



ing
maschinenbau

Hendrik Kuhlmann

Strömungsmechanik

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	9
Kapitel 1 Einleitung	11
1.1 Motivation	12
1.2 Grundlegende Charakteristika von Fluiden	17
1.2.1 Das Kontinuum und seine Grenze	18
1.2.2 Viskosität	19
1.2.3 Kompressibilität	21
1.2.4 Grenzflächenspannung	22
1.2.5 Nichtlineare Dynamik	23
Zusammenfassung	25
Kapitel 2 Hydrostatik	27
2.1 Gleichgewichtsbedingung	28
2.2 Konstante Dichte	29
2.2.1 Kommunizierende Gefäße	30
2.2.2 Hydrostatische Druckkräfte	33
2.3 Variable Dichte	38
2.3.1 Ideales Gas	38
2.3.2 Ruhende Atmosphäre	39
2.4 Kapillarität	42
2.4.1 Laplace-Druck	43
2.4.2 Kontaktwinkel	45
2.4.3 Steighöhe in Kapillaren	46
2.4.4 Ausblick auf die kapillare Dynamik	48
Zusammenfassung	52
Aufgaben	53
Kapitel 3 Hydrodynamische Grundlagen	57
3.1 Kinematik	58
3.1.1 Substantielle Ableitung	59
3.1.2 Linien in einem strömenden Fluid	61
3.1.3 Visualisierung und Messung der Bewegung eines Fluids	63
3.1.4 Lokale Deformation eines Fluids	65
3.2 Reynolds' Transport-Theorem	69
3.3 Erhaltungsgleichungen für reibungsfreie Fluide	71
3.3.1 Massenerhaltung	71
3.3.2 Impulserhaltung	72

3.3.3	Drallerhaltung	73
3.3.4	Erhaltung der Gesamtenergie	74
3.3.5	Thermodynamische Energie	75
3.4	Bemerkungen zur Euler-Gleichung	75
	Zusammenfassung	77
	Aufgaben	78

Kapitel 4 Bewegung entlang von Stromfäden und Stromlinien 81

4.1	Stromfadentheorie	82
4.1.1	Massenerhaltung für einen stationären Stromfaden	82
4.1.2	Impulserhaltung bei der Rohrströmung	83
4.1.3	Energieerhaltung entlang eines Stromfadens	84
4.2	Integration längs und senkrecht zu Stromlinien	85
4.2.1	Bernoulli-Gleichung	85
4.2.2	Bemerkungen zur Bernoulli-Gleichung	87
4.2.3	Impulsbilanz senkrecht zur Stromlinie	89
4.3	Anwendungen der Bernoulli-Gleichung	90
4.3.1	Bernoulli-Konstante für eine homogene Anströmung	90
4.3.2	Strömung längs einer festen Wand	91
4.3.3	Venturi-Rohr	92
4.3.4	Prandtlsches Staurohr	93
4.3.5	Verlustloses Ausströmen aus einem Behälter	95
4.4	Energiesatz für kompressible Strömungen	99
4.4.1	Thermodynamische Größen im Staupunkt	99
4.4.2	Wärmezufuhr bei konstantem Druck	100
4.5	Anwendung des Impulssatzes	101
4.5.1	Strahlimpuls	101
4.5.2	Strahlablenkung an einer Schneide	102
4.5.3	Pelton-Schaufelrad	103
4.5.4	Schub und Leistung eines Strahls	105
4.5.5	Propeller und Windturbine	108
4.5.6	Turbinen und Pumpen	112
	Zusammenfassung	118
	Aufgaben	119

Kapitel 5 Strömungen mit und ohne Vortizität 125

5.1	Die Stromfunktion	127
5.2	Wirbeldynamische Grundlagen	128
5.2.1	Vortizität	128
5.2.2	Helmholtz-Gleichung	129
5.2.3	Helmholtzsche Wirbelsätze	131
5.2.4	Zirkulationstheorem von Kelvin	131

5.3	Potentialströmungen	132
5.3.1	Cauchy-Riemannsche Differentialgleichungen	133
5.3.2	Komplexe Darstellung von Potentialströmungen	135
5.4	Ebene Wirbelströmungen	137
5.4.1	Festkörperrotation	137
5.4.2	Potentialwirbel	137
5.4.3	Rankine-Wirbel	138
5.4.4	Ebene Senkenströmung	140
5.4.5	Wirbelsenkenströmung	140
5.4.6	Abflußwirbel	141
5.5	Oberflächenwellen	142
5.5.1	Schwerewellen	143
5.5.2	Einfluß von Oberflächenspannung und Tiefe	147
5.5.3	Flachwasserwellen	148
	Zusammenfassung	152
	Aufgaben	154
Kapitel 6 Kompressible, reibungsfreie Strömungen		157
6.1	Schallausbreitung	158
6.1.1	Wellengleichung und Schallgeschwindigkeit	158
6.1.2	Machscher Kegel	161
6.2	Verdichtungsstoß	162
6.2.1	Verdichtungswelle	162
6.2.2	Stationärer, senkrechter Verdichtungsstoß	164
6.2.3	Thermodynamisches Argument gegen einen Verdünnungsstoß ..	167
6.2.4	Instationärer Stoß	169
6.2.5	Schwacher Stoß	171
6.2.6	Schräger Verdichtungsstoß	171
6.3	Stationärer, kompressibler Stromfaden	175
6.3.1	Infinitesimale Variationen	175
6.3.2	Geschwindigkeit entlang eines kompressiblen Stromfadens	177
6.3.3	Zustandsgrößen und kritische Werte	179
6.3.4	Kompressible Strömung durch Düsen	183
	Zusammenfassung	191
	Aufgaben	193
Kapitel 7 Viskose Strömungen		195
7.1	Grundgleichungen	196
7.1.1	Spannungstensor	196
7.1.2	Navier-Stokes-Gleichung	199
7.1.3	Wärmetransportgleichung	201
7.1.4	Mechanische Ähnlichkeit	201
7.1.5	Dimensionsanalyse	204

7.2	Schleichende Strömungen	208
7.2.1	Eckenströmungen	209
7.2.2	Dünne Filme	209
7.3	Rohrströmung	211
7.3.1	Laminare, inkompressible Rohrströmung	212
7.3.2	Rohrhydraulik	214
7.4	Laminare Grenzschicht	216
7.4.1	Grenzschichtgleichungen	217
7.4.2	Blasius-Profil	220
7.4.3	Ablösung der Grenzschicht	226
7.5	Turbulente Strömungen	228
7.5.1	Übergang zur Turbulenz	229
7.5.2	Gleichungen für turbulente Strömungen	232
7.5.3	Wirbelviskosität	234
7.5.4	Prandtlscher Mischungsweg	234
7.5.5	Mittlere Geschwindigkeit in Wandnähe	236
7.5.6	Turbulente Grenzschicht einer ebenen Platte	239
7.5.7	Wandrauhigkeit	243
7.5.8	Turbulente inkompressible Rohrströmung	245
7.6	Kraftwirkung auf Körper	249
7.6.1	Durchströmung von Rohrleitungen	249
7.6.2	Umströmung von Körpern	254
7.6.3	Kutta-Joukowski-Formel	256
	Zusammenfassung	264
	Aufgaben	266
	Anhang A Kleines mathematisches Repetitorium	271
A.1	Produkte mit Vektoren	271
A.2	Vektorielle Ableitungen	273
A.3	Fundamentalsatz der Vektoranalysis	274
A.4	Formeln für Volumen- und Flächenintegrale	275
A.5	Taylor-Entwicklung	275
	Anhang B Operatoren und Navier-Stokes-Gleichung in Zylinderkoordinaten	277
	Anhang C Ausbreitung eines senkrechten Verdichtungsstoßes	281
	Anhang D Druckverteilung in einer Laval-Düse	283
	Literaturverzeichnis	287
	Sachregister	291