündeln	623
3.4.5.2	Interferenzfeldinterpretation	626
3.4.5.3	Signale	628
3.4.5.4	Sockelunterdrückung	630
3.4.5.5	Behebung der Vorzeichenunsicherheit	631
3.4.5.6	Vektormessung	633
3.4.6	Verarbeitung der Dopplersignale	
3.4.6.1	Einzelsignalverarbeitung	635
3.4.6.2	Vielsignalverarbeitung	638
3.4.6.3	Photonenkorrelation	641
3.4.6.4	Statistische Auswertung	643
3.4.7	Dopplerinterferenzvelozimeter	
3.4.7.1	Michelsonvelozimeter	648
3.4.7.2	Phasennachführung	652
3.4.7.3	Fabry/Perot-Velozimeter	658