



Leseprobe

Wilfried Franke, Bernd Platzer

Rohrleitungen

Grundlagen - Planung - Montage

ISBN (Buch): 978-3-446-42450-0

ISBN (E-Book): 978-3-446-42999-4

Weitere Informationen oder Bestellungen unter

<http://www.hanser-fachbuch.de/978-3-446-42450-0>

sowie im Buchhandel.

# Inhaltsverzeichnis

Vorwort .....	5
<b>1 Rohre und Armaturen .....</b>	<b>9</b>
1.1 Rohre .....	9
1.2 Armaturen .....	20
1.2.1 Sperr- und Regeleinrichtungen .....	21
1.2.2 Sicherheitsarmaturen .....	23
1.2.3 Sonderarmaturen .....	25
<b>2 Strömungs- und wärmetechnische Rohrauslegung .....</b>	<b>27</b>
2.1 Strömungscharakteristika .....	27
2.2 Inkompressible Medien .....	28
2.2.1 Berechnung der Rohrreibung .....	28
2.2.2 Verlustbeiwerte von Formstücken .....	39
2.2.3 Kenngrößen von Armaturen .....	39
2.2.4 Rohrleitungsdimensionierung und Pumpenauslegung .....	41
2.2.5 Förderhöhe und Rohrleitungskennlinie .....	46
2.2.6 Bestimmung des optimalen Rohrdurchmessers .....	48
2.2.7 Auswahl von Regelventilen .....	52
2.2.8 Auslegung von Sicherheitsventilen .....	55
2.2.9 Strömungsabriss und Kavitation .....	59
2.2.10 Wirkungsgrad von Rohrleitungen und Diffusoren .....	61
2.2.11 Rohrnetze .....	65
2.3 Strömung kompressibler Medien durch gerade Leitungen .....	71
2.3.1 Ideale Gase .....	71
2.3.2 Verdünnte Gase .....	82
2.3.3 Dampfleitungen .....	83
2.4 Instationäre Strömungsvorgänge .....	85
2.5 Beanspruchungen von Rohrleitungen .....	86
2.5.1 Kraftwirkung bei stationären Strömungen .....	86
2.5.2 Druckstoß .....	88
2.6 Leckage .....	93
2.7 Verweilzeitverteilung .....	94
2.8 Thermische Vorgänge .....	97
2.8.1 Wärmeausdehnung .....	97
2.8.2 Wärmeleitung .....	99
2.8.3 Konvektiver Wärmeübergang .....	106

2.8.4	Wärmedurchgang .....	113
2.8.4.1	Wärmedurchgangskoeffizient .....	113
2.8.4.2	Rohre mit Rippen oder Nadeln .....	114
2.8.4.3	Rohrdämmung .....	115
2.8.4.4	Temperaturänderungen in Rohrleitungen .....	117
2.8.5	Wärmeübertragung durch Strahlung .....	118

### **3 Konstruktive Dimensionierung von Rohrleitungselementen... 123**

3.1	Berechnung der Rohrwanddicke bei Innendruck .....	123
3.1.1	Grundlagen .....	123
3.1.2	Werkstoffprüfung und zulässige Spannung .....	132
3.1.3	Praktische Berechnung der Wanddicke .....	136
3.1.4	Bestell-Wanddicke .....	150
3.2	Flanschverbindungen .....	153
3.3	Berechnung der Wanddicke von Rohrbogen .....	166
3.3.1	Glattrohrbogen .....	166
3.3.2	Segmentbogen .....	172
3.4	Wanddickenberechnung von T-Stücken und Abzweigen .....	174
3.4.1	Arten .....	174
3.4.2	Grundlagen .....	175
3.4.3	Berechnungsansatz .....	178

### **4 Verlegung von Rohrleitungen ..... 189**

4.1	Halterungen .....	189
4.2	Stützweite in einer Rohrleitung .....	192
4.2.1	Einspannung des Rohrs an den Stützen .....	192
4.2.2	Gelenkige Lagerung des Rohrs an den Auflagern .....	194
4.2.3	Betrachtung der Biegespannungen .....	195
4.3	Thermisch belastetes gerades Rohr zwischen zwei Festpunkten .....	200
4.4	Dehnungsausgleich .....	205
4.4.1	Künstlicher Dehnungsausgleich .....	205
4.4.2	Einordnung der Ausgleicher in die Rohrleitung .....	214
4.4.3	Natürlicher Dehnungsausgleich (s. auch [61]) .....	218

### **5 Montage ..... 244**

5.1	Inhalt und Umfang der Montage .....	244
5.2	Voraussetzungen für die Montage .....	245
5.3	Montagedurchführung .....	246
5.3.1	Montageplanung .....	246
5.3.2	Montageablauf .....	261
5.3.2.1	Anlageninterne Rohrleitungen .....	261
5.3.2.2	Lineare Rohrleitungen .....	262
5.3.2.3	Schweißverfahren .....	264
5.3.3	Qualitätssicherung .....	267
5.3.3.1	Qualitätssicherung der Fügestellen .....	269

5.3.3.2	Zerstörungsfreie Schweißnahtprüfung.....	271
5.3.3.3	Innenreinigung von Rohrleitungen .....	273
5.3.3.4	Entrosten und Entzundern von Stahlrohren .....	275
5.3.3.5	Komplexprüfung.....	278
5.4	Vorfertigung.....	280
<b>Anhang</b>	.....	<b>282</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	.....	<b>303</b>
<b>Sachwortverzeichnis</b>	.....	<b>307</b>

# Vorwort

Das vorliegende Buch ist als Lehrbuch zum Gebrauch neben den Vorlesungen konzipiert. Es wendet sich vordergründig an Ingenieurstudenten, die einen verfahrenstechnisch orientierten Studiengang belegen. Erfahrungsgemäß sind in diesen Studiengängen – mehr oder weniger ausgeprägt – Lehrveranstaltungen zur Anlagen- und Apparatechnik bzw. zur Rohrleitungstechnik integriert. Hier ist das Buch geeignet, das Selbststudium zu unterstützen. Von Studierenden mehr maschinenbaulich orientierter Studiengänge kann es ebenfalls mit Gewinn gelesen werden. Auch Praktiker können in ihm Anregungen zur Beantwortung anstehender Fragen finden.

Entsprechend dieser Ausrichtung sind zum Verständnis der behandelten Problematik und zum Nachvollziehen der aufgezeigten Lösungswege Kenntnisse der in den vorgelagerten Lehrveranstaltungen, z. B. Mathematik, Strömungslehre, Wärmelehre (Thermodynamik) und Technische Mechanik vermittelten Grundlagen erforderlich. Davon ausgehend und unter Berücksichtigung des einzuhaltenden Umfangs des Buches, wurde auf eine ausführliche Darstellung prägender Elemente dieser Lehrgebiete verzichtet. Im Buch ist die Anwendung dieser theoretischen Grundlagen auf ausgewählte Fragestellungen aus dem Gebiet der Rohrleitungstechnik vordergründig. Eine vollständige Behandlung aller hier relevanten ingenieurtechnischen Aspekte ist nicht möglich. Dafür sei auf die weiterführende Literatur verwiesen, für deren Nutzung das vorliegende Buch den Einstieg erleichtern soll.

Bei Verweis auf Normen ist stets deren neueste Ausgabe zu nutzen, das gilt auch für andere im Text zitierte Regeln.

Die Autoren sind den Firmen zu Dank verpflichtet, die dieses Projekt durch Bereitstellung von Informationen und die Genehmigung für deren Veröffentlichung sowie durch praktische Hinweise tätig unterstützten. Insbesondere seien hier APRO Ingenieurbüro GmbH Leuna, Sikla GmbH VS-Schwenningen, Witzemann GmbH Pforzheim sowie IMO Industriemontagen Merseburg GmbH genannt.

Dank gebührt dem Fachbereich Ingenieur- und Naturwissenschaften der Hochschule Merseburg (FH) für die Unterstützung bei der Fertigstellung des Manuskriptes. Besonderen Dank schulden die Autoren Herrn *Jochen Horn* vom Carl Hanser Verlag für seine Begleitung des Buchprojektes und sein stets gezeigtes Verständnis! Dank gilt auch Frau *Silke Wienhold*, die die nicht immer einfache Aufgabe übernahm und hervorragend löste, dem Text und den Skizzen die rechte Form zu geben.

Juni 2014

*Wilfried Franke*, Merseburg  
*Bernd Platzer*, Chemnitz

Die **mittlere Strömungsgeschwindigkeit**  $\bar{c}$  bestimmt bei vorgegebenem Durchsatz den Strömungsquerschnitt und ist wie folgt definiert:

$$\bar{c} = \frac{\dot{V}}{A} = \frac{1}{A} \int_0^A c \, dA \quad (2.2)$$

Neben der Gewährleistung des Durchsatzes müssen bei der Festlegung der mittleren Strömungsgeschwindigkeit noch weitere Anforderungen beachtet werden (s. Kap. 2.2.6).

$\lambda$  ist der **Rohrreibungsbeiwert** bzw. die Rohrreibungszahl. Einflussgrößen sind die REYNOLDS-Zahl, Wandrauigkeit, Leitungsabmessungen, Form des Leitungsquerschnitts sowie Stoffeigenschaften. Anhand der Größe der REYNOLDS-Zahl

$$Re = \frac{c_{\text{char}} l_{\text{char}}}{\nu} = \frac{\rho c_{\text{char}} l_{\text{char}}}{\eta} \quad (2.3)$$

erfolgt die Einteilung in **laminare** (Schichtenströmung,  $Re < Re_{\text{krit}}$ ) und **turbulente** (Grundströmung überlagert mit stochastischen Wirbelstrukturen,  $Re > Re_{\text{krit}}$ ) **Strömungen**. Neuere Messungen haben gezeigt, dass auch in ausgebildeten turbulenten Strömungen die Grob- und die Feinturbulenz eine Intermittenz aufweisen. Bei Störungsfreiheit (abgerundeter Einlauf, sorgsam Anfahren, Vermeidung auch kleinster Störungen wie z. B. Schwingungen) kann sich  $Re_{\text{krit}}$  zu sehr großen Werten verschieben. Solche Bedingungen sind jedoch meist nur mit speziellen Laboraufbauten zu erreichen. Die Strömung schlägt dann aber auch schon bei sehr kleinen Störungen um und bleibt danach turbulent. Richtwerte für  $Re_{\text{krit}}$  bei Rohrströmungen unter technischen Bedingungen, bei denen von der Existenz kleiner Störungen (Druckschwankungen, Schwingungen der Rohre u. a.) ausgegangen werden kann, enthält Tabelle 2.1. Sie stellen somit die untere Grenze des Umschlags dar.

Die **mittlere Geschwindigkeit** wird bei Rohrströmungen meist als charakteristische Geschwindigkeit verwendet. Die Stoffwerte werden bei moderaten Druck- und Temperaturänderungen während der Strömung meist auf den mittleren Druck  $(p_1 + p_2)/2$  und die mittlere Temperatur  $(T_1 + T_2)/2$  bezogen.

Die Innenwandung wird durch die **Wandrauigkeit**  $k$  charakterisiert. Sie ist eine mittlere Größe für die Wandunebenheiten. Anhaltswerte enthält Tabelle 2.2, detailliertere Zusammenstellungen gibt es z. B. in [4]. Man unterscheidet zwischen **unregelmäßigen** und **welligen Rauigkeiten** sowie einer **Sandrauigkeit**  $k_s$ , die für Strömungsuntersuchungen im Labor durch dicht aufgeklebte Sandkörner auf Flächen erzeugt wurde. Versuche zeigten, dass bei gleichem Druckverlust die Erhebung bei Wellenrauigkeit ca. fünfmal größer sein kann als die Erhebung der Sandrauigkeit.

Es ist zu beachten, dass sich die Rohrrauigkeiten durch Ablagerungen, Korrosion und Erosion während der Betriebszeit gegenüber dem Neuzustand sehr stark verändern können, was erhebliche Auswirkungen auf den Druckverlust haben und zum vollständigen Verstopfen von Leitungen bzw. zur Lochbildung führen kann. Stahlrohrleitungen verschmutzen weniger als Gussrohre, denn die Gussrohre weisen neben der schon größeren Anfangsrauigkeit viele Muffenverbindungen auf, die das Ablagern mitgeführter Teilchen begünstigen. In Gasleitungen erhöht mitgeführtes Wasser die Korrosion.

**Tabelle 2.1** REYNOLDS-Zahlen für Rohrströmungen und Anhaltswerte für  $Re_{\text{krit}}$ 

Flüssigkeit	$\nu$	$Re$	$Re_{\text{krit}}$
NEWTONSches Fluid $\tau = \eta \dot{\gamma}$	$\nu \neq f(\dot{\gamma})$	$\frac{\bar{c} d}{\nu} = \frac{\dot{V} d}{\nu A}$  Ringspalt, $R_2 > R_1$ : $\frac{2 \dot{V}}{\pi \nu (R_1 + R_2)}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <b>Rohr</b><sup>*)</sup>: 2 320                gekrümmtes Rohr: <math>2 \cdot 10^4 (d/d_k)^{0,32}</math>                für <math>15 &lt; d_k/d &lt; 860</math>,                (<math>d_k</math> siehe Tabelle Anhang A2)</li> <li>▪ <b>Rohrschlange</b>:  <math display="block">2320 \left[ 1 + 8,6 \left( \frac{d}{D} \right)^{0,45} \right]</math>                (D s. Tabelle Anhang A2)</li> <li>▪ <b>oszillierende/pulsierende Strömung</b>:                z. T. deutlich über oder unter 2 320 [13]</li> <li>▪ Kanal (Seite <math>a \geq b</math>, in <math>Re d \rightarrow d_h</math>):  <math display="block">1350 \left( \frac{b}{a} \right)^{1,6} + 2790 \tanh \left( 0,26 \frac{a}{b} \right)</math>                (Anpassung an [46])</li> <li>▪ <b>Ringspalt</b><sup>**)</sup>: (Anpassung an [47])                innerer Zylinder:  <math display="block">2700 \tanh \left[ 1,8 \left( \frac{R_1}{R_2} \right)^{0,4} \right]</math></li> </ul>
BINGHAM-Fluid $\tau = \tau_0 + \eta_B \dot{\gamma}$ ( $\tau_0$ ... Fließgrenze $\tau_w$ ... Wandschubspannung)	$\nu_B = \frac{\tau_0}{\rho \dot{\gamma}} + \nu$	$\frac{\bar{c} d}{\nu_B}$	$\text{Rohr: } 2320 \frac{1 - \frac{4}{3} \frac{\tau_0}{\tau_w} + \frac{1}{3} \left( \frac{\tau_0}{\tau_w} \right)^4}{\left( 1 - \frac{\tau_0}{\tau_w} \right)^3}$ (s. auch [44], [45])
pseudoplastisch ( $n < 1$ ) oder dilatant ( $n > 1$ ) (OSTWALD- DE-WAELE-Fluid) $\tau = k \dot{\gamma}^n$	$\nu_p = k \dot{\gamma}^{n-1}$	$\frac{8 \bar{c}^{2-n} d^n \rho}{k \left( 2 \frac{1+3n}{n} \right)^n}$	$\text{Rohr: } \frac{7144 n}{(1+3n)^2} (2+n)^{\frac{2+n}{1+n}}$

<sup>\*)</sup> Bis  $Re = 3000$  kann die Strömung intermittierend sein. Bei Mikrokanälen wurde von einigen Autoren der Wert für  $Re_{\text{krit}}$  bestätigt, es sind in der Literatur dafür jedoch auch größere oder kleinere Werte zu finden.

<sup>\*\*)</sup> Die Strömung wird zunächst am inneren und erst später am äußeren Zylinder turbulent. Schon eine leicht exzentrische Anordnung des inneren Kerns senkt  $Re_{\text{krit}}$  deutlich [66].

**Tabelle 2.2** Anhaltswerte für die absolute Rauigkeit  $k$  von Rohren

Rohrart	Bemerkung	$k$ (in mm)
gezogene Rohre aus Glas, Messing, Kupfer, Aluminium		< 0,0015
Stahlrohre	gezogen, neu gezogen, angerostet gezogen, stark verkrustet geschweißt, neu	0,04 0,2 3,0 0,05
gusseiserne Rohre	neu gebraucht, angerostet	0,5 1,2
Betonrohre	Glattstrich rau	0,5 3,0
Kunststoffrohre	neu länger gebraucht	< 0,0015 < 0,03

Bei laminaren Strömungen kann der Einfluss der Wandrauigkeit so lange vernachlässigt werden, wie der freie Querschnitt nicht merklich eingeengt wird. Die Größe der Wandrauigkeit hat jedoch im turbulenten Strömungsbereich große Auswirkungen auf das sich ausbildende Strömungsprofil und den sich einstellenden Druckverlust. Man unterscheidet folgende Situationen:

- *hydraulisch glatt*  $\frac{k}{d} \leq 5 Re^{-7/8}$
- *Übergangsbereich*  $5 Re^{-7/8} < \frac{k}{d} < 225 Re^{-7/8}$
- *hydraulisch rau*  $\frac{k}{d} \geq 225 Re^{-7/8}$

Bei **NEWTONSchen Medien** besteht ein linearer Zusammenhang zwischen der Schubspannung  $\tau$  (tangential an einer Fläche angreifende Kraft) und der Deformationsgeschwindigkeit  $\dot{\gamma}$  (Änderung des Deformationswinkels eines Fluidteilchens mit der Zeit, was der Ableitung der Geschwindigkeit quer zur Strömungsrichtung entspricht). Wasser, Gase, Lösungsmittel, viele technische Öle und zumindest näherungsweise die Mehrzahl der dünnflüssigen Einphasensysteme können als NEWTONSche Medien angesehen werden.

**Nicht-NEWTONSche Medien** sind alle Fluide, für die ein anderer als der obige Zusammenhang zwischen der Schubspannung und der Deformationsgeschwindigkeit besteht. Dazu gehören z.B. Polymerschmelzen, viele Lebensmittel (Honig, Zahnpasta) und viele Mehrphasensysteme. Bei nicht-NEWTONSchen Medien und mehrphasigen Strömungen existieren neben der REYNOLDS-Zahl (s. Tabelle 2.1) weitere Einflussgrößen.

Im **laminaren Strömungsbereich** gilt für ein Medium im waagerechten Rohr das HAGEN-POISEUILLE-Gesetz, das schon 1838/1840 gefunden wurde:

$$c(r) = \frac{\Delta p d^2}{16 \eta l} \left[ 1 - \left( \frac{r}{R} \right)^2 \right] = 2 \bar{c} \left[ 1 - \left( \frac{r}{R} \right)^2 \right] \quad (2.4)$$

Dieses Gesetz führt nach Kopplung mit der Gl. (2.1) und einigen Zwischenrechnungen zu dem **Rohrreibungsbeiwert**:

$$\lambda = \frac{64}{Re} \quad (2.5)$$

Das Geschwindigkeitsprofil der **turbulenten Rohrströmung** ist gegenüber dem laminaren in der Mitte flacher und am Rand viel steiler. Das zeitlich gemittelte Profil kann gut mit

$$c = c_{\max} \left[ 1 - \frac{2r}{d} \right]^{1/n} = \frac{(n+1)(2n+1)}{2n^2} \bar{c} \left[ 1 - \frac{2r}{d} \right]^{1/n} \quad (2.6)$$

beschrieben werden, wobei für kleine  $r$  die Abweichung von den Messwerten etwas größer wird, da für Gl. (2.6) in der Rohrmitte die radiale Ableitung der Geschwindigkeit nicht null wird. Der Exponent  $n$  hängt von der REYNOLDS-Zahl und der Wandrauigkeit ab. NUNNER [67] gibt an, dass sowohl für glatte als auch für raue Rohre als gute Näherung verwendet werden kann ( $\lambda$  s. Gl. (2.9)):

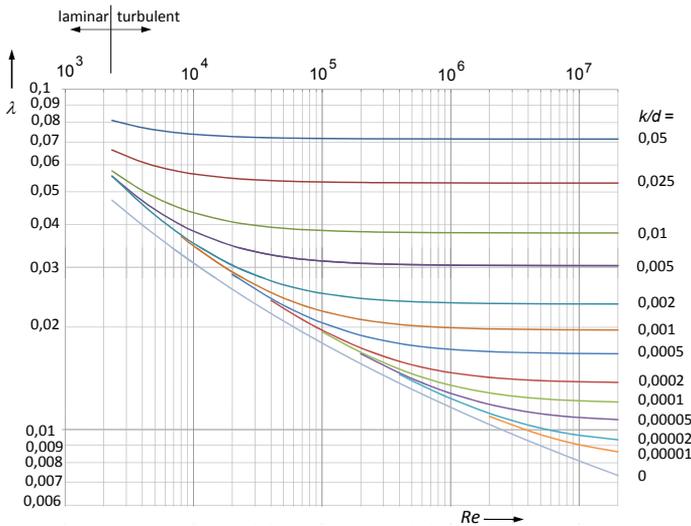
$$n = \frac{1}{\sqrt{\lambda}} \quad (2.7)$$

Für eine laminare Strömung eines NEWTONSchen Mediums in einem Kanal der Höhe  $H$  und der Breite  $B$  (Koordinatenursprung in Kanalmitte,  $x \in [-B/2, B/2]$ ,  $y \in [-H/2, H/2]$ ) ergibt sich die Geschwindigkeit nach [48] zu:

$$c = \frac{\Delta p_V H^2}{8 \eta l} \left\{ 1 - 4 \frac{x^2}{B^2} - \frac{32}{\pi^3} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{(2n-1)^3} \frac{\cosh \left[ (2n-1) \pi \frac{y}{B} \right]}{\cosh \left[ (2n-1) \pi \frac{H}{2B} \right]} \cos \left[ (2n-1) \pi \frac{x}{B} \right] \right\} \quad (2.8)$$

Bei vorgegebenem Druckverlust wird der Durchsatz für einen quadratischen Querschnitt ( $B = H$ ) am größten. Analog zum Rohr sind turbulente Geschwindigkeitsprofile bei Kanalströmungen gegenüber dem laminaren Fall ebenfalls viel völliger. Zusätzlich treten jedoch in den Ecken von Kanälen und in Rohrschlangen Sekundärströmungen auf.

Die verschiedenen Geschwindigkeitsprofile führen zu unterschiedlichen Gleichungen für den Rohrreibungsbeiwert. Der Zusammenhang  $\lambda(Re, k)$  ist in dem Diagramm nach PRANDTL-COLEBROOK dargestellt (Bild 2.1). Die für die unterschiedlichen turbulenten Strömungsbereiche existierenden Gleichungen weichen stark voneinander ab und ermöglichen z. T. nur eine iterative  $\lambda$ -Bestimmung. Deshalb hat man in den letzten Jahren nach Gleichungen gesucht, die für den gesamten turbulenten Bereich gelten und eine iterationsfreie Berechnung von  $\lambda$  ermöglichen. Eine sehr gute Übereinstimmung mit dem PRANDTL-COLEBROOK-Diagramm erreicht der Ansatz von ZIGRANG und SYLVESTER [5]:



**Bild 2.1** Rohrreibungsbeiwert für gerade Rohre in Abhängigkeit von der REYNOLDS-Zahl und der Wandrauigkeit nach Gl. (2.9)

gesamter turbulenter Bereich:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \lg \left\{ \frac{k}{3,7 d} - \frac{5,02}{Re} \lg \left[ \frac{k}{3,7 d} - \frac{5,02}{Re} \lg \left( \frac{k}{3,7 d} + \frac{13}{Re} \right) \right] \right\} \quad (2.9)$$

$$Re > Re_{\text{krit}} \text{ und } \forall \frac{k}{d}$$

Diese Gleichung vereinfacht sich wie folgt:

- glattes Rohr ( $k = 0$ ):

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \lg \left\{ -\frac{5,02}{Re} \lg \left[ -\frac{5,02}{Re} \lg \left( \frac{13}{Re} \right) \right] \right\} \quad (2.9 \text{ a})$$

$$\text{alternativ } \lambda = 0,3164 Re^{-0,25} \quad \text{für } 2300 < Re < 10^5 \quad (2.9 \text{ b})$$

$$\lambda = 0,0032 + 0,221 Re^{-0,237} \quad \text{für } 10^5 < Re < 5 \cdot 10^6 \quad (2.9 \text{ c})$$

- raues Rohr ( $\lambda$ -Wert für  $Re \rightarrow \infty$  aus Gl. (2.9), der aber schon ab  $Re^{7/8} \cdot k/d > 225$  gilt):

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \lg \left( \frac{k}{3,7 d} \right) = -2 \lg \left( \frac{k}{d} \right) + 1,14 \quad (2.9 \text{ d})$$

Bei **nichtkreisförmigen Querschnitten** bleibt die Abhängigkeit von der REYNOLDS-Zahl erhalten, wenn der Durchmesser in der REYNOLDS-Zahl, in der Druckverlustbeziehung und im Verhältnis  $k/d$  durch den hydraulischen Durchmesser ersetzt wird:

$$d_{\text{hydr}} = 4 A_{\text{durchströmt}} / U_{\text{benetzt}} \quad (2.10)$$

Im Massenerhaltungssatz steht jedoch weiterhin die durchströmte Fläche. Diese Definition ergibt für ein volldurchströmtes rundes Rohr den Rohrdurchmesser. Mit dieser Modifizierung können im turbulenten Bereich die für das Rohr gefundenen Formeln für  $\lambda$  übernommen werden. Bei einer laminaren Strömung ändert sich trotz der Verwendung des hydraulischen Durchmessers jedoch noch zusätzlich der Wert des Proportionalitätsfaktors:

$$\lambda = \frac{64 \varphi}{Re_h} \quad (2.11)$$

Die Anpassung der in der Literatur für einen Kanal tabellierten Werte ergibt

$$\varphi = 1,5 - 0,625 \tanh(2,5 h/b) \quad \text{mit } b \text{ längere, } h \text{ kürzere Seite.} \quad (2.12)$$

Tabelle 2.3 liefert Anhaltswerte für den Druckabfall. Tabelle 2.4 fasst die Vorgehensweise zusammen. Strömungsprofile und andere Charakteristika für eckige und elliptische Kanäle sowie Ringkanäle für nicht-NEWTONSche bzw. NEWTONSche Medien findet man z. B. in [21]. Aussagen zu den  $\lambda$ -Werten bei nicht-NEWTONSchen Flüssigkeiten enthalten Tabelle 2.5 sowie die Bilder 2.2 und 2.3.

**Tabelle 2.3** Anhaltswerte für den längenbezogenen Druckabfall in verfahrenstechnischen Anlagen

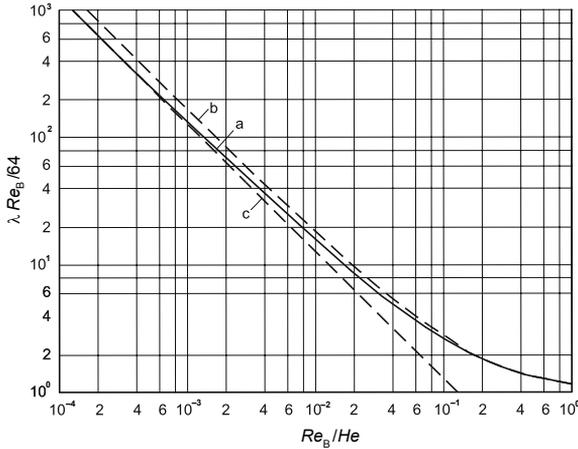
Medium	$\frac{\Delta p}{l}$ (in Pa m <sup>-1</sup> )	$\frac{\Delta p}{\rho_1 l}$ (in m <sup>-1</sup> )
Wasser, besonders Kühlwasser	250...350	
organische Flüssigkeiten	150	
zähe Flüssigkeiten	30...100	
Flüssigkeiten, die aus einem Behälter oder Apparat mit eigenem Gefälle ablaufen sollen	20...50	
drucklose Gase		$(0,2...0,5) \cdot 10^{-4}$
Druckgase		$(0,4...1,5) \cdot 10^{-4}$
Heißdampf		$(0,5...3) \cdot 10^{-4}$
Produktdämpfe		$(10...30) \cdot 10^{-4}$

**Tabelle 2.4** Vorgehen bei der Bestimmung des Rohrreibungsbeiwerts für ein NEWTONSches Medium

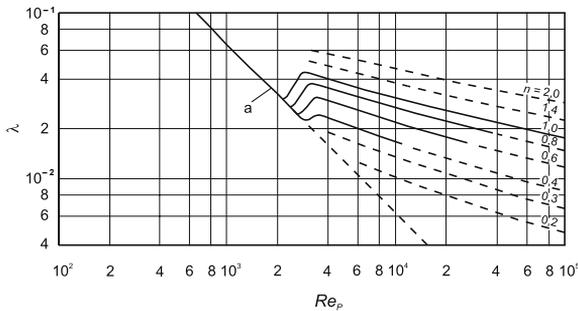
1. Berechnung der REYNOLDS-Zahl (Tabelle 2.1) <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Einbeziehen von <math>d_{\text{hydr}}</math> bei nichtkreisförmigen Strömungsquerschnitten (Gl. (2.10))</li> <li>▪ Berücksichtigung der Temperaturabhängigkeit der Viskosität bei merklichen Temperaturänderungen</li> </ul>
2. Festlegung des Strömungscharakters durch Vergleich der berechneten mit der kritischen REYNOLDS-Zahl (Tabelle 2.1). Bei Mehrphasenströmungen sind weitere Strömungsformen zu beachten!
3. Ermittlung von $k/d_{\text{hydr}}$ bei turbulenten Strömungen (s. Tabelle 2.2)
4. Bei laminaren Strömungen in nichtkreisförmigen Querschnitten zusätzlich Bestimmung des Proportionalitätsfaktors entsprechend Gl. (2.11) und Gl. (2.12)
5. Berechnung von $\lambda$ (laminar: Gl. (2.5) oder (2.11), turbulent: Gl. (2.9)) oder Ablesen aus Bild 2.1

**Tabelle 2.5** Reibungsbeiwerte und Strömungscharakteristika einiger Fluide für ein gerades Rohr ohne Einbauten,  $Re_{krit}$  s. Tabelle 2.1

Flüssigkeit/ Kennwert	$\lambda$	$c(r), \dot{V}$
<p>NEWTONSches Fluid <math>\tau = \eta \dot{\gamma}</math></p>	<p>laminar: Gl. (2.5), (2.11)</p> <p>turbulent: Gl. (2.9) und Bild 2.1</p>	<p>laminar: <math>c(r)</math> in Gl. (2.4)</p> $\dot{V} = \frac{\pi}{128} \frac{d^4}{\eta l} \Delta p$ <p>turbulent: <math>c(r)</math> in Gl. (2.6), (2.7)</p> $\dot{V} = 2,2526 \left( \frac{d^{19} \Delta p^4}{\eta \rho^3 l^4} \right)^{\frac{1}{7}} \text{ für Gl. (2.9b)}$ $\dot{V} = \pi \lg \left( \frac{k}{3,7 d} \right) \sqrt{\frac{d^5 \Delta p}{2 \rho l}} \text{ für Gl. (2.9d)}$
<p>BINGHAM-Fluid <math>\tau = \tau_0 + \eta_B \dot{\gamma}</math> <math>Re_B = \frac{\rho \bar{c} d}{\eta_B}</math>, <math>He = \frac{\rho \tau_0 d^2}{\eta_B^2}</math> <math>r_0 = \frac{2 \tau_0 l}{\Delta p}</math>, <math>\tau_w = \frac{\Delta p d}{4 l}</math></p>	<p>laminar [21]:</p> $\frac{\lambda Re_B}{64} = 1 + \frac{1}{6} \left( \frac{Re_B}{He} \right)^{-1}$ $- 8,138 \cdot 10^{-5} \left( \frac{\lambda Re_B}{64} \right)^{-3} \left( \frac{Re_B}{He} \right)^{-4}$ $\approx \begin{cases} 1 + \frac{1}{6} \left( \frac{Re_B}{He} \right)^{-1} & \frac{Re_B}{He} > 0,1 \\ \frac{1}{8} \left( \frac{Re_B}{He} \right)^{-1} & \frac{Re_B}{He} < 0,001 \end{cases}$ <p>(s. auch Bild 2.2)</p> <p>turbulent [21]:</p> $\lambda = 0,3164 Re_B^{-1/4}$ $\lambda = \max(\lambda_{lam}, \lambda_{turb})$	<p>laminar:</p> $c(r) = \begin{cases} \frac{\tau_w d}{4 \eta_B} \left[ 1 - \frac{r^2}{R^2} - 2 \frac{r_0}{R} \left( 1 - \frac{r}{R} \right) \right] & r \geq r_0 \\ \frac{\tau_w d}{4 \eta_B} \left( 1 - \frac{r_0}{R} \right)^2 & r \leq r_0 \end{cases}$ <p>für <math>0 \geq \tau_w \leq \tau_0</math></p> $\dot{V} = \begin{cases} 0 & \text{für } 0 \geq \tau_w \leq \tau_0 \\ \frac{\pi d^3 \tau_w}{32 \eta_B} \left[ 1 - \frac{4 \tau_0}{3 \tau_w} + \frac{1}{3} \left( \frac{\tau_0}{\tau_w} \right)^4 \right] & \text{für } \tau_w > \tau_0 \end{cases}$
<p>Potenzansatz <math>\tau = k \dot{\gamma}^n</math> <math>Re_P = \frac{8 \rho \bar{c}^{2-n} d^n}{k \left( \frac{2+\delta n}{n} \right)^n}</math></p>	<p>laminar:</p> $\lambda = \frac{64}{Re_P}$ <p>turbulent:</p> $\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = \frac{2}{n^{0,75}} \lg \left[ Re_P \left( \lambda/4 \right)^{1-n/2} \right] - \frac{0,2}{n^{1,2}}$ <p>(s. auch Bild 2.3)</p>	<p>laminar:</p> $\frac{c(r)}{\bar{c}} = \frac{1+3n}{1+n} \left[ 1 - \left( \frac{2r}{d} \right)^{(1+n)/n} \right]$ $\dot{V} = \frac{n \pi d^3}{8(1+3n)} \left( \frac{\Delta p d}{4 k l} \right)^{1/n}$



**Bild 2.2** Rohrreibungsbeiwert  $\lambda$  für ein laminar strömendes Fluid [21]. Kurve a exakte Lösung, b Näherung für große Werte für  $Re_B/He$ , c für kleine Werte für  $Re_B/He$



**Bild 2.3** Rohrreibungsbeiwert  $\lambda$  für ein OSTWALD-DE-WAELE-Fluid [21]. a laminare Strömung

**Beispiel:** Durch Alterungsprozesse ändern sich bei einer durch ein Rohr umgepumpten Flüssigkeit die Fließeigenschaften derart, dass sich bei dem zunächst NEWTONschen Medium eine immer größer werdende Fließgrenze ausbildet. Welche Auswirkungen ergeben sich dadurch bei sonst gleichbleibenden Bedingungen für den Durchsatz?

**Lösung**

Nach Tabelle 2.5 gilt mit  $\eta_B = \eta$  und  $\tau_w = \frac{\Delta p d}{4 l}$

$$\frac{\dot{V}_{\text{BINGHAM}}}{\dot{V}_{\text{NEWTON}}} = \frac{\frac{\pi d^3}{32 \eta} \frac{\Delta p d}{4 l} \left[ 1 - \frac{4 \tau_0}{3 \tau_w} + \frac{1}{3} \left( \frac{\tau_0}{\tau_w} \right)^4 \right]}{\frac{\pi d^4}{128 \eta l} \Delta p} = 1 - \frac{4 \tau_0}{3 \tau_w} + \frac{1}{3} \left( \frac{\tau_0}{\tau_w} \right)^4$$

Somit folgt z. B. für  $\tau_0/\tau_w = 0,1$  für das Volumenstromverhältnis der Wert 0,8667. Für  $\tau_0/\tau_w = 1$  kommt die Strömung vollkommen zum Erliegen.

Bei dem Eintritt eines Fluids in eine Rohrleitung treten **Einlaufeffekte** auf. Das Strömungsprofil nähert sich - eine genügend lange störungsfreie Rohrlänge vorausgesetzt - dem voll ausgebildeten Geschwindigkeitsprofil (s. Gl. (2.4) und (2.6)) an. Diese Distanz ist die

**Einlaufänge.** Die in der Literatur enthaltenen Werte für die Einlaufängen weichen stark voneinander ab [23]. Anhaltswerte sind:

- laminare Rohrströmung [39]  $\frac{l_E}{d} \approx \left[ 0,619^{1,6} + (0,0567 Re)^{1,6} \right]^{1,6}$
- laminare Kanalströmung [39]  $\frac{l_E}{d} \approx \left[ 0,631^{1,6} + (0,0442 Re)^{1,6} \right]^{1,6}$
- turbulente Strömung  $\frac{l_E}{d} \approx \frac{4,88}{\sqrt{\lambda}}$

Durch die Einlaufeffekte treten zusätzliche Druckänderungen auf, die besonders bei kurzen Rohrleitungen (kleine  $l/d$ -Werte) zu berücksichtigen sind (s. Tabelle Anhang A2). Außerdem ändern sich durch die Umbildung des Geschwindigkeitsprofils die kinetische Energie

$$\dot{E}_{\text{kin}} = \frac{\rho}{2} \int_0^A c^3 dA \quad (2.13)$$

und der Impulsstrom

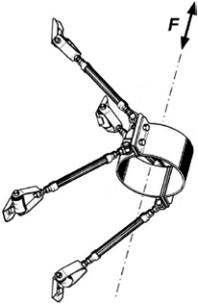
$$\dot{i} = \rho \int_0^A c^2 dA \quad (2.14)$$

Wie sich das bei unterschiedlichen Strömungsprofilen auswirkt, zeigt Tabelle 2.6.

**Tabelle 2.6** Werte für den Impulsstrom und die kinetische Energie bei Rohrströmungen

Profil	$K_1 = \frac{\dot{i}}{\rho \frac{\pi d^2}{4} \bar{c}^2}$	$K_e = \frac{\dot{E}_{\text{kin}}}{\rho \frac{\pi d^2}{8} \bar{c}^3}$
Pfropfen	1	1
Parabel (laminare Strömung, Gl. (2.4))	4/3	2
Potenzfunktion der turbulenten Strömung, Gl. (2.6)	$\frac{(n+1)(2n+1)^2}{4n^2(n+2)}$	$\frac{(2n+1)^3(n+1)^3}{4n^4(n+3)(2n+3)}$
Potenz-Ansatz nicht-NEWTONSches Medium, (Tabelle 2.5), laminar, ( $n = 1$ : Parabel)	$\frac{3n+1}{2n+1}$	$\frac{3(3n+1)^2}{(2n+1)(5n+3)}$

**Nichtisotherme Strömungen** wirken sich zunächst über die Temperaturabhängigkeit der Stoffwerte auf die REYNOLDS-Zahl und somit auf die Größe der Rohrreibungsbeiwerte aus. Es ist deshalb notwendig, die sich ergebende maximale und minimale REYNOLDS-Zahl und deren Einfluss auf die Rohrreibungsbeiwerte zu bestimmen. Radiale Temperaturprofile führen außerdem zusätzlich zu einer Veränderung des Geschwindigkeitsprofils. Dessen Anstieg wird in Wandnähe bei kalter Wand flacher und bei warmer Wand steiler, was in Analogie zu den Modellen für den Wärmeübergangskoeffizienten (s. Kap. 2.8.3) unter Einbeziehung des Viskositätswertes an der Wand  $\eta_w$  mit folgendem Ansatz berücksichtigt werden kann:

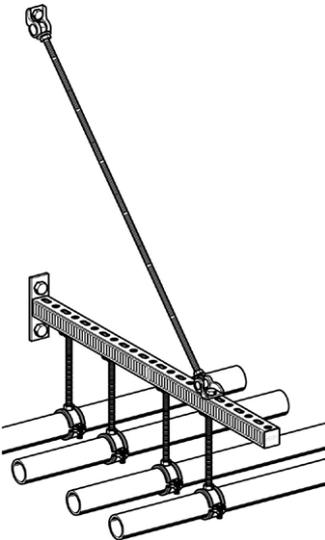


**Bild 4.6** Bockfestpunkt mit wechselnder Rohrkraft  $F$   
(SIKLA GmbH, Hausen)

Rohrhalterungen werden heute industriell gefertigt und zur Verfügung gestellt. Es gibt sie in isolierender Ausführung und auch als schalldämmende Variante. Sofern die Leitungen mit Gefälle verlegt werden müssen, werden höhenverstellbare Halterungen eingesetzt (z. B. Bild 4.2 und Bild 4.4).

Im Hinblick auf die Rationalisierung des Anlagenbauprozesses hat es sich als günstig erwiesen, insbesondere für anlageninterne Rohrleitungen und für Leitungen in Gebäuden, die erforderliche Tragkonstruktion ebenfalls industriell zu fertigen und der Baustelle passfähig anzuliefern (Bilder 4.7 und 4.8).

Im Erdreich verlegte Leitungen erfordern eine satte Lagerung in feinkörnigem Schüttgut (Sand), um Schäden an der Rohraußenseite zu vermeiden. Die Überdeckung über dem Rohrscheitel beträgt etwa 1 000 mm. Eine solche Leitung wird außer durch den Innendruck auch noch durch die Erdlast beansprucht. Die äußere Beanspruchung führt auf das Problem der **Beulbeanspruchung** der Rohrwand bei elastischer Bettung. Dieses Stabilitätsproblem wird hier nicht behandelt.



**Bild 4.7** Vorgefertigtes Element einer Tragkonstruktion  
(SIKLA GmbH, Hausen)



**Bild 4.8** Vorgefertigte Rohrtrasse in einem Gebäude (SIKLA GmbH, Hausen)

## ■ 4.2 Stützweite in einer Rohrleitung

Der Abstand der Unterstützungen in einer Rohrleitung darf nicht zu groß sein, denn dann besteht die Gefahr einer unzulässigen Durchbiegung und letztlich der Schädigung der Rohrleitung. Durch eine Anordnung der Unterstützungen in einem zu kurzen Abstand werden die damit verbundenen Kosten gesteigert, ohne dass dafür eine technische Notwendigkeit gegeben ist. Der Abstand der Rohrhalterungen ist folglich unter Beachtung technischer Sachverhalte festzulegen. Dazu ist eine entsprechende Modellvorstellung erforderlich.

Ganz allgemein stellt eine Rohrleitung einen auf mehreren Stützen gelagerten **Durchlaufträger** dar (Bild 4.9) und müsste so berechnet werden. Zur vereinfachten Berechnung der Stützweite wird die tatsächliche Lagerung jedoch durch geeignete Modelle angenähert. Im folgenden werden zwei Ansätze verfolgt:

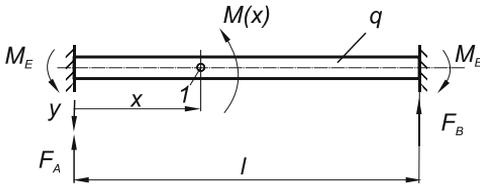
- Einspannung des Rohrs an den Stützen,
- gelenkige Lagerung des Rohrs an den Stützen.



**Bild 4.9** Rohrleitung als Durchlaufträger

### 4.2.1 Einspannung des Rohrs an den Stützen

Bild 4.10 zeigt ein Rohr, das an den Stützen eingespannt ist. Hier greifen die Auflagerkräfte  $F_A$  und  $F_B$  sowie das Einspannmoment  $M_E$  an.  $M(x)$  ist das Schnittmoment. Die Streckenlast  $q$  möge die Eigenlast des Rohrs, des Mediums im Rohr, der Isolierung und der Zusatzlasten, z. B. Schnee, beinhalten.



**Bild 4.10** Rohrleitung mit Einspannmomenten an den Stützen

Die Gleichgewichtsbetrachtung des Rohrfelds ergibt, formuliert am unverformten Rohr:

$$+\uparrow \sum F = 0: \quad F_A + F_B - ql = 0 \quad (4.1)$$

und aus Symmetriegründen

$$F_A = F_B = \frac{ql}{2} \quad (4.2)$$

An der Schnittstelle (1) wirkt das Schnittmoment:

$$\curvearrowright \sum M_{(1)} = 0: \quad M(x) + M_E - F_A x + \frac{qx^2}{2} = 0 \quad (4.3)$$

$$M(x) = F_A x - M_E - \frac{q x^2}{2} = \frac{q l x}{2} - M_E - \frac{q x^2}{2} = -M_E + \frac{q x}{2} (l - x) \quad (4.4)$$

Die Durchbiegung  $y(x)$  des Rohrs ermittelt man mithilfe der Differenzialgleichung der Biegelinie:

$$-E I y''(x) = M(x) \quad (4.5)$$

Setzt man hier Gl. (4.4) ein, so folgt:

$$-E I y''(x) = -M_E + \frac{q x}{2} (l - x) \quad (4.6)$$

und durch Integration

$$-E I y'(x) = -M_E x + \frac{q l x^2}{4} - \frac{q x^3}{6} + C_1 \quad (4.7)$$

$$-E I y(x) = -M_E \frac{x^2}{2} + \frac{q l}{12} x^3 - \frac{q}{24} x^4 + C_1 x + C_2 \quad (4.8)$$

Die Unbekannten  $C_1$ ,  $C_2$  und  $M_E$  sind mittels der folgenden Bedingungen zu bestimmen.

*Randbedingungen:*

$$1. \quad y(0) = 0 \quad \rightarrow \quad C_2 = 0$$

$$2. \quad y'(0) = 0 \quad \rightarrow \quad C_1 = 0$$

*Symmetriebedingung:*

$$3. \quad y'\left(\frac{l}{2}\right) = 0 \quad \rightarrow \quad M_E = \frac{q l^2}{12} \quad (4.9)$$

Damit folgt als Gleichung für die Biegelinie

$$-E I y(x) = \frac{-q l^2 x^2}{24} + \frac{q l}{12} x^3 - \frac{q}{24} x^4$$

und nach Umformen

$$y(x) = \frac{q l^4}{24 E I} \left(\frac{x}{l}\right)^2 \left(1 - \frac{x}{l}\right)^2 \quad (4.10)$$

Die maximale Durchbiegung in der Mitte des Stützfelds ( $x = l/2$ ) unter der Annahme, dass die Rohrenden an den Auflagern starr eingespannt sind, ist somit

$$y_{\max} = \frac{q l^4}{384 E I} \quad (4.11)$$

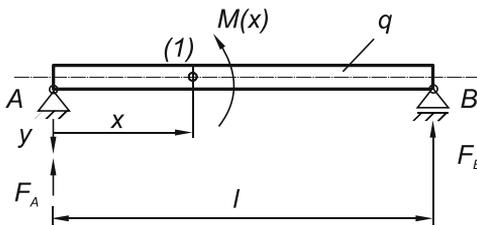
Bei Vorgabe der Durchbiegung erhält man hieraus die Stützweite:

$$l = \sqrt[4]{\frac{384 E I y_{\max}}{q}} \quad (4.12)$$

Bei der Bewertung des Ergebnisses zu ist beachten, dass das Rohr am Auflager nicht starr eingespannt ist und es auch nicht nur auf zwei Stützen aufliegt.

#### 4.2.2 Gelenkige Lagerung des Rohrs an den Auflagern

Die hierfür relevanten Verhältnisse sind in Bild 4.11 dargestellt.



**Bild 4.11** Gelenkige Lagerung des Rohrfelds

Zunächst sind zur Bestimmung der Auflagerreaktionen wieder die Gleichgewichtsbedingungen zu formulieren:

$$+\uparrow \sum F = 0: F_A + F_B - ql = 0 \quad (4.13)$$

Aus Symmetriegründen ist  $F_A = F_B$ . Das Momentengleichgewicht um das Auflager A ergibt

$$\curvearrowright \sum M_A = 0: F_B l - \frac{ql^2}{2} = 0 \quad (4.14)$$

und damit

$$F_A = F_B = \frac{ql}{2} \quad (4.15)$$

Das Schnittmoment ergibt sich zu:

$$\curvearrowright \sum M_{(1)} = 0: M(x) - F_A x + \frac{qx^2}{2} = 0 \quad (4.16)$$

und wegen Gl. (4.15) zu

$$M(x) = \frac{qx}{2}(l-x) \quad (4.17)$$

Mit Gl. (4.5) und nach Integration wird dann

$$\begin{aligned}
 -EI y'' &= \frac{q}{2} (lx - x^2) \\
 -EI y' &= \frac{q}{2} \left( l \frac{x^2}{2} - \frac{x^3}{3} \right) + C_1 \\
 -EI y &= \frac{q}{2} \left( l \frac{x^3}{6} - \frac{x^4}{12} \right) + C_1 x + C_2
 \end{aligned} \tag{4.18}$$

Mit den Randbedingungen  $y(0) = 0$  und  $y(l) = 0$  folgen  $C_2 = 0$  und  $C_1 = -ql^3/24$ . Eine weitere Möglichkeit, die Integrationskonstante  $C_1$  zu bestimmen, bietet die Symmetriebedingung für die Mitte des Stützabstandes  $y'(l/2) = 0$ , was erwartungsgemäß zur gleichen Lösung führt. Setzt man die Konstanten ein, so ergibt sich die Durchbiegung zu

$$y(x) = \frac{ql^3 \cdot x}{24 EI} \left[ 1 - 2 \left( \frac{x}{l} \right)^2 + \left( \frac{x}{l} \right)^3 \right] \tag{4.19}$$

Die maximale Durchbiegung ergibt sich hieraus wiederum an der Stelle  $x = l/2$  zu

$$y_{\max} \left( \frac{l}{2} \right) = \frac{5}{384} \frac{ql^4}{EI} \tag{4.20}$$

Der Vergleich mit Gl. (4.11) zeigt, dass die Durchbiegung bei Annahme einer gelenkigen Lagerung in der Mitte des Feldes zwischen den Auflagern fünfmal größer ist, d. h., eine feste Einspannung am Auflager verringert deutlich die Durchbiegung des Rohrs. Allerdings ist mit einer festen Einspannung nur in Ausnahmefällen zu rechnen, etwa bei einem kurzen Anschlussstück eines Rohrs größerer Nennweite an einen großen Behälter. Für Rohrleitungen auf Rohrbrücken oder auf Sockeln trifft eher die Annahme einer gelenkigen Lagerung zu.

Bei gegebener Nennweite und Durchbiegung ist die Stützweite aus Gl. (4.20) bestimmbar:

$$l = \sqrt[4]{\frac{384 EI y_{\max}}{5 q}} \tag{4.21}$$

In der Praxis akzeptiert man meist 1 mm Durchbiegung pro 1 m Länge. Die TRR 100 empfiehlt in Abhängigkeit von der Rohr-Nennweite für  $\leq DN 50$   $y_{\max} = 3$  mm und für  $> DN 50$   $y_{\max} = 5$  mm. Damit soll eine „Pfüßenbildung“ in der Leitung vermieden werden.

### 4.2.3 Betrachtung der Biegespannungen

Bei der Durchbiegung entstehen in der Rohrwand Biegespannungen  $\sigma_b = M/W$ . Mit dem Widerstandsmoment

$$W = \frac{2 I}{d_a} = \frac{\pi (d_a^4 - d_i^4)}{32 d_a} \tag{4.22}$$

ergibt sich dann

$$\sigma_b(x) = \frac{32 M(x) d_a}{\pi (d_a^4 - d_i^4)} \quad (4.23)$$

Hierin ist  $M(x)$  gemäß den Lagerungsbedingungen einzusetzen. Diese Gleichung kann bei gegebenem Stützabstand zur Berechnung der vorhandenen Spannung genutzt werden. Sie kann aber auch, wenn man  $\sigma_b = \sigma_{zul}$  setzt, nach der entsprechend der Biegespannung zulässigen Stützweite umgestellt werden. Für die beiden Lagerungsarten gilt:

a) *feste Einspannung*

Mit  $M(x)$  folgt aus Gl. (4.4) unter Berücksichtigung von Gl. (4.9) die Biegespannung in der Feldmitte zu

$$\sigma_b\left(\frac{l}{2}\right) = \frac{4 q d_a l^2}{3 \pi (d_a^4 - d_i^4)} \quad (4.24)$$

bzw. nach Einführung der zulässigen Spannung die Stützweite

$$l = \sqrt{\frac{3 \pi (d_a^4 - d_i^4) \sigma_{zul}}{4 q d_a}} \quad (4.25)$$

b) *gelenkige Lagerung*

$M(x)$  aus Gl. (4.17) eingesetzt, ergibt die Gleichung für die Spannung

$$\sigma_b(x) = \frac{16 d_a q l^2 \frac{x}{l} \left(1 - \frac{x}{l}\right)}{\pi (d_a^4 - d_i^4)} \quad (4.26)$$

Mit der zulässigen Spannung in Feldmitte erhält man

$$l = \sqrt{\frac{\pi (d_a^4 - d_i^4) \sigma_{zul}}{4 q d_a}} \quad (4.27)$$

Im Vergleich zur Gl. (4.25) bei fester Einspannung ist zu erkennen, dass die zulässige Spannung bei gelenkiger Lagerung schon bei geringerer Stützweite erreicht wird, d. h., das Modell „gelenkige Lagerung“ führt unter Bezug auf die Biegespannung zu einer geringeren Stützweite als das Modell „feste Einspannung“.

Die zulässige Spannung muss so definiert werden, dass sie den üblichen Beanspruchungen einer auf Stützen gelagerten Rohrleitung genügt. Insofern unterscheidet sie sich von der zulässigen Spannung, die bei der Ermittlung der Rohrwanddicke im Kap. 3.1.2 verwendet wurde. Die TRR 100 setzt daher  $\sigma_{zul} = 40 \text{ N/mm}^2$  an.

**Hinweis:** Hier wurde unterstellt, dass der Kreisquerschnitt des Rohrs erhalten bleibt. Diese Annahme ist bei geringen Durchbiegungen vertretbar, sie muss aber im Zusammenhang mit Elastizitätsbetrachtungen an Rohrleitungen aufgegeben werden.

Die **Streckenlast** erfasst alle für die Belastung der Leitung maßgeblichen Komponenten, soweit sie als längenabhängig angesehen werden können. Einzellasten, wie z. B. die im Bereich installierter Armaturen, müssen separat berücksichtigt werden. Hierzu sei auf die TRR 100 verwiesen. Längenabhängige Lastkomponenten ergeben sich aus dem Rohrmaterial  $R$ , der Dämmung  $D$ , der Blechummantelung  $B$  und dem Medium  $M$ :  $q = q_R + q_M + q_D + q_B$ . Im Einzelnen sind dies:

- *Streckenlast durch die Rohreigenmasse*

$$q_R = \frac{g m_R}{l} = \frac{g V_R \rho_R}{l} = g \rho_R A_R = g \rho_R \frac{\pi}{4} (d_a^2 - d^2) \quad (4.28)$$

- *Streckenlast durch das Medium*

$$q_M = \frac{g M_M}{l} = g \rho_M A_M = g \rho_M \frac{\pi d^2}{4} \quad (4.29)$$

- *Streckenlast durch die Dämmung*

$$q_D = g \rho_D (d_a + s_D) \pi s_D \quad (4.30)$$

$s_D$  Dicke der Dämmung

- *Streckenlast durch den Blechmantel der Isolierung*

$$q_B = \frac{g M_B}{l} = g \rho_B A_B = g \rho_B s_B (d_a + 2 s_D + s_B) \pi \approx g \rho_B s_B (d_a + 2 s_D) \pi \quad (4.31)$$

$s_B$  Dicke des Blechmantels

Weiterhin sind im Bedarfsfall **Schnee-** und **Windlasten** zu berücksichtigen. Es ist darauf hinzuweisen, dass die hier vorgestellte Rechnung vordergründig allgemeine theoretische Aspekte berücksichtigt. Für praktische Rechnungen enthält die TRR 100 Anhaltswerte zur Bestimmung der Streckenlast, s. Tabelle 4.1.

**Tabelle 4.1** Anhaltswerte zur Bestimmung der Streckenlast,  $s_B$  ... Dicke des Mantelblechs

Komponente der Streckenlast	Anhaltswert
Medium	$\rho_M = 1\,000 \text{ kg/m}^3$
Rohr	$\rho_R = 7\,900 \text{ kg/m}^3$
Dämmstoff	$\rho_D = 120 \text{ kg/m}^3$
Blechmantel	$\rho_B s_B = 10 \text{ kg/m}^2$

**Beispiel:** Eine isolierte Rohrleitung aus Rohr  $406,4 \times 8,8$  DIN EN 10216-1 für Wasser soll auf Sockeln verlegt werden. Welchen Abstand müssen die Sockel haben?

### Lösung

Es werden beide Modelle für die Rohrlagerung und auch die Spannungsverhältnisse betrachtet. Zunächst ist es erforderlich, die Streckenlast  $q$  zu bestimmen.

$$\text{Gl. (4.28): } q_R = 9,81 \cdot 7\,900 \cdot \frac{\pi}{4} (406,4^2 - 388,8^2) \cdot \frac{10^3}{1\,000^3} \frac{\text{N}}{\text{m}} = 851,8 \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

$$\text{Gl. (4.29): } q_M = 9,81 \cdot 1\,000 \cdot \frac{388,8^2 \cdot \pi}{4} \cdot \frac{1}{1\,000^2} \frac{\text{N}}{\text{m}} = 1\,164,7 \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

$$\text{Gl. (4.30): } q_D = 9,81 \cdot 120 \cdot (406,4 + 80) \cdot \pi \cdot 80 \cdot \frac{1}{1\,000} \frac{\text{N}}{\text{m}} = 143,9 \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

$$\text{Gl. (4.31): } q_B = 9,81 \cdot 10 \cdot (406,4 + 2 \cdot 80) \cdot \pi \cdot \frac{1}{1\,000} \frac{\text{N}}{\text{m}} = 174,6 \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

Mit diesen Komponenten wird die Streckenlast

$$q = (851,8 + 1\,164,7 + 143,9 + 174,6) \text{ N/m} = 2\,335 \text{ N/m.}$$

Weiterhin wird das Flächenträgheitsmoment benötigt:

$$I = \frac{\pi}{64} (406,4^4 - 388,8^4) \text{ mm}^4 = 2,173 \cdot 10^8 \text{ mm}^4$$

#### a) feste Einspannung

Berechnung der Stützweite bei  $y_{\max} = 5 \text{ mm}$  mit Gl. (4.12) und  $E = 2 \cdot 10^5 \text{ N/mm}^2$

$$l = \sqrt[4]{\frac{384 \cdot 2 \cdot 10^5 \cdot 2,173 \cdot 10^8 \cdot 5 \cdot 1\,000}{2\,335}} \text{ mm} = 13\,750 \text{ mm}$$

Kontrolle der Durchbiegung je Meter Stützweite:

$$\frac{5 \text{ mm}}{13,75 \text{ m}} = 0,36 \frac{\text{mm}}{\text{m}} < 1 \frac{\text{mm}}{\text{m}}$$

Kontrolle der vorhandenen Spannung mit Gl. (4.24):

$$\sigma_{\text{vorh.}} \left( \frac{l}{2} \right) = \frac{4 \cdot 2\,335 \cdot 406,4 \cdot 13\,750^2}{3 \cdot \pi \cdot (406,4^4 - 388,8^4) \cdot 1\,000} \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} = 17,2 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} < 40 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Stützweite unter Beachtung der zulässigen Spannung aus Gl. (4.25):

$$l = \sqrt{\frac{3 \cdot \pi (406,4^4 - 388,8^4) \cdot 40 \cdot 1\,000}{4 \cdot 2\,335 \cdot 406,4}} \text{ mm} = 20\,969 \text{ mm}$$

Kontrolle der Durchbiegung in der Feldmitte mit Gl. (4.11):

$$y_{\max} = \frac{2 \cdot 335 \cdot 20 \cdot 969^4}{384 \cdot 2 \cdot 10^5 \cdot 2,173 \cdot 10^8 \cdot 1 \cdot 000} \text{ mm} = 27,0 \text{ mm} > 5 \text{ mm}$$

Diese Durchbiegung ist im Hinblick auf „Pfüßenbildung“ im Rohr zu groß. Berechnet man auch noch die Durchbiegung je Meter Stützweite, erhält man mit  $27,0/20,969 \text{ mm/m} = 1,31 \text{ mm/m}$  ebenfalls einen zu großen Wert. Die zulässige Spannung ist hier als Planungskriterium ungeeignet. Der Stützabstand ist mit Bezug auf funktionsbestimmende technologische Anforderungen zu planen.

b) *gelenkige Lagerung*

Berechnung der Stützweite mit  $y_{\max} = 5 \text{ mm}$  und Gl. (4.21)

$$l = \sqrt[4]{\frac{384 \cdot 2 \cdot 10^5 \cdot 2,173 \cdot 10^8 \cdot 5 \cdot 10^3}{5 \cdot 2 \cdot 335}} \text{ mm} = 9 \, 195 \text{ mm}$$

Kontrolle Durchbiegung je m Stützweite:

$$\frac{5 \text{ mm}}{9,195 \text{ m}} = 0,54 \frac{\text{mm}}{\text{m}} < 1 \frac{\text{mm}}{\text{m}}$$

Kontrolle der Spannung mit Gl. (4.26) bei  $x = l/2$ :

$$\sigma_{\text{vorh.}} \left( \frac{l}{2} \right) = \frac{16 \cdot 406,4 \cdot 2 \cdot 335 \cdot 9 \, 195^2 \cdot 0,25}{\pi \cdot (406,4^4 - 388,8^4) \cdot 1 \, 000} \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} = 23,08 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} < 40 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Stützweite unter Berücksichtigung der zulässigen Spannung mit Gl. (4.27):

$$l = \sqrt{\frac{40 \cdot \pi \cdot (406,4^4 - 388,8^4) \cdot 1 \, 000}{4 \cdot 406,4 \cdot 2 \cdot 335}} \text{ mm} = 12 \, 106 \text{ mm}$$

Mit dieser Stützweite ist die Durchbiegung nach Gl. (4.20)

$$y_{\max} = \frac{5 \cdot 2 \cdot 335 \cdot 12 \, 106^4}{384 \cdot 2 \cdot 10^5 \cdot 2,173 \cdot 10^8 \cdot 1 \, 000} \text{ mm} = 15,0 \text{ mm} > 5 \text{ mm}$$

Auch bei gelenkiger Lagerung ist die spannungsbezogene Stützweite zu verwerfen. Die Durchbiegung je Meter Stützweite ist zu groß. Ein Vergleich mit den Tabellenwerten in TRR 100 ergibt Stützweiten in ähnlicher Größe.

Der gesuchte Abstand der Sockel richtet sich nach den obigen, auf die Durchbiegung bezogenen Werten, es muss aber noch eine Belastung durch Schnee und Eis berücksichtigt werden. Außerdem ist eine zusätzliche Belastung, z. B. durch spielende Kinder, zu bedenken.

## ■ 4.3 Thermisch belastetes gerades Rohr zwischen zwei Festpunkten

Zur Erklärung des grundsätzlichen Zusammenhangs wird hier ein senkrechtes, zwischen zwei Festpunkten eingespanntes Rohr betrachtet, das bei Raumtemperatur montiert wird und anschließend einer Erwärmung ausgesetzt ist. Zwischen den Festpunkten sollen keine weiteren Abstützungen (z. B. Gleitlager) angeordnet sein. Die Annahme der vertikalen Leitungsführung hat den Vorteil, dass die Eigenmasse der Leitung aus den Betrachtungen ausgeschlossen werden kann. Die weitere Behandlung erfolgt nunmehr mit der elementaren Stabilitätstheorie. In diesem Zusammenhang wird noch vorausgesetzt, dass das Rohr ideal gerade ist und einen exakt kreisförmigen Querschnitt mit konstanter Wanddicke hat. Aus praktischer Sicht ist diese Annahme eher zu verwerfen, da allein die nach der Norm zulässigen Toleranzen dem entgegenstehen.

Rohre dehnen sich bei Erwärmung aus. Ihre Erwärmung kann infolge des in ihnen strömenden Fluids oder auch infolge der Umweltbedingungen (z. B. durch Sonneneinstrahlung) erfolgen. Es gilt:

$$l_{\vartheta} = l_0 (1 + \alpha \Delta \vartheta) \quad (4.32)$$

Infolge der starren Einspannung wird die temperaturbedingte Längenänderung verhindert und auf die beiden Einspannstellen die Druckkraft  $F_{\vartheta} = \sigma_{\vartheta} A$  ausgeübt, wobei  $A$  die Querschnittsfläche der Rohrwand ist. Führt man hier das HOOKEsche Gesetz  $\sigma = \varepsilon E$  ein, ergibt sich mit der Dehnung  $\varepsilon = \Delta l / l_0 = \alpha \Delta \vartheta$  die temperaturbedingte Druckkraft (Knickkraft):

$$F_{\vartheta} = \alpha \Delta \vartheta E A \quad (4.33)$$

Die Wärmespannung  $\sigma_{\vartheta} = \alpha \Delta \vartheta E$  ist somit nicht von geometrischen Größen abhängig. Zur Berechnung ist neben dem Wärmeausdehnungskoeffizienten noch der Elastizitätsmodul  $E$  des Rohrwerkstoffs erforderlich. Auch er hängt vom Werkstoff und von der Temperatur ab. Nach DIN EN 13480-3 ist für die Temperaturabhängigkeit der Ansatz geeignet:

$$E = a_1 + b_1 \vartheta + c_1 \vartheta^2 \quad E \text{ in kN/mm}^2, \vartheta \text{ in } ^\circ\text{C} \quad (4.34)$$

In Tabelle 4.2 sind die Koeffizienten für die Stahlsorten aufgeführt. In Tabelle 2.25 wurde schon ein Polynom zur Berechnung des linearen Wärmeausdehnungskoeffizienten ange-

**Tabelle 4.2** Koeffizienten der Gl. (4.34) für die Temperaturabhängigkeit des Elastizitätsmoduls nach DIN EN 13480-3

Stahlgruppe	$a_1$	$b_1$	$c_1$	Gültigkeitsbereich
<b>ferritisch</b>				
1 bis 4, 5.1 und 5.2	213,16	$-6,91 \cdot 10^{-2}$	$-1,824 \cdot 10^{-5}$	$20 \text{ }^\circ\text{C} \leq \vartheta < 600 \text{ }^\circ\text{C}$
5.3, 5.4, 6 und 7	215,44	$-4,28 \cdot 10^{-2}$	$-6,185 \cdot 10^{-5}$	
<b>austenitisch</b>				
8.1 und 8.2	201,66	$-8,48 \cdot 10^{-2}$	0	$20 \text{ }^\circ\text{C} \leq \vartheta < 800 \text{ }^\circ\text{C}$

geben. Nach der Norm sollte, wenn die von einer Temperaturdifferenz verursachte Spannung zu berechnen ist, als Temperatur

$$\vartheta = 0,75 \max(\vartheta_1, \vartheta_2) + 0,25 \min(\vartheta_1, \vartheta_2) \quad \vartheta \text{ in } ^\circ\text{C} \quad (4.35)$$

verwendet werden.

Die Einspannstellen nehmen nicht nur Kräfte in vertikaler und horizontaler Richtung, sondern auch Biegemomente auf, die hier als **Einspannmoment** bezeichnet werden.

Die Längskraft wird durch die verhinderte thermische Dehnung hervorgerufen, s. Gl. (4.33). Das verformte Rohr (Bild 4.12) kann mithilfe der Differentialgleichung für die Biegelinie Gl. (4.5) beschrieben werden. Zur Bestimmung des Biegemoments  $M(x)$  wird der obere Teil des eingespannten Rohrs betrachtet (Bild 4.13), wobei die Verformung  $y(x)$  zwar klein ist, aber hier nicht vernachlässigt wird (Theorie II. Ordnung):

$$\Leftrightarrow \sum M_{(1)} = 0: \quad M(x) + M_E - F y(x) = 0$$

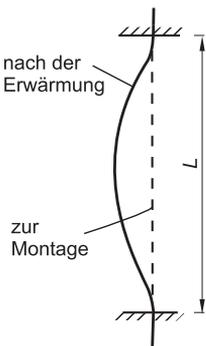
$$\rightarrow M(x) = F y(x) - M_E \quad (4.36)$$

Das Einsetzen in die allgemeine Differentialgleichung der Biegelinie Gl. (4.5) ergibt:

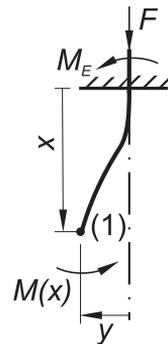
$$EI y''(x) = M_E - F y(x) \quad \text{bzw.} \quad y''(x) + \frac{F}{EI} \cdot y(x) = \frac{M_E}{EI} \quad (4.37)$$

Diese inhomogene lineare Differentialgleichung mit konstanten Koeffizienten kann mit der Substitution  $y(x) = w(x) + M_E/F$  in die homogene Differentialgleichung  $w''(x) + F/(EI) w(x) = 0$  überführt werden. Für die allgemeine Lösung dieser Gleichung wird der Ansatz  $w(x) = e^{p x}$  empfohlen. Damit folgen  $w'(x) = p e^{p x}$  und  $w''(x) = p^2 e^{p x}$ . Nach Einsetzen dieser Ausdrücke und der Division durch  $e^{p x}$  folgt die „charakteristische Gleichung“ der Differentialgleichung  $p^2 + F/(EI) = 0$ . Sie hat die beiden Lösungen

$$p_1 = +\sqrt{-\frac{F}{EI}} = \sqrt{\frac{F}{EI}} i \quad \text{und} \quad p_2 = -\sqrt{-\frac{F}{EI}} = -\sqrt{\frac{F}{EI}} i$$



**Bild 4.12** Modell des eingespannten Rohres



**Bild 4.13** Schnittgrößen



b)



c)

**Bild 5.14** (Fortsetzung) Rohrbrücke. b) Rohrbrücke mit z. T. gedämmten Rohrleitungen [115],  
c) Leitungen auf Rohrbrücke mit noch unbehandelten Schweißnähten [115]

Erdverlegte Leitungen mit langen Strecken der Trasse, z.B. im Pipelinebau, erfordern besonders hohe Montageleistungen. Um sie zu erreichen, werden die Rohre neben dem Rohrgraben vorgestreckt und komplett, d.h. auch mit den zugehörigen Bögen, zu ebener Erde verschweißt und geprüft. Das Absenken in den vorbereiteten Rohrgraben erfolgt mittels mehrerer gleichzeitig eingesetzter Seitenbaumtraktoren.

### 5.3.2.3 Schweißverfahren

Das Verschweißen der Rohre (z.B. Bild 5.15) ist in hohem Maße spezialisiert, d.h., das Schweißen einer Naht nimmt ein Team vor und zwar so, dass jeder Schweißer nur eine bestimmte Schweißlage ausführt, beispielsweise die Wurzelnaht. Nachfolgende Schweißer stellen dann



**Bild 5.15** Schweißarbeiten an Rohren [115]

die Füll- und Decklagen her [54]. Im Rohrleitungsbau, insbesondere auf der Baustelle unter den dort gegebenen Bedingungen, finden nicht alle Schweißverfahren Anwendung.

Bewährte Verfahren sind:

#### *Gasschmelzschweißen (Autogenschweißen)*

Durch eine Brenngas-Sauerstoff-Flamme werden der Grundwerkstoff des Rohrs und der Zusatzwerkstoff aufgeschmolzen und verbunden. Als Brenngas dient in der Regel Acetylen, es können aber auch z. B. Erdgas und Propangas verwendet werden. Der Zusatzwerkstoff soll in seiner chemischen Zusammensetzung dem Grundwerkstoff ähnlich sein.

#### *Lichtbogenhandschweißen (Elektrodenhandschweißen)*

Dieses Verfahren wird auf der Baustelle am häufigsten angewendet. Ein offener Lichtbogen brennt zwischen einer abschmelzenden Elektrode (Zusatzwerkstoff) und dem Grundwerkstoff. Es werden sowohl Gleich- als auch Wechselspannung verwendet. Als Stromquellen stehen Schweißumformer, -gleichrichter und -transformatoren zur Verfügung. Der Typ der Umhüllung der Elektroden hat wesentlichen Einfluss auf die Festigkeitseigenschaften des Schweißguts. Üblich sind Elektroden mit basischer Umhüllung sowie Zellulose- und Rutilumhüllung. Letztere haben sich für die Wurzelschweißung und auch für Füll- und Decklagen bewährt. Die zelluloseumhüllten Elektroden wendet man vorzugsweise im Fernrohrleitungsbau an. Basisch umhüllte Elektroden eignen sich für größere Schweißquerschnitte bzw. -volumina.

#### *Wolfram-Inertgas-Schweißen (WIG)*

Der Lichtbogen brennt zwischen einer nicht abschmelzenden Wolframelektrode und dem Rohr, wobei eine Schutzgasatmosphäre aus Argon das Schweißbad vor dem Luftzutritt schützt. Der Zusatzwerkstoff wird stromlos zugeführt. Es kann mit Wechsel- oder Gleichstrom gearbeitet werden. Das Verfahren eignet sich gut für das Schweißen der Nahtwurzel bei allen Stählen.

*Metall-Inertgas-Schweißen (MIG)*

Es ähnelt dem WIG-Schweißen, hat allerdings als Elektrode den abschmelzenden Zusatzwerkstoff. Als Inertgas kommt hauptsächlich Argon, auch mit zugefügten Komponenten anderer Gase (z. B. CO<sub>2</sub>), zum Einsatz. Es wird Gleichstrom verwendet.

*Metall-Aktivgas-Schweißen (MAG, CO<sub>2</sub>-Schutzgasschweißen)*

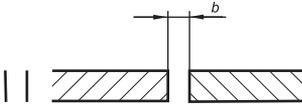
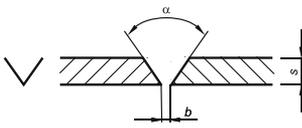
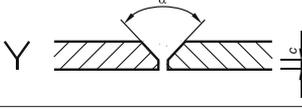
Das Verfahren stimmt im Prinzip mit dem WIG-Verfahren überein, allerdings dient als Schutzgas reines CO<sub>2</sub> oder auch mit Argon oder Helium versetztes CO<sub>2</sub>. Es wird nur mit Gleichstrom gearbeitet. Umfassende Informationen hierzu sind in [54] und [71] zu finden. Eine Übersicht über die Anwendung der Verfahren enthält Tabelle 5.5.

**Tabelle 5.5** Ausgewählte Schweißverfahren (Auszug nach [54])

Schweißverfahren	Kurzzeichen	Anwendungsbereich				Bemerkung
		Wanddicke (in mm)	DN	Schweißlagen	Anwendungs-ort	
Gasschmelzschweißen	G	≤ 6	≤ 150	eine Lage	Montagestelle, Werkstatt	nicht für hochlegierte Stähle
Elektrodenhandschweißen	E	≤ 6	> 150	Wurzel,	Montagestelle, Werkstatt	
		> 6	alle	Füll-, Deck-, Kapplage		
Wolfram-Inertgas-Schweißen	WIG	alle	alle	Wurzel	Montagestelle, Werkstatt	alle Stähle
				Füll-, Decklage		hochlegierte und warmfeste Stähle
Metall-Aktivgas-Schweißen	MAG	alle	> 100	Wurzel, Füll-, Deck-, Kapplage	Werkstatt	nicht- und niedriglegierte Stähle
Metall-Inertgas-Schweißen	MIG	> 3	> 150	Füll-, Deck-, Kapplage	Werkstatt	hochlegierte Stähle

Die Schweißfuge (Tabelle 5.6) kann durch thermisches Trennen oder durch maschinelle spangebende Bearbeitung hergestellt werden. Die I- und V-Nahtvorbereitung wird bei geringeren Wanddicken durch Brennschneiden vorgenommen. Bei größeren Wanddicken und höheren Qualitätsanforderungen an die Naht ist die mechanische Bearbeitung der Schweißfuge erforderlich. Die Schweißnaht wird in Abhängigkeit von der Wanddicke in mehreren Lagen aufgebaut: Wurzel-, Füll- und Decklagen. Bei zweiseitiger Zugänglichkeit zur Naht besteht die Möglichkeit, bei Bedarf die Wurzel zu entfernen und eine Kappnaht zu schweißen. Zur Sicherung der Nahtqualität kann eine thermische Vor- und/oder Nachbehandlung, abhängig von der Wanddicke und dem Werkstoff, erforderlich sein. Das Vorwärmen verhindert den schnellen Wärmeabfluss aus dem Schweißgut in das kalte Grundmaterial. Die Wärmenachbehandlung trägt zur Ausbildung des geforderten Gefüges der Schweißnaht bei und reduziert Schweißspannungen. Für die Wärmebehandlung nutzt der Montagebetrieb z. B. Ringbrenner, Infrarotstrahler, Glühmatten und Induktionsspulen. Grundsätze für die Wärmebehandlung sind in den AD-Merkblättern HP 7/1 ... 3 angegeben.

**Tabelle 5.6** Ausgewählte Fugenformen im Rohrleitungsbau, Auszug aus DIN EN 29692

Benennung	Fugenform Sinnbild, Bild	Schweiß- verfahren	s (in mm)	$\alpha$ (in °)	b (in mm)	c (in mm)	h (in mm)
I-Naht einseitig geschweißt		G	$\leq 3$	-	2 ... 3	-	-
		WIG	$\leq 2$		$\leq 2$		
		E	$\leq 3$		1 ... 3		
		MIG/MAG	$\leq 6$		$\leq 2$		
V-Naht		G	3 ... 6	50 ... 60	2 ... 4	-	-
		WIG	2 ... 8				
		E	3 ... 16	40 ... 60	$\leq 3$		
		MIG/MAG					
Y-Naht		E fallend	$\geq 3$	50 ... 60	$1,5 \pm 0,5$	-	
U-Naht auf V-Wurzel		WIG	$\geq 12$	50 ... 60	1 ... 3	-	3 ... 4

### 5.3.3 Qualitätssicherung

In Abhängigkeit von der Art der Montageeinheit und von der Spezialisierung des Montagebetriebs können fremde und eigene Bauelemente zum Einbau gelangen. Werden eigene Bauelemente durch den Montagebetrieb hergestellt, ist er auch verantwortlich für deren qualitätsentsprechende technologische Vorbereitung. Bereits mit der Übernahme fremder Bauelemente durch den Montagebetrieb sind im Zusammenhang mit ihrer Qualitätssicherung die Kontrollen

- der Bauelemente auf Transportschäden,
- der Lieferung auf Vollzähligkeit,
- der Vollständigkeit der Dokumentation und ihrer Übereinstimmung mit den gelieferten Bauelementen

durchzuführen. Werden die Bauelemente bis zu ihrer Montage gelagert, sind die damit verbundenen Transport-, Umschlag- und Lagerprozesse so auszuführen, dass dadurch die den Anlieferungszustand kennzeichnenden Qualitätsmerkmale erhalten bleiben. Gleichzeitig sind Maßnahmen zur Sicherung einer verlustlosen Aufbewahrung durchzuführen. Zur Qualitätserhaltung großer Bauelemente gehört auch, dass sie zu Transport- und Umschlagzwecken nur an den dafür vorgesehenen und gekennzeichneten Stellen angeschlagen werden. Nicht jede Verpackung und Teilverpackung darf bereits im Zwischenlager entfernt werden. Aus Gründen der Erhaltung eines definierten und seitens der betreffenden Lieferbetriebe garantierten Reinheitszustands bestimmter Bauelemente ist deren Verpackung erst unmittelbar vor ihrer Montage unter Aufsicht der zuständigen Leiter zu entfernen. Durch zu frühes und unsachgemäßes Entfernen der Verpackung geht meist die Gewährleistungspflicht auf den

Montagebetrieb über. Im Rohrleitungsbau sind z. B. öl- und fettfrei gelieferte Armaturen für Sauerstoff-Rohrleitungen solche Bauelemente. Bei falscher Behandlung dieser Bauelemente während der Lagerung muss der Montagebetrieb ihre z. T. mit erheblichem Kosten- und Zeitaufwand verbundene komplette Nachentfettung veranlassen, da mit vorsätzlicher oder fahrlässiger Verunreinigung gerechnet werden muss. Andere Bauelemente müssen in Abhängigkeit von der zu erwartenden Lagerzeit und von den klimatischen Bedingungen, unter denen die Lagerung erfolgt, einen temporären Korrosionsschutz erhalten (z. B. Schutzlack, Öl). Dieser ist vor der Montage wieder sorgfältig zu entfernen (Herstellung des projektgerechten Einbauzustands der Bauelemente).

Während der Montage sind die Bauelemente erneut Beanspruchungen ausgesetzt, die zu einer Qualitätsminderung (Lackschäden, Verformungen, Brüche, Eintragen von Verunreinigungen in das Innere von Hohlkörpern) führen können. Um diese zu vermeiden, sind entsprechende qualitätserhaltende montage technologische Vorkehrungen zu treffen. Dazu gehört auch insbesondere die ständige Qualifizierung der Monteure bzw. ihre montage-spezifische Unterweisung.

Bei der Montage stehen aus der Sicht der Qualitätssicherung

- die Struktur der Anlage, d. h. ihre geometrische Konfiguration,
- die Fügstellen (lösbar und unlösbar) sowie
- der technische Zustand der Montageeinheit

in dem Maße im Vordergrund, wie sie zum Liefer- und Leistungsumfang des betreffenden Montagebetriebs gehören. Die Einhaltung der im Projekt festgelegten Maße (Längen und Winkel) ist dabei ein Schwerpunkt. Die Maßeinhaltung ist während der Montage der Ausrüstungen ständig zu kontrollieren, da hiervon die Funktionsfähigkeit der Anlage unmittelbar beeinflusst werden kann (z. B. senkrechte Stellung von Apparaten).

Ein weiterer Schwerpunkt der strukturellen Qualitätssicherung besteht in der Vollständigkeit der Montageeinheit und in der richtigen Einbaulage der Bauelemente. In diesem Zusammenhang kommt, ohne die diesbezügliche Verantwortung des Montagebetriebs schmälern zu wollen, der augenscheinlichen Kontrolle des erreichten Montagefortschritts durch den Planungsingenieur eine große Bedeutung zu. Sie ist notwendig, da erfahrungsgemäß in den Planungsunterlagen nicht alle die Montage beeinflussenden Probleme umfassend dargestellt sind und sich daraus Abweichungen gegenüber dem konzipierten Zustand ergeben können. Diese Probleme sind im Rahmen der Autorenkontrolle unmittelbar zu klären. Die Autorenkontrolle kann sich schwerpunktmäßig auf

- die projektgerechte Montage der Grundausrüstungen und Rohrleitungen,
- den richtigen Einbau der Armaturen in Fließrichtung,
- den Einsatz der vorgesehenen Werkstoffe,
- die Einhaltung eines vorgeschriebenen Gefälles von Rohrleitungen,
- die ordnungsgemäße Kennzeichnung der Rohrleitungen,
- die Zugänglichkeit von Be- und Entlüftungen bzw. Entwässerungen

und auf andere Sachverhalte erstrecken.

Bei der Rohrleitungsmontage sind die Toleranzen von Bau, Stahlbau, der Grundausrüstungen und der Rohrleitungselemente zu beachten und zu kompensieren. Toleranzbedingte Anpassarbeiten vor Ort erhöhen allerdings den Montagezeitaufwand.

Besondere Sorgfalt muss bei der Montage von richtungsändernden Rohrleitungselementen aufgebracht werden. Die hier zulässige Winkelabweichung kann z. B. bei Verbindung eines geraden Rohrs mit einem Krümmer letztlich zu erheblichen Maßabweichungen in horizontaler oder vertikaler Richtung (je nach Einbaulage des Krümmers) führen. Mit fortschreitender Montage muss sich daher der Monteur stets durch Messung von der Einhaltung der vorgegebenen Maße überzeugen, wobei er im Bedarfsfalle zur Herstellung der Maßhaltigkeit der Lage der Rohrleitung Justiervorgänge zwischenschalten muss. Die Maßabweichungen, die sich aus der Summe der Einzeltoleranzen der Bauelemente ergeben, entstehen unabhängig vom Monteur. Er muss in diesem Fall seine Aufmerksamkeit darauf richten, zur Herstellung der projektgerechten Lage der Rohrleitung die Abweichungen an geeigneter Stelle zu kompensieren. Von Monteur abhängige Maßabweichungen können während des Montageprozesses an den Fügstellen der Rohre entstehen. Als Ursachen kommen dafür in Frage:

- mangelhafte Schweißnahtvorbereitung,
- das Rohrende steht nicht rechtwinklig zur Rohrachse,
- der Luftspalt zwischen den zu fügenden Rohrleitungselementen hat längs des Rohrumfangs keine konstante Breite.

Zulässige Toleranzen sind in Tabelle 5.7 angegeben.

**Tabelle 5.7** Toleranzklassen, Auszug aus DIN 8570-DH

Grenzmaße für	Nennmaßbereich in mm					
	≤ 30	> 30 ... 120	> 1 000 ... 2 000	> 4 000 ... 8 000	> 12 000 ... 16 000	> 20 000
Länge (in mm)	1	4	12	21	32	40
Winkel (in °)	1° 30'		1°			
Form, Lage (in mm) (Ebenheit, Gradheit, Parallelität)	2,5		14	26	36	40

### 5.3.3.1 Qualitätssicherung der Fügstellen

Für die Funktionsfähigkeit und Betriebssicherheit der montierten Rohrleitungen ist die Gewährleistung einer hohen Qualität der Fügstellen der Rohrleitungselemente ausschlaggebend. Bei der Herstellung von Schraubverbindungen in der Rohrleitung hat der Monteur folgende Hinweise besonders zu beachten:

- Beim Einbau von **Flanschen** dürfen deren Dichtflächen nicht beschädigt sein. Schadhafte Dichtflächen können insbesondere bei höheren Drücken und Temperaturen zu Undichtheiten führen, die auch durch das Einlegen neuer Dichtungen nicht mehr behoben werden können. Beschädigte Dichtflächen sind nach Möglichkeit nachzuarbeiten.
- **Schrauben** sind gleichmäßig (z. B. mit dem Drehmomentenschlüssel) kreuzweise anzuziehen.

- **Dichtungen** müssen stets zentrisch in die Flanschverbindungen eingelegt werden. Exzentrisch eingelegte Dichtungen stellen für das in der Rohrleitung strömende Medium einen zusätzlichen Strömungswiderstand dar, können zerstört werden und zu Schäden in der Anlage führen.

Die hohen Anforderungen, die an die Schweißverbindungen in einer Rohrleitung gestellt werden, setzen die fachliche Qualifikation der Schweißer und eine hinreichende Kontrolle der Schweißnähte voraus. Der Schweißnahtbereich der zu fügenden Bauelemente muss trocken, frei von Zunder, Rost, Öl und sonstigen Verschmutzungen sein. Ein gleichmäßiger dünner und festhaftender Zunder (sog. Walzhaut) darf belassen werden. Bei korrosionssgeschützten Bauelementen ist das Korrosionsschutzmittel, sofern es nicht überschweißbar ist, im Schweißnahtbereich zu entfernen.

Die zu verwendenden **Schweißzusatzstoffe** dürfen keine Beschädigungen, Verunreinigungen oder Feuchtigkeit aufweisen. Falls erforderlich, sind sie unter Beachtung der Angaben des Herstellers in auf der Baustelle vorhandenen Elektroden-Trockenschränken zu trocknen. Die Trockenzeiten betragen im Allgemeinen:

- für kalkbasisch ummantelte Elektroden 2 h bei 250 ... 300 °C,
- für Schweißpulver 4 h bei 350 ... 400 °C.

Von wesentlichem Einfluss auf die Erzeugnisqualität ist die **Schweißfolge**. Sie ist bei komplizierten Bauelementen vom verantwortlichen Technologen vorzugeben. Das Ermitteln und Festlegen der richtigen Schweißfolge dient dazu, das Auftreten unzulässiger Verformungen des Bauelements zu vermeiden sowie zusätzliche Spannungen im Schweißnahtbereich zu mindern. Als günstig erweist es sich, komplizierte Bauelemente höherer Ordnung so in Bauelemente niederer Ordnung aufzulösen, dass diese vollständig unter Werkstattbedingungen gefügt und notfalls gerichtet werden können. Auf der Baustelle sollten dann nur noch einfache Schweißnähte ausgeführt werden.

Allgemein gelten folgende Regeln:

- Die Schweißfolge ist so festzulegen, dass die zu fügenden Bauelemente ungehindert schrumpfen können. Nähte, die zu einer starren Verbindung von Bauelementen führen, sollten als letzte geschweißt werden.
- Treffen Längs- und Querstumpfnähte zusammen, sind die Quernähte als erste zu schweißen.
- Bei sich kreuzenden Stumpfnähten ist die in Beanspruchungsrichtung liegende durchgehend zu schweißen.
- Symmetrisch angeordnete Nähte sollten durch Einsatz mehrerer Schweißer gleichzeitig hergestellt werden.
- Beim Schweißen großer Nahtlängen ist insbesondere beim E-Schweißen die erste Lage im Pilgerschrittverfahren herzustellen.
- Das Zünden des Lichtbogens beim E-Schweißen sollte nur an einer solchen Stelle erfolgen, die beim Schweißen aufgeschmolzen wird (sonst Kraterbildung, Angriffspunkt für Korrosion, Kerbwirkung in Abhängigkeit von der Belastung).

# Sachwortverzeichnis

## Symbole

90°-Krümmer 241

## A

Abnahmeprüfzeugnis 133  
absolute Rauigkeit 31  
Absperrvorrichtung 91  
Abzweig 183  
Angularkompensator 211  
anlageninterne Rohrleitung 245, 261  
Anwendungsgrenze 136  
Anzahl der zulässigen Lastwechsel 143  
äquivalente Rohrlänge 39  
Armatur 20  
- Einsatzbereich 21  
- Kenngröße 39  
Armaturengrundtyp 21  
asbestfreier Faserstoff 154  
Auflager 214  
Aufstellungsplan 249  
Ausflussmassenstrom 56  
Ausflussvolumenstrom 56  
Ausflussziffer 56  
Ausgleicher, Einbauort 216  
Aushalsung 175  
Auslegung  
- eines Bogens 168, 169  
- konstruktive 11  
- technologische 11  
austenitischer Stahl 148  
Autogenschweißen 265  
Autorenkontrolle 268  
Axialkompensator 210

## B

Badverfahren 276  
Balgenkompensator 209  
Balkendiagramm 256

Baustelleneinrichtung 245  
Beanspruchung  
- Rohrleitung 86  
- wechselnde 139  
Beizen 275  
Belastung, Rohrbogen unter 235  
Belegung einer Rohrleitungsbrücke 263  
Berechnung  
- Ereignistermin 259  
- späterer 260  
- Termin 257  
- Wanddicke 136  
Berechnungsansatz für ebene Systeme 220  
Bestell-Wanddicke 145, 150  
Bestimmung der Dehnung 124  
Beulbeanspruchung 191  
Biegemoment 158, 235  
Biegespannung 195  
Bingham-Fluid 30, 35  
Blase 110  
Blasenströmung 110  
Bockkonstruktion 190  
Bodenablassventil 26  
Bogen, Auslegung 168, 169  
Breckkappe 25  
Breite, tragende 159

## C

chemische Innenreinigung, Rohr 276  
CO<sub>2</sub>-Schutzgasschweißen 266  
CPM 256  
CROSS, Verfahren von 67

## D

Dämmstoff 115  
Dampfleitung 83  
DARCY-WEISBACH-Gleichung 28  
Dehngrenze 134  
Dehnung 125

- Bestimmung 124
- Dehnungsausgleich 205
- natürlicher 218
- Dehnungsausgleicher 262
- Dehnungsrichtung 219
- Dichtheitsprüfung 278
- Dichtung 270
- Standkraft 162
- Dichtungskennwert 160
- Dichtungskraft 161
- Dichtungswerkstoff 154
- Dichtungswerkstoff, metallischer
  - Formänderungsfestigkeit 159
- dickwandiges Rohr 90
- Diffusionsprüfung 272
- Diffusionsverfahren 278
- Diffusor 63
- Dimensionierung
  - Rohrleitungselement 123
  - Wanddicke 130
- 3D-Modell 255
- DN 16
- Doppel-Schieber 21
- Dreiliniendarstellung 250
- Drosselung 71
- Druckabfall, längenbezogener 34
- Druckhöhenausgleich, Verfahren 67
- Druckluftstrahlen 275
- Druckstoß 88
- dünnwandiges Rohr 90
- Durchbiegung 193
- maximale 195
- Durchflussausgleich, Verfahren 67
- Durchflussbeiwert 40
- Durchlaufträger 192
- Durchlaufverfahren 276
- Durchmesserprüfung 133
- DVGW-G 464 38

## E

- ebenes Rohrsystem
  - mit Einspannfestpunkt 229
  - mit Gelenkfestpunkt 220
- ebenes System, Berechnungsansatz 220
- Eckfestpunkt 216
- Einbauort des Ausgleichers 216
- Einlauf
  - hydraulischer 107
  - thermischer 107
- Einlauffeffekt 36

- Einlauflänge 37
- Einliniendarstellung 250
- einphasiges System 27
- Einsatzbereich von Armaturen 21
- Einspannfestpunkt 220
- ebenes Rohrsystem mit 229
- Einspannmoment 192, 201, 232
- Einspannung
  - feste 196
  - Rohr 192
- Einzelplatten-Schieber 21
- Eisbildung 113
- elastische Länge des Rohrbogens 239
- Elastizität einer Rohrleitung 218
- Elastizitätsmodul 89
- Elektrodenhandschweißen 265
- Emissionsgrad 119
- Endfestpunkt 214
- Energiekosten 49
- Entfetten, Stahlrohr 274
- Entrosten, Stahlrohr 275
- Entzundern, Stahlrohr 275
- Ereignistermin
  - Berechnung 259
  - spätester, Berechnung 260
- Error-Funktion 97
- Ersatzdruck 143
- erzwungene Konvektion 106
- expandierter Graphit 155
- Extruder 19

## F

- Fadenströmung 27
- Faserstoff, asbestfreier 154
- feste Einspannung 196
- Festigkeitskenngröße 134
- Festigkeitskennwert 134, 146
- Festigkeitsprüfung 279
- Festkosten 48
- Festlager 190
- Festpunkt 190
- Festpunktkraft 221
- Ficksche Diffusion 93
- Filmkondensation 111
- Flachdichtung 154
- Flächenausdehnung 97
- Flächenträgheitsmoment 222
- Flächenvergleichsverfahren 166, 178
- Flansch 269
- Flanschverbindung 153

- Kraft an der 156  
 Fluid 27  
 Förderhöhe 46  
 Formänderungsarbeit, Satz vom Minimum der 236  
 Formänderungsfestigkeit metallischer Dichtungswerkstoffe 159  
 Formeln von MOIRVE 202  
 Formstück, Verlustbeiwert 39  
 Fouling 101  
 freie Konvektion 109  
 FRETZ-MOON-Verfahren 19  
 frühester Termin 258  
 Fugenform im Rohrleitungsbau 267  
 Fügestelle 269  
 Führungslager 190  
 Fundamentplan 249

## G

Gammadefektoskopie 272  
 Gas  
 - ideales 27, 71  
 - verdünntes 82  
 Gasschmelzschweißen 265  
 GEH 130  
 Gelenkfestpunkt 220  
 - ebenes Rohrsystem mit 220  
 gelenkige Lagerung 194, 196  
 Gelenkkompensator 211  
 gerade Leitung 71  
 geschweißtes Rohr 19  
 Geschwindigkeit  
 - mittlere 29  
 - ökonomische 44  
 Gestaltänderungs-Energie-Hypothese 130  
 Glatrohrbogen 166  
 Gleitlager 190  
 Gleitrohrkompensator 206, 213  
 Graphit, expandierter 155  
 Gummi 155  
 Gummikompensator 213  
 Gun-Pakt-Expansions-Kompensator 207

## H

HAGEN-POISEUILLE-Gesetz 31  
 Hahn 23  
 Halterung 189  
 Hauptprüfung 279  
 Herstellerlänge 16

HOOKESches Gesetz 200  
 Hosenstück 184  
 HYDRA-Kompensator 214  
 hydraulischer Einlauf 107

## I

ideales Gas 27, 71  
 Impulsstrom 37  
 I-Naht 267  
 inkompressibles Medium 28  
 Innendruckbelastung 279  
 Innenreinigung  
 - chemische, Rohr 276  
 - Rohrleitung 273  
 instationärer Strömungsvorgang 85  
 instationäre Strömung 27  
 Instrumentenfließbild 246  
 integrale Rauigkeit 38  
 Investitionskosten 48, 49  
 isometrische Projektion 254  
 isometrische Rohrleitungszeichnung 254

## K

Kalk-Petroleum-Prüfung 272  
 kalkulatorischer Zins 48  
 Kapitaldienstkosten 49  
 KÁRMÁN-Zahl 236  
 Kavitation 59  
 Kenngröße, Armatur 39  
 Kennzeichnung von Rohrleitungen 16  
 Kerbwirkungsklasse 144  
 Kesselformel 128  
 KIRCHHOFFScher Knotensatz 65  
 KIRCHHOFFScher Maschensatz 66  
 Klappe 23  
 Knickkraft 200, 202  
 Knickspannung 203  
 - zulässige 204  
 Knoten 65  
 Knotensatz, Kirchhoffscher 65  
 KNUDSEN-Diffusion 93  
 Kompensator mit Leitrohr 209  
 Komplexprüfung 278  
 Kompressibilität 98  
 Kondensatableiter 25  
 Kondensation, Wärmeübergang 111  
 Konstruktion, Regel für die 161  
 konstruktive Auslegung 11  
 Kontinuitätsgleichung 42

Konvektion  
 – erzwungene 106  
 – freie 109  
 konvektiver Wärmeübergang 106  
 Kraft an der Flanschverbindung 156  
 kritischer Weg 257  
 – Methode 256  
 Kunststoffrohr 19  
 Kurzzeichen der Rohrleitung 252  
 Kurzzeitwert 135

## L

Lageplan 247  
 Lagerung, gelenkige 194, 196  
 laminaire Strömung 29  
 Länge  
 – elastische, des Rohrbogens 239  
 – maximal zulässige gerade 203  
 Längenausdehnung 97  
 Längenausdehnungskoeffizient 98  
 längenbezogener Druckabfall 34  
 Längsspannung 128  
 Langzeitwert 135  
 Lastspielzahl, zulässige 145  
 Lastwechsel, zulässige Anzahl 143  
 Lateralkompensator 211  
 Leckage 93  
 Leckagerate 153  
 Leitrohr, Kompensator mit 209  
 Leitung  
 – gerade 71  
 – linear orientierte 244  
 Lichtbogenhandschweißen 265  
 linear orientierte Leitung 244  
 Linienträgheitsmoment 222, 239, 241  
 Linienzentrifugalmoment 223  
 Linsendichtung 155  
 Linsenkompensator 208  
 LORENZ-Zahl 237  
 Loslager 190  
 Lyra-Ausgleicher 212

## M

Magnetpulververfahren 272  
 Masche 65  
 Maschensatz, Kirchhoffscher 66  
 Maßabweichung 269  
 Maßeinhaltung 268  
 Materialkosten 49

maximale Durchbiegung 195  
 maximal zulässige gerade Länge 203  
 Medium  
 – inkompressibles 28  
 – NEWTONSches 31  
 – nicht-NEWTONSches 31  
 mehrdimensionale Wärmeleitung 103  
 Mehrphasenströmung 27, 28  
 Membranarmatur 22  
 Metall 155  
 Metall-Aktivgas-Schweißen 266  
 Metall-Inertgas-Schweißen 266  
 metallischer Dichtungswerkstoff,  
 Formänderungsfestigkeit 159  
 Metallkompensator 213  
 Metall-Weichstoff-Flachdichtung 154  
 Methode des kritischen Wegs 256  
 Mikrojet 60  
 Minimum der Formänderungsarbeit, Satz vom  
 236  
 mittlere Geschwindigkeit 29  
 mittlere Strömungsgeschwindigkeit 29  
 MOVRE, Formeln von 202  
 Molch 274  
 molekulare Strömung 82  
 Moment  
 – 1. Grades 230  
 – statisches 240, 241  
 Montage 244  
 Montageablauf 245, 261  
 – Planung 255  
 Montagedurchführung 246  
 Montagefreiheit 245  
 Montageplanung 246  
 Montageprozess 244  
 Montageverrichtung 244  
 Montieren 244

## N

Nadel 114  
 nahtloses Stahlrohr 17  
 natürlicher Dehnungsausgleich 218  
 Nenndruck 16, 252  
 Nennweite 16, 252  
 Netzplantechnik 257  
 NEWTONSches Fluid 30, 35  
 NEWTONSches Medium 31  
 nichtaustenitischer Stahl 146  
 nichtisotherme Strömung 37  
 nicht-NEWTONSches Medium 31

Normalspannungs-Hypothese 130  
Normung 11  
NSH 130  
Nummer der Rohrleitung 252

**O**

ökonomische Geschwindigkeit 44  
optimaler Rohrdurchmesser 48  
optimaler Rohrrinnendurchmesser 50  
organisches Reinigungsmittel 274  
OSTWALD-DE-WAELE-Fluid 30

**P**

Pfropfenströmung 110  
Pfüthenbildung 195  
PKL 47  
Planung des Montageablaufs 255  
Plattenstreifen 179  
PN 16  
PRANDTL-COLEBROOK-Diagramm 32  
PRANDTL-Zahl 106  
Profildichtung 154, 155  
Profil-Schmiegedichtung 155  
Profil-Schneidedichtung 156  
progressive Terminbestimmung 258  
Projektion, isometrische 254  
Prüfung  
- Rohr 132  
- Rohrleitung 279  
PTFE 155  
PTFE-Kompensator 213  
Pumpenauslegung 41  
Pumpenkennlinie 47

**Q**

Qualitätssicherung 267, 269

**R**

Rauigkeit  
- absolute 31  
- integrale 38  
Regeleinrichtung 21  
Regel für die Konstruktion 161  
Regelventil 52  
reibungsbefahreter Vorgang 74  
reibungsfreier Vorgang 72  
Reihe, Stutzen in 184

Reinigungsmittel, organisches 274  
REYNOLDS-Zahl 29, 30  
richtungsänderndes Rohrleitungselement 269  
Ringelement 123  
Ringflächenkraft 157  
Ring-Joint-Dichtung 155  
Rippe 114  
Rissprüfung 272  
RKL 46  
Rohr 9  
- chemische Innenreinigung 276  
- dickwandiges 90  
- dünnwandiges 90  
- Einspannung 192  
- geschweißtes 19  
- Prüfung 132  
- thermisch belastetes gerades 200  
- verformtes 201  
Rohrauslegung 27  
Rohrbogen 171  
- elastische Länge 239  
- unter Belastung 235  
- Wanddicke 166  
Rohrbrücke 264  
Rohrdämmung 115  
Rohrdurchmesser, optimaler 48  
Rohreintritt  
- Überschallströmung 77  
- Unterschallströmung 76  
Rohrgelenk 213  
Rohrhalterung 189  
Rohrrinnendurchmesser, optimaler 50  
Rohrklassennummer 252  
Rohrlänge, äquivalente 39  
Rohrleitung 9  
- anlageninterne 261  
- anlagenorientierte 245  
- Beanspruchung 86  
- Elastizität 218  
- Innenreinigung 273  
- Kennzeichnung 16  
- Kurzzeichen 252  
- Nummer 252  
- Prüfung 279  
Rohrleitungsanlage 42  
Rohrleitungsbau 9  
- Fugenform 267  
Rohrleitungsbauteil 280  
Rohrleitungsberechnung, strömungstechnische 43

- Rohrleitungsbrücke, Belegung 263  
 Rohrleitungsdimensionierung 41  
 Rohrleitungselement  
   - Dimensionierung 123  
   - richtungsänderndes 269  
 Rohrleitungsfließbild 246  
 Rohrleitungssinnendruck 127  
 Rohrleitungskennlinie 46  
 Rohrleitungsmontage 244  
 Rohrleitungsstückliste 252, 253  
 Rohrleitungszeichnung, isometrische 254  
 Rohrnetz 65  
 Rohrreibung 28  
 Rohrreibungsbeiwert 29, 32, 34  
 Rohrsystem, ebenes  
   - mit Einspannfestpunkt 229  
   - mit Gelenkfestpunkt 220  
 Rohrwanddicke 123  
 Rohrwerkstoffgruppe 254  
 Röntgendefektoskopie 272  
 Rückflussverhinderer 23  
 Runddrahtdichtung 155
- S**
- Sandrauigkeit 29  
 Satz vom Minimum der Formänderungsarbeit 236  
 Saughöhe 59  
 Schallgeschwindigkeit 71, 90  
 Schieber 21  
 Schlankheitsgrad 203  
 Schmutzfänger 26  
 Schneelast 197  
 Schnittmoment 192, 194  
 schräger Stutzen 183  
 Schrägwalz-Pilgerschrittverfahren 18  
 Schraube 269  
 Schraubkraft 162  
 Schubspannungs-Hypothese 130  
 Schweißdichtung 156  
 Schweißfolge 270  
 Schweißnahtfehler 271  
 Schweißnahtprüfung, zerstörungsfreie 271  
 Schweißnahtwertigkeit 136  
 Schweißverfahren 264, 266  
 Schweißzusatzstoff 270  
 Segmentbogen 172  
 senkrechter Verdichtungsstoß 78  
 Sicherheitsarmatur 23  
 Sicherheitsventil 55  
 Sichtprüfung 133, 271  
 Siedepunkt 109  
 Sonderarmatur 25  
 Spannung 125  
   - zulässige 132, 145  
   - zeitabhängige 148  
   - zeitunabhängige 146  
 Spannungs-Dehnungs-Diagramm 203  
 Spannungsfaktor 143  
 Sparbeize 275  
 spätester Ereignistermin, Berechnung 260  
 spätester Termin 258  
 Sperreinrichtung 21  
 Spiralnaht-Schweißen 19  
 SSH 130  
 Stahl  
   - austenitischer 148  
   - nichtaustenitischer 146  
 Stahlrohr  
   - Entfetten 274  
   - Entrostern 275  
   - Entzundern 275  
   - nahtloses 17  
 Standkraft der Dichtung 162  
 stationäre Strömung 86  
 statisches Moment 240, 241  
 STEINERScher Satz 232  
 Stopfbuchskompensator 206  
 Stoßdiffusor 63  
 Strang 65  
 Strangpressverfahren 18  
 Streckenlast 197  
 Streckgrenze 134  
 Strömung  
   - instationäre 27  
   - laminare 29  
   - molekulare 82  
   - nichtisotherme 37  
   - stationäre 86  
   - turbulente 29  
 Strömungsabriss 59  
 Strömungscharakteristika 27  
 Strömungsform 110  
 Strömungsgeschwindigkeit, mittlere 29  
 strömungstechnische Rohrleitungsberechnung 43  
 Strömungsvorgang, instationärer 85  
 Stutzen 176  
   - in Reihe 184  
   - schräger 183  
 Stützweite 192, 194, 195

- System  
 - ebenes, Berechnungsansatz 220  
 - einphasiges 27

**T**

- technologische Auslegung 11  
 Temperaturabhängigkeit 200  
 Temperaturänderung 117  
 Temperatur-Einflussfaktor 145  
 Termin  
 - Berechnung 257  
 - frühester 258  
 - spätester 258  
 Terminbestimmung, progressive 258  
 thermisch belastetes gerades Rohr 200  
 thermischer Einlauf 107  
 thermischer Vorgang 97  
 Toleranzklasse 269  
 tragende Breite 159  
 Tropfenkondensation 111  
 T-Stück 174  
 turbulente Strömung 29

**U**

- Überschallströmung am Rohreintritt 77  
 Ultraschallprüfung 271  
 Umfangsspannung 127  
 U-Naht 267  
 Unterhaltungskosten 49  
 Unterschallströmung am Rohreintritt 76  
 U-Rohr-Ausgleicher 212

**V**

- Ventil 22  
 Ventilbauart 22  
 Ventilhub-Kennlinie 53  
 Ventilkoeffizient 39  
 Verdampfen 109  
 - Wärmeübergang 109  
 Verdampfungsenthalpie 109  
 Verdampfungswärme 109  
 Verdichtungsstoß 71  
 - senkrechter 78  
 verdünntes Gas 82  
 Verfahren  
 - Druckhöhenausgleich 67  
 - Durchflussausgleich 67  
 - von Cross 67

- verformtes Rohr 201  
 Vergleichsdehnung 175  
 Vergleichsspannung 130, 175  
 Verlustbeiwert, Formstück 39  
 Verstärkungsscheibe 185  
 Verstrebung 190  
 Verweilzeitverteilung 94  
 Viskosität 28  
 V-Naht 267  
 Volumenausdehnung 97  
 Volumenausdehnungskoeffizient 97  
 Vorfertigung 280  
 Vorgang  
 - reibungsbehafteter 74  
 - reibungsfreier 72  
 - thermischer 97  
 Vorgangsliste 256  
 Vorprüfung 279  
 Vorspannung 216  
 Vorverformungskraft 159

**W**

- Wanddicke  
 - Berechnung 136  
 - Dimensionierung 130  
 - Rohrbogen 166  
 Wanddickenberechnung 174  
 Wanddickenprüfung 133  
 Wandraugigkeit 29  
 Wärmeausdehnung 97  
 Wärmeausdehnungskoeffizient 97  
 Wärmedurchgang 113  
 Wärmedurchgangskoeffizient 113  
 Wärmeleitfähigkeit 100  
 Wärmeleitung 99  
 - mehrdimensionale 103  
 Wärmequelle 78  
 Wärmesenke 78  
 Wärmestrahlung 119  
 Wärmetransport 100  
 Wärmeübergang  
 - bei Kondensation 111  
 - beim Verdampfen 109  
 - konvektiver 106  
 Wärmeübergangskoeffizient 109  
 Wärmeübertragung 118  
 Wasserschlag 88  
 Wasserschloss 92  
 wechselnde Beanspruchung 139  
 Weichstoffkompensator 213

Wellrohrkompensator 209  
Werksbescheinigung 133  
Werkstoffkurzzeichen 135  
Werkstoffprüfung 132  
Werkzeugzeugnis 133  
Windlast 197  
Wirkungsgrad 61  
WÖHLER-Diagramm 140  
WÖHLER-Kurve 140  
Wolfram-Inertgas-Schweißen 265

**Y**

YARWAY-Expansions-Kompensator 207  
Y-Naht 267

**Z**

Z-Bogen 233  
zeitabhängige zulässige Spannung 148  
Zeitdehngrenze 134  
Zeitstandfestigkeit 135, 149  
zeitunabhängige zulässige Spannung 146  
Zentrifugalmoment 240  
zerstörungsfreie Schweißnahtprüfung 271  
Zins, kalkulatorischer 48  
zulässige Knickspannung 204  
zulässige Lastspielzahl 145  
zulässige Lastwechsel, Anzahl 143  
zulässige Spannung 132, 145  
- zeitabhängige 148  
- zeitunabhängige 146  
Zulaufhöhe 60  
Zustandsänderung 27, 71  
Zwischenfestpunkt 214