

# Inhaltsverzeichnis

<b>Symbolverzeichnis</b> . . . . .	12
<b>1. Grundlagen der Fluidmechanik für die Strömungsmesstechnik</b> . . . . .	15
1.1. Ruhende Fluide (Hydro- und Aerostatik) . . . . .	15
1.2. Statische Druckmessung . . . . .	17
1.3. Hydro- und Aerodynamik . . . . .	24
1.3.1. Navier-Stokessche Bewegungsgleichungen . . . . .	24
1.3.2. Kontinuitätsgleichung . . . . .	26
1.3.3. Energiegleichung . . . . .	27
1.3.4. Reynoldssche Bewegungsgleichungen der turbulenten Strömung . . . . .	28
1.3.5. Korrelationsanalyse von Strömungen . . . . .	30
1.4. Modellmethode . . . . .	37
Literatur . . . . .	40
<b>2. Strömungsgeschwindigkeit und Durchfluß</b> . . . . .	41
2.1. Geschwindigkeitsverteilung im Rohr für laminare Strömungen . . . . .	41
2.2. Geschwindigkeitsverteilung im Rohr für turbulente Strömungen . . . . .	44
2.2.1. Turbulente Strömungen in fluidmechanisch glatten Rohren . . . . .	44
2.2.2. Turbulente Strömungen in fluidmechanisch rauhen Rohren . . . . .	47
2.3. Direkte Messung der mittleren Strömungsgeschwindigkeit für den Durchfluß . . . . .	50
2.3.1. Einpunktmessung . . . . .	50
2.3.2. Netzmessung . . . . .	51
Literatur . . . . .	55
<b>3. Strömungs- und Durchflußmessung nach mechanischen Wirkprinzipien</b> . . . . .	56
3.1. Strömungsmessung mit Drucksonden . . . . .	56
3.1.1. Gesamtdruck-, statische Druck- und Staudrucksonden . . . . .	56
3.1.2. Strömungsgeschwindigkeitsmessung . . . . .	58
3.1.3. Sonden für Mehrkomponentenmessungen . . . . .	62
3.1.4. Staudrucksonden für Durchflußmessungen . . . . .	67
3.1.5. Flüssigkeitsmanometer für Drucksonden . . . . .	69
3.1.6. Bewertung des Verfahrens der Geschwindigkeits- und Durchflußmessung mit Hilfe von Drucksonden . . . . .	72
3.2. Durchflußmessung mit Hilfe von Drosselgeräten – Wirkdruckverfahren . . . . .	73
3.2.1. Meßprinzip und Normung . . . . .	73
3.2.2. Normblende . . . . .	75
3.2.3. Normdüsen . . . . .	81

3.2.4.	Normventuridüse	85
3.2.5.	Klassisches Venturirohr	87
3.2.6.	Einbaubedingungen für Drosselgeräte	88
3.2.6.1.	Rohrrauheit	88
3.2.6.2.	Einlauf- und Auslaufstrecken	89
3.2.7.	Bewertung des Verfahrens der Durchflußmessung mit Drosselgeräten	90
3.2.8.	Durchflußmessung an offenen Gerinnen	91
3.2.8.1.	Überfallwehr	91
3.2.8.2.	Venturikanal	93
3.3.	Durchflußmessung aus dem Differenzdruck am geraden und gekrümmten Rohr	95
3.3.1.	Durchflußmessung aus dem Druckabfall in einem geraden Rohr	95
3.3.2.	Durchflußmessung aus dem Differenzdruck am Rohrkrümmer	98
3.4.	Massestrommesser	101
3.4.1.	Coriolis-Massestrommesser	101
3.4.1.1.	Funktionsprinzip	101
3.4.1.2.	Meßsysteme	103
3.4.2.	Massestrommesser mit Strömungsmodulator	108
3.4.3.	Massestrommessung durch Drehimpulsübertragung	111
3.5.	Wirbel-Durchflußmesser	112
3.5.1.	Funktionsprinzip	112
3.5.2.	Staukörper für Wirbel-Durchflußmesser	114
3.5.3.	Messung der Wirbelfrequenz	114
3.5.4.	Meßsysteme	118
3.5.5.	Bewertung des Wirbelmeßverfahrens	123
3.6.	Schwebekörper-Durchflußmesser	123
3.6.1.	Funktionsprinzip	124
3.6.2.	Schwebekörperformen	125
3.6.3.	Meßsysteme	127
3.6.4.	Meßunsicherheit	130
3.6.5.	Massestrommessung mit dem Schwebekörper-Durchflußmesser	131
3.6.6.	Federbelastete Schwebekörper-Durchflußmesser	131
3.6.7.	Bewertung des Schwebekörper-Durchflußmeßverfahrens	134
3.7.	Durchflußmesser mit Stauscheiben, Klappen oder Schwingkörpern	135
3.7.1.	Stauscheiben-Durchflußmesser	135
3.7.2.	Klappendurchflußmesser	136
3.7.3.	Schwingkörper-Durchflußmesser	137
3.8.	Strömungs- und Durchflußmesser mit Schalen- und Flügelrädern	139
3.8.1.	Strömungsmesser mit Schalen- und Flügelrädern	139
3.8.1.1.	Schalenkreuzanemometer	139
3.8.1.2.	Flügelradanemometer (Luftlog) und hydrometrischer Flügel	140
3.8.2.	Durchflußmesser mit Meßflügeln	142
3.8.3.	Bewertung der Strömungs- und Durchflußmessung mit Schalen- und Flügelrädern	145
3.9.	Volumenzählung und Volumenstrommessung mit Meßkammern	147
3.9.1.	Ovalradzähler	148
3.9.2.	Ringkolbenzähler	148
3.9.3.	Servogeregelter Zahnradzähler	150

3.9.4. Bewertung der Volumenzählung und Volumenstrommessung mit Meßkammern	151
Literatur	152
<b>4. Thermische Strömungsmessung</b>	154
4.1. Physikalische Grundlagen	154
4.2. Meßsonden	156
4.2.1. Hitzdrahtsonden	156
4.2.2. Heißfilmsonden	157
4.3. Meßschaltungen	159
4.4. Richtungsempfindlichkeit von Hitzdraht- und Heißfilmsonden	165
4.5. Zeitverhalten thermischer Anemometer	168
4.6. Draht- oder Filmelemente als Temperatursensoren	173
4.7. Thermische Geschwindigkeits- und Durchflußmesser	174
4.7.1. Einbausonden zur Messung von Gas- und Flüssigkeitsströmen	174
4.7.2. Luftgeschwindigkeitsmesser	175
4.7.3. Thermische Durchflußmesser	177
4.7.3.1. Durchflußmesser nach dem Abkühlverfahren	177
4.7.3.2. Durchflußmesser nach dem Aufwärmverfahren	181
4.8. Bewertung thermischer Meßverfahren	186
Literatur	187
<b>5. Magnetisch-induktive Strömungsmessung</b>	189
5.1. Einleitung	189
5.2. Physikalische Grundlagen	189
5.3. Durchflußmessung mit Wechselfeld	195
5.3.1. Durchflußmessung mit 50-Hz-Wechselfeld	195
5.3.2. Durchflußmessung mit 25-Hz-Wechselfeld	197
5.4. Durchflußmessung mit pulsierendem Gleichfeld	199
5.4.1. Meßwertgewinnung durch Schalten des Magnetfeldes	199
5.4.2. Unterdrückung zeitlich langsam veränderlicher elektrochemischer Störspannungen	202
5.4.3. Beispiele technischer Durchflußmesser mit pulsierendem Gleichfeld	204
5.4.4. Vergleich von pulsierenden Gleichfeldsystemen mit Wechselfeldsystemen	206
5.5. Meßwandler und Meßstoff	207
5.5.1. Bauformen	207
5.5.2. Einbaubedingungen	210
5.5.3. Leitfähigkeit des Fluids	210
5.6. Magnetisch-induktive Durchflußmessung in offenen Rechteckgerinnen	212
5.7. Magnetisch-induktiver Strömungsmesser für freie Strömungen	216
5.7.1. Meßwertbildung bei Umströmung einer Zylindersonde	216

5.7.2.	Kugelsonde als magnetisch-induktiver Zweikomponenten-Strömungsmesser	218
5.7.3.	Diskussonde als magnetisch-induktiver Zweikomponenten-Strömungsmesser	221
5.7.4.	Magnetisch-induktive Strömungsmesser für Schiffsgeschwindigkeitsmessungen	223
5.8.	Bewertung des magnetisch-induktiven Meßverfahrens	227
	Literatur	228
<b>6.</b>	<b>Akustische Strömungsmessung</b>	<b>230</b>
6.1.	Physikalische Grundprinzipien	230
6.1.1.	Akustische Strömungsmeßverfahren nach dem Mitführungseffekt	231
6.1.1.1.	Phasendifferenzmessung	231
6.1.1.2.	Frequenzdifferenzmessung bei konstanter Wellenlänge	232
6.1.1.3.	Impulsverfahren	234
6.1.1.4.	Strahlableitverfahren	242
6.1.2.	Akustische Strömungsmeßverfahren nach dem Doppler-Effekt	244
6.1.2.1.	Prinzip	244
6.1.2.2.	Meßvolumen	245
6.1.2.3.	Unschärfe	246
6.1.2.4.	Ortsbestimmung	247
6.1.2.5.	Richtungserkennung	249
6.1.3.	Bewertung der Verfahren	250
6.2.	Anwendung akustischer Meßstrecken	251
6.2.1.	Geschwindigkeitsmeßstrecken mit eintauchenden Sonden	252
6.2.1.1.	Zweikomponenten-Strömungsmesser mit V-förmigem Schallweg nach dem Mitführungseffekt	253
6.2.1.2.	Zweikomponenten-Strömungsmesser mit W-förmigem Schallweg	258
6.2.1.3.	Dreikomponenten-Strömungsmesser	258
6.2.1.4.	Autonom arbeitende akustische Strömungsmesser der Meeresmeßtechnik	261
6.2.1.5.	Strömungsmesser mit Richtflosse und Magnetometer	261
6.2.1.6.	Akustische Windgeschwindigkeitsmesser	262
6.2.1.7.	Eintauchende Doppler-Sonden und akustische Niveauhöhenmesser für Geschwindigkeits- und Durchflußmessungen	266
6.2.2.	Akustische Durchflußmesser	269
6.2.2.1.	Einbau-Durchflußmesser in Rohrleitungen	269
6.2.2.2.	Meßstrecken mit angeklebten Meßköpfen	277
6.3.	Bewertung der Ultraschall-Strömungs- und Durchflußmessung	281
	Literatur	282
<b>7.</b>	<b>Optische Strömungsmessung</b>	<b>285</b>
7.1.	Einleitung	285
7.2.	Markierung von Strömungen	287
7.2.1.	Luftströmungen	287
7.2.2.	Wasserströmungen	289

7.3. Schatten- oder einfaches Schlierenverfahren (shadowgraph method) . . . . .	292
7.4. Toeplersches Schlierenverfahren . . . . .	294
7.5. Holographische Interferometrie . . . . .	297
7.6. Strömungsgeschwindigkeitsmessung durch optoelektronische Gitterabtastung .	300
7.6.1. Meßprinzip . . . . .	300
7.6.2. Signalbildung . . . . .	302
7.6.3. Summensignale und Meßfehler . . . . .	304
7.6.4. CCD-Zeile als Differenzgitter für Geschwindigkeitsmessungen . . . . .	305
7.6.5. Bewertung des Verfahrens . . . . .	309
7.7. Laser-Doppler-Anemometer . . . . .	309
7.7.1. Meßprinzip . . . . .	310
7.7.2. Meßvolumen des Zweistrahl-Anemometers . . . . .	313
7.7.3. Einflüsse auf das Meßsignal . . . . .	316
7.7.4. Signalauswertung . . . . .	325
7.7.5. Meßsysteme . . . . .	329
7.7.5.1. Richtungsbestimmung mittels Bragg-Zellen . . . . .	329
7.7.5.2. Zweikomponenten-Meßsysteme . . . . .	331
7.7.5.3. Dreikomponenten-Meßsysteme . . . . .	332
7.7.6. Anwendungen . . . . .	334
7.8. Laser-Zweifokus-Anemometer . . . . .	337
7.9. Bewertung der Geschwindigkeitsmessung mit Hilfe von Laserstrahlen . . . . .	339
Literatur . . . . .	340
<b>8. Geschwindigkeits- und Durchflußmessung nach dem Korrelationsverfahren . .</b>	<b>344</b>
8.1. Meßprinzip . . . . .	344
8.2. Laufzeitmessung . . . . .	346
8.3. Polaritäts-Korrelation . . . . .	346
8.4. Korrelatorausführungen . . . . .	347
8.5. Sensoren . . . . .	351
8.6. Anwendung zur Volumenstrommessung in Rohren . . . . .	353
8.7. Bewertung der korrelativen Geschwindigkeits- und Durchflußmessung . . . . .	354
Literatur . . . . .	355
<b>Sachwörterverzeichnis . . . . .</b>	<b>356</b>