

DIN 2413



ICS 23.040.10

Ersatz für
DIN 2413:2011-06**Nahtlose Stahlrohre für öl- und wasserhydraulische Anlagen –
Berechnungsgrundlage für Rohre und Rohrbögen bei schwellender
Beanspruchung**Seamless steel tubes for oil- and water-hydraulic systems –
Calculation rules for pipes and elbows for dynamic loadsTubes en acier sans soudure pour des systèmes hydrauliques d'huile et d'eau –
Règles de calcul pour tuyaux et coudes de tuyaux sous efforts dynamiques

Gesamtumfang 34 Seiten

DIN-Normenausschuss Rohrleitungen und Dampfkesselanlagen (NARD)
DIN-Normenausschuss Maschinenbau (NAM)

Inhalt

	Seite
Vorwort	4
1 Anwendungsbereich	5
2 Normative Verweisungen	5
3 Begriffe	5
4 Einheiten, Symbole und Abkürzungen	6
4.1 Einheiten	6
4.2 Symbole und Abkürzungen	6
5 Berechnung der Wanddicken von geraden Rohren und Bögen gegen Innendruck	10
5.1 Berechnung der Wanddicken von geraden Rohren	10
5.1.1 Geltungsbereich	10
5.1.2 Berechnungsformeln	11
5.1.3 Werkstoffkenndaten	12
5.2 Berechnung der Wanddicken von Rohrbögen	12
5.2.1 Allgemeines	12
5.2.2 Erforderliche Wanddicke	13
5.2.3 Berechnung	13
5.2.4 Berechnung der Spannungen bei vorgegebenen Abmessungen	16
5.2.5 Berücksichtigung der Unrundheit bei schwellender Beanspruchung	18
6 Erläuterung zur Berechnung von Rohren nach Tabelle 3	21
6.1 Allgemeines	21
6.2 Berechnungsdruck	22
6.3 Zulässige Beanspruchung	22
6.3.1 Allgemeines	22
6.3.2 Geltungsbereich I, vorwiegend ruhend beansprucht bis 120 °C	23
6.3.3 Geltungsbereich III, schwellend beansprucht bis 120 °C	24
6.4 Berechnungstemperatur	27
6.5 Berücksichtigung des Druckstoßes	27
6.6 Zuschlag c	28
6.6.1 Allgemeines	28
6.6.2 Zuschlag c_1 zum Ausgleich der zulässigen Wanddicken-Unterschreitung	28
6.6.3 Zuschlag c_2 zur Berücksichtigung von Korrosion bzw. Abnutzung	29
6.7 Prüfdruck für das einzelne Rohr	29
7 Berechnungsgrundsätze für Rohre	29
7.1 Allgemeines	29
7.2 Zusatzbeanspruchungen	30
7.2.1 Allgemeines	30
7.2.2 Biegemomente aus Streckenlasten infolge Eigengewicht der Rohrleitung einschließlich Beschichtung, Auskleidung, Dämmung und Rohrinhalt, Wind- und Schneelasten, Ein- oder Aufbauten usw.	30
7.2.3 Biegemomente aus einer elastischen Krümmung der Rohrachse bei der Verlegung	30
7.2.4 Kräfte und Momente infolge behinderter Wärmedehnungen der Rohrleitung und dadurch entstehende Längsspannungen	30
7.2.5 Ungleichmäßige Temperaturverteilung über die Wanddicke	30
7.2.6 Biegemomente in Umfangsrichtung infolge Unrundheit	31
7.3 Äußerer Überdruck	31
7.4 Einteilung und Bewertung der Spannungen	32
7.4.1 Allgemeines	32
7.4.2 Spannungskategorien	32
7.4.3 Bauteilfließkonzept	33
7.4.4 Vergleichsspannungen	33
7.4.5 Begrenzung der Spannungen	33

Literaturhinweise	34
-----------------------------	----

Bilder

Bild 1 — Schematische Darstellung des Rohrbogens mit Formelzeichen	13
Bild 2 — Minderung der Schwellfestigkeit von Rohrbögen mit unrundem Querschnitt	18
Bild 3 — B_I und B_A bei vorgegebenem Innendurchmesser	19
Bild 4 — B_I und B_A bei vorgegebenem Außendurchmesser	20
Bild 5 — Berechnungsbeiwert B für Rohrbögen gleicher Wanddicke $s_{VI} = s_{VA}$ mit Außendurchmesser = Nenndurchmesser	21
Bild 6 — Schwellfestigkeit nahtloser Stahlrohre mit einem äußeren Durchmesser $d_a > 114,3$ mm	26
Bild 7 — Schwellfestigkeit nahtloser Stahlrohre mit einem äußeren Durchmesser $d_a \leq 114,3$ mm, Güteeigenschaften nach DIN EN 10216-1 oder vergleichbaren Normen und Regelwerken	26

Tabellen

Tabelle 1 — Einheiten	6
Tabelle 2 — Symbole	6
Tabelle 3 — Ermittlung der rechnerischen Wanddicke s_v und des Prüfdruckes p'	10
Tabelle 4 — Mechanische Eigenschaften der betrachteten Werkstoffe	12
Tabelle 5 — Berechnung der Spannungen (Vergleichsspannungen nach der Schubspannungshypothese)	17
Tabelle 6 — Grenzlastspielzahlen für nahtlose Stahlrohre mit einem äußeren Durchmesser $> 114,3$ mm (Ermittlung mit $S_L = 10$ aus Bild 6)	23
Tabelle 7 — Grenzlastspielzahlen für nahtlose Stahlrohre mit einem äußeren Durchmesser $\leq 114,3$ mm, Güteeigenschaften nach DIN EN 10216-1 oder vergleichbaren Normen und Regelwerken (Ermittlung mit $S_L = 10$ aus Bild 7)	23

Vorwort

Dieses Dokument wurde vom Arbeitsausschuss NA 082-00-07 AA „Rohrverschraubungen“ im DIN-Normenausschuss Rohrleitungen und Dampfkesselanlagen (NARD) erarbeitet.

Es wird auf die Möglichkeit hingewiesen, dass einige Elemente dieses Dokuments Patentrechte berühren können. DIN ist nicht dafür verantwortlich, einige oder alle diesbezüglichen Patentrechte zu identifizieren.

Mit der Veröffentlichung von DIN EN 13480-3 sind die bis dahin gültigen Ausgaben von DIN 2413-1 und DIN 2413-2 zurückgezogen worden. Die praktische Anwendung von DIN EN 13480-3 ergab, dass diese Norm für hydraulische Anlagen zu Wanddicken führen kann, die entsprechend langjähriger Erfahrungen zu groß sind. Die Festlegung einer anderen Berechnungsmethode wurde deshalb notwendig. Daher wurde DIN 2413 in Zusammenarbeit zwischen NA 082-00-07 AA und VDEh erarbeitet.

Auch wenn sich die Ergebnisse einer Wanddickenberechnung nach 5.2 in der Praxis nicht immer bestätigen, wurde der theoretische Ansatz der Vollständigkeit halber und sowie mangels anderer Alternativen beibehalten.

Änderungen

Gegenüber DIN 2413:2011-06 wurden folgende Änderungen vorgenommen:

- a) Anwendungsbereich auf nahtlose Rohre und Rohrbögen aus Kohlenstoff- und nichtrostendem Stahl für öl- und wasserhydraulische Anlagen beschränkt, die nicht unter die Druckgeräterichtlinie 2014/68/EU fallen;
- b) normative Verweisungen und Literaturhinweise aktualisiert;
- c) Norm redaktionell überarbeitet.

Frühere Ausgaben

DIN 2413: 1927-01, 1936-09, 1954-05, 1966-06, 1972-06, 2011-06

DIN 2413-1: 1993-10

DIN 2413-2: 1993-10

DIN 2445 Beiblatt: 1974-11

DIN 2445 Beiblatt 1: 2000-09

1 Anwendungsbereich

Dieses Dokument enthält die Grundlage für die Berechnung nahtloser Rohre und Rohrbögen aus Kohlenstoff- und nichtrostendem Stahl für öl- und wasserhydraulische Anlagen.

Dieses Dokument ist anzuwenden für Rohrleitungen, bei denen jede der drei nachfolgenden Bedingungen erfüllt ist:

- 1) zum Einbau in Maschinen im Sinne der Maschinenrichtlinie 2006/42/EG;
- 2) für den Betrieb
 - i) mit Flüssigkeiten der Gruppe 2 nach Druckgeräterichtlinie 2014/68/EU (DGRL) bei $DN \leq 200$ bei beliebigem Druck und bei $DN > 200$ und bei einem maximal zulässigem Druck (PS) ≤ 50 MPa (500 bar) oder
 - ii) mit Gasen der Gruppe 2 nach DGRL bei $DN \leq 100$ oder PS $DN \leq 350$ MPa (3 500 bar);
- 3) für den Betrieb mit einer zulässigen maximalen Temperatur (TS) bis 120 °C.

ANMERKUNG Für Rohrleitungen, die die Bedingungen der Nummer 1 und Nummer 2 erfüllen, gilt der Ausschluss in Artikel 1, Absatz 2 (f) der Druckgeräterichtlinie.

Dieses Dokument ist nicht anzuwenden für Rohrleitungen, die unter den Anwendungsbereich der Druckgeräterichtlinie fallen.

2 Normative Verweisungen

Die folgenden Dokumente werden im Text in solcher Weise in Bezug genommen, dass einige Teile davon oder ihr gesamter Inhalt Anforderungen des vorliegenden Dokuments darstellen. Bei datierten Verweisungen gilt nur die in Bezug genommene Ausgabe. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe des in Bezug genommenen Dokuments (einschließlich aller Änderungen).

DIN EN 10204, *Metallische Erzeugnisse — Arten von Prüfbescheinigungen*

DIN EN 10216-1, *Nahtlose Stahlrohre für Druckbeanspruchungen — Technische Lieferbedingungen — Teil 1: Rohre aus unlegierten Stählen mit festgelegten Eigenschaften bei Raumtemperatur*

DIN EN 10216-3, *Nahtlose Stahlrohre für Druckbeanspruchungen — Technische Lieferbedingungen — Teil 3: Rohre aus legierten Feinkornbaustählen*

DIN EN 10216-5, *Nahtlose Stahlrohre für Druckbeanspruchungen — Technische Lieferbedingungen — Teil 5: Rohre aus nichtrostenden Stählen*

DIN EN 10305-4, *Präzisionsstahlrohre — Technische Lieferbedingungen — Teil 4: Nahtlose kaltgezogene Rohre für Hydraulik- und Pneumatik-Druckleitungen*

DIN EN 13480 (alle Teile), *Metallische industrielle Rohrleitungen*

3 Begriffe

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die Begriffe nach den Normen der Reihe DIN EN 13480.

DIN und DKE stellen terminologische Datenbanken für die Verwendung in der Normung unter den folgenden Adressen bereit:

— DIN-TERMinologieportal: verfügbar unter <https://www.din.de/go/din-term>

— DKE-IEV: verfügbar unter <http://www.dke.de/DKE-IEV>

4 Einheiten, Symbole und Abkürzungen

4.1 Einheiten

Die in diesem Dokument verwendeten Einheiten sind in Tabelle 1 angegeben.

Tabelle 1 — Einheiten

Größe	Einheit
Abmessungen	—
Durchmesser, Wanddicke Radius	mm
Fläche	mm ²
Länge des Rohrleitungsabschnittes	m
Druck ^a	N/mm ²
Spannungen, Festigkeitskennwerte, Elastizitätsmodul	N/mm ²
Masse	kg
Dichte	kg/m ³
Zeit	s bzw. h
Geschwindigkeit	m/s
Temperatur	°C
Temperaturdifferenz	K
^a Für andere Druckeinheiten gilt: 1 N/mm ² = 1 MPa = 10 bar	

4.2 Symbole und Abkürzungen

Die in dieser Norm verwendeten Symbole sind in Tabelle 2 angegeben.

Tabelle 2 — Symbole

Symbole	Größe	Einheit
Rohre		
a	Fortpflanzungsgeschwindigkeit einer Druckwelle	m/s
$c = c_1 + c_2$	Zuschlag zur rechnerischen Wanddicke	mm
c_1	Zuschlag zum Ausgleich der zulässigen Wanddicken-Unterschreitung	mm
c_1'	zulässige Wanddicken-Unterschreitung	%
c_2	Zuschlag für Korrosion bzw. Abnutzung	mm
d_a	Rohr-Außendurchmesser	mm
d_i	Rohr-Innendurchmesser	mm

Tabelle 2 (fortgesetzt)

Symbole	Größe	Einheit
l	Länge des Rohrleitungsabschnittes	m
n	Lastspielzahl (Anzahl der Druckwechsel), die im Betrieb zu erwarten ist	—
n_B	Lastspielzahl bis zum Bruch	—
N	Anzahl der Lastspiele bei Erreichen der Schwellfestigkeit	—
p	Berechnungsdruck	N/mm ²
p_k	kritischer Außendruck (elastisches Beulen)	N/mm ²
$\hat{p} - \overset{v}{p}$	Schwingbreite einer Druckschwingung	N/mm ²
p'	Prüfdruck	N/mm ²
Δp	Druckänderung durch Druckstoß	N/mm ²
r	Krümmungsradius der Mittellinie eines Rohrbogens	mm
s	erforderliche Wanddicke einschließlich Zuschläge	mm
s_v	rechnerische Wanddicke ohne Zuschläge	mm
$u = d_a/d_i$	Durchmesser Verhältnis	—
w	Strömungsgeschwindigkeit	m/s
$w\vartheta$	Temperaturänderungsgeschwindigkeit	k/h
A	Bruchdehnung ($L_0 = 5,65 \cdot \sqrt{S_0}$)	%
B_p	Faktor zur Berücksichtigung der Dichtungskräfte in den Prüfpresen bei der Prüfung im Werk	—
B_u	Berechnungsbeiwert für unrunde Rohre	—
E	Elastizitätsmodul des Stahls	N/mm ²
K	Festigkeitskennwert	N/mm ²
$\overset{v}{R}_{eH}$	obere Streckgrenze (spezifizierter Mindestwert) bei 20 °C	N/mm ²
$\overset{v}{R}_{p 0,2}$	0,2 %-Dehngrenze (spezifizierter Mindestwert) bei 20 °C	—
$\overset{v}{R}_{t 0,5}$	Dehngrenze bei 0,5 % gesamte Dehnung (spezifizierter Mindestwert) bei 20 °C	—
$\overset{v}{R}_{p 1,0}$	1 %-Dehngrenze (spezifizierter Mindestwert) bei 20 °C	N/mm ²
$\overset{v}{R}_{p 0,2/\vartheta}$	Warmstreckgrenze bzw. 0,2 %-Dehngrenze (spezifizierter Mindestwert) bei Berechnungstemperatur ϑ	N/mm ²
$\overset{v}{R}_{p 1,0/\vartheta}$	1 %-Dehngrenze (spezifizierter Mindestwert) bei Berechnungstemperatur ϑ	N/mm ²

Tabelle 2 (fortgesetzt)

Symbole	Größe	Einheit
R_m	Zugfestigkeit	N/mm ²
$\overset{\vee}{R}_m$	Zugfestigkeit (spezifizierter Mindestwert)	N/mm ²
$\bar{R}_m/_{200\,000/\vartheta}$	Zeitstandfestigkeit für 200 000 h (Mittelwert) bei Berechnungstemperatur ϑ	N/mm ²
$\bar{R}_m/_{100\,000/\vartheta}$	Zeitstandfestigkeit für 100 000 h (Mittelwert) bei Berechnungstemperatur ϑ	N/mm ²
S	Sicherheitsbeiwert	—
S_L	Lastspielsicherheit	—
S_K	Sicherheit gegen Einbeulen	—
T_R	Reflexionszeit bei Druckstoß	s
T_S	Schließzeit des Absperrorgans bzw. des Steuerorgans	s
U	Unrundheit	%
$Y = 1/S$	Nutzungsgrad	—
Y'	Nutzungsgrad der Mindeststreckgrenze beim Innendruckversuch (Prüfdruck im Werk)	—
α_l	thermischer Längenausdehnungskoeffizient	1/K
ϑ	Berechnungstemperatur	°C
ν	Querkontraktionszahl	—
ρ	Dichte des Durchflusstoffes	kg/m ³
σ_{zul}	Zulässige Beanspruchung bei ruhender Belastung	N/mm ²
$\bar{\sigma}_{zul}$	Zulässige Beanspruchung bei schwellender Belastung	N/mm ²
σ_l	Längsspannung	N/mm ²
σ_r	Radialspannung	N/mm ²
σ_M	Mittelspannung	N/mm ²
$\overset{\vee}{\sigma}_{Sch/D}$	Dauerschwellfestigkeit (Mindestwert)	N/mm ²
σ_{Schi}	äquivalente Schwellspannung	N/mm ²
$\overset{\vee}{\sigma}_{Sch/n}$	Zeitschwellfestigkeit (Mindestwert)	N/mm ²
σ_u	Umfangsspannung	N/mm ²
σ_v	Vergleichsspannung	N/mm ²
Δr	Abweichung von der Kreisform	mm
Δw	Änderung der Strömungsgeschwindigkeit durch einen Regelvorgang (kann positiv oder negativ sein)	m/s

Tabelle 2 (fortgesetzt)

Symbole	Größe	Einheit	
$\Delta\sigma$	Spannungsschwingbreite	N/mm ²	
$\Delta\vartheta$	Temperaturänderung	K	
Zusätzliche Symbole für Rohrbögen			
c_{1B}	Zuschlag zum Ausgleich der zulässigen Wanddicken-Unterschreitung am Rohrbogen	mm	
d_i, d_a	Innen- bzw. Außendurchmesser des Rohrbogens	mm	
f_u	Minderungsfaktor für die Schwellfestigkeit bei unrunder Rohrbögen	—	
r, R	Krümmungsradien des Rohrbogens nach Bild 3	mm	
s_i	erforderliche Wanddicke der Bogeninnenseite des Rohrbogens mit Zuschlägen	mm	
s_a	erforderliche Wanddicke der Bogenaußenseite des Rohrbogens mit Zuschlägen	mm	
s_{ei}	ausgeführte Wanddicke der Bogeninnenseite des Rohrbogens mit Zuschlägen	mm	
s_{ea}	ausgeführte Wanddicke der Bogenaußenseite des Rohrbogens mit Zuschlägen	mm	
s_{vi}	Wanddicke der Bogeninnenseite ohne Zuschläge	} (rechnerische Mindestwanddicke)	mm
s_{va}	Wanddicke der Bogenaußenseite ohne Zuschläge		mm
B_I	Berechnungsbeiwert zur Ermittlung der Wanddicke der Bogeninnenseite	—	
B_A	Berechnungsbeiwert zur Ermittlung der Wanddicke der Bogenaußenseite	—	
B	Berechnungsbeiwert bei gleicher Wanddicke	—	
$\bar{\sigma}_I$	mittlere Spannung der Bogeninnenseite	N/mm ²	
$\bar{\sigma}_A$	mittlere Spannung der Bogenaußenseite	N/mm ²	
$\sigma_{I,i}$	Spannung an der Bogeninnenseite, Wandinnenseite, siehe Bild 3	N/mm ²	
$\sigma_{A,i}$	Spannung an der Bogenaußenseite, Wandinnenseite, siehe Bild 3	N/mm ²	
Nebenzeichen			
\wedge	Maximalwert (z. B. \hat{p} = Maximaldruck)	—	
\vee	Minimalwert (z. B. \check{p} = Minimaldruck)	—	
$\bar{\quad}$	Mittelwert (z. B. $\bar{\sigma}$ = mittlere Spannung)	—	
\sim	wechselnd (z. B. $\tilde{\sigma}_{zul}$ = wechselnde Beanspruchung)	—	

5 Berechnung der Wanddicken von geraden Rohren und Bögen gegen Innendruck

5.1 Berechnung der Wanddicken von geraden Rohren

5.1.1 Geltungsbereich

Die angegebenen Formeln zur Berechnung der Wanddicke gegen Innendruck gelten für Rohre mit Kreisquerschnitt ohne Ausschnitte bis zu einem Durchmesser Verhältnis $u = d_a/d_i = 2,0$ für folgende Geltungsbereiche:

- I Rohrleitungen für vorwiegend ruhende Beanspruchung bis 120 °C Berechnungstemperatur¹;
- III Rohrleitungen für vorwiegend schwellende Beanspruchung bis 120 °C Berechnungstemperatur².

Für die einzelnen Geltungsbereiche sind die anzuwendenden Formeln zur Berechnung der rechnerischen Wanddicke s_v in Tabelle 3 enthalten, für Werkstoffkenndaten siehe Tabelle 4.

Tabelle 3 — Ermittlung der rechnerischen Wanddicke s_v und des Prüfdruckes p'

Geltungsbereich	Rechnerische Wanddicke s_v mm	Festigkeitskennwert K N/mm ²	Sicherheitsbeiwert S bzw. Nutzungsgrad Y für Rohre				
			mit		ohne ^a		
			Abnahmeprüfzeugnis nach DIN EN 10204				
$\sigma_{zul} = K/S = Y \cdot K$			A^b	S	Y	S	Y
I vorwiegend ruhend beansprucht	$s_v = \frac{d_a \cdot p}{2\sigma_{zul}} \quad (1)$	Streckgrenze bzw. 0,2 %-Dehngrenze bzw. Dehngrenze für 0,5 % Gesamtdehnung	≥ 25 %	1,5	0,67	1,7	0,59
			= 20 %	1,6	0,63	1,75	0,57
	$= \frac{d_i}{\frac{2\sigma_{zul}}{p} - 2} \quad (2)$	Mindestwerte bei 20 °C ^{d,e} Ausnahme siehe 6.3.1	= 15 %	1,7	0,59	1,8	0,55
			Für erdverlegte Rohrleitungen in Gebieten ohne besondere zusätzliche Beanspruchung gilt:				
			≥ 25 %	1,4	0,72	1,7	0,59
			= 20 %	1,5	0,67	1,75	0,57
			= 15 %	1,6	0,63	1,8	0,55

1 Bei Wandtemperaturen unter -10 °C sind die Zähigkeitseigenschaften der Stähle besonders zu beachten. Es sind dann bevorzugt Stähle mit besonderen Kaltzähigkeitseigenschaften zu verwenden. Angaben über Stähle für tiefe Temperaturen siehe DIN EN 10216-3, DIN EN 10216-4, Regelung über die Anwendung bei tiefen Temperaturen siehe AD 2000-Merkblatt W 10.

2 Für höhere Temperaturen siehe AD 2000-Merkblatt S 2.

Tabelle 3 (fortgesetzt)

Geltungsbereich	Rechnerische Wanddicke s_v mm	Festigkeitskennwert K N/mm ²	Sicherheitsbeiwert S bzw. Nutzungsgrad Y für Rohre				
			mit Abnahmeprüfzeugnis nach DIN EN 10204		ohne ^a		
$\sigma_{zul} = K/S = Y \cdot K$			A^b	S	Y	S	Y
III schwellend beansprucht Die Berechnung wird durchgeführt gegen Verformen und gegen Zeitschwingbruch. Die größere rechnerische Wanddicke s_v muss gewählt werden.	a) Berechnung gegen Verformen: nach Gleichung (1) und Gleichung (2) ^c b) Berechnung gegen Zeitschwingbruch bzw. Dauerbruch bei konstanter Schwingbreite: $s_v = \frac{d_a}{\frac{2\sigma_{zul}}{\Delta \cdot \nu} - 1}$ (3) Bei unterschiedlichen Schwingbreiten siehe 6.3.3.3	Siehe Geltungsbereich I σ_{zul} siehe 6.3.3.1	siehe Geltungsbereich I siehe 6.3.1, 6.3.3 und 7.2.4				
		Zeitschwellfestigkeit ν $\sigma_{Sch/n}$ Dauerschwellfestigkeit ν $\sigma_{Sch/D}$	—	$S_L = 2$ bis 10		—	—
Prüfdruck p' in der Prüfpresse N/mm ²	$p' = B_p \cdot Y' \cdot R_{eH} \cdot \frac{2(s - c_1)}{d_a}$ (4)						
Gilt für das einzelne Rohr. 6.7 muss beachtet werden.							
<p>^a Ohne Abnahmeprüfzeugnis dürfen nur Rohre aus unlegierten Werkstoffen bis 550 N/mm² Mindestzugfestigkeit und aus austenitischen Werkstoffen mit einer Bruchdehnung von $A \geq 40\%$ vorgesehen werden.</p> <p>^b Bruchdehnung mit $L_0 = 5,65 \cdot \sqrt{S_0}$ Zwischenwerte dürfen linear interpoliert bzw. bei kleineren Dehnungen als 15 % extrapoliert werden.</p> <p>^c Gleichung (2) ist die mathematische Umwandlung von Gleichung (1) und führt zu dem gleichen Ergebnis, wenn $d_a = d_i + 2s_v$ ist. Das Gleiche gilt für die Gleichung (4) gegenüber Gleichung (3) und die Gleichung (6) gegenüber Gleichung (5).</p> <p>^d Als Streckgrenze sind die in den jeweiligen Normen, Regelwerken, Werkstoffblättern oder Spezifikationen angegebenen Werte einzusetzen, gegebenenfalls ist zu interpolieren. Bei Berechnungstemperaturen unter 20 °C gelten die Werte für 20 °C (siehe 6.3.2).</p> <p>^e Bei austenitischen Stählen darf unter bestimmten Voraussetzungen an Stelle von $R_{p0,2}^v$ mit $R_{p1,0}^v$ und an Stelle von $R_{p0,2/\theta}^v$ mit $R_{p1,0/\theta}^v$ gerechnet werden (siehe 6.3.2).</p>							

5.1.2 Berechnungsformeln

Die erforderliche Wanddicke beträgt

$$s = s_v + c_1 + c_2 \tag{5}$$

Sie ergibt sich aus der rechnerischen Wanddicke s_v nach Tabelle 3, dem Zuschlag c_1 zur Berücksichtigung der zulässigen Wanddicken-Unterschreitung (siehe 6.6.2) und dem Zuschlag c_2 für Korrosion bzw. Abnutzung (siehe 6.6.3). Sofern die zulässige Wanddicken-Unterschreitung mit c_1 in % angegeben ist, beträgt die

erforderliche Wanddicke

$$s = (s_v + c_2) \frac{100}{100 - c_1'} \quad (6)$$

5.1.3 Werkstoffkenndaten

Tabelle 4 — Mechanische Eigenschaften der betrachteten Werkstoffe

Werkstoff		Wandstärke	Festigkeitskennwert K	R_m	$A_{5 \text{ min}}$
Werkstoffnummer (Kurzname)	nach Norm	mm	N/mm ²	N/mm ²	%
1.0308+N (E235+N)	DIN EN 10305-4	$d_a \leq 30 \text{ mm},$ $s \leq 3 \text{ mm}$	$R_{eH} = 225$	340	25
		übrige Abmessungen	$R_{eH} = 235$		
1.0580+N (E355+N)	DIN EN 10305-4	$d_a \leq 30 \text{ mm},$ $s \leq 3 \text{ mm}$	$R_{eH} = 345$	490	22
		übrige Abmessungen	$R_{eH} = 355$		
1.4571 (X6CrNiMoTi17-12-2)	DIN EN 10216-5	$d_a \leq 50 \text{ mm}$	$R_{eH} = 245$	490	35

5.2 Berechnung der Wanddicken von Rohrbögen

5.2.1 Allgemeines

Die Berechnungsregel berücksichtigt, dass bei Innendruckbeanspruchung ein Rohrbogen an der Bogeninnenseite höhere und an der Bogenaußenseite niedrigere Spannungen aufweist, als ein gerades Rohr gleicher Wanddicke und gleichen Durchmessers.

Die Bezeichnungen am Rohrbogen sind in Bild 1 angegeben.

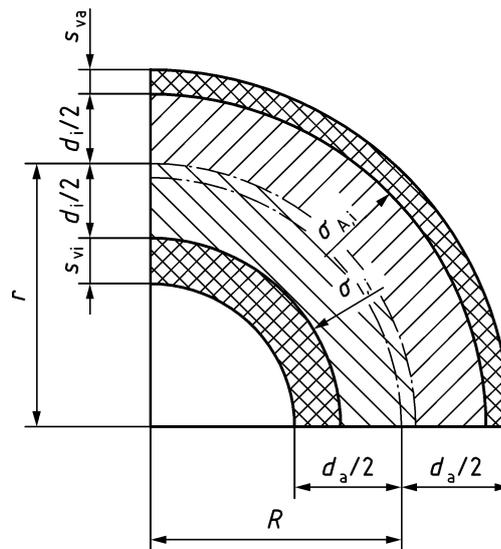


Bild 1 — Schematische Darstellung des Rohrbogens mit Formelzeichen

5.2.2 Erforderliche Wanddicke

Die rechnerische Mindestwanddicke beträgt:

- für die Bogeninnenseite s_{vi}
- für die Bogenaußenseite s_{va}

Sind Zuschläge für die zulässige Wanddickenunterschreitung c_{1B} und/oder Korrosion c_2 in Ansatz zu bringen, so gilt:

$$\text{— für die Bogeninnenseite} \quad s_i = s_{vi} + c_{1B} + c_2 \quad (7)$$

$$\text{— für die Bogenaußenseite} \quad s_a = s_{va} + c_{1B} + c_2 \quad (8)$$

Für die Nachrechnung ausgeführter Rohrbögen mit den Wanddicken s_{ei} bzw. s_{ea} muss gesetzt werden:

$$\text{— für die Bogeninnenseite} \quad s_{vi} = s_{ei} - c_{1B} - c_2 \quad (9)$$

$$\text{— für die Bogenaußenseite} \quad s_a = s_{ea} - c_{1B} - c_2 \quad (10)$$

Anschrägungen an der Übergangsstelle vom Rohrbogen zum anschließenden geraden Rohr zur Vermeidung scharfer Wanddickenübergänge oder von Kantenversatz brauchen rechnerisch nicht berücksichtigt zu werden.

5.2.3 Berechnung

5.2.3.1 Berechnung der Wanddicke

Die Wanddicke an der Bogeninnenseite ohne Zuschläge berechnet sich zu

$$s_{vi} = s_v \cdot B_I \quad (11)$$

mit s_v nach Tabelle 3.

Die Wanddicke an der Bogenaußenseite ohne Zuschläge berechnet sich zu

$$s_{va} = s_v \cdot B_A \quad (12)$$

In 5.2.3.2, 5.2.3.3 und 5.2.3.4 werden die Formeln zur Ermittlung der Beiwerte B_I und B_A angegeben.

In 5.2.3.5 werden vereinfachte Formeln für die Beiwerte B_I und B_A angegeben, die für $s_v/d_a \leq 0,02$ ausreichend genau sind und für dickwandigere Rohrbögen auf der sicheren Seite liegen.

5.2.3.2 Beiwerte B_I und B_A bei vorgegebenem Innendurchmesser

Die Beiwerte B_I und B_A für Rohrbögen mit vorgegebenem Innendurchmesser errechnen sich nach den Gleichungen (13) und (14).

$$B_I = \frac{s_{vi}}{s_v} = \frac{r}{s_v} - \frac{d_i}{2s_v} - \sqrt{\left(\frac{r}{s_v} - \frac{d_i}{2s_v}\right)^2 - 2\frac{r}{s_v} + \frac{d_i}{2s_v}} \quad (13)$$

$$B_A = \frac{s_{va}}{s_v} = -\frac{r}{s_v} - \frac{d_i}{2s_v} + \sqrt{\left(\frac{r}{s_v} + \frac{d_i}{2s_v}\right)^2 + 2\frac{r}{s_v} + \frac{d_i}{2s_v}} \quad (14)$$

Die Beiwerte B_I und B_A können in Abhängigkeit von r/d_i aus Bild 3 entnommen werden.

5.2.3.3 Beiwerte B_I und B_A bei vorgegebenem Außendurchmesser

Die Beiwerte B_I und B_A für Rohrbögen mit vorgegebenem Außendurchmesser errechnen sich nach den Gleichungen (15) und (16).

$$B_I = \frac{s_{vi}}{s_v} = \frac{d_a}{2s_v} + \frac{r}{s_v} - \left(\frac{d_a}{2s_v} + \frac{r}{s_v} - 1\right) \cdot \sqrt{\frac{\left(\frac{r}{s_v}\right)^2 - \left(\frac{d_a}{2s_v}\right)^2}{\left(\frac{r}{s_v}\right)^2 - \frac{d_a}{2s_v} \cdot \left(\frac{d_a}{2s_v} - 1\right)}} \quad (15)$$

Da mit d_a normalerweise auch der Krümmungsradius R vorgegeben ist, muss man hierbei

$$\frac{r}{s_v} = \sqrt{\frac{1}{2} \cdot \left[\left(\frac{d_a}{2s_v}\right)^2 + \left(\frac{R}{s_v}\right)^2\right]} + \sqrt{\frac{1}{4} \cdot \left[\left(\frac{d_a}{2s_v}\right)^2 + \left(\frac{R}{s_v}\right)^2\right]^2 - \frac{d_a}{2s_v} \cdot \left(\frac{d_a}{2s_v} - 1\right) \cdot \left(\frac{R}{s_v}\right)^2} \quad (16)$$

einsetzen.

Die Gleichungen (13) und (15) liefern nur gleiche Ergebnisse, wenn

$$d_a = d_i + s_{vi} + s_{va} \quad (17)$$

und

$$R = r - \frac{1}{2} \cdot (s_{vi} - s_{va}) \quad (18)$$

gesetzt werden.

$$B_A = \frac{s_{va}}{s_v} = \frac{d_a}{2s_v} - \frac{r}{s_v} - \left(\frac{d_a}{2s_v} - \frac{r}{s_v} - 1 \right) \cdot \sqrt{\frac{\left(\frac{r}{s_v}\right)^2 - \left(\frac{d_a}{2s_v}\right)^2}{\left(\frac{r}{s_v}\right)^2 - \frac{d_a}{2s_v} \cdot \left(\frac{d_a}{2s_v} - 1\right)}} \quad (19)$$

Bei vorgegebenem R ist r/s_v nach Gleichung (16) einzusetzen.

Die Beiwerte B_I und B_A können in Abhängigkeit von R/d_a aus Bild 4 entnommen werden.

Die Gleichungen (14) und (19) liefern nur gleiche Ergebnisse, wenn zwischen d_i , d_a , r und R die Beziehungen (17) und (18) bestehen.

5.2.3.4 Beiwerte B_I und B_A für Rohrbögen mit gleicher Wanddicke $s_{vi} = s_{va}$

Bei Rohrbögen mit gleicher Wanddicke lässt sich die erforderliche Wanddicke berechnen zu

$$s_{vi} = s_{va} = s_v \cdot B \quad (20)$$

1) für Rohrbögen mit vorgegebenem Innendurchmesser:

Mit dem Beiwert $B = B_I$ nach Gleichung (13)

2) für Rohrbögen mit vorgegebenem Außendurchmesser:

$$B = \frac{s_{vi}}{s_v} = \frac{s_{va}}{s_v} = \frac{d_a}{2s_v} - \frac{R}{s_v} + \sqrt{\left(\frac{d_a}{2s_v} - \frac{R}{s_v}\right)^2 + 2\frac{R}{s_v} - \frac{d_a}{2s_v}} \quad (21)$$

Der Beiwert B kann in Abhängigkeit von R/d_a aus Bild 5 entnommen werden.

Gleichung (13) liefert in Verbindung mit Gleichung (20) nur dann gleiche Ergebnisse wie Gleichung (21), wenn

$$d_a = d_i + 2s_{vi} \quad (22)$$

und

$$R = r \quad (23)$$

gesetzt werden.

5.2.3.5 Vereinfachte Berechnung der Beiwerte B_I und B_A

Für die Bogeninnenseite gilt:

$$B_I = \frac{2R/d_a - 0,5}{2R/d_a - 1} \quad (24)$$

Für die Bogenaußenseite gilt:

$$B_A = \frac{2R/d_a + 0,5}{2R/d_a + 1} \quad (25)$$

Für die Gleichungen (24) und (25) gelten in Bild 4 die Kurven mit $s_v/d_a = 0$.

5.2.4 Berechnung der Spannungen bei vorgegebenen Abmessungen

In Tabelle 5 sind die Gleichungen (26) bis (33) für die Vergleichsspannungen am Bogen für die Geltungsbereiche I und III angegeben. Diese Spannungen sind nach der Schubspannungshypothese berechnet.

Die Gleichungen (30), (32), (31) und (33) führen im Geltungsbereich III unter sonst gleichen Voraussetzungen zu geringfügig höheren Spannungen als bei Anwendung der Gleichungen (11) bis (21); dieser Unterschied ist zulässig.

Tabelle 5 — Berechnung der Spannungen (Vergleichsspannungen nach der Schubspannungshypothese)

Geltungsbereich	d_i, r	d_a, R
I vorwiegend ruhend beansprucht	$\bar{\sigma}_I = \frac{p \cdot d_i}{2s_{vi}} \cdot \frac{2r - 0,5d_i}{2r - d_i - s_{vi}} + p$ (26)	$\bar{\sigma}_I = \frac{p(d_a - s_{vi} - s_{va})}{2s_{vi}} \cdot \frac{2R - 0,5d_a + 1,5s_{vi} - 0,5s_{va}}{2R - d_a + s_{vi}} + p$ (27)
	$\bar{\sigma}_A = \frac{p \cdot d_i}{2s_{va}} \cdot \frac{2r + 0,5d_i}{2r + d_i + s_{va}} + p$ (28)	$\bar{\sigma}_A = \frac{p(d_a - s_{vi} - s_{va})}{2s_{va}} \cdot \frac{2R + 0,5d_a + 0,5s_{vi} - 1,5s_{va}}{2R + d_a - s_{va}} + p$ (29)
III	$\sigma_{I,i} = \frac{p \cdot (d_i + s_{vi})}{2s_{vi}} \cdot \frac{2r - 0,5d_i}{2r - d_i - s_{vi}} + p$ (30)	$\sigma_{I,i} = \frac{p(d_a - s_{va})}{2s_{vi}} \cdot \frac{2R - 0,5d_a + 1,5s_{vi} - 0,5s_{va}}{2R - d_a + s_{vi}} + p$ (31)
	$\sigma_{A,i} = \frac{p(d_i + s_{va})}{2s_{va}} \cdot \frac{2r + 0,5d_i}{2r + d_i + s_{va}} + p$ (32)	$\sigma_{A,i} = \frac{p(d_a - s_{vi})}{2s_{va}} \cdot \frac{2R + 0,5d_a + 0,5s_{vi} - 1,5s_{va}}{2R + d_a - s_{va}} + p$ (33)

5.2.5 Berücksichtigung der Unrundheit bei schwellender Beanspruchung

Bei Rohrbögen muss mit einer entsprechend der Unrundheit U in %,

$$U = \frac{2 \left(\hat{d}_a - \overset{\vee}{d}_a \right)}{\hat{d}_a + \overset{\vee}{d}_a} \cdot 100 \quad (34)$$

zunehmenden Minderung der Schwellfestigkeit nach Bild 2 gerechnet werden.

Die Wanddicke s_v nach Tabelle 3 Geltungsbereich III muss mit einem mit dem Faktor f_u multiplizierten Festigkeitskennwert K ermittelt werden.

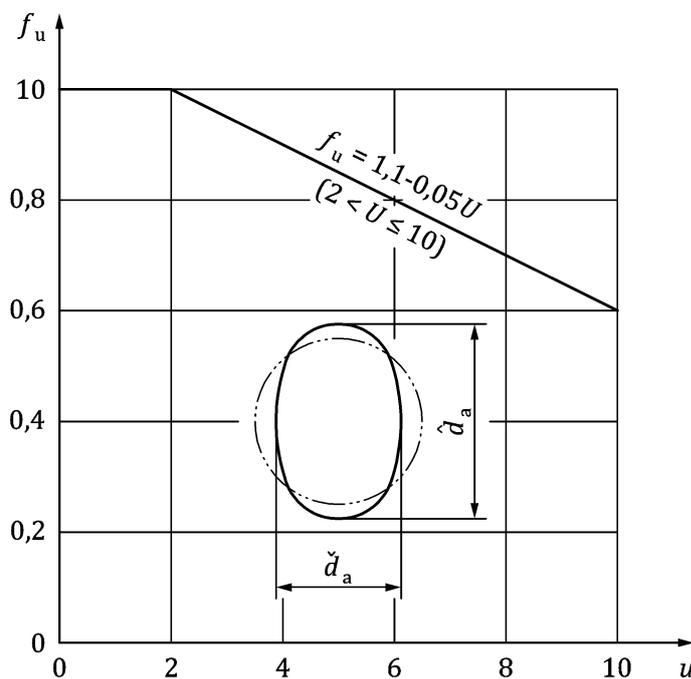


Bild 2 — Minderung der Schwellfestigkeit von Rohrbögen mit unrundem Querschnitt

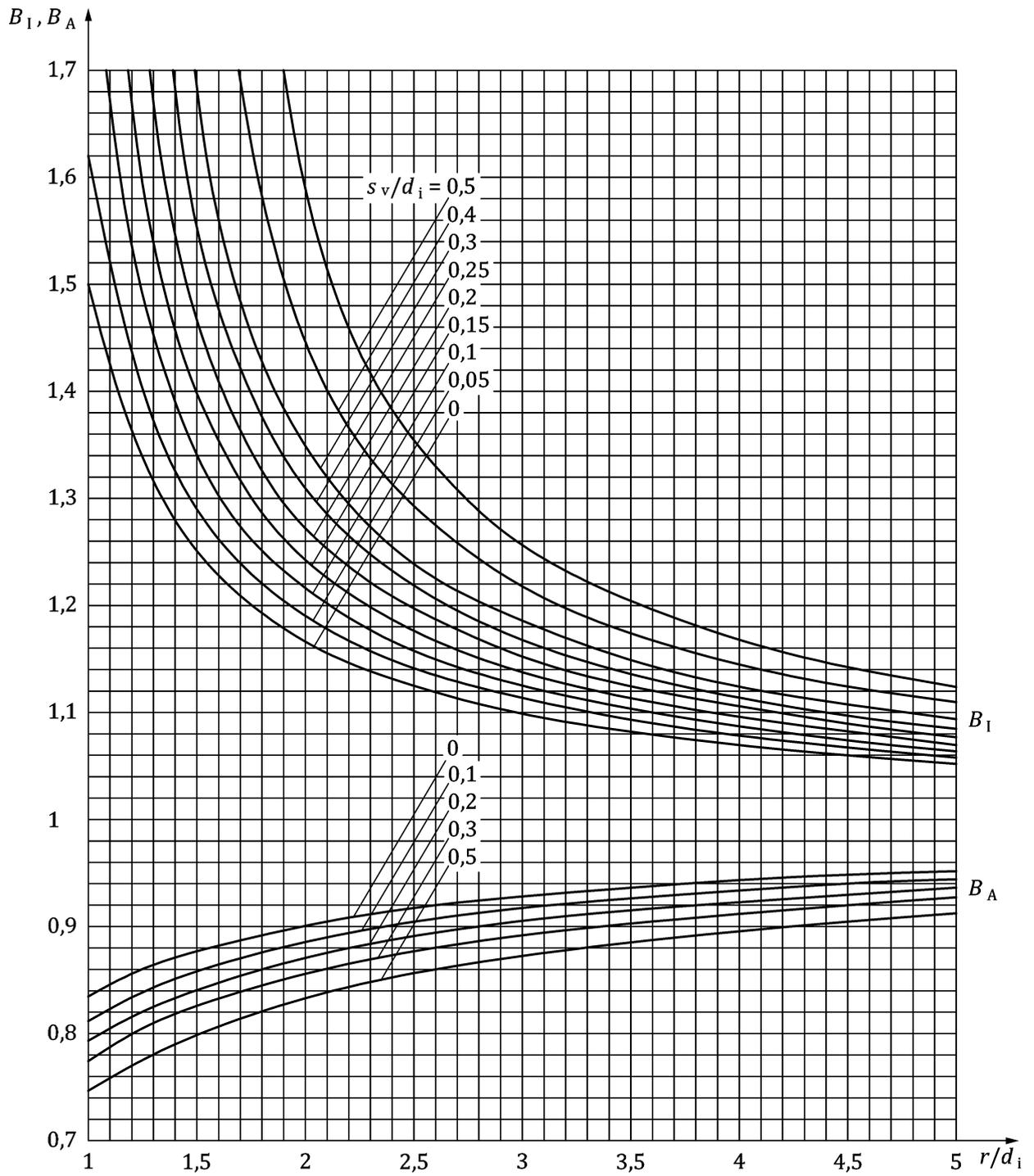


Bild 3 — B_1 und B_A bei vorgegebenem Innendurchmesser

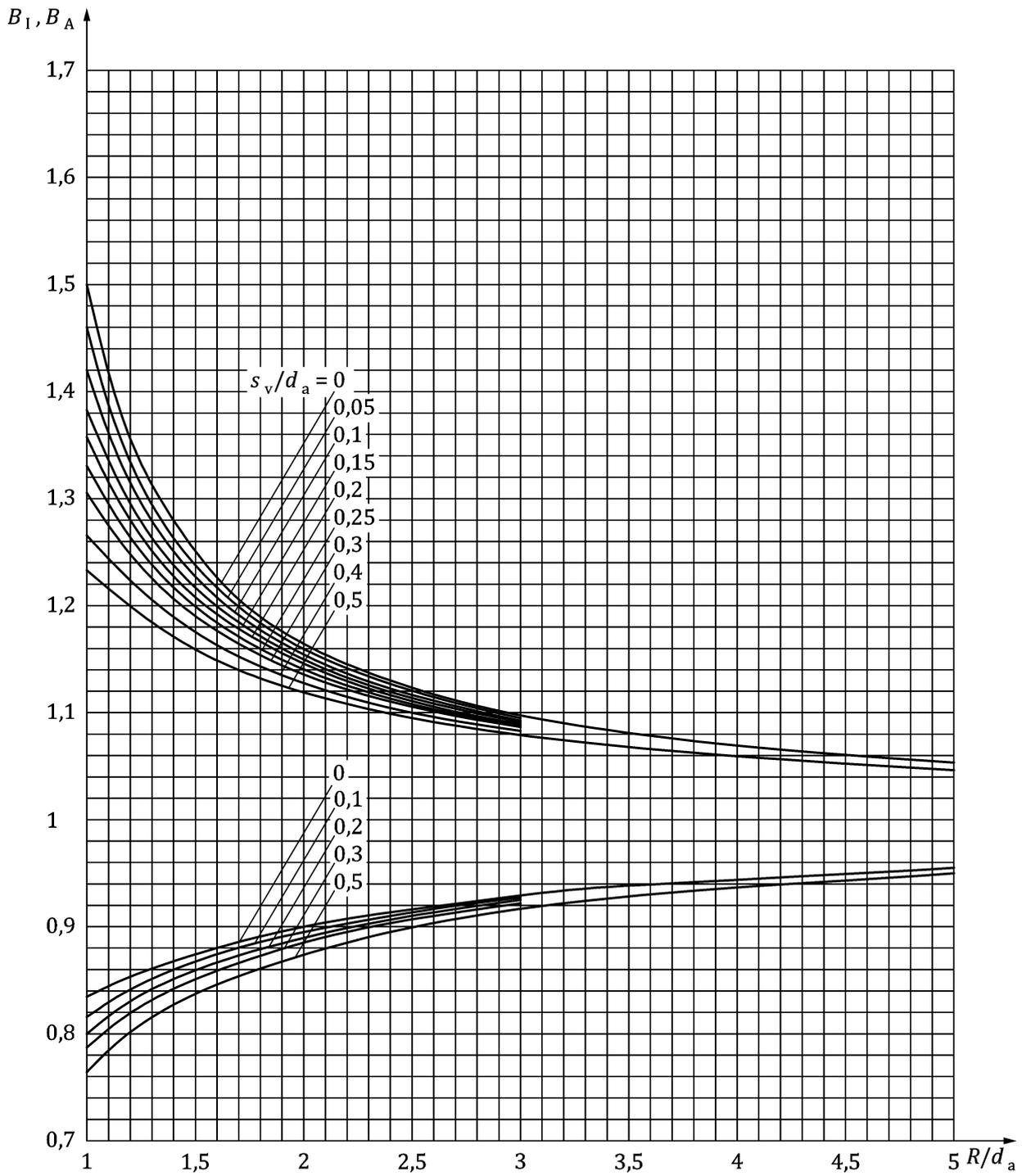


Bild 4 — B_I und B_A bei vorgegebenem Außendurchmesser

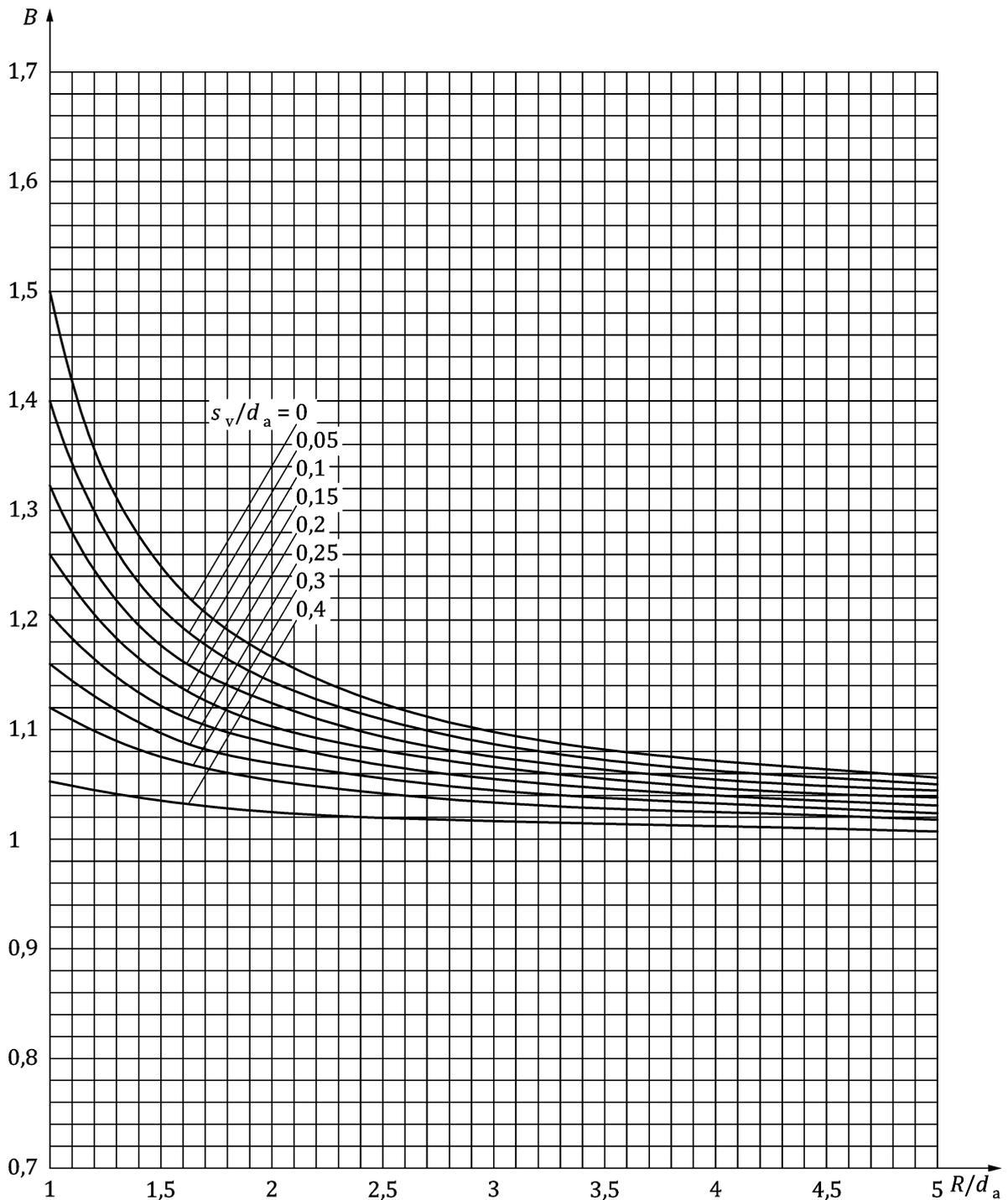


Bild 5 — Berechnungsbeiwert B für Rohrbögen gleicher Wanddicke $s_{vi} = s_{va}$ mit Außendurchmesser = Nenndurchmesser

6 Erläuterung zur Berechnung von Rohren nach Tabelle 3

6.1 Allgemeines

Die Berechnung gilt für unter Innendruck stehende Rohre. Den Gleichungen (1), (2) und (3) der Tabelle 3 liegt die Schubspannungshypothese zu Grunde, die nur die größte und kleinste Hauptspannung, d. h. bei Beanspruchung des Rohres durch Innendruck in der Regel die Spannungen σ_u und σ_r berücksichtigt. Solange die Längs-

spannung σ_1 aus Innendruck und Zusatzbeanspruchungen (siehe Abschnitt 7.2) in den Grenzen zwischen σ_u und σ_r bleibt, d. h. solange

- für Gleichung (1, 2)
$$-p \leq \sigma_1 \leq \frac{p \cdot d_i}{2s}$$
- für Gleichung (3)
$$-p \leq \sigma_1 \leq \frac{p \cdot (d_i + s)}{2s}$$

erfüllt ist, wird das Ergebnis der Berechnung nicht beeinflusst.

Überschreiten die Beanspruchungen die genannten Grenzen, muss Abschnitt 7.2 berücksichtigt werden.

6.2 Berechnungsdruck

Unter Berechnungsdruck p ist der innere Überdruck in einem Rohrleitungsabschnitt unter Beachtung aller Betriebszustände zu verstehen.

Für den Berechnungsdruck p ist dabei der größere der unter 1) und 2) angeführten Werte einzusetzen.

- 1) Maximal möglicher Überdruck an der Sicherheitseinrichtung zuzüglich Druck aus Höhendifferenz zwischen Sicherheitseinrichtungen und tiefstem Leitungspunkt.
- 2) Die nachfolgenden Anteile des Spitzendruckes \hat{p} (maximal möglicher innerer Überdruck), der sich bei den zu erwartenden Betriebszuständen einschließlich der Druckerhöhungen infolge Höhendifferenz, Druckverlust und dynamischer Vorgänge (z. B. Druckstoß) ergibt:

$p = 1,00\hat{p}$, wenn die Wirkungszeit des Spitzendruckes mehr als 10 % der vorgesehenen Gesamtbetriebszeit beträgt.

$p = 0,83\hat{p}$, wenn die Wirkungszeit des Spitzendruckes nicht mehr als 1 % der vorgesehenen Gesamtbetriebszeit beträgt.

Zwischenwerte müssen linear interpoliert werden.

Die unter 2) aufgeführten abgeminderten Spitzendrücke infolge Druckstoß gelten nur für die Berechnung gegen vorwiegend ruhende Beanspruchungen (Geltungsbereich I). Bei Berechnung gegen schwellende Beanspruchungen (Geltungsbereich III) sowie bei den Abgrenzungen gegen schwellende Beanspruchung nach 6.3 sind die tatsächlichen Spitzendrücke infolge Druckstoß einzusetzen.

Dynamische Druckänderungen (Druckstöße) müssen insbesondere bei flüssigen Medien beachtet werden.

6.3 Zulässige Beanspruchung

6.3.1 Allgemeines

Die zulässige Beanspruchung ist $\sigma_{zul} = K/S = Y \cdot K$ (siehe Tabelle 6 und Tabelle 7). Die Schreibweise $Y \cdot K$ wird dabei aus dem internationalen Regelwerk zur Berechnung von Rohren für Rohrleitungen übernommen. Der Faktor Y gibt an, welcher Nutzungsgrad dem Festigkeitskennwert K bei dieser Beanspruchung zugeordnet werden kann. Die Werte für den Sicherheitsbeiwert S und den Nutzungsgrad Y sind in Tabelle 3 angegeben.

Bei schwellender Beanspruchung ist eine Berechnung gegen vorwiegend ruhende Beanspruchung (Geltungsbereich I) ausreichend, wenn im Betrieb die für verschiedene Zugfestigkeiten in Tabelle 6 und Tabelle 7 angegebenen und mit der Lastspielsicherheit $S_L = 10$ ermittelten Lastspielzahlen bei den jeweils aufgeführten, der Berechnung zu Grunde liegenden zulässigen Beanspruchungen σ_{zul} nicht überschritten werden. Bei der Ermittlung der Lastspielsicherheit sind nur die Druckänderungen großer Schwingbreite, wie sie z. B. beim

An- und Abfahren einer Rohrleitung entstehen, in Betracht zu ziehen. Sind höhere Lastspielzahlen zu erwarten, so muss zusätzlich nach Geltungsbereich III gerechnet werden.

Tabelle 6 — Grenzlastspielzahlen für nahtlose Stahlrohre mit einem äußeren Durchmesser > 114,3 mm (Ermittlung mit $S_L = 10$ aus Bild 6)

σ_{zul} N/mm ²	R_m^v N/mm ²				
	350 bis 450	500	550	600	650
160	100 000	> 100 000	> 100 000	> 100 000	> 100 000
180	50 000	90 000	> 100 000	> 100 000	> 100 000
200	30 000	50 000	80 000	> 100 000	> 100 000
250	—	17 000	26 000	40 000	56 000
300	—	—	—	16 000	22 000
350	—	—	—	—	10 000

Tabelle 7 — Grenzlastspielzahlen für nahtlose Stahlrohre mit einem äußeren Durchmesser ≤ 114,3 mm, Güteeigenschaften nach DIN EN 10216-1 oder vergleichbaren Normen und Regelwerken (Ermittlung mit $S_L = 10$ aus Bild 7)

σ_{zul} N/mm ²	R_m^v N/mm ²			
	350	400	450	500
160	> 100 000	> 100 000	> 100 000	> 100 000
180	70 000	> 100 000	> 100 000	> 100 000
200	—	—	> 100 000	> 100 000
250	—	—	—	70 000

6.3.2 Geltungsbereich I, vorwiegend ruhend beansprucht bis 120 °C

Als Festigkeitskennwert K ist der spezifizierte Mindestwert der Streckgrenze bei 20 °C einzusetzen. Bei Feinkornbaustählen nach DIN EN 10216-3 und bei austenitischen Stählen, die bei Betriebstemperaturen über 50 °C verwendet werden, ist jedoch die Streckgrenze bei Betriebstemperatur maßgebend.

Für Temperaturen unter 20 °C ist die Streckgrenze bei 20 °C einzusetzen.

Bei der Verwendung von Sonderstählen mit hohem Verhältnis der spezifizierten Mindestwerte von Streckgrenze zu Zugfestigkeit darf als Festigkeitskennwert K jedoch höchstens eingesetzt werden:

- $0,7R_m^v$ bei unvergüteten Stählen;
- $0,8R_m^v$ bei vergüteten Stählen sowie bei mikrolegierten, kontrolliert gewalzten Stählen mit niedrigem Kohlenstoff-Äquivalent.

Bei Vorliegen ausreichender und nachgewiesener Betriebsbewährung bzw. entsprechenden Eignungsnachweisen kann von diesen Grenzwerten abgewichen werden.

Eine ausreichende Betriebsbewährung ist an Rohren bzw. Rohrleitungen aus (dem beabsichtigten Anwendungsfall) den entsprechenden Stahlsorten mit $\frac{\sqrt{R_{p0,2}}}{\sqrt{R_m}} > 0,80$ (bzw. $> 0,7\sqrt{R_m}$)³ nachzuweisen. Diese Rohre müssen ihre rechnerische und betriebliche Ausnutzung in einem Bereich $K > 0,8\sqrt{R_m}$ (bzw. $> 0,7\sqrt{R_m}$) haben, der ebenfalls den Verhältnissen des beabsichtigten Anwendungsfalles entspricht.

Für Rohre aus „neuen“ Stählen oder solchen, für die eine ausreichende Betriebsbewährung nicht zweifelsfrei nachgewiesen werden kann, müssen entsprechende Eignungsnachweise für eine Anwendung von $K > 0,8\sqrt{R_m}$ (bzw. $> 0,7\sqrt{R_m}$) erbracht werden.

Die verwendeten Stähle müssen ein genügend hohes Formänderungsvermögen aufweisen. Die untere Grenze hierfür ist der Wert der Bruchdehnung $A = 14\%$ ($L_o = 5,65 \cdot \sqrt{S_o}$) der Längsprobe bei 20 °C.

Bei austenitischen Stählen mit einem Verhältnis von 0,2 %-Dehngrenze zu Zugfestigkeit $\frac{\sqrt{R_{p0,2}}}{\sqrt{R_m}} \leq 0,5$ bei 20 °C dürfen die Rohre unter Zugrundelegung der 1 %-Dehngrenze $\sqrt{R_{p1,0}}$ berechnet werden.

Die in Tabelle 3 angegebenen Sicherheitsbeiwerte sind Mindestwerte. Sie müssen abhängig von der für Längsproben⁴ bei 20 °C geltenden Bruchdehnung der Werkstoffe ermittelt werden.

Zwischenwerte dürfen linear interpoliert bzw. bei kleineren Dehnungen als 15 % extrapoliert werden.

Rohre ohne Abnahmeprüfung dürfen nur aus unlegierten Stählen bis 550 N/mm² Mindestzugfestigkeit und aus austenitischen Stählen mit einer Bruchdehnung von $A \geq 40\%$ ($L_o = 5,65 \cdot \sqrt{S_o}$) vorgesehen werden.

6.3.3 Geltungsbereich III, schwelend beansprucht bis 120 °C

6.3.3.1 Allgemeines

Bei schwelend beanspruchten Rohren ist zu der Berechnung gegen Verformungen nach Geltungsbereich I zusätzlich die Untersuchung auf Zeitschwingbruch unter Berücksichtigung der in Betracht kommenden Lastspielzahl n bzw. auf Dauerbruch durchzuführen. Die dabei ermittelte größere Wanddicke muss gewählt werden.

a) Berechnung gegen unzulässiges Verformen

Die Berechnung ist nach Geltungsbereich I, 6.3.2 durchzuführen.

b) Prüfung auf Zeitschwingbruch bzw. Dauerbruch

Je nach Häufigkeit und Schwingbreite der in einem Rohrleitungsabschnitt auftretenden Druckschwankungen (Lastspielzahlen) muss die Prüfung auf Zeitschwingbruch bzw. die Berechnung gegen Dauerbruch durchgeführt werden.

Grenzkurven für die Zeit- bzw. Dauerschwellfestigkeit nahtloser Stahlrohre sind auf Grund von Innendruck-schwellversuchen mit jeweils konstanter Schwingbreite in Bild 6 und Bild 7 wiedergegeben.

In diesen Wöhlerkurven ist der Einfluss der Oberfläche, der Form und des Werkstoffes bereits erfasst, so dass diese Einflussgrößen nicht nochmals besonders berücksichtigt werden müssen.

3 Anstelle $\frac{\sqrt{R_{p0,2}}}{\sqrt{R_m}}$ auch $\frac{\sqrt{R_{eH}}}{\sqrt{R_m}}$ bzw. $\frac{\sqrt{R_{t0,5}}}{\sqrt{R_m}}$

4 Wird in den Werkstofftabellen die Bruchdehnung in Querrichtung angegeben, können die zur Ermittlung des Sicherheitsbeiwertes dienenden Dehnungswerte um 2 Einheiten erhöht werden.

Für nahtlose Rohre gelten die Schwellfestigkeitswerte nach Bild 6. Für nahtlose Rohre mit einem äußeren Durchmesser $d_a \leq 114,3$ mm mit besonders hohen Güteeigenschaften nach DIN EN 10216-1 oder vergleichbaren Lieferbedingungen dürfen die erhöhten Schwellfestigkeitswerte nach Bild 7 benutzt werden.

Nahtlose Rohre können auf unterschiedliche Weise hergestellt werden. Grundsätzlich unterscheidet man zwischen warmgewalzten und kaltgezogenen Rohren die unterschiedliche Eigenschaften bzgl. Werkstoffkenndaten und Oberflächenzustand haben. Daraus resultieren auch unterschiedliche Eigenschaften in der Druckbelastbarkeit. Bild 6 und Bild 7 zeigen typische Schwellfestigkeiten nahtloser Rohre. In der Hydraulik hat der Anteil der kaltgezogenen nahtlosen Rohre gegenüber den warmgewalzten zugenommen. Die nahtlos kaltgezogenen sogenannten Präzisionsstahlrohre ermöglichen herstellungsbedingt höhere Schwellfestigkeiten.

Für Präzisionsstahlrohre aus E235+N (nach DIN EN 10305-4) darf für die Berechnung ein Dauerschwellfestigkeitswert $\sigma_{Sch/D} = 225 \text{ N/mm}^2$ zugrunde gelegt werden.

Die Schwellfestigkeit steigt nicht proportional mit der Zugfestigkeit an. Höhere Schwellfestigkeitswerte für Präzisionsstahlrohre aus E355+N (nach DIN EN 10305-4) gegenüber dem E235+N werden zurzeit geprüft.

Die Angaben beziehen sich allgemein auf gerade Rohre mit in den zulässigen Toleranzen liegenden Formabweichungen.

Zu beachten ist weiterhin, dass die Schwellfestigkeit bei stark korrodierter Innenoberfläche der Rohre beträchtlich abfällt.

Über Lebensdauerbetrachtungen aus weiteren Einflussgrößen, z. B. Oberflächenschädigung.

6.3.3.2 Lastspiele gleicher Schwingbreite

Die Berechnung wird nach Gleichung (3) gegen Zeitschwingbruch durchgeführt. Die zulässige Beanspruchung $\tilde{\sigma}_{zul}$ der Rohre gegen Zeitschwingbruch ist aus Bild 1 und Bild 2 für die Bruchlastspielzahl $n_B = S_L \cdot n$ zu entnehmen. Dabei bedeutet n die im Laufe der gesamten vorgesehenen Betriebszeit zu erwartende Lastspielzahl, während S_L die Lastspielsicherheit darstellt.

Sind Betriebslastkollektive bekannt, genügt eine Lastspielsicherheit $S_L = 5$. Eine höhere Lastspielsicherheit wird empfohlen, wenn besondere Korrosionsbedingungen oder sonstige Oberflächenschädigungen zu erwarten sind.

Bei der Berechnung gegen Dauerbruch beträgt die zulässige Beanspruchung

$$\tilde{\sigma}_{zul} = \frac{\sigma_{Sch/D}}{S} \quad (35)$$

Als Sicherheitsbeiwert muss $S = 1,5$ eingesetzt werden.

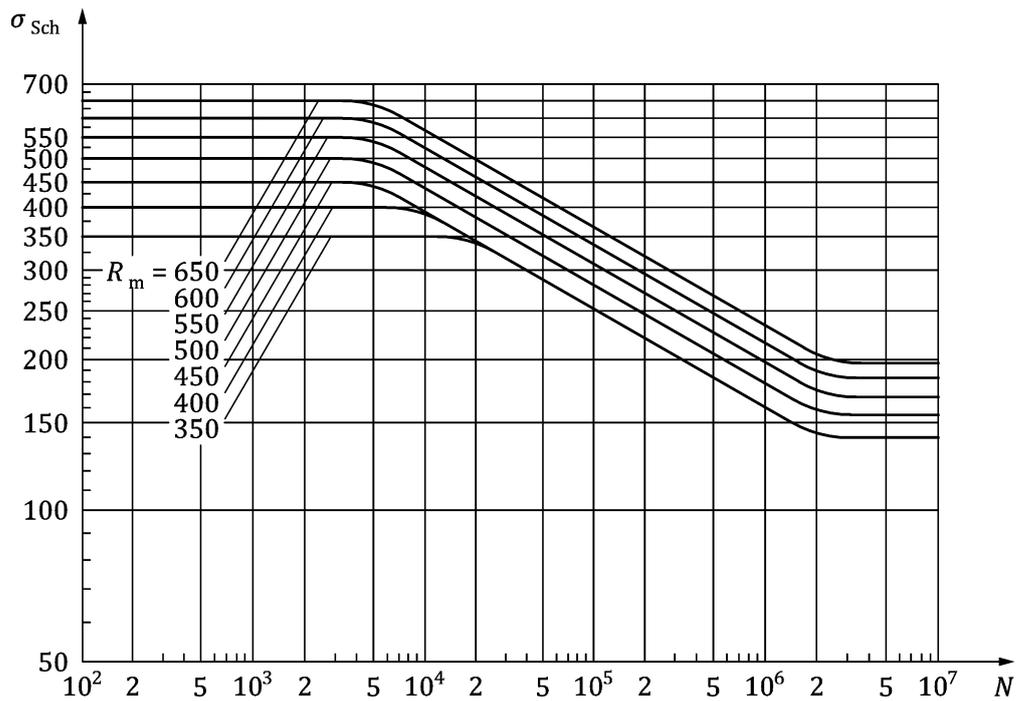


Bild 6 — Schwellfestigkeit nahtloser Stahlrohre mit einem äußeren Durchmesser $d_a > 114,3$ mm

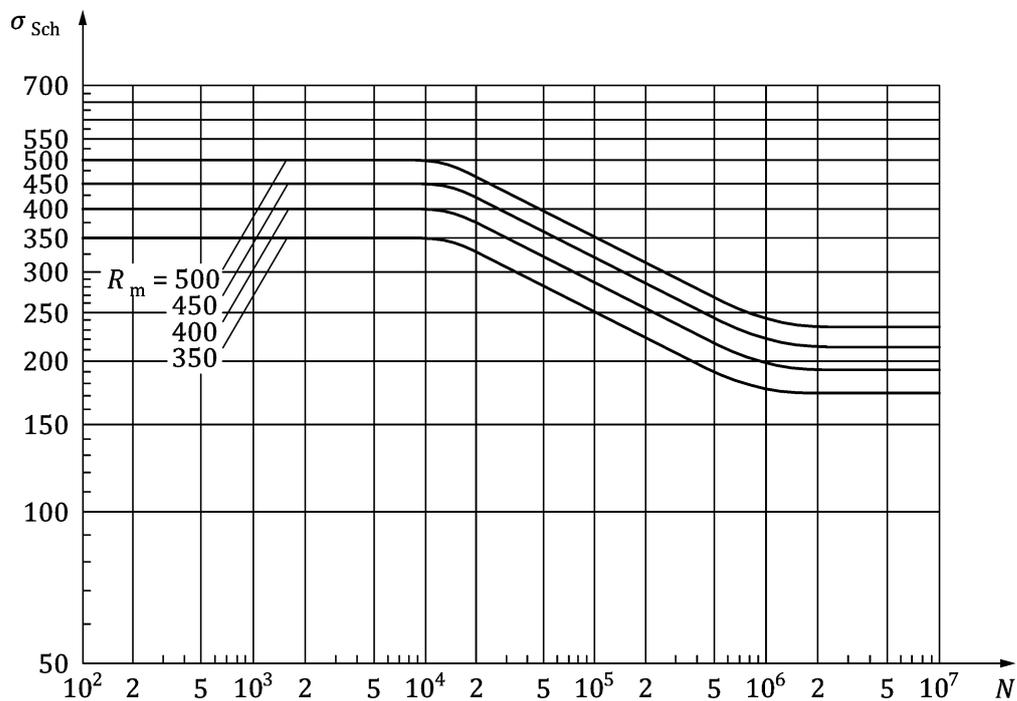


Bild 7 — Schwellfestigkeit nahtloser Stahlrohre mit einem äußeren Durchmesser $d_a \leq 114,3$ mm, Güteeigenschaften nach DIN EN 10216-1 oder vergleichbaren Normen und Regelwerken

6.3.3.3 Lastspiele unterschiedlicher Schwingbreite

Bei Rohren, die Innendrücker unterschiedlicher Höhe ausgesetzt sind, ist eine unmittelbare Berechnung der Wanddicke s_v nicht möglich. Die Untersuchung erstreckt sich dann auf die Nachprüfung der im Laufe des Betriebes zu erwartenden Schädigung.

Das kann nach der linearen Schädigungs-Akkumulations-Hypothese („Miner-Regel“) erfolgen. Dazu müssen mit ungünstigster Kombination der Drücke für die unterschiedlichen Druckschwingbreiten

$$\Delta p_i = \hat{p}_i - \check{p}_i \quad (36)$$

die sich aus Gleichung (3) ergebenden Spannungsschwingbreiten

$$\sigma_{Schi} = 0,5 \cdot \Delta p_i \cdot (1 + d_a/s_v) \quad (37)$$

ermittelt werden und dafür aus dem zutreffenden Bild 6 und Bild 7 die zugehörigen N_i entnommen werden.

Spannungsschwingbreiten mit einer größeren Mittelspannung als $\sigma_M \geq \frac{\Delta\sigma}{2}$ müssen mit einer Korrektur versehen werden:

$$\sigma_{Schi} = \frac{2R_m^2}{\Delta\sigma} \left[\sqrt{\left(1 - \left(\frac{\sigma_M}{R_m}\right)^2\right)^2 + \left(\frac{\Delta\sigma}{R_m}\right)^2} + \left(\frac{\sigma_M}{R_m}\right)^2 - 1 \right] \quad (38)$$

Mit den gegebenen Betriebslastspielzahlen n_i ergibt sich dann für die Schädigung D die Bedingung:

$$D = \sum_{i=1}^m \frac{n_i}{N_i} = \frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \dots + \frac{n_m}{N_m} \leq \frac{1}{S_L} \text{ mit } S_L \geq 5 \quad (39)$$

Sind keine Betriebslastkollektive bekannt, sondern liegen nur Angaben über die zu erwartenden Druckänderungen beim An- und Abfahren vor, so muss mit einer Lastspielsicherheit $S_L \geq 10$ gerechnet werden.

6.4 Berechnungstemperatur

Die Berechnungstemperatur ist die zur Festlegung der Festigkeitskennwerte maßgebende Rohrwandtemperatur.

Bei unbeheizten Rohren gilt als Berechnungstemperatur die höchste zu erwartende Temperatur des Durchflussmediums unter Beachtung aller Betriebszustände.

Sind für die Wanddickenberechnung Zeitstandfestigkeitswerte maßgebend, ist eine um 5 K (Messtoleranz) über der Mediumtemperatur liegende Berechnungstemperatur anzusetzen.

ANMERKUNG Angaben über Berechnungstemperaturen von beheizten Rohren enthält AD 2000-Merkblatt B 0.

6.5 Berücksichtigung des Druckstoßes

Dynamische Druckänderungen (Druckstöße) sind den stationären Betriebsdrücken für den Normalbetrieb hinzuzurechnen. Bei Rohrleitungen, die bei hoher Temperatur gegen die Zeitstandfestigkeit ausgelegt werden, muss diese Druckerhöhung nur bei der Überprüfung der Sicherheit gegen die Warmstreckgrenze berücksichtigt werden.

Druckstöße treten auf, wenn die Strömungsgeschwindigkeit in einer Rohrleitung verändert wird, z. B. durch Schließen oder Öffnen von Absperr- oder Regelarmaturen, bei In- und Außerbetriebnahme von Pumpen, Turbinen, Kompressoren oder ähnliches.

Wasserschläge sind Folge eines negativen Druckstoßes und entstehen nach dem Abreißen der Wassersäule infolge Unterdruck durch das nachfolgende, ungedämpfte Wiederauftreten der rückströmenden Wassersäule auf das Absperrorgan.

Wesentliche Einflussgrößen auf die Höhe eines Druckstoßes Δp sind die Länge l des maßgebenden Rohrleitungsabschnitts, die Schließ- oder Stellzeit T_S des Steuerorgans, die Strömungsgeschwindigkeit w und die Fortpflanzungsgeschwindigkeit a der Druckwelle im Medium. Unter Vernachlässigung der Reibungseinflüsse in der Flüssigkeit beträgt bei einer plötzlichen Geschwindigkeitsänderung

$$\Delta w = w_1 - w_2$$

die maximale Druckänderung:

$$\Delta p = \frac{\rho \cdot a \cdot \Delta w}{10^6} \quad (40)$$

Der maximale Druckstoß (Joukowsky-Stoß) errechnet sich nach Gleichung (40), wenn die Strömungsgeschwindigkeit von w_1 auf $w_2 = 0$ plötzlich, d. h. in einer sehr kurzen Schließzeit

$$T_S \left(T_S < T_R \text{ mit Reflexionszeit } T_R = 2 \frac{l}{a} \right)$$

reduziert wird.

Bei Steuerorganen mit einer linearen Geschwindigkeitsänderung kann durch eine Verlängerung der Schließzeit auf mehrere Reflexionszeiten eine merkliche Reduzierung des Druckstoßes bewirkt werden mit

$$\Delta p = \frac{\rho \cdot a \cdot \Delta w}{10^6} \cdot \frac{T_R}{T_S} \quad (41)$$

Für Hydraulikleitungen mit verhältnismäßig dickwandigen Rohren gilt als Mittelwert für Wasser und für dünnflüssige Öle $a \approx 1\,300$ m/s.

Die oben genannten Gleichungen können nur für näherungsweise Berechnung des Druckstoßes verwendet werden. Es empfiehlt sich daher, druckstoßgefährdete Rohrleitungen, darunter fallen auch solche für hochverdichtete Gase, genau zu untersuchen, um möglichst alle Einflussgrößen zu erfassen und abzuwägen, sowie gegebenenfalls druckstoßdämpfende (z. B. konstruktive) Maßnahmen vorzusehen.

6.6 Zuschlag c

6.6.1 Allgemeines

Der Zuschlag setzt sich aus den Einzelzuschlägen für zulässige Wanddicken-Unterschreitung c_1 sowie für Korrosion bzw. Abnutzung c_2 zusammen.

6.6.2 Zuschlag c_1 zum Ausgleich der zulässigen Wanddicken-Unterschreitung

Bei allen drei Geltungsbereichen sind die bei der Herstellung nahtloser Rohre zulässigen Wanddicken-Unterschreitungen als Wert c_1 der errechneten Wanddicke s_v zuzuschlagen. Der Wert c_1 bzw. c_1' ist in den technischen Lieferbedingungen für nahtlose Rohre festgelegt. Wird die zulässige Wanddicken-Unterschreitung c_1' in % angegeben, so errechnet sich der absolute Zuschlag c_1 in mm wie folgt:

$$c_1 = (s_v + c_2) \frac{c_1'}{100 - c_1'} \quad (42)$$

Bei der Berechnung von Rohren im Geltungsbereich dieses Dokuments müssen nur die Wanddicken-Unterschreitungen, die über die ganze Länge der Rohre zulässig sind, nach den technischen Lieferbedingungen berücksichtigt werden. Die darüber hinausgehenden begrenzten Unterschreitungen, die sich nur auf einen kleinen Längenbereich erstrecken und die in den technischen Lieferbedingungen ebenfalls festgelegt sind, brauchen bei der Ermittlung des Zuschlages c_1 nicht beachtet zu werden.

6.6.3 Zuschlag c_2 zur Berücksichtigung von Korrosion bzw. Abnutzung

In dem Zuschlag c_2 wird eine Wanddicken-Verminderung berücksichtigt, die durch Korrosion und/oder durch Abnutzung hervorgerufen werden kann; er ist abhängig von Medium und Umgebung festzulegen. Die Verminderung der Schwellfestigkeit durch Korrosion wird durch einen solchen Zuschlag c_2 nicht erfasst.

Für c_2 ist bei ferritischen Stählen im Allgemeinen ein Wert von 1 mm ausreichend. Bei austenitischen Stählen braucht im Allgemeinen ein Zuschlag für Korrosion nicht berücksichtigt zu werden.

Der Zuschlag kann entfallen, wenn der Korrosionsgefahr vorgebeugt wird bzw. kein Verschleiß zu erwarten ist. Werkstoffbeeinflussung durch Spannungsrisskorrosion oder ähnliche Erscheinungen sind besonders zu berücksichtigen und können durch einen Zuschlag c_2 nicht abgedeckt werden.

6.7 Prüfdruck für das einzelne Rohr

Die Höhe des Prüfdruckes für den im Herstellerwerk am geraden Rohr durchgeführten Innendruckversuch ist im Allgemeinen in den technischen Lieferbedingungen angegeben bzw. kann zwischen Besteller und Hersteller vereinbart werden.

Soll ein Überschreiten der Streckgrenze an der Innenfaser des Rohres vermieden werden, so darf unter Anwendung der Gestaltänderungsenergie-Hypothese der Prüfdruck nicht höher sein als

$$p' = B_p \cdot Y' \cdot R_{eH} \frac{2 \cdot (s - c_1)}{d_a} \quad (43)$$

Der Faktor B_p , der die beim Prüfen in der Presse auftretende Entlastung in Längsrichtung sowie den zum Dichthalten auf die Rohrenden wirkenden Druck berücksichtigt, beträgt für Rohre

$$\begin{aligned} \text{mit } s/d_a \leq 0,1 & \quad B_p = 0,96 \\ \text{mit } s/d_a > 0,1 & \quad B_p = 1,02 - 0,6 s/d_a \end{aligned} \quad (44)$$

Der Nutzungsgrad der Streckgrenze R_{eH} bzw. $R_{p0,2}$ beträgt im Allgemeinen $Y' \leq 0,95$; damit wird der Labilität im Gebiet der oberen Streckgrenze sowie den im Bereich der 0,2 %-Dehngrenze schon auftretenden bleibenden Dehnungen am Rohr Rechnung getragen.

Wird ein höherer Prüfdruck als nach Gleichung (43) durch Wahl von Y' bis 1,0 zwischen Besteller und Hersteller vereinbart, so muss ein einseitiges Fließen an der Stelle der geringsten Wanddicke und eine Vergrößerung des Durchmesserfeldes des einzelnen Rohres erwartet werden.

7 Berechnungsgrundsätze für Rohre

7.1 Allgemeines

Im Allgemeinen genügt die Wanddickenberechnung gegen vorwiegend ruhende Beanspruchung aus Innendruck nach Geltungsbereich I, wie aus Tabelle 6 und Tabelle 7 zu ersehen ist. Werden die dort angegebenen Grenzlastspielzahlen überschritten, müssen derartige Rohre nach Geltungsbereich III berechnet bzw. nachgeprüft werden. Auftretende, auch wechselnde Zusatzbeanspruchungen müssen gegebenenfalls beachtet werden.

Gegenüber der gesamten Wechselbeanspruchung $\tilde{\sigma}_v$ (siehe 7.4.4) sollte mindestens eine Lastwechselsicherheit von $S_L = 5$ gegenüber der in Betracht kommenden Zeitschwellfestigkeit bzw. 1,1fache Sicherheit gegen Dauerschwellfestigkeit gefordert werden.

7.2 Zusatzbeanspruchungen

7.2.1 Allgemeines

Die wichtigsten Zusatzbeanspruchungen von Rohren in Rohrleitungen ergeben sich durch die in 7.2.2 bis 7.2.6 angegebenen Kriterien.

7.2.2 Biegemomente aus Streckenlasten infolge Eigengewicht der Rohrleitung einschließlich Beschichtung, Auskleidung, Dämmung und Rohrinhalt, Wind- und Schneelasten, Ein- oder Aufbauten usw.

Durch Streckenlasten hervorgerufene Biegemomente ergeben bei nicht erdgedeckten Rohrleitungen Längsspannungen, die im Allgemeinen statischen Nachweis berücksichtigt werden müssen. Ebenso müssen örtlich an den Auflagerstellen auftretende Beanspruchungen beachtet werden.

7.2.3 Biegemomente aus einer elastischen Krümmung der Rohrachse bei der Verlegung

Die Spannung in Längsrichtung, die sich bei einer elastischen Krümmung der Achse mit dem Radius r ergibt, beträgt

$$\sigma_l = \pm \frac{E \cdot d_a}{2r} \quad (45)$$

7.2.4 Kräfte und Momente infolge behinderter Wärmedehnungen der Rohrleitung und dadurch entstehende Längsspannungen

Kräfte und Momente infolge behinderter Wärmedehnung führen beim geraden Rohr in ebenen Systemen zu Längsspannungen, in räumlichen Systemen außerdem zu Torsionsspannungen.

Eine Wanddickenvergrößerung bedeutet im Hinblick auf behinderte Wärmedehnung keine Verbesserung der Konstruktion, sondern führt zu einer weiteren Erhöhung der Zwangskräfte.

Die Beanspruchung aus behinderter Wärmedehnung kann bei oberirdischen Leitungen durch Wahl einer zweckmäßigen Leitungsführung und die richtige Anordnung der Festpunkte sowie durch den Einbau von Dehnungsausgleichern günstig beeinflusst werden. Weiterhin besteht die Möglichkeit, die Kraftwirkungen im Betriebszustand durch Vorspannen der Leitung bei der Montage zu vermindern.

7.2.5 Ungleichmäßige Temperaturverteilung über die Wanddicke

Die Wärmespannungen in der Wandung bei einem Temperaturunterschied $\Delta\vartheta$ zwischen der Rohrinne- und Rohraußenseite können bis zu $u = d_a/d_i = 1,2$ für die Umfangs- und Längsrichtung näherungsweise berechnet werden zu

$$\sigma_{uw} = \sigma_{lw} \approx \pm \frac{1}{2} \cdot \frac{E}{1-\nu} \cdot \alpha_l \cdot \Delta\vartheta \quad (46)$$

wobei auf der kälteren Seite die Zugspannungen entstehen. Für genauere Berechnungen, insbesondere bei dickeren Wandungen.

Die Wärmespannungen σ_w , die sich in Rohren ergeben, wenn mit der Temperaturänderungsgeschwindigkeit w_ϑ an- oder abgefahren wird, betragen für unlegierte und niedriglegierte Stahlrohre näherungsweise

$$\sigma_{uw} = \sigma_{lw} \approx \pm \frac{2}{10^{10}} \cdot E \cdot w_\vartheta \cdot s^2 \quad (47)$$

bzw. für austenitische Stahlrohre

$$\sigma_{uw} = \sigma_{lw} \approx \pm \frac{5}{10^{10}} \cdot E \cdot w_{\vartheta} \cdot s^2 \quad (48)$$

Beträchtliche Wärmespannungen können durch plötzliches Aufheizen oder Abkühlen (Thermoschock) entstehen.

7.2.6 Biegemomente in Umfangsrichtung infolge Unrundheit

Werden unrunde Rohre unter Innendruck gesetzt, so ergeben sich in der Wandung Biegespannungen in Umfangsrichtung, da der innere Überdruck den unrunder Rohrquerschnitt rund zu drücken sucht. Bei Annahme eines etwa elliptischen Ausgangsquerschnittes mit der Abweichung des Halbmessers von der Kreisform Δr treten die maximalen Umfangsbiegespannungen in den Scheitelpunkten der Ellipse auf. Ihr Wert errechnet sich zu

$$\hat{\sigma}_{u,b} = \pm \frac{p \cdot d_i}{2 \cdot s_v} \cdot \frac{6\Delta r}{s_v} \cdot \frac{1}{B_u} \quad (49)$$

mit dem Beiwert,

$$B_u = 1 + \frac{1 - \nu^2}{2} \cdot \frac{p}{E} \cdot \left(\frac{d_a - s_v}{s_v} \right)^3 \quad (50)$$

Im Allgemeinen brauchen bei Rohren unter vorwiegend ruhender Innendruckbeanspruchung die Spannungen aus Unrundheit nicht berücksichtigt zu werden.

Bei schwellender Innendruckbeanspruchung ist die entsprechend den technischen Lieferbedingungen für Rohre (z. B. DIN EN 10216-1 und DIN EN 10305-4) zulässige Unrundheit in den Schwellfestigkeitswerten von Bild 6 und Bild 7 bereits berücksichtigt. Für darüber hinausgehende Unrundheiten muss die entsprechende Biegespannung nach Gleichung (49) den Spannungen aus dem Innendruck sowie aus anderen zusätzlichen Belastungen überlagert werden. Als Vergleichswerte sind Bild 6 und Bild 7 mit den Sicherheitsbeiwerten nach Tabelle 3, Geltungsbereich III heranzuziehen.

7.3 Äußerer Überdruck

Bei Rohren unter äußerem Überdruck oder innerem Unterdruck ist die Sicherheit gegen Einbeulen nachzuweisen. Äußerer Überdruck und innerer Unterdruck müssen bei gleichzeitigem Auftreten addiert werden.

Der kritische Außendruck, bei dem das elastische Einbeulen eines kreisrunden Rohres erfolgt, beträgt

$$p_k = \frac{2E}{1 - \nu^2} \cdot \left(\frac{s}{d_a} \right)^3 \quad (51)$$

Formabweichungen beeinträchtigen die Einbeulfestigkeit beträchtlich. Mit Rücksicht auf mögliche Unrundheit der Rohre muss im Allgemeinen eine Sicherheit von mindestens $S_K = 3$ gegenüber dem vorhandenen Außendruck gefordert werden.

Tritt Unterdruck allein auf oder ist der äußere Überdruck zuzüglich etwa vorhandenem Unterdruck nicht größer als $0,1 \text{ N/mm}^2$ ($= 1 \text{ bar}$), so braucht der Beulnachweis nur für Rohre mit einem Wanddicken-Durchmesserverhältnis $s/d_a < 0,01$ geführt zu werden.

7.4 Einteilung und Bewertung der Spannungen

7.4.1 Allgemeines

Die Beanspruchungen lassen sich hinsichtlich ihrer Ursache und Auswirkung unterteilen. Sie dürfen nach dem Verfahren der Spannungskategorisierung oder mit Hilfe des Bauteilfließkonzeptes bewertet werden. Beide Verfahren liefern annähernd gleiche sicherheitstechnische Aussagen.

7.4.2 Spannungskategorien

Je nach Ursache und nach Auswirkung auf das Bauteilverhalten werden die Spannungen in folgende Spannungskategorien unterteilt:

- Primärspannungen;
- Sekundärspannungen;
- Spannungsspitzen.

Wegen ihrer unterschiedlichen sicherheitstechnischen Bedeutung dürfen sie in unterschiedlicher Höhe zugelassen werden.

Das Verfahren der Spannungskategorisierung ist sowohl für statische als auch für schwingende Beanspruchungen anwendbar und setzt ideal elastisch berechnete Spannungen voraus, ist aber nicht für Stabilitätsberechnungen anwendbar.

7.4.2.1 Primärspannungen

Darunter sind solche linear verteilte Spannungen oder Spannungsanteile zu verstehen, die das Gleichgewicht mit den äußeren Lasten herstellen. Diese Lasten bleiben auch nach dem Plastifizieren des Querschnittes erhalten (d. h. sie bauen sich nicht ab). Dazu gehören z. B. folgende Lasten:

- Innen- und Außendruck;
- Gewichts-, Schnee- und Windlasten bei Leitungen im Freien.

7.4.2.2 Sekundärspannungen

Sekundärspannungen sind solche linear verteilten Spannungen oder Spannungsanteile, die sich aus behinderter Wärmedehnung oder infolge geometrischer Unstetigkeiten unter äußeren Belastungen ergeben. Darunter fallen z. B. Spannungen aus

- behinderter Wärmedehnung der Rohrleitung,
- ungleichmäßigen Temperaturen über die Wanddicke,
- unterschiedlichem Dehnverhalten an Übergängen zu anderer geometrischer Form (z. B. unterschiedliche Wanddicken, aufgesetzte Ringe, Übergänge zu Böden usw.),
- Unrundheit bei innerem Überdruck.

Die Sekundärspannungen können sich im Falle der Überbeanspruchung durch plastisches Verformen abbauen. Sie führen somit bei vorwiegend ruhender Belastung nie unmittelbar zum Versagen, können jedoch bei oft wiederholten Verformungswechseln Ursache von Ermüdungsbrüchen sein.

7.4.2.3 Spannungsspitzen

Spannungsspitzen sind solche nichtlinear verteilte Spannungen, die der Summe der primären und sekundären Spannungen in eng begrenzten Bereichen überlagert sind. Sie bewirken zwar örtliche Dehnungen, jedoch keine merklichen Verformungen der Gesamtstruktur und sind in Verbindung mit primären und sekundären Spannungen nur im Hinblick auf das Ermüdungsverhalten des Bauteiles von Bedeutung.

Zu den Spannungsspitzen zählen z. B.:

- Kerbspannungen;
- Lochrandspannungen;
- Spannungen aus Thermoschock bei An- oder Abfahren einer Rohrleitung.

7.4.3 Bauteilfließkonzept

Es wird das integrale Bauteilverhalten untersucht und bewertet. Dabei wird bei inhomogen beanspruchten Bauteilen berücksichtigt, dass bei örtlicher überelastischer Beanspruchung die zuvor weniger beanspruchten Bauteilbereiche stärker zur Lastaufnahme herangezogen werden. Dies führt zu einer besseren Bauteilausnutzung. Das Verfahren ist nur für vorwiegend ruhende Belastungen anwendbar.

Es darf auf die Beurteilung von Abzweigen, Rohrbögen und durch Lasteinleitungen örtlich beanspruchter Rohre angewendet werden.

7.4.4 Vergleichsspannungen

Zur Beurteilung eines mehrachsigen Spannungszustandes können die Schubspannungs- oder die Gestaltänderungsenergie-Hypothese verwendet werden. Vergleichsspannungen sind

a) nach der Schubspannungs-Hypothese

$$\sigma_{\text{vSH}} = \sigma_{\text{max}} - \sigma_{\text{min}} \quad (52)$$

b) nach der Gestaltänderungsenergie-Hypothese:

$$\sigma_{\text{vGE}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{(\sigma_{\text{u}} - \sigma_{\text{l}})^2 + (\sigma_{\text{l}} - \sigma_{\text{r}})^2 + (\sigma_{\text{r}} - \sigma_{\text{u}})^2} \quad (53)$$

zu ermitteln.

Für beide Gleichungen ist vorausgesetzt, dass die genannten Spannungen Hauptspannungen sind.

Je nach Beanspruchungsart sind in diese Gleichungen die Spannungen selbst oder die Spannungsschwingbreiten einzusetzen.

Die Schubspannungs-Hypothese liegt den Formeln der Tabelle 3 zu Grunde, siehe auch Abschnitt 6.

ANMERKUNG Die Gleichungen (51) und (52) gelten sowohl bei Anwendung der Spannungs-kategorisierung als auch bei einer Beurteilung nach dem Bauteilfließkonzept.

7.4.5 Begrenzung der Spannungen

Die Festlegung der zulässigen Spannungen hängt von den Berechnungsverfahren und den sicherheitstechnischen Anforderungen an die Rohre ab. Angaben dazu finden sich in AD 2000-Merkblatt S 2.

Literaturhinweise

DIN 2445-1, *Nahtlose Stahlrohre für schwellende Beanspruchungen — Teil 1: Warmgefertigte Rohre für hydraulische Anlagen 100 bar bis 500 bar*

DIN 2445-2, *Nahtlose Stahlrohre für schwellende Beanspruchungen — Teil 2: Präzisionsstahlrohre für hydraulische Anlagen 100 bar bis 500 bar*

DIN EN 764-1, *Druckgeräte — Teil 1: Vokabular*

DIN EN 764-2, *Druckgeräte — Teil 2: Größen, Symbole und Einheiten*

DIN EN 1333, *Flansche und ihre Verbindungen — Rohrleitungsteile — Definition und Auswahl von PN*

DIN EN 10216-2, *Nahtlose Stahlrohre für Druckbeanspruchungen — Technische Lieferbedingungen — Teil 2: Rohre aus unlegierten und legierten Stählen mit festgelegten Eigenschaften bei erhöhten Temperaturen*

DIN EN 10216-4, *Nahtlose Stahlrohre für Druckbeanspruchungen — Technische Lieferbedingungen — Teil 4: Rohre aus unlegierten und legierten Stählen mit festgelegten Eigenschaften bei tiefen Temperaturen*

DIN EN ISO 3183, *Erdöl- und Erdgasindustrie — Stahlrohre für Rohrleitungstransportsysteme*

DIN ISO 10763, *Fluidtechnik — Nahtlose und geschweißte Präzisionsstahlrohre — Maße und Nenndrucke*

AD 2000-Merkblatt B 0⁵, *Berechnung von Druckbehältern*

AD 2000-Merkblatt S 2⁵, *Berechnung auf Wechselbeanspruchung*

AD 2000-Merkblatt W 10⁵, *Werkstoffe für tiefe Temperaturen — Eisenwerkstoffe*

Richtlinie 2006/42/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 17. Mai 2006 über Maschinen und zur Änderung der Richtlinie 95/16/EG⁶

Richtlinie 2014/68/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 15. Mai 2014 zur Harmonisierung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über die Bereitstellung von Druckgeräten auf dem Markt⁶

⁵ Zu beziehen bei: Beuth Verlag GmbH, 10277 Berlin

⁶ Verfügbar unter : <https://eur-lex.europa.eu/>