

Inhaltsverzeichnis

1	Hydraulisches Versuchswesen	19
1.1	Einleitung	19
1.2	Ähnlichkeit eines hydraulischen Modells	21
1.2.1	Kriterien der mechanischen Ähnlichkeit	21
1.2.2	Kombination physikalischer Größen	24
1.2.3	Dimensionsanalyse (Π -Theorem)	24
1.2.4	Dimensionslose Zahlen aus Kräfteverhältnissen	27
1.2.5	Dimensionslose Darstellung von Differenzialgleichungen	28
1.3	Ähnlichkeitsgesetze	29
1.3.1	<i>Euler</i> 'sches Modellgesetz	29
1.3.2	<i>Froude</i> 'sches Ähnlichkeitsgesetz	29
1.3.3	Verzerrtes <i>Froude</i> -Modell	31
1.3.4	<i>Reynolds</i> 'sches Ähnlichkeitsgesetz	32
1.3.5	<i>Weber</i> 'sches Ähnlichkeitsgesetz	32
1.3.6	<i>Cauchy-Mach</i> 'sches Ähnlichkeitsgesetz	33
1.4	Modellregeln und Übertragungsgrenzen	33
1.4.1	Turbulenzgrenze	33
1.4.2	Fließwechselgrenze	34
1.4.3	Rauheitsgrenze	35
1.4.4	Kapillargrenze	36
1.4.5	Kavitationsgrenze	36
1.4.6	Belüftungsgrenze	36
1.4.7	Verzerrte Modelle	38
1.4.8	Modelle mit beweglicher Sohle	38
1.4.9	Modelfamilien	40
1.4.10	Analogiemodelle	40
1.4.11	Numerische Modelle	42
1.5	Hydrometrie	43
1.5.1	Messgrößen	43
1.5.2	Messungen des Wasserstandes	43
1.5.2.1	Pegellatte	43
1.5.2.2	Schwimmerpegel	43
1.5.2.3	Spitzenpegel	44
1.5.2.4	Wellenharfe	44
1.5.2.5	Widerstandswellenmessgerät	45
1.5.2.6	Kapazitives Wellenmessgerät	46
1.5.2.7	Echolot/Ultraschallsensor	46
1.5.2.8	LCD-Zeilenkamera	47
1.5.2.9	Einperlverfahren	47
1.5.2.10	Druckgeber	47
1.5.2.11	Auswahlkriterien	47
1.5.3	Druck-, Kraft- und Spannungsmessung	48
1.5.3.1	Piezometer	48

1.5.3.2	Druckrohr und Druckscheibe	48
1.5.3.3	Mechanische Druckmessgeräte	49
1.5.3.4	Druckmessdosen	49
1.5.3.5	Piezoelektrische Kristalle	49
1.5.3.6	Schubspannungsmessungen	49
1.5.3.7	Messung von Kräften	50
1.5.4	Geschwindigkeitsmessung	50
1.5.4.1	Tracermethoden	50
1.5.4.2	Flügelmessung	51
1.5.4.3	Auslenkungsmessung eines Pendels	52
1.5.4.4	Staurohr	52
1.5.4.5	Ultraschallmessungen	53
1.5.4.6	Hitzdraht	54
1.5.4.7	Magnetisch-induktive Geschwindigkeitssonden	55
1.5.4.8	Particle Velocimeter Device (PVD)	55
1.5.4.9	Lasermessverfahren	55
1.5.5	Durchflussmessung	57
1.5.5.1	Volumen- bzw. Gewichtsbestimmung	57
1.5.5.2	Wasserzähler	58
1.5.5.3	Wirbeldurchflussmesser	59
1.5.5.4	Dralldurchflussmesser	59
1.5.5.5	Schwebekörperdurchflussmesser	60
1.5.5.6	Wirkdruckgeber	61
1.5.5.7	Magnetisch-induktive Durchflussmesser (MID)	62
1.5.5.8	Ultraschalldurchflussmesser	63
1.5.5.9	Massedurchflussmesser	63
1.5.5.10	Verschlussorgane	64
1.5.5.11	Überfälle	64
1.5.5.12	Kontrollrinnen	65
1.5.5.13	Integration von Geschwindigkeitsmessungen	66
1.5.5.14	Einperlverfahren	67
1.5.6	Temperaturmessungen	67
1.5.7	Sonstige Messverfahren	67
1.5.7.1	Konzentrationsmessungen	67
1.5.7.2	Absorption radioaktiver Strahlung	68
1.5.7.3	Sedimentfallen	68
1.5.7.4	Abstands- und Profilmessungen	68
1.5.7.5	Farbmarkierungen	68
1.5.8	Auswertung der Messergebnisse	68
1.5.8.1	Erfassung von Messgrößen	68
1.5.8.2	Messfehler	69
1.5.8.3	Fehlerfortpflanzung	71
1.5.8.4	Regressionsanalyse	71
1.5.8.5	Fehlerkurven	73
1.6	Literatur	73
1.7	Verwendete Bezeichnungen	74

2	Gerinneströmung	77
2.1	Einleitung	77
2.2	Fließformeln	77
2.3	Klassische Fließformel von <i>Brahms</i> und <i>de Chezy</i>	78
2.4	Empirische Fließformel	79
2.5	Universelle Fließformel	80
2.6	Stationär gleichförmiger Durchfluss	84
2.6.1	Rauheiten	84
2.6.1.1	Gleichmäßig über den benetzten Umfang verteilte Rauheiten	84
2.6.1.2	Ungleichmäßig über den benetzten Umfang verteilte Rauheiten	85
2.6.2	Fließquerschnitt	89
2.6.2.1	Rechteckprofil	89
2.6.2.2	Trapezprofil	90
2.6.2.3	Kreisprofil	92
2.6.2.4	Muldenprofil	93
2.6.2.5	Haubenprofil	95
2.6.2.6	Zusammengesetzte Querschnitte	97
2.7	Stationär ungleichförmiges Fließen	100
2.8	Schubspannungen	105
2.8.1	Phänomenologische Theorien der turbulenten Strömung	109
2.8.2	Schubspannung bei ungleichförmigem Abfluss	115
2.8.3	Bestimmung der lokalen Wandschubspannung	116
2.9	Literatur	124
2.10	Verwendete Bezeichnungen	126
3	Numerische Modellierung über- und unterirdischer Strömungs- und Transportprozesse	129
3.1	Einleitung	129
3.2	Grundlagen und Voraussetzungen	131
3.2.1	Erhaltungsprinzip	131
3.2.2	Formen der Bilanzgleichungen	132
3.2.3	Mathematische Konventionen	133
3.2.4	Gravitation und Variable	136
3.2.5	Hydraulischer Radius	137
3.2.6	Freie Oberflächen	138
3.2.7	Viskose Spannungen auf Oberflächen	139
3.2.8	Potenzialströmung	140
3.3	Grundlegende Bilanzgleichungen	141
3.3.1	Fluidmassenerhaltung	141
3.3.2	Fluidimpulserhaltung	142
3.3.2.1	<i>Darcy</i> -Strömung im porösen Medium	143

3.3.2.2	Ebene und drehsymmetrische Parallelströmung (<i>Poiseuille</i> -Strömung)	144
3.3.2.3	Bewegungsgleichungen für Oberflächenabfluss- und Kanalströmung	146
3.3.3	Massenerhaltung chemischer Spezies (Kontaminanten)	148
3.3.4	Energieerhaltung	149
3.4	Verallgemeinerte Transportgleichungen	150
3.4.1	Strömung	150
3.4.2	Kontaminantentransport	150
3.4.3	Wärmetransport	150
3.5	Finite-Elemente-Formulierungen	154
3.5.1	Hauptgleichung, Randbedingungen und Wichtungsansatz	154
3.5.2	Räumliche Diskretisierung	155
3.5.3	Zeitliche Diskretisierung	156
3.5.3.1	θ -Methode	156
3.5.3.2	Prädiktor-Korrektor-Methode	157
3.5.4	Finite-Elemente-Basisoperationen	157
3.6	Anwendungen	161
3.6.1	Strömungssimulator FEFLOW	161
3.6.2	Problemerstellung	163
3.6.3	Variantenberechnungen und weiterführende Aufgaben	166
3.7	Zusammenfassung	171
3.8	Literatur	171
3.9	Verwendete Bezeichnungen	172
4	Hydraulik der Wasserbehandlungsanlagen und industrieller Prozesse	179
4.1	Einleitung	179
4.2	Grundlagen der hydraulischen Bemessung	179
4.2.1	Erhaltungssätze	179
4.2.2	Fließformeln	180
4.2.3	Strömungsverluste	180
4.2.4	Überfälle	181
4.2.5	Ausfluss	186
4.3	Spezielle hydraulische Problemstellungen	189
4.3.1	Stromtrennung	189
4.3.2	Wasserverteilung	191
4.3.3	Stromvereinigung	193
4.3.4	Wasserabzug	194
4.3.5	Freigefälledruckleitungen	196
4.3.6	Versturzleitungen	200
4.4	Strömungsturbulenz	204
4.4.1	Entstehung der Strömungsturbulenz	204
4.4.2	Turbulenzdefinition	204
4.4.3	Turbulenztheorie	206

4.4.4	Auswirkungen turbulenter Strömungen	213
4.4.5	Turbulenzerzeugung	216
4.4.6	Turbulenzverhinderung	218
4.5	Beurteilung der hydraulischen Wirksamkeit	221
4.5.1	Schlüsselkurve einer Anlage	222
4.5.2	Gradienten-Zeit-Diagramm	223
4.5.3	Geschwindigkeits- und Impulsentwicklung	226
4.5.4	Dichteströmung und Dichteschichtung	227
4.5.5	Verweilzeitanalyse	232
4.6	Literatur	238
4.7	Verwendete Bezeichnungen	243
5	Probabilistische Aspekte der hydraulischen Bemessung	245
5.1	Deterministische Bemessung	245
5.2	Bemessung auf probabilistischer Grundlage	246
5.3	Grundlagen für die probabilistische Bemessung	251
5.3.1	Datengewinnung, Häufigkeiten, Korrelation und Regression	251
5.3.2	Verteilungsfunktionen	253
5.3.3	Momente der Verteilungsfunktionen	253
5.3.4	Anpassung spezieller Verteilungsfunktionen an Datenreihen	255
5.3.4.1	Normalverteilung	256
5.3.4.2	Logarithmische Normalverteilung	257
5.3.4.3	Extremwertverteilungen	257
5.3.4.4	<i>Gumbel</i> -Verteilung	258
5.3.4.5	<i>Pearson-III</i> -Verteilung und <i>Log-Pearson-III</i> -Verteilung	259
5.3.5	Anpassungstest für die gewählte Verteilung	262
5.3.6	Zweidimensionale stetige Verteilungen	263
5.3.7	Erzeugung von Zufallszahlen	263
5.3.8	Anwendungen auf hydrologisch-meteorologische Größen	265
5.4	Logische Bäume	269
5.4.1	Fehlerbaum	269
5.4.2	Ereignisbaum	271
5.4.3	Ursachen-Folgen-Diagramm	271
5.5	Geschlossene Lösungen	271
5.6	Statistische Versuche, Monte-Carlo-Methode	279
5.7	Zulässige Versagenswahrscheinlichkeiten	290
5.8	Literatur	293
5.9	Verwendete Bezeichnungen	296

6	Spezielle hydraulische Probleme an ausgewählten Betriebseinrichtungen	299
6.1	Kavitation bei Betriebseinrichtungen	299
6.1.1	Einleitung	299
6.1.2	Physikalische Grundlagen	299
6.1.3	Kavitationsmodelle.	301
6.1.3.1	Kennzahlen für Kavitationserscheinungen.	301
6.1.3.2	Vereinfachtes Kavitationsmodell	303
6.1.3.3	Schlussfolgerungen	315
6.2	Standardüberfälle.	315
6.2.1	Einleitung	315
6.2.2	Konstruktive Gestaltung	315
6.2.3	Überfallströmungen	320
6.2.3.1	Ermittlung des Abflusses	320
6.2.3.2	Einschätzung der Kavitationsgefahr.	323
6.3	Ringkolbenventile in Grundablass- und Entnahmemeitungen von Stauanlagen	328
6.3.1	Einleitung	328
6.3.2	Hydraulische und geometrische Parameter	330
6.3.2.1	Stellverhältnis	330
6.3.2.2	Flächenverhältnisse des Austrittsstrahles.	331
6.3.2.3	Hydraulische Parameter	333
6.3.3	Ringkolbenventil am Ende einer Rohrleitung	335
6.3.4	Ringkolbenventil mit einer angeschlossenen Rohrleitung.	337
6.3.5	Kavitationsverhalten	340
6.3.5.1	Ausmündung in Luft.	340
6.3.5.2	Anschluss einer Rohrleitung	342
6.3.5.3	Berechnungsbeispiele	344
6.4	Literatur	348
6.5	Verwendete Bezeichnungen	349
7	Rohrnetze, Druckstoß in Rohrleitungen	353
7.1	Einleitung	353
7.2	Wichtige Grundgleichungen für die Rohrnetzberechnung	353
7.2.1	Grundgleichungen der Rohrströmung	353
7.2.2	Grundgleichungen von örtlichen Verlusten und von Anlagenkomponenten.	354
7.3	Grundstrukturen von Rohrleitungssystemen.	355
7.3.1	Elemente und Knoten	355
7.3.2	Verästelungssystem	356
7.3.3	Maschensystem	357
7.4	Berechnungsverfahren für Rohrleitungsnetze	357
7.4.1	Grundsätzliche Einteilung der Verfahren	357

7.4.2	Maschenorientierte Berechnungsverfahren	358
7.4.2.1	Sequenzielle Lösungsmethode (<i>Cross-Verfahren</i>)	358
7.4.2.2	Simultane Lösungsmethode	361
7.4.3	Knotenorientierte Berechnungsverfahren	362
7.5	Instationäre Strömungen in Rohrleitungen	367
7.5.1	Einführung	367
7.5.2	Berechnungsgrundlagen	367
7.5.2.1	Bewegungsgleichung	367
7.5.2.2	Kontinuitätsgleichung	369
7.5.2.3	Zur Druckwellenfortpflanzungsgeschwindigkeit	371
7.5.2.4	Charakteristikenverfahren	372
7.5.3	Randbedingungen	377
7.5.3.1	Allgemeines	377
7.5.3.2	Behälter mit konstantem Wasserspiegel	379
7.5.3.3	Behälter mit veränderlichem Wasserspiegel	380
7.5.3.4	Geschlossene Armatur	381
7.5.3.5	Drossel	381
7.5.3.6	Armatur am Ende einer Rohrleitung	382
7.5.3.7	Armatur zwischen zwei Rohrleitungen	383
7.5.3.8	Knoten	385
7.5.3.9	Druckbehälter mit Gaspolster (Windkessel)	386
7.5.3.10	Druckbehälter mit Gaspolster und Drossel	388
7.5.3.11	Wasserschloss	389
7.5.3.12	Pumpe mit konstanter Drehzahl	391
7.5.4	Armatur am Ende einer Rohrleitung	392
7.6	Literatur	396
7.7	Verwendete Bezeichnungen	397
	Sachwörterverzeichnis	391