

Inhalt

1 Mechanische Meßmethoden	11
1.1 Druckmessungen	11
1.1.1 Druckeinheiten	12
1.1.2 Bernoulli Gleichung	13
1.1.2.1 Stationäre, inkompressible Strömung	15
1.1.2.2 Stationäre, kompressible Unterschallströmung	17
1.1.2.3 Stationäre Überschallströmung	20
1.1.3 Druckmeßsonden zur Bestimmung des Betrages der Geschwindigkeit	22
1.1.3.1 Gesamtdrucksonden (Pitot Rohre)	22
1.1.3.2 Sonden zur Messung des statischen Drucks	23
1.1.3.3 Sonden zur gleichzeitigen Messung des Gesamtdrucks und des statischen Drucks (Prandtl Rohre)	25
1.1.3.4 Meßfehler bei Prandtl- und Pitot Rohren	27
1.1.4 Druckmeßsonden zur Bestimmung der Strömungsrichtung	32
1.1.4.1 Zweilochsonden	33
1.1.4.2 Mehrlochsonden	34
1.1.5 Messung der Wandschubspannung	35
1.1.5.1 Messung der Wandschubspannung in einer Rohr- oder Kanalströmung	36
1.1.5.2 Messung der Wandschubspannung in einer turbulenten Grenzschichtströmung	37
1.1.6 Durchflußmessung	39
1.1.6.1 Durchflußmessung mittels Meßblende oder Meßdüse	39
1.1.6.2 Schwebekörper Durchflußmessung	42
1.2 Mikromanometer	43
1.2.1 Flüssigkeitsmanometer	43
1.2.1.1 U-Rohr Manometer mit gleichen Schenkeldurchmessern	44
1.2.1.2 U-Rohr Manometer mit ungleichen Schenkeldurchmessern	50
1.2.1.3 Umgekehrtes U-Rohr Manometer	54
1.2.2 Federmanometer	54
1.3 Kraftmessungen	56
1.3.1 Hebelwaagen	57
1.3.2 Stielwaagen	58
1.3.3 Messung des Reibungswiderstands	62
1.4 Schrifttum	66
1.4.1 Nicht im Text genanntes Schrifttum	67
2 Elektromechanische Wandler und Messung von Schwankungsgrößen	68
2.1 Wandler zur Druckmessung	69
2.1.1 Schnelle Druckwandler	69
2.1.1.1 Elektrodynamischer Wandler (dynamisches Mikrofon)	70
2.1.1.2 Piezoelektrischer Wandler (Kristallmikrofon)	71
2.1.1.3 Kapazitiver Wandler (Kondensatormikrofon)	71
2.1.2 Druckwaagen	73
2.1.3 Bleeding Probe	74
2.2 Wandler zur Geschwindigkeitsmessung	74
2.2.1 Schalenkreuzanemometer	74
2.2.2 Flügelradanemometer	76
2.2.3 Pulsdrahtanemometrie	76
2.2.4 Hitzdraht in der Wirbelstraße	77
2.3 Hitzdraht- und Heißfilmanemometrie	79

2.3.1	Zusammenhang zwischen Geschwindigkeit, Temperatur und abgeführter Wärme	81
2.3.2	Konstant-Strom-Methode	83
2.3.2.1	Sensorempfindlichkeit für zeitlich konstante Geschwindigkeiten und quasistationäre Geschwindigkeitsschwankungen	84
2.3.2.2	Sensorempfindlichkeit für Geschwindigkeitsschwankungen	85
2.3.2.3	Messung von Geschwindigkeitsschwankungen	90
2.3.2.4	Messung von Temperaturschwankungen	92
2.3.3	Konstant-Temperatur Methode	93
2.3.3.1	Sensorempfindlichkeit	94
2.3.3.2	Messungen in inkompressiblen Strömungen	96
2.3.3.3	Linearisierung der Anemometerausgangsspannung	99
2.3.3.4	Messungen in kompressiblen Strömungen	101
2.3.4	Richtungsempfindlichkeit eines zylindrischen Sensors	103
2.3.4.1	Richtungsempfindlichkeit eines unendlich langen Sensors	103
2.3.4.2	Richtungsempfindlichkeit eines Sensors endlicher Länge	105
2.3.5	Messung von Schwankungsgeschwindigkeiten	106
2.3.5.1	Messungen mit X- oder V-Sonden	107
2.3.5.2	Messungen mit Schrägdrahtsonden	111
2.3.5.3	Messungen mit Mehrsensorsonden	112
2.3.6	Spezielle Probleme bei Messungen in Flüssigkeiten	113
2.3.6.1	Elektrische Leitfähigkeit	114
2.3.6.2	Wahl der Sensortemperatur	114
2.3.6.3	Blasenbildung	115
2.3.6.4	Verschmutzung	115
2.3.7	Messung der Wandschubspannung	116
2.3.7.1	Zusammenhang zwischen Wärmestrom und Wandschubspannung	117
2.3.7.2	Messungen mit bündig in die Wand eingebauten Heißfilmen	120
2.3.7.3	Zusammenhang zwischen Massenstrom und Wandschubspannung	121
2.3.7.4	Messungen mit der elektrochemischen Methode	123
2.3.7.5	Pulsdrahtwandsonde	125
2.4	Ultraschall Velocimetrie	126
2.4.1	Prinzipielle Arbeitsweise der Dopplermethode	126
2.4.2	Prinzipielle Arbeitsweise der Laufzeitmethode	129
2.5	Durchflußmessung	130
2.5.1	Induktive Durchflußmessung	131
2.5.2	Wirbeldurchflußmesser	132
2.6	Kraftmessung	134
2.7	Schrifttum	138
2.7.1	Nicht im Text genanntes Schrifttum	141
3	Optische Meßmethoden	142
3.1	Laser-Doppler-Anemometrie (LDA)	142
3.1.1	Referenzstrahl-Methode	143
3.1.2	Differential- oder Kreuzstrahl-Methode	146
3.1.3	Interferenzstreifenmodell	148
3.1.3.1	Messung des Vorzeichens der Geschwindigkeit	151
3.1.3.2	Größe des Meßvolumens	153
3.1.3.3	Meßvolumen in einer Flüssigkeit	158
3.1.3.4	Dopplersignale	159
3.1.4	Streuteilchen	161
3.1.5	Verarbeitung der Dopplersignale	162

3.1.5	Verarbeitung der Dopplersignale	162
3.1.5.1	FFT Analysator	164
3.1.5.2	Counter Processor	164
3.1.5.3	"Bias" Korrektur	166
3.1.5.4	Frequenz Tracker	167
3.1.6	Prinzipieller Aufbau eines Laser-Doppler-Anemometers	168
3.1.6.1	Mehrkomponenten Laser-Doppler-Anemometer	171
3.1.6.2	Mehrkomponentenmessungen in Flüssigkeiten	173
3.1.6.3	Messung von Effektivwerten und der turbulenten Schubspannung mit nur einem Anemometermodul	175
3.2	Laser Zwei Fokus Anemometer (L2F)	177
3.3	Geschwindigkeitsfeldmessung	178
3.3.1	Particle Image Velocimetry (PIV)	181
3.3.1.1	Zweidimensionale Aufzeichnung von Geschwindigkeitsfeldern	182
3.3.1.2	Bildverschiebung (Image Shifting)	184
3.3.1.3	Auswertung von Teilchenaufnahmen	186
3.3.1.4	Dreidimensionale Aufzeichnung von Geschwindigkeitsfeldern	191
3.3.2	Laser-Speckle-Velocimetry (LSV)	195
3.3.2.1	Speckle-Photographie	196
3.3.3	Particle-Tracking-Velocimetry (PTV)	197
3.4	Optische Verfahren, die auf der Dichteabhängigkeit des Brechungsindex beruhen	198
3.4.1	Schattenverfahren	202
3.4.2	Schlierenverfahren	205
3.4.3	Interferenzverfahren	211
3.4.3.1	Mach-Zehnder-Interferometer	211
3.4.3.2	Differentialinterferometer	217
3.4.3.3	Holographische Interferometer	219
3.5	Optische Druckmessung	221
3.5.1	Theoretische Grundlagen	223
3.5.2	Kalibrierung und Druckverteilungsmessung	223
3.6	Schrifttum	226
3.6.1	Nicht im Text genanntes Schrifttum	230
4	Methoden der Strömungs-sichtbarmachung	231
4.1	Sichtbarmachung von Luftströmungen	239
4.1.1	Fadensonde	239
4.1.2	Streuteilchen für Luft	241
4.1.2.1	Bewegungsgleichung für Streuteilchen	241
4.1.2.2	Schwerkraftwirkung	245
4.1.2.3	Brownsche Bewegung	245
4.1.2.4	Wirkung eines Geschwindigkeitsgradienten	246
4.1.2.5	Auswahl der Streuteilchen	247
4.1.3	Rauch	248
4.1.3.1	Laserlichtschnittverfahren	250
4.1.3.2	Rauchdraht	251
4.1.3.3	Rauchlinien	254
4.1.4	Heißdraht	255
4.1.5	Heliumseifenbläschen	255
4.1.6	Anstrichbilder	256
4.1.6.1	Wandstromlinien	256
4.1.6.2	Umschlag laminar-turbulent	257
4.2	Sichtbarmachung von Wasserströmungen	258

4.2.1	Fadensonde	258
4.2.2	Streuteilchen für Wasser	259
4.2.2.1	Auswahl der Streuteilchen	260
4.2.3	Farbe	261
4.2.4	Tellurmethode	262
4.2.5	Wasserstoffbläschenmethode	265
4.2.6	Anstrichbilder	267
4.2.7	Flüssigkristalle	269
4.3	Sichtbarmachung mit Hilfe fotochromatischer Substanzen	270
4.4	Brechungsindexanpassung	272
4.5	Schrifttum	274
4.5.1	Nicht im Text genanntes Schrifttum	277
5	Versuchsanlagen für Modelluntersuchungen	278
5.1	Ähnlichkeitsgesetze	278
5.2	Windkanäle	283
5.2.1	Niedergeschwindigkeitswindkanäle	284
5.2.1.1	Antriebsmotor, Gebläse und Umlenkung	286
5.2.1.2	Diffusor	287
5.2.1.3	Vorkammer, Strömungsgleichrichter und Siebe	288
5.2.1.4	Düse	291
5.2.1.5	Meßstrecke	293
5.2.1.6	Auffangtrichter	295
5.2.1.7	Beispiele für ausgeführte Windkanäle	297
5.2.2	Windkanal für hohe Unterschallgeschwindigkeiten	300
5.2.3	Transsonischer Windkanal	300
5.2.4	Überschallwindkanal	302
5.2.4.1	Strömung eines idealen Gases aus einer nur konvergenten Düse	302
5.2.4.2	Laval Düse	305
5.2.4.3	Laval Düse mit falschem Gegendruck	308
5.2.4.4	Überschalldiffusor	309
5.2.4.5	Meßstrecke	311
5.2.4.6	Beispiele für ausgeführte Überschallwindkanäle	314
5.2.5	Hypersonischer Windkanal	317
5.3	Stoßwellenrohre	320
5.3.1	Stoßwellenkanal	324
5.3.2	Hochenthalpiekanal	325
5.3.3	Rohrwindkanal	326
5.4	Wasserkkanäle	329
5.4.1	Wasserumlaufkanal	330
5.4.2	Kavitationskanal	332
5.4.3	Schlepptank	336
5.4.4	Strömungskkanäle für spezielle Aufgaben	338
5.5	Schrifttum	341
5.5.1	Nicht im Text genanntes Schrifttum	342
	Namensverzeichnis	343
	Sachverzeichnis	345