

9 Edition
ISO 4

Prof. Dr.-Ing. habil. Hans-Burkhard Horlacher
Prof. Dr. Horst-Joachim Lüdecke

Strömungsberechnung für Rohrsysteme

Berechnung stationärer und transienter Strömung in Rohrsystemen
für Wasser, Abwasser, industrielle Flüssigkeiten und Gase.

Auslegung von Dämpfungsmaßnahmen
gegen unzulässige dynamische Drücke. Mit PC-Übungsbeispielen

2., völlig neu bearbeitete und erweiterte Auflage

expertUjjverlag

Mit
Internetanbindung

Inhaltsverzeichnis

Vorwort

Stationäre Rohrströmung	1
1.1 Die Grundgleichungen des Einzelrohrs und der Drossel	1
1.1.1 Gasrohrströmung und Sonderfälle	5
1.2 Methoden zur Berechnung von Rohrleitungsnetzen	7
1.2.1 Die Knotenmethode	8
1.2.2 Das simultane Lösungsverfahren für die Knotenmethode	10
1.2.3 Die Maschenmethode	11
1.2.4 Das simultane Lösungsverfahren für die Maschenmethode	12
1.2.5 Das sequentielle Lösungsverfahren für die Maschenmethode (CROSS-Methode)	14
1.2.6 Drossel in Rohrsystemen	24
1.3 Methodenvergleich und weitere Verfahren	25
1.4 Übungen mit einem VBA-Rechencode	27
Grundlagen transientser Rohrströmung von Flüssigkeiten	51
2.1 Einleitung	51
2.2 Die Bewegungsgleichung	51
2.3 Die Kontinuitätsgleichung	53
2.4 Zur Druckwellenfortpflanzungsgeschwindigkeit	55
2.5 Das Charakteristikenverfahren	56
2.6 Zur Rohrrückbildung	61
2.7 Zur Interpolation	64
2.8 Druckstoßdämpfung bei viskoelastischen Rohrmaterialien	67
Randbedingungen und Kräfte in Rohrleitungen	71
3.1 Allgemeines	71
3.2 Behälter mit konstantem Wasserspiegel	74
3.3 Behälter mit veränderlichem Wasserspiegel	74
3.4 Geschlossene Armatur	75
3.5 Drossel	75
3.6 Armatur am Ende einer Rohrleitung	76
3.7 Programmbeispiel: Armatur am Ende einer einsträngigen Leitung	80

Inhaltsverzeichnis

3.8	Rohrerweiterung, Rohrverengung	84
3.9	Knoten	85
3.10	Armaturn zwischen zwei Rohrleitungen	87
3.11	Armaturn mit Bypass	89
3.12	Windkessel	90
3.13	Windkessel mit Drossel	93
3.14	Wasserschloss	94
3.15	Be- und Entlüftungsventil	96
3.16	Pumpe mit geregelter konstanter Drehzahl	100
3.17	Pumpenausfall	102
	3.17.1 Allgemeines	102
	3.17.2 Dimensionslose Kennfelder	105
	3.17.3 Maßgebende Gleichungen	109
3.18	Pumpenstart und stationäre Pumpe ohne Drehzahlregelung	112
3.19	Pumpen in Parallelanordnung	113
3.20	Pumpen in Reihenanordnung	115
3.21	Turbine (Netztrennung)	116
3.22	Dynamische Kennlinie von Rückschlagklappen	117
3.23	Kräfte auf Rohrleitungen und Rohreinbauten	121
	3.23.1 Allgemeines	121
	3.23.2 Grundgleichungen	125
	3.23.3 Krümmer	127
	3.23.4 Horizontaler Rohrabschnitt	128
	3.23.5 Totes Rohrende, Querschnittsänderungen und Drucksprünge	128
	3.23.6 T-Stück	129
	3.23.7 Kräfte im stationären Strömungszustand	130
3.24	Programmbeispiele in VBA	130
	3.24.1 Drust (Armaturschließen)	130
	3.24.2 Pumpenausfall	141
4	Optimierte Stellgesetze von Steuerorganen	157
4.1	Allgemeines	157
4.2	Einfache Beispiele ohne Reibung	157
4.3	Vorgabe einer Geschwindigkeitsänderung am Rohrleitungsanfang	165
4.4	Geschwindigkeitsänderung gemäß einer inkompressiblen Flüssigkeit	169
4.5	Beispiele	172
4.6	Ermittlung von Stellgesetzen durch Parameteroptimierung	178
	4.6.1 Allgemeine Erläuterungen zur Parameteroptimierung	178
	4.6.2 Eindimensionale Optimumsuche	181
	4.6.3 LAGRANGE Interpolation	182
4.7	Praktische Ermittlung von zweistufigen Stellgesetzen	184
	4.7.1 Rastermethode	184

4.7.2	Das Verfahren von HOOKE und JEEVES.	186
4.8	Programmbeispiele	187
4.8.1	Stell1.	187
4.8.2	Stell2.	196
4.9	Regelungen in Rohrleitungssystemen.	205
Gasausscheidung und Kavitation		209
5.1	Einleitung	209
5.2	Kavitation in Rohrleitungen.	209
5.3	Modell der konzentrierten Dampfkavitation (KoDa).	213
5.4	Modell der konzentrierten Gaskavitation (KoGa).	218
5.5	Modelle mit nichtlinearen Charakteristiken (Nli).	221
5.6	Modell mit LAX-WENDROFF-Lösung (LAXWE).	222
5.7	Modellvergleich.	224
Mehrphasenströmung		227
6.1	Einleitung	227
6.2	Veranlassungen zum Abgehen von der Charakteristikenmethode	227
6.3	Modelle mit mehr als zwei Feldgleichungen.	228
6.4	Numerische Lösung eines Modells mit drei Feldgleichungen.	232
6.5	Rohrströmungsberechnung mit finiten Elementen	234
Gasrohrströmung		237
7.1	Besonderheiten der Gasrohrströmung	237
7.2	Modellvereinfachungen: quasisexaktes, Langrohr- und Speichermodell	238
7.3	Anfangs- und Randbedingungen.	239
7.3.1	Rohrleitungsknoten	239
7.3.2	Drosselwiderstand und Stellarmaturen.	239
7.3.3	Behälter und Gasometer.	240
7.3.4	Gebläse.	241
7.3.5	Mess- und Regeleinrichtungen	243
7.4	Vergleich der Modellvereinfachungen mit dem exakten Modell	243
7.5	Die Lösung des exakten und quasisexakten Modells.	246
7.5.1	Die Wahl stabiler Zeit- und Ortsschrittweiten.	248
7.6	Die Lösung des Langrohr-Modells mit der Charakteristikenmethode	250
7.7	Zusammenfassung.	251
Entwurf eines Simulationsprogramms		253
8.1	Allgemeines.	253
8.2	Anmerkungen zum Datenfile.	254
8.3	Hinweise zur Programmstruktur.	257
8.4	Sicherheits- und Wirtschaftlichkeitsfragen.	260

Inhaltsverzeichnis

8.5	Gefährdung durch Druckstöße, Druckstoßsicherungen	261
8.6	Allgemeines zur Berechnungsdurchführung	264
8.6.1	Datensammlung	265
8.7	Simulationsrechnungen	266
8.7.1	Ergebnisaufbereitung	266
8.7.2	Druckstoßsoftware	266
9	Programmvalidierungen	269
9.1	Ergebnisgenauigkeit von Druckstoßprogrammen	270
9.2	Bezeichnungen und Konventionen der Vergleichsrechnungen	272
9.3	Vergleichsrechnungen	274
9.3.1	Beispiel 1 - Kraftwerkskühlleitung	274
9.3.2	Beispiel 2 - Pumpendruckleitung mit Windkessel	280
9.3.3	Beispiel 3 - Flüssigkeitstrennung	286
9.3.4	Beispiel 4 - Standrohre mit Entleerung	290
9.3.5	Beispiel 5 - Einwegwasserschloss	300
9.3.6	Beispiel 6 - Belüfter mit Dom	306
10	Literaturverzeichnis	317
	Schlagwortverzeichnis	333

