

Ulrich C. E. Zanke

Hydromechanik der Gerinne und Küstengewässer

**Für Bauingenieure, Umwelt-
und Geowissenschaftler**

Mit 249 Abbildungen

Parey Buchverlag Berlin 2002



Inhaltsverzeichnis

Vorwort	V
Symbolverzeichnis	XIV
1 Historische Entwicklung	1
2 Eigenschaften von Flüssigkeiten	5
2.1 Allgemeines	5
2.2 Dichte	5
2.3 Schallausbreitung	7
2.4 Viskosität (Zähigkeit)	7
2.5 Scheinviskosität	10
2.6 Dampfbildung, Dampfdruck, Kavitation	11
2.6.1 Dampfbildung	11
2.6.2 Dampfdruck, Kavitation	12
2.7 Oberflächenspannung	13
2.8 Kapillarität	13
3 Hydrostatik	15
3.1 Vorbemerkung	15
3.2 Druck	15
3.3 Überdruck, Unterdruck, Atmosphärendruck	16
3.4 Druckhöhe	17
3.5 Druckkraft	17
3.6 Lage des Kraftangriffs	18
3.7 Schräge ebene Wände	19
3.8 Teilflächen unter der Oberfläche	20
3.9 Gekrümmte Wände	20
3.10 Innendruck in Rohrleitungen und Behältern	21
3.11 Ausrichtung der Oberfläche	22
4 Hydrodynamik	23
4.1 Aufgaben, Phänomene und Lösungswege	23
4.1.1 Aufgabe der Hydrodynamik	23
4.1.2 Phänomene	23

4.1.3	Lösungswege	24
4.1.3.1	Grundannahmen	24
4.1.3.2	Lösung durch Modelle und Modellvorstellungen	25
4.1.4	Genauigkeit hydraulischer Berechnungsergebnisse	28
4.2	Definitionen und Grundzusammenhänge	30
4.2.1	Definitionen	30
4.2.1.1	Querschnitt, Geschwindigkeit, mittlere Querschnittsgeschwindigkeit	30
4.2.1.2	Rohrströmung - Offenes Gerinne	31
4.2.1.3	Druckhöhenlinie und Energiehöhenlinie	32
4.2.1.4	Gleichförmige oder ungleichförmige Strömung	33
4.2.1.5	Stationäre oder instationäre Strömung	33
4.2.1.6	Begriffe: Wirbel und Walzen	34
4.2.2	Grundgleichungen und grundlegende Zusammenhänge	36
4.2.2.1	Massenerhaltung (Kontinuitätsgleichung)	36
4.2.2.2	Energieerhaltung (BERNOULLI- Gleichung)	36
4.2.2.3	Impulsstrom, Kräftebilanz (Stützkraftsatz)	39
4.2.2.4	Turbulenz	44
4.2.2.5	Energieverluste, Wandschubspannung	47
4.2.3	Potentialströmung	56
4.2.3.1	Grundlagen	56
4.2.3.2	Potentialnetze	59
4.2.3.3	Kreisströmung	62
4.3	Energieverluste in Rohren und Gerinnen	64
4.3.1	Verlustrhöhen, Widerstands- und Verlustbeiwerte	64
4.3.2	Strömungswiderstand	65
4.3.2.1	Strömungszustand	65
4.3.2.2	Grenzschicht	66
4.3.3	Reibungs-Verlustbeiwerte	67
4.3.3.1	Laminare Strömung	67
4.3.3.2	Turbulente Strömung	70
4.3.3.3	Berechnungsgleichungen	73
4.3.3.4	Äquivalente Sandrauheit k_S	73
4.3.3.5	Formrauheiten	75
4.3.4	Örtliche Verluste	76
4.4	Strömungen in Rohren	77
4.4.1	Allgemeines	77
4.4.2	Berechnungsgrundlagen	78
4.4.3	Berechnungs-Grundfälle	82

4.4.4	Örtliche Verluste	83
4.4.4.1	Querschnittsänderungen	83
4.4.4.2	Einlauf	85
4.4.4.3	Krümmen	86
4.4.4.4	Segmentkrümmen	86
4.4.4.5	Kniestücke	87
4.4.4.6	Rohrvereinigungen und Abzweige	87
4.4.4.7	Verschlußorgane	88
4.4.4.8	Einbauten	89
4.4.4.9	Austrittsverluste	90
4.4.5	Geschwindigkeits- und Durchsatzmessung	91
4.5	Strömungen in offenen Gerinnen	93
4.5.1	Allgemeines	93
4.5.2	Strömen-Schießen-Wechselsprung	94
4.5.2.1	Grenzzustand	95
4.5.2.2	Übergänge Strömen - Schießen - Strömen	100
4.5.2.3	h_{gr} und v_{gr} bei anderen Querschnittsformen	102
4.5.3	Normalabfluß	103
4.5.3.1	Fließformeln für Normalabfluß	104
4.5.3.2	Hydraulischer Radius	106
4.5.3.3	Widerstandsbeiwerte λ	106
4.5.3.4	Empirische Fließformeln	106
4.5.3.5	Genauigkeitsrahmen und Rückrechnung der Rauheit	109
4.5.3.6	Abflußkurve (Schlüsselkurve)	110
4.5.3.7	Geschwindigkeitsverteilung in geraden Fließstrecken	111
4.5.3.8	Geschwindigkeitsverteilung in Kurven offener Gerinne	118
4.5.4	Örtliche Verluste (Querschnittsänderungen, Einbauten, Richtungsänderungen)	120
4.5.4.1	Umströmung von Inseln	120
4.5.4.2	Verluste an Einläufen	121
4.5.4.3	Pfeiler	122
4.5.4.4	Rechen	127
4.5.5	Gerinne - Querschnitte	128
4.5.5.1	Hydraulisch günstige Querschnittsformen	128
4.5.5.2	Natürliche Querschnittsformen und Ersatzquerschnitte	129
4.5.5.3	Gegliederte Querschnitte	130
4.5.6	Gerinne mit Bewuchs	131
4.5.7	Steilgerinne	132

4.5.8	Teilgefüllte Rohrleitungen	133
4.5.9	Ausfluß und Überfall	135
4.5.9.1	Allgemeines	135
4.5.9.2	Ausfluß	136
4.5.9.3	Abfluß über Wehre	138
4.5.9.4	Ausfluß unter Schützen	144
4.5.9.5	Druckkräfte auf Schützen und Klappen	146
4.5.9.6	Heber	147
4.5.9.7	Abstürze	149
4.5.9.8	Tosbecken	150
4.6	Ungleichförmige Strömung	154
4.6.1	Differentialgleichung der Wasserspiegellinie	154
4.6.2	Iterative Wasserspiegelberechnung	155
4.6.3	Ungleichförmigkeit infolge Zu- oder Ableitung	157
4.6.4	Überschlägige Berechnung der Stauweite	158
4.7	Instationäre Strömung	160
4.7.1	Allgemeines	160
4.7.2	Schwall und Sunk	160
4.7.3	Druckstoß in Rohrleitungen	163
4.7.3.1	Effektive Druckstoßgeschwindigkeit	163
4.7.3.2	Reflexionen von Druckstößen	164
4.7.3.3	Wasserschloß	165
4.8	Sekundärströmungen	166
4.8.1	Allgemeines	166
4.8.2	Sekundärströmungen erster Art	166
4.8.2.1	Sekundärströmungen in seitlichen Ausbuchtungen	166
4.8.2.2	Sekundärströmungen in Abzweigen	167
4.8.2.3	Strömung in Krümmungen	168
4.8.3	Sekundärströmungen zweiter Art	172
4.9	Sedimenttransport	174
4.9.1	Relevanz	174
4.9.2	Quantitativer Transport	175
4.9.2.1	Genauigkeit	175
4.9.2.2	Definitionen und Materialkennwerte	175
4.9.2.3	Sedimente (Definitionen, Herkunft)	176
4.9.2.4	Wirksame Schubspannung an der Sohle	176
4.9.2.5	Kritische Strömungszustände, Bewegungsbeginn	177
4.9.2.6	Geschiebetransport	181

4.9.2.7	Transport in Suspension	185
4.9.2.8	Gesamttransport	194
4.9.3	Transportmengen-Dauerlinie	195
4.9.4	Morphodynamische Modelle	196
4.9.5	Sohlensicherung mit Steinschüttungen	196
4.10	Hydromechanische Grundlagen der Wasser- und Windkraftnutzung	199
4.10.1	Generelles	199
4.10.2	Leistung	200
4.10.3	Hydraulische Varianten der Energieumwandlung	202
4.10.3.1	Freistrahlturbine (PELTON-Turbine)	202
4.10.3.2	Turbinen in Rohrleitungen	206
4.10.3.3	Leiteinrichtungen	212
4.10.3.4	Wasserräder	213
4.10.4	Windkraft	216
4.10.5	Pumpen	218
5	Hydromechanik des Küstenbereichs	220
5.1	Tiden (Gezeiten)	220
5.1.1	Allgemeines	220
5.1.2	Begriffe, Definitionen	221
5.1.2.1	Tidekurve und Tidewellenlinie	221
5.1.3	Entstehung der Gezeiten	222
5.1.4	Ausprägung der Gezeiten	227
5.1.4.1	Gezeiten in Meeren	227
5.1.4.2	Gezeiten in Flüssen	234
5.1.5	Veränderung von Wassertiefe oder lokalem Füllvolumen	240
5.2	Windstau	242
5.2.1	Allgemeines	242
5.2.2	Wirksame Windschubspannung	242
5.2.3	Windstauansatz ohne Rückströmung	244
5.2.4	Windstau bei Zirkulationsströmung	245
5.3	Wellen und Seegang	248
5.3.1	Allgemeines	248
5.3.2	Natürlicher Seegang	252
5.3.2.1	Auswertung von Wellenmessungen	252
5.3.2.2	Beschreibung des Seegangs	254
5.3.3	Wellenausbildung unter Windeinfluß (Seegangsvorhersage)	261
5.3.4	Wellentheorien	262

5.3.4.1	Lineare Theorie (Theorie kleiner Wellenhöhen)	262
5.3.4.2	Theorien endlicher Wellenhöhen	264
5.3.5	Strömungen unter Wellen	267
5.3.6	Energie, Energiefluß und Gruppengeschwindigkeit	267
5.3.7	Wechselwirkungen bei Grundberührung ("Flachwassereffekte")	269
5.3.7.1	Vorbemerkung	269
5.3.7.2	Shoaling	269
5.3.7.3	Refraktion	270
5.3.7.4	Wellenbrechen	272
5.3.8	Effekte an Hindernissen	283
5.3.8.1	Diffraction	283
5.3.8.2	Reflexion	284
5.3.8.3	Transmission	287
5.3.8.4	Wellenauflauf	290
6	Simulation von Strömungen	292
6.1	Wasserbauliches Versuchswesen	292
6.1.1	Allgemeines	292
6.1.2	Modellgesetze	293
6.1.2.1	Strömungen mit freier Oberfläche	293
6.1.2.2	Luftmodelle von Flüssen	294
6.1.2.3	Strömungen in vollgefüllten Rohren	296
6.2	Numerische Simulation	297
6.2.1	Einsatzbereiche numerischer Modelle	297
6.2.2	Formulierung numerischer Modelle	298
6.2.3	Auswahl der Prozesse	300
6.2.4	Modellgleichungen	303
6.2.4.1	Auswahl der Modellgleichungen	303
6.2.4.2	Beispiel einer Modellgleichung: Massenerhaltung und Transportgleichung	303
6.2.4.3	Kontinuitätsgleichung	304
6.2.4.4	Impulsgleichung	305
6.2.5	Grundlegende numerische Methoden	306
6.2.5.1	Gitternetze	306
6.2.5.2	Finite Differenzen (FD)	308
6.2.5.3	Finite Elemente (FE)	309
6.2.5.4	Finite Volumen (FV)	309
6.2.6	Instationäre Probleme	311
6.2.7	Numerische Effekte	311

6.2.7.1	Numerische Diffusion	311
6.2.7.2	Überschwingen der Lösung	313
6.2.8	Ablauf einer Modellierung	313
Tabellenverzeichnis		316
Literaturverzeichnis		317
Namens- und Stichwortverzeichnis		323