

Inhaltsverzeichnis

1	Grundlagen der Strömungsmechanik	1
1.1	Stromlinie, Bahnlinie (Trajektorie), Stromfaden und Stromröhre	2
1.2	Erhaltungssätze der Strömungsmechanik	3
1.2.1	Bewegungsgleichung für ein Fluidelement	4
1.2.2	Euler'sche Bewegungsgleichung in Strömungsrichtung	5
1.2.3	Euler'sche Bewegungsgleichung normal zur Strömungsrichtung	7
1.2.4	Bernoulligleichung	11
1.2.5	Ausflussgleichung von Torricelli	14
1.2.6	Kontinuitätsgleichung	16
1.2.7	Impulssatz und Impulskraft für stationäre Strömungen	17
1.2.8	Drallsatz	21
1.2.9	Starrkörperwirbel	23
1.3	Fluid-Struktur-Wechselwirkung	24
1.4	Beispiele	25
1.5	Aufgaben	27
2	Ähnlichkeitsgesetze der Strömungsmechanik	31
2.1	Modellgesetz	31
2.2	Reynoldsähnlichkeit	32
2.3	Knudsenzahl als Ähnlichkeitskennzahl der Gasdynamik	34
2.4	Ähnlichkeitskennzahlen	36
2.5	Beispiele	40
3	Stationäre inkompressible Strömung; Hydrodynamik	43
3.1	Stationäre Einlaufströmung in Rohrleitungen	43
3.2	Stationäre inkompressible reibungsbehaftete Strömung	45
3.2.1	Hydraulischer Radius und hydraulischer Durchmesser	46
3.3	Reibungsbehaftete Rohrströmung	47
3.3.1	Hagen-Poiseuille'sche Strömung	48
3.3.2	Strömungsformen in Rohrleitungen	51

3.3.3	Laminare Rohrströmung	52
3.3.4	Turbulente Rohrströmung	54
3.3.5	Ermittlung des Rohrreibungsbeiwertes	59
3.3.6	Geschwindigkeitsverteilung im zylindrischen Rohr	62
3.3.7	Technisch zulässige Rauigkeiten von umströmten Oberflächen	64
3.4	Druckverluste in Formstücken und Rohrbögen	66
3.5	Druckverluste in Armaturen	74
3.6	Strömung im ebenen Spalt mit geringer Reynoldszahl	79
3.7	Strömung in keilförmigen Axial- und Radialspalten von Lagern	82
3.7.1	Strömung im keilförmigen Axiallagerspalt	82
3.7.2	Strömung im radialen Gleitlager	88
3.8	Düsen- und Diffusorströmung	92
3.8.1	Düsenströmung	92
3.8.2	Kegeldiffusoren	94
3.8.3	Verluste und Wirkungsgrad von Diffusoren	95
3.8.4	Radiale Diffusoren	98
3.9	Freistrahл	100
3.10	Strömung in Kanälen mit freier Oberfläche	106
3.10.1	Reibungsbeiwerte für die Gerinneströmung	113
3.10.2	Strömung in offenen Saugbecken mit freier Oberfläche	114
3.11	Rohrverzweigungen und Rohrnetzberechnung	120
3.11.1	Reihenschaltung von Rohrleitungen	123
3.11.2	Laminare Strömung	125
3.11.3	Turbulente Strömung im hydraulisch glatten Rohr	125
3.11.4	Turbulente Strömung bei ausgebildeter Rauigkeitsströmung mit $\lambda = f(d/k)$	126
3.11.5	Parallelschaltung von Rohrleitungen	126
3.12	Beispiele	128
3.13	Aufgaben	137
3.14	Modellklausuren	143
4	Stationäre kompressible Strömung; Gasdynamik	161
4.1	Einführung	161
4.2	Thermodynamische Grundlagen	163
4.2.1	Thermische Zustandsgleichung idealer Gase	163
4.2.2	Kalorische Zustandsgleichungen	165
4.2.3	Isentropengleichung	168
4.3	Schallgeschwindigkeit und Schallausbreitung	170
4.3.1	Schallgeschwindigkeit	170
4.3.2	Schallausbreitung und Machzahl	172
4.4	Energiegleichung der kompressiblen eindimensionalen Strömung	176
4.4.1	Formen der Energiegleichung der Gasdynamik	178

4.5	Ruhegrößen und kritischer Zustand	180
4.5.1	Definition der Ruhegrößen	180
4.5.2	Kritischer Zustand	182
4.6	Geschwindigkeitsdiagramm der Energiegleichung	183
4.7	Beschleunigte kompressible Strömung	185
4.7.1	Reibungsbehaftete kompressible Rohrströmung	186
4.7.2	Reibungsbehaftete isotherme kompressible Rohrströmung	188
4.7.3	Reibungsbehaftete adiabate kompressible Rohrströmung	191
4.7.4	Kompressible reibungsfreie Rohrströmung mit Wärmeaustausch	197
4.7.5	Aus- und Durchflussfunktion für Gase	199
4.7.6	Berechnung der Durchflussfunktion	201
4.7.7	Isentrope Strömung in Düsen und Blenden	203
4.7.8	Flächen-Geschwindigkeits-Beziehung	203
4.7.9	Betriebsverhalten von Überschalldüsen	216
4.8	Verdichtungsstoß	218
4.8.1	Senkrechter Verdichtungsstoß	220
4.8.2	Schiefer Verdichtungsstoß	227
4.8.3	Schiefer Verdichtungsstoß in der Hodographenebene	233
4.8.4	Expansion von Überschallströmungen und Prandtl- Meyer-Strömung	236
4.9	Zweidimensionale kompressible Potentialströmung	238
4.9.1	Potentialgleichung der zweidimensionalen Strömung	241
4.9.2	Linearisierung der zweidimensionalen kompressiblen Potentialströmung	242
4.9.3	Zweidimensionale Überschallströmung um schlanke Profile	243
4.9.4	Zweidimensionale Unterschallströmung um schlanke Profile	245
4.10	Beispiele	247
4.11	Aufgaben	256
4.12	Modellklausuren	261
5	Zweidimensionale Potentialströmung	271
5.1	Differentialgleichung von Laplace	276
5.1.1	Potentialfunktion	276
5.1.2	Stromfunktion	277
5.2	Potentialströmung um Kreiszyylinder	279
5.2.1	Geschwindigkeits- und Druckverteilung um den Kreiszyylinder	281
5.3	Singularitätenverfahren	283
5.3.1	Quell- und Senkenströmung	284
5.3.2	Überlagerung von Parallel- und Quellströmung	285
5.3.3	Überlagerung von Parallel- und Senkenströmung	287

5.3.4	Gestaltung umströmter Körper mittels Singularitäten	288
5.3.5	Potentialwirbel	290
5.3.6	Wirbelsenke	293
5.3.7	Dipolströmung	293
5.4	Strömungskraft auf einen Körper	296
5.5	Wellenbewegung	298
5.5.1	Hydraulischer Sprung	299
5.5.2	Oberflächenwellen	300
5.6	Beispiele	304
6	Grenzschichtströmung	309
6.1	Begriffe der Grenzschichtströmung	311
6.1.1	Grenzschichtdicke	311
6.1.2	Verdrängungsdicke	312
6.1.3	Impulsverlustdicke	313
6.2	Grenzschichtgleichungen	315
6.3	Eigenschaften der Grenzschichten	318
6.3.1	Ablösung der Grenzschicht	319
6.3.2	Tangentialspannung an der Wand und Reibungswiderstand	321
6.4	Strömungen mit großer Reynoldszahl	323
6.5	Plattengrenzschicht	325
6.6	Umschlag der Strömung laminar-turbulent	327
6.7	Turbulente Grenzschicht	329
6.7.1	Prandtl'scher Mischungsweg	330
6.8	Turbulenz und Turbulenzgrad	334
6.8.1	Turbulenzgrad	335
6.8.2	Energietransport in turbulenten Strömungen	338
6.9	Beispiele	339
6.10	Modellklausuren	340
7	Stationäre Umströmung von Körpern und Profilen	345
7.1	Widerstand umströmter Körper	345
7.1.1	Entstehung und Berechnung von Widerstand	348
7.1.2	Änderung von Druck- und Reibungswiderstand an Körpern	351
7.1.3	Kugelumströmung und Auftrieb	352
7.2	Tragflügelprofile und Auftrieb	354
7.2.1	Tragflügel unendlicher Spannweite	355
7.2.2	Auftrieb und Profilwiderstand	357
7.2.3	Tragflügel endlicher Spannweite	359
7.2.4	Induzierter Widerstand an Tragflächen und Axialschaufeln	360
7.3	Profilpolare für Tragflügel und Schaufelprofile	362
7.4	Einfluss der Reynoldszahl auf die Tragflügelumströmung	365

7.5	Tragflügelumströmung bei hoher Anströmmachzahl	367
7.6	Beispiele	370
8	Instationäre Strömung	375
8.1	Bewegungs- und Energiegleichung der eindimensionalen instationären Strömung	375
8.2	Instationärer Ausfluss aus einem Behälter mit variabler Spiegelhöhe ..	377
8.3	Flüssigkeitsschwingungen	378
8.3.1	Schwingung der Flüssigkeit in einem U-Rohr	379
8.3.2	Periodische Behälterentleerung	381
8.4	Druckstoß in Rohrleitungen	384
8.4.1	Druckstoß in elastischen Leitungen unter Berücksichtigung der Kompressibilität der Flüssigkeit	385
8.4.2	Druckstoß bei Ausfluss aus einem offenen Behälter	387
8.5	Wirbelablösung hinter umströmten Körpern	388
8.5.1	Kármán'sche Wirbelstraße	389
8.6	Beispiele	390
8.7	Aufgaben	395
9	Grundlagen der Akustik und Aeroakustik	399
9.1	Tonskala und Frequenzen von Tönen	399
9.2	Hörbereich und Schalldruck	401
9.3	Schallfeld und Schallfeldgrößen	403
9.3.1	Schalldruck und Schalldruckpegel	403
9.3.2	Schallschnelle und Schallschnellepegel	405
9.3.3	Schallintensität	406
9.3.4	Schalleistung und Schalleistungspegel	407
9.4	Schallquellen	407
9.4.1	Aeroakustische Schallquellen	408
9.4.2	Akustische Wellengleichung	409
9.4.3	Analogie von Lighthill	411
9.4.4	Inhomogene akustische Wellengleichung	412
9.5	Akustische Umsetzung von Strömungen	415
9.6	Schallmessung	416
9.6.1	Schallmessgrößen	418
9.6.2	Schalldruck- und Schalldruckpegelmessung	418
9.6.3	Schallintensitäts- und Schallgeschwindigkeitsmessung	422
9.6.4	Schalleistungs- und Schalleistungspegelmessung	424
9.7	Messauswertung, Frequenzanalyse und spektrale Leistungsdichte ..	426
9.7.1	Frequenzanalyse	428
9.7.2	Spektrale Schalleistungsdichte	432
9.8	Wavelets der Aeroakustik	433

9.9	Schallmessgeräte	436
9.9.1	Mikrofon	437
9.10	Addition von Schallpegeln und Summenregel	437
9.11	Aufgaben	439
10	Grundlagen der Strömung in Turbomaschinen	441
10.1	Bauarten von Turbomaschinen	441
10.2	Strömung im rotierenden radialen Laufrad	444
10.2.1	Absolut- und Relativgeschwindigkeit	445
10.2.2	Geschwindigkeitsdreiecke am Laufradein- und Austritt	445
10.3	Eulergleichung der Turbomaschinen	446
10.4	Drehmomentensatz für Turbomaschinen	447
10.5	Strömung in Axialmaschinen	448
10.5.1	Axiale ebene Schaufelgitter	448
10.5.2	Belastungszahl von Schaufelgittern	451
10.5.3	Belastungszahl und Widerstandsbeiwert unter Berücksichtigung der Reibung	452
10.6	Ähnlichkeitskennzahlen von Turbomaschinen	454
10.6.1	Lieferzahl	455
10.6.2	Energieübertragungszahl, Druckzahl	456
10.6.3	Spezifische Drehzahl und Schnellaufzahl	458
10.6.4	Durchmesserzahl	459
10.6.5	Cordierdiagramm	459
10.6.6	Leistungszahl	461
10.7	Radseitenreibung	462
10.8	Verluste in inneren und äußeren Dichtspalten	466
10.9	Nutzleistung und Wirkungsgrad	468
10.10	Leiteinrichtungen (Diffusoren)	469
10.10.1	Radialdiffusor	469
10.10.2	Strömung im Spiralgehäuse	469
10.11	Kavitation	470
10.11.1	Blasendynamik in Kavitationsströmungen	471
10.12	Kennlinien von Strömungsmaschinen	473
10.13	Beispiele	475
10.14	Aufgaben	482
10.15	Modellklausuren	485
11	Grundlagen der Mehrphasenströmung	495
11.1	Charakterisierung von Mehrphasenströmungen	495
11.2	Partikelform, Sphärizität und Formfaktoren	497
11.3	Partikelgrößenverteilung und mittlere Partikelgröße	499
11.4	Schüttdichte und Gemischdichte	501

11.5	Bewegungsverhalten von Feststoffen in Fluiden	502
11.6	Kräfte in strömenden Gemischen	506
11.7	Sinkgeschwindigkeit eines kugelförmigen Einzelpartikels	509
11.8	Kritische Geschwindigkeit	510
11.9	Druckverluste in Rohrleitungen und Schüttungen	511
11.10	Strömung beim hydraulischen Transport	513
11.11	Strömung beim pneumatischen Transport	516
11.12	Massenkraftabscheidung von Staub	516
	11.12.1 Schwerkraftabscheidung	517
	11.12.2 Fliehkraftabscheidung (Zyklonabscheidung)	518
12	Strömungstechnische Messtechnik	523
12.1	Druckmesstechnik	523
	12.1.1 Hydraulische Druckmessgeräte	525
	12.1.2 Mechanische Druckmessgeräte	527
	12.1.3 Elektromechanische Drucksensoren	528
	12.1.4 Instationäre Druckmessung	529
12.2	Geschwindigkeitsmessung	533
	12.2.1 Staudrucksonden und Prandtlrohr	533
	12.2.2 Hitzdrahtsonden und Heißfolienanemometer	535
	12.2.3 Laser-Anemometer	536
	12.2.4 Laser-Doppler-Anemometrie (LDA)	537
	12.2.5 Laser-2Fokus-Anemometrie (L2FA)	538
	12.2.6 Particle-Image Velocimetry (PIV)	539
	12.2.7 Laser-Speckle-Anemometrie	540
	12.2.8 Optische- und Schlierenmessverfahren	541
12.3	Temperaturmessung	543
	12.3.1 Widerstandsthermometer	544
	12.3.2 Thermoelement	545
	12.3.3 Strahlungsthermometer	547
12.4	Volumenstrom- und Massestrommessung	548
	12.4.1 Messprinzipien	548
	12.4.2 Volumenstrommessgeräte	549
	12.4.3 Massestrommessgeräte	550
12.5	Beispiele	553
12.6	Aufgaben	558
12.7	Modellklausur	559
13	Lösungen	561
13.1	Lösungen der Aufgaben im Kapitel 1	561
13.2	Lösungen der Aufgaben im Kapitel 3	563
13.3	Lösungen der Modellklausuren im Kapitel 3	571

13.4	Lösungen der Aufgaben im Kapitel 4	597
13.5	Lösungen der Modellklausuren im Kapitel 4	611
13.6	Lösungen der Modellklausuren im Kapitel 6	634
13.7	Lösungen der Aufgaben im Kapitel 8	643
13.8	Lösungen der Aufgaben im Kapitel 9	645
13.9	Lösungen der Aufgaben im Kapitel 10	646
13.10	Lösungen der Modellklausuren im Kapitel 10	654
13.11	Lösungen der Aufgaben im Kapitel 12	683
13.12	Lösungen der Modellklausuren im Kapitel 12	685
Nomenklatur		687
Anhang		693
Sachverzeichnis		719