

# R o h r h y d r a u l i k

Allgemeine Grundlagen, Forschung, Praktische  
Berechnung und Ausführung  
von Rohrleitungen

von

**Dr.-Ing. Hugo Richter, VDI.**

Berlin-Mariendorf  
Privatdozent an der Bergakademie Freiberg

Mit 192 Textabbildungen  
und 44 Zahlentafeln



Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH 1934

ISBN 978-3-662-40582-6      ISBN 978-3-662-41060-8 (eBook)  
DOI 10.1007/978-3-662-41060-8

**Alle Rechte, insbesondere das der Übersetzung  
in fremde Sprachen, vorbehalten.**

Copyright 1934 by Springer-Verlag Berlin Heidelberg  
Ursprünglich erschienen bei Julius Springer in Berlin 1934  
Softcover reprint of the hardcover 1st edition 1934

## Vorwort.

Nachdem in den letzten Jahren so überaus eifrig und erfolgreich an der Erforschung der Strömungsvorgänge in Flüssigkeiten gearbeitet wurde, ist es notwendig, interessante und technisch bedeutungsvolle Erfahrungen auch dem praktischen Ingenieur zu vermitteln. Ich habe in diesem Buche alle erreichbaren und für die praktische Hydraulik bemerkenswerten theoretischen und praktischen Arbeiten über das technisch wichtige Gebiet der Rohrströmung, die in deutschen und fremdsprachigen Zeitschriften und Büchern verstreut zu finden sind, zu einem Gesamtüberblick verarbeitet.

Nach einem kurzen Abriß über die physikalischen Grundlagen der Flüssigkeitsströmung, in dem ich bemüht war, die heute gemessenen Zähigkeitswerte von technischen Flüssigkeiten und Flüssigkeitsgemischen möglichst vollständig wiederzugeben und das allgemeine Ähnlichkeitsgesetz für Strömungsvorgänge leichtverständlich zu entwickeln, habe ich in einem zweiten Abschnitt die Ansätze der Hydraulik und die wichtigsten Forschungsergebnisse der Strömung von tropfbaren und gasförmigen Flüssigkeiten in geschlossenen Rohrleitungen dargestellt. Zur Lösung hydrodynamischer Aufgaben gibt die exakte theoretische Hydromechanik zweierlei Ansätze: die Gleichungen von Bernoulli und Euler für reibungsfrei gedachte und die Gleichungen von Navier und Stokes für natürliche reibungsbehaftete Flüssigkeiten. Zur Berechnung der meisten technischen Flüssigkeitsströmungen versagen diese Ansätze. Die Aufgabe dieses zweiten Abschnitts ist daher, die Näherungsverfahren der praktischen Hydraulik darzulegen, mit welchen man die technisch vorkommenden Strömungsfälle in Rohrleitungen mit ausreichender Genauigkeit beherrschen kann. Ganz allgemein versteht man unter Hydraulik die praktische Lehre von den Vorgängen in bewegten Flüssigkeiten. Sie umfaßt die Strömung in offenen Gerinnen und geschlossenen Rohrleitungen und Kanälen, die Grundwasserbewegung und die Strömung um feste Körper. Die Rohrströmung ist also nur ein Teilgebiet der Hydraulik.

Der dritte Teil des Buches bringt eine Reihe der vom heutigen Standpunkt aus empfehlenswerten Formeln zur praktischen Berechnung der besonderen Strömungsfälle und praktische Rechen-

beispiele. Da es außerordentlich viele Formeln gibt und diese untereinander häufig stark abweichen, war die Auswahl zuverlässiger nicht leicht. Von brauchbar und als gleichwertig befundenen Formeln wurden nur eine oder wenige zur Rechnung empfohlen, um dem Leser die Auswahl zu ersparen. Verschiedentlich wurde zur Klarheit die frühere Bezeichnung „Schmiedeisen“ an Stelle der genormten „Stahl“, wie man heute alle ohne Nachbehandlung schmiedbaren Eisensorten nennt, beibehalten.

Das technische Maßsystem (Meter, Kilogramm, Sekunden) wurde überall streng durchgeführt und eine einmal gebrauchte Bezeichnung ständig beibehalten.

Meine Ausführungen sind für alle diejenigen gedacht, die dieses Fachgebiet studieren wollen oder beruflich hydraulische Rechnungen an Rohrleitungen ausführen müssen. Ich hoffe, daß mein Buch ein brauchbares Bindeglied zwischen Theorie und Praxis wird. Möge es eine gute Aufnahme finden!

Berlin, November 1933.

**Hugo Richter.**

# Inhaltsverzeichnis.

	Seite
<b>Bedeutung häufig gebrauchter Bezeichnungen . . . . .</b>	<b>VIII</b>
<b>I. Mechanische und wärmetechnische Grundlagen . . . . .</b>	<b>1</b>
1. Stoffeigenschaften . . . . .	1
a) Begriff der Flüssigkeit . . . . .	1
b) Spezifisches Gewicht . . . . .	2
c) Innere und äußere Reibung, Zähigkeit . . . . .	3
d) Zahlentafeln für das spezifische Gewicht und die Zähigkeit von Flüssigkeiten . . . . .	6
Allgemeines S. 6. — Tropfbare Flüssigkeiten S. 9. — Gas- und dampfförmige Flüssigkeiten S. 16. — Gasmische S. 22.	
2. Kontinuitätsgesetz . . . . .	27
3. Energieformen . . . . .	29
I. Potentielle Energie . . . . .	29
a) Gewichtsenegie oder Energie der Lage S. 29. — b) Druck- oder Spannungsenergie S. 29.	
II. Innere Energie . . . . .	29
a) Wärme- oder innere Energie S. 29. — b) Wärmehalt S. 29.	
III. Kinetische Energie . . . . .	30
4. Energiesätze für reibungslose Flüssigkeiten . . . . .	30
a) Begriff der reibungslosen Flüssigkeit . . . . .	30
b) Energiegleichungen . . . . .	30
c) Druck/Volumen-Diagramme . . . . .	32
Tropfbare Flüssigkeiten S. 32. — Gasförmige Flüssigkeiten S. 33.	
d) Arbeitsaufwand bei kleinen Druckänderungen . . . . .	35
e) Statischer und dynamischer Druck . . . . .	36
5. Allgemeine Energiesätze für natürliche Flüssigkeiten . . . . .	40
a) Energiegleichungen S. 40. — b) Leitungsgefälle S. 42.	
6. Mechanische Ähnlichkeit von Strömungsvorgängen . . . . .	43
a) Begriff der mechanischen Ähnlichkeit . . . . .	43
b) Ableitung des Ähnlichkeitsgesetzes aus den Kräftebedingungen. . . . .	45
c) Ableitung des Ähnlichkeitsgesetzes aus der Navier-Stokesschen Gleichung . . . . .	47
d) Beziehungen für die Reynoldssche Zahl . . . . .	48
e) Sonderfälle . . . . .	48
<b>II. Theoretische Überlegungen und Versuchserfahrungen . . . . .</b>	<b>50</b>
Einleitung . . . . .	50
A. Strömung in geraden Rohren mit unveränderlichem Querschnitt . . . . .	51
1. Beziehungen für den Druckabfall in geraden Rohren . . . . .	51
a) Allgemeine Bemerkungen zur Geschwindigkeits- und Druckverteilung im Leitungsquerschnitt . . . . .	51

	Seite
b) Energieverteilung im Querschnitt . . . . .	52
c) Allgemeine Druckabfallgleichung . . . . .	55
d) Druckverlust und Ähnlichkeitsgesetz . . . . .	58
e) Druckabfallgleichung für tropfbare Flüssigkeiten . . . . .	60
f) Druckabfallgleichung für gasförmige Flüssigkeiten . . . . .	61
$\alpha$ ) Fortleitung ohne Wärmeaustausch, adiabatische Strömung S. 62. — $\beta$ ) Fortleitung bei unveränderlicher Temperatur und vernachlässigbarer Änderung der Lagenenergie S. 65. — $\gamma$ ) Ver- einfachung der Formeln für isothermische Strömung S. 66. — $\delta$ ) Fortleitung bei unveränderlicher Temperatur mit Rücksicht auf die Höhenänderung S. 68.	
2. Laminarströmung im geraden Kreisrohr . . . . .	69
a) Vollkommen ausgebildete Strömung . . . . .	69
b) Vorgänge bei der Ausbildung der laminaren Strömung . . . . .	78
3. Übergangsbereich zwischen laminarer und turbulenter Strömung . . . . .	84
4. Turbulente Strömung im glatten geraden Kreisrohr . . . . .	91
a) Vollkommen ausgebildete Strömung . . . . .	91
$\alpha$ ) Strömungswiderstand bei turbulenter Bewegung im geraden glatten Kreisrohr S. 92. — $\beta$ ) Messung des Geschwindigkeitspro- fils S. 97. — $\gamma$ ) Versuch einer näherungsweise rechnerischen Erfassung der Geschwindigkeitsverteilung S. 99. — $\delta$ ) Rechne- rische Form des Widerstandsgesetzes für glattes Rohr S. 106.	
b) Vorgänge bei der Ausbildung der turbulenten Strömung . . . . .	110
5. Turbulente Strömung im rauhen geraden Kreisrohr . . . . .	113
a) Allgemeingültige Erfahrungen und Gesetze . . . . .	113
b) Geschwindigkeitsverteilung im Rohrquerschnitt . . . . .	122
6. Strömung in geraden Rohren mit anderem als Kreisquerschnitt . . . . .	123
a) Turbulente Strömung . . . . .	123
b) Laminarströmung in Rohren mit Kreisringquerschnitt . . . . .	127
c) Laminarströmung in Rohren mit Rechteckquerschnitt . . . . .	130
B. Strömung in geraden Rohren mit veränderlichem Quer- schnitt . . . . .	133
1. Leitungen mit stetig veränderlichem Querschnitt . . . . .	133
a) Laminarströmung . . . . .	133
b) Übergangsbereich zwischen laminarer und turbulenter Strömung . . . . .	136
c) Turbulente Strömung . . . . .	136
2. Leitungen mit unstetig veränderlichem Querschnitt . . . . .	141
C. Strömung in anderen als geraden Rohren . . . . .	143
1. Richtungsänderungen . . . . .	143
a) Strömung in gekrümmten Rohren . . . . .	143
$\alpha$ ) Einwirkung der Krümmung auf die Strömungsform, Druck- und Geschwindigkeitsverteilung in gekrümmten Rohren S. 143. $\beta$ ) Druckabfall in gekrümmten Rohren S. 148. — 1. Turbulente Strömung in Krümmern S. 148. — 2. Turbulente Strömung in Rohrschlangen S. 154. — 3. Strömung bei kleinen Reynoldsschen Zahlen S. 156.	
b) Strömung in Knierohren . . . . .	159
2. Abzweige . . . . .	161
Strömung in T-Stücken . . . . .	161

	Seite
<b>III. Praktische Berechnung und Ausführung von Rohrleitungen . . .</b>	<b>163</b>
A. Allgemeine Richtlinien und Gesichtspunkte . . . . .	163
1. Formeln für gerades Rohr . . . . .	163
Allgemeines S. 163. — Stahlrohre S. 165. — Glatte Rohre S. 176.	
— Holzrohre S. 176. — Betonrohre S. 176. — Eternitrohre S. 176.	
— Schläuche S. 177. — Überschlagsformeln S. 178.	
2. Widerstandszahlen von Krümmern und anderen Leitungsteilen . .	181
Krümmer S. 182. — Kniee S. 184. — T-Stücke S. 186. — Ven-	
tile S. 187. — Äquivalente Rohrlängen S. 189. — Eckenrechte	
Leitung S. 190.	
3. Widerstand von Leitungen mit vielen Abzweigungen . . . . .	191
4. Förderung von pulsierenden Stoffströmen (nichtstationäre Strömung)	191
5. Wirkungsgrad einer Rohrleitung . . . . .	192
6. Größtmögliche Energieentnahme aus einer Leitung . . . . .	193
7. Ablagerungen an Rohrleitungen im Betrieb . . . . .	195
8. Über die Genauigkeit der Formeln . . . . .	199
9. Richtlinien für die Anlage von Leitungen . . . . .	201
10. Nennweiten handelsüblicher Rohre nach DIN 2402 . . . . .	203
B. Leitung tropfbarer Flüssigkeiten, besondere Strömungs-	
fälle . . . . .	204
1. Wasserleitungen . . . . .	204
a) Leitungen für Trink- und Nutzwasserversorgung . . . . .	204
Aufgabe 1 bis 8 . . . . .	205
b) Leitungen für Wasserkraftwerke . . . . .	210
Aufgabe 9 bis 11 . . . . .	212
c) Freispiegelleitungen . . . . .	214
2. Soleleitungen . . . . .	216
Aufgabe 12 . . . . .	216
3. Ölleitungen . . . . .	217
a) Entwurf von Fernölleitungen . . . . .	217
b) Ermittlung des Druckverlustes in Ölleitungen . . . . .	220
Aufgabe 13 bis 14 . . . . .	221
C. Leitung gasförmiger Flüssigkeiten, besondere Strömungs-	
fälle . . . . .	222
1. Luftleitungen . . . . .	222
Aufgabe 15 bis 20 . . . . .	224
2. Gasleitungen . . . . .	227
a) Allgemeine Bemerkungen . . . . .	227
b) Nachprüfung von Biels Formel für Stahlrohr . . . . .	228
c) Zum Entwurf von Gasfernleitungen . . . . .	229
Aufgabe 21 . . . . .	231
d) Leuchtgas-Niederdruckleitungen . . . . .	234
Aufgabe 22 bis 26 . . . . .	235
3. Dampfleitungen . . . . .	237
Aufgabe 27 bis 30 . . . . .	244
4. Gerades glattes Rohr als Mengenmeßgerät . . . . .	245
Zur weiteren Vertiefung empfehlenswerte Bücher . . . . .	249
Namenverzeichnis . . . . .	250
Sachverzeichnis . . . . .	252

## Bedeutung häufig gebrachter Bezeichnungen.

Im allgemeinen werden nur die Benennungen m, kg, s und kcal gebraucht. Mit Rücksicht auf die technische Praxis müssen aber gelegentlich auch die Einheiten mm, cm, dm, km, l, g, t, at und h verwendet werden.

$l$	Länge in m,	$\gamma$	spezifisches Gewicht in $\text{kg/m}^3$ ,
$L$	Länge in km,	$\gamma'$	spezifisches Gewicht in $\text{g/cm}^3$ oder $\text{kg/dm}^3$ oder $\text{kg/l}$ oder $\text{t/m}^3$ ,
$l$	Mischungsweg in m,	$s$	relatives Gewicht bezogen auf Luft = 1,
$x, y$	Abstand in m,	$v$	spezifisches Volumen in $\text{m}^3/\text{kg}$ ,
$H, h$	örtliche Höhe in m,	$z$	Zeit in s,
$h$	Druckhöhe in m,	$w_{\text{Zeitger}}$	Einzelgeschwindigkeit in m/s,
$U$	Umfang in m,	$w$	mittlere Strömungsgeschwindigkeit in m/s,
$d$	Durchmesser in m,	$\bar{w}$	Schubspannungsgeschwindigkeit in m/s,
$r$	Rohrhalbmesser in m,	$g$	Erdbeschleunigung in $\text{m/s}^2$ ,
$D$	Rohrdurchmesser in mm,	$N$	Leistung in PS = 75 mkg/s,
$\rho$	Krümmungshalbmesser in m,	$M$	Masse in $\text{kg s}^2/\text{m}$ ,
$b$	Breite in m,	$\mu$	(dynamische) Zähigkeit in $\text{kg s/m}^2$ ,
$s$	Spaltbreite in m,	$\eta = \mu g$	Zähigkeit in $\text{kg/ms}$ ,
$\delta$	Dicke der laminaren Grenz- schicht in m,	$\nu$	kinematische Zähigkeit in $\text{m}^2/\text{s}$ ,
$\Delta$	Ablagerungsdicke in m,	$\varepsilon$	Austauschgröße in $\text{m}^2/\text{s}$ ,
$E$	Exzentrizität in m,	$E$	Zähigkeit in Englergrad,
$e$	mittlere Höhe der Rauigkeits- erhebungen einer Wand in m,	$t$	Temperatur in $^{\circ}\text{C}$ ,
$e' = \text{konst} \cdot e$	Hilfsgröße in m,	$T = 273 + t$	absolute Temperatur in Grad,
$f$	Entfernung der Rauigkeits- erhebungen voneinander bei gleichförmiger Rauigkeit in m,	$R$	Gaskonstante in $\text{m/Grad}$ ,
$\varepsilon = \frac{e}{r}$	relative Rauigkeit (unbenannt),	$Q'$	Wärmemenge in $\text{kcal/kg}$ ,
$F$	Fläche in $\text{m}^2$ ,	$u$	innere Energie in $\text{kcal/kg}$ ,
$F/U$	hydraulischer Halbmesser in m,	$i$	Wärmeinhalt in $\text{kcal/kg}$ ,
$O$	Oberfläche in $\text{m}^2$ ,	$r$	Verdampfungswärme in $\text{kcal/kg}$ ,
$V$	Rauminhalt in $\text{m}^3$ ,	$\kappa = \frac{c_p}{c_v}$	Adiabatexponent,
$Q$	Durchflußmenge in $\text{m}^3$ ,	$A = \frac{1}{427}$	$\text{kcal/mkg}$ mechanisches Wärmeäquivalent,
$K$	Kraft in kg,	$k$	Wärmedurchgangszahl in $\text{kcal/m}^2\text{h Grad}$ ,
$G$	Gewicht in kg,	$\varphi$	Winkel in Grad- oder Bogenmaß,
$W$	Widerstand in kg,	$\delta$	Ablenkungswinkel in Grad,
$L$	Arbeit in $\text{mkg/kg}$ ,	$\alpha$	Neigungswinkel in Grad,
$E$	Energiegehalt in $\text{mkg/kg}$ ,		
$P$	Druck in $\text{kg/m}^2$ oder mm WS,		
$P_0$	atmosphärischer Druck in $\text{kg/m}^2$ ,		
$p$	Druck in $\text{kg/cm}^2$ oder at,		
$\tau$	Schubspannung in $\text{kg/m}^2$ ,		



$\alpha$	Erweiterungswinkel in Grad,	$e$	Ende (bei $P, p$ ),
$\eta$	Wirkungsgrad,	$gem$	Gemisch (bei $\eta, v$ ),
$\xi$	Energiebeiwert,	$ges$	gesamt (bei $P, \gamma, \lambda, \zeta$ ),
$\chi$	relative Verlustleistung,	$G$	Gas (bei $\gamma, \eta$ ),
$\varphi$	Beiwert des Gesetzes der Laminarströmung,	$G$	Gußeisen (bei $\lambda, C$ ),
$J$	Leitungsgefälle,	$h$	stündlich (bei $Q, G$ ),
$\lambda$	Widerstandszahl,	$i$	innen (bei $Q, P, r$ ),
$\zeta = \lambda \frac{l}{d}$	Widerstandszahl bei Geschwindigkeitshöhe allein,	$is$	isothermisch (bei $L, N$ ),
$\beta$	Widerstandszahl = $51\lambda$ ,	$k$	Krümmen (bei $l, \lambda$ ),
$Re$	Reynoldssche Zahl = $\frac{wd}{\nu}$ ,	$krit$	kritisch (bei $w, Re$ ),
$\eta$	unbenannter Randabstand,	$l$	in $l$ -Richtung (bei $w$ ),
$\varphi$	unbenannte Geschwindigkeit,	$L$	Luft (bei $\gamma, t, \eta, R$ ),
$\mu$	Kontraktionskoeffizient,	$m$	Mittel (bei $P, p, \gamma, t, T, r, v, d$ ),
$C, K$	Konstante,	max	maximal (bei $w, w_i, x, N, Re$ ),
$A, B \dots$	Hilfsgrößen,	min	minimal (bei $w$ ),
$a, b \dots$	Hilfsgrößen,	$n$	normal ( $15^\circ, 760 \text{ mm QS}$ ) (bei $P, p, \gamma, w, Q, t, T, v$ ),
$\alpha, \beta \dots$	Hilfsgrößen,	$O$	Oberfläche (bei $\tau$ ),
$b, c, m, n, q, x, y, z$	Exponenten,	$P$	Pumpe (bei $H, \eta, N$ ),
<i>Zahl</i>	Zusammenziehung von unbenannten Größen,	$pol$	polytropisch (bei $L, N$ ),
$f_{zeiger}$	Verhältniszahlen.	$Qu$	Querströmung (bei $\zeta$ ),
<i>Zeiger</i>		$R$	Reibung (bei $K, L, \lambda, P$ ),
$a$	außerhalb, Außenseite (bei $Q, P, r$ ),	$s$	sekundlich (bei $Q, G$ ),
$a$	Anlaufänge (bei $C, l, \delta$ ),	$s$	für das relative Gewicht (bei $C$ ),
$a$	Abzweig (bei $d, Q, w, \zeta$ ),	$s$	Schallgeschwindigkeit (bei $w$ ),
$a$	Anfang (bei $P, p$ ),	$s$	in der Saugleitung (bei $w$ ),
$ad$	adiabatisch (bei $L, N$ ),	$St$	Stahl (bei $\lambda$ ),
$Abl$	Ablösung (bei $\zeta$ ),	$t$	bei $t$ Grad (bei $\eta, v$ ),
$B$	Beschleunigung (bei $\lambda, P$ ),	$t$	für die Temperatur (bei $C$ ),
$d$	Durchgang (bei $Q, w, \zeta$ ),	$T$	Trägheit (bei $K$ ),
$d$	in der Druckleitung (bei $w$ ),	$U$	Undichtigkeit (bei $C$ ),
$d$	Dampf (bei $C$ ),	$u$	Umlenkung (bei $P, \zeta, \lambda$ ),
$dyn$	dynamisch (bei $P$ ),	$\ddot{u}$	überhitzt (bei $C$ ),
$\delta$	Grenzschicht (bei $w_i$ ),	$x$	in der Entfernung $x$ (bei $l, Q$ ),
$e$	eckenrecht (bei $l$ ),	$x, y$	in $x, y$ -Richtung (bei $w, \tau, l, K_R, K_T$ ),
		$z$	zusammen (bei $Q, d, w, \zeta$ ),
		$0$	Null Grad (bei $\eta, v$ ),
		1, 2,	3... an Stelle 1, 2, 3... (bei $l, d, H, F, K, G, Q, E, N, w, P, p, \gamma, v, t, T, Q', \mu, \eta, v, i, u, \lambda, \zeta, Re$ ),

$m_1, m_2, m_3 \dots$  Maßstabsbezeichnung,

QS in mm Quecksilbersäule,

WS in mm Wassersäule.