

AD 2000-Merkblatt

ICS 23.020.30

Ausgabe Februar 2005

Sonderfälle	Vereinfachte Berechnung auf Wechselbeanspruchung	AD 2000-Merkblatt S 1
-------------	--	--------------------------

Die AD 2000-Merkblätter werden von den in der „Arbeitsgemeinschaft Druckbehälter“ (AD) zusammenarbeitenden, nachstehend genannten sieben Verbänden aufgestellt. Aufbau und Anwendung des AD 2000-Regelwerkes sowie die Verfahrensrichtlinien regelt das AD 2000-Merkblatt G1.

Die AD 2000-Merkblätter enthalten sicherheitstechnische Anforderungen, die für normale Betriebsverhältnisse zu stellen sind. Sind über das normale Maß hinausgehende Beanspruchungen beim Betrieb der Druckbehälter zu erwarten, so ist diesen durch Erfüllung besonderer Anforderungen Rechnung zu tragen.

Wird von den Forderungen dieses AD 2000-Merkblattes abgewichen, muss nachweisbar sein, dass der sicherheitstechnische Maßstab dieses Regelwerkes auf andere Weise eingehalten ist, z. B. durch Werkstoffprüfungen, Versuche, Spannungsanalyse, Betriebserfahrungen.

Fachverband Dampfkessel-, Behälter- und Rohrleitungsbau e.V. (FDBR), Düsseldorf

Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften e.V., Sankt Augustin

Verband der Chemischen Industrie e.V. (VCI), Frankfurt/Main

Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V. (VDMA), Fachgemeinschaft Verfahrenstechnische Maschinen und Apparate, Frankfurt/Main

Stahlinstitut VDEh, Düsseldorf

VGB PowerTech e.V., Essen

Verband der Technischen Überwachungs-Vereine e.V. (VdTÜV), Berlin

Die AD 2000-Merkblätter werden durch die Verbände laufend dem Fortschritt der Technik angepasst. Anregungen hierzu sind zu richten an den Herausgeber:

Verband der Technischen Überwachungs-Vereine e.V., Postfach 10 38 34, 45038 Essen.

Inhalt

- | | | | |
|---|---|----|---|
| 0 | Präambel | 9 | Maßnahmen bei Erreichen der rechnerischen Lebensdauer |
| 1 | Geltungsbereich | 10 | Zusätzliche Angaben |
| 2 | Allgemeines | | |
| 3 | Formelzeichen und Einheiten | | |
| 4 | Ermittlung der zulässigen Lastspielzahl | | Anhang 1: Erläuterungen zum AD 2000-Merkblatt S 1 |
| 5 | Konstruktion | | |
| 6 | Herstellung | | Anhang 2: Berechnungsbeispiel |
| 7 | Prüfung | | |
| 8 | Berücksichtigung besonderer Betriebsbedingungen | | Anhang 3: Vereinfachte Berechnung auf Wechselbeanspruchung für Gusseisen mit Kugelgraphit |

0 Präambel

Zur Erfüllung der grundlegenden Sicherheitsanforderungen der Druckgeräte-Richtlinie kann das AD 2000-Regelwerk angewandt werden, vornehmlich für die Konformitätsbewertung nach den Modulen „G“ und „B + F“.

Das AD 2000-Regelwerk folgt einem in sich geschlossenen Auslegungskonzept. Die Anwendung anderer technischer Regeln nach dem Stand der Technik zur Lösung von Teilproblemen setzt die Beachtung des Gesamtkonzeptes voraus.

Bei anderen Modulen der Druckgeräte-Richtlinie oder für andere Rechtsgebiete kann das AD 2000-Regelwerk sinngemäß angewandt werden. Die Prüfständigkeit richtet sich nach den Vorgaben des jeweiligen Rechtsgebietes.

1 Geltungsbereich

1.1 Die nachstehenden Regeln einer vereinfachten Berechnung auf Wechselbeanspruchung¹⁾ gelten für drucktragende Teile von Druckbehältern aus

- ferritischen und austenitischen Walz- und Schmiedestählen,
- Gusseisensorten mit Kugelgraphit nach Anhang 3, die nach den AD 2000-Merkblättern der Reihe W und HP hergestellt und geprüft werden.

1.2 Die Berechnung gilt nur für Bauteile, die auf der Grundlage zeitunabhängiger Festigkeitskennwerte dimensioniert sind.

¹⁾ Hierbei ist der Begriff „Wechselbeanspruchung“ umfassend im Sinne der zeitlichen Veränderung einer Beanspruchung unabhängig von Größe und Vorzeichen des Mittelwertes gemeint.

Ersatz für Ausgabe Oktober 2004; | = Änderungen gegenüber der vorangehenden Ausgabe

Die AD 2000-Merkblätter sind urheberrechtlich geschützt. Die Nutzungsrechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, die Wiedergabe auf fotomechanischem Wege und die Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei auszugsweiser Verwertung, dem Urheber vorbehalten.

sioniert sind (siehe AD 2000-Merkblatt B 0 Abschnitt 6.2 und 6.3) und die nur durch Druckschwankungen wechselbeansprucht werden. Zusätzliche Wechselbeanspruchungen, z. B. durch schnelle Temperaturänderungen im Betrieb oder durch äußere Kräfte und Momente, sind im Rahmen der Berechnung nach AD 2000-Merkblatt S 2 zu beurteilen.

1.3 Eine Berechnung auf Wechselbeanspruchung ist nur als Lebensdauerabschätzung zur sinnvollen Festlegung von Prüffristen zu werten, um damit eventuell auftretende Ermüdungsanrisse rechtzeitig zu erkennen.

Die ertragbaren Lastspielzahlen können unter Berücksichtigung des Streufeldes der Ermüdungsfestigkeitswerte der Werkstoffe und bei günstigeren Randbedingungen für Konstruktion, Herstellung und Belastung als bei der Entwurfsprüfung zugrunde gelegt ein Vielfaches der rechnerischen Lastspielzahlen erreichen.

1.4 Wenn die nachfolgenden zwei Bedingungen erfüllt sind, braucht AD 2000-Merkblatt S 1 nicht angewendet zu werden.

- a) Die Anzahl der Lastspiele mit Druckschwankungen zwischen dem drucklosen Zustand und dem maximal zulässigen Druck p (An- und Abfahrten) beträgt $N \leq 1000$ und
- b) die Schwingbreite $(\hat{p} - \check{p})$ beliebig vieler Druckschwankungen überschreitet nicht 10 % von p .

Der Grenzwert der Druckschwankungsbreite $(\hat{p} - \check{p})$ von 10 % kann auf 20 % von p angehoben werden, wenn folgende zusätzliche Bedingungen erfüllt sind:

- Anzahl der Lastspiele mit Druckschwankungen zwischen dem drucklosen Zustand und dem maximal zulässigen Druck p (An- und Abfahrten) $N \leq 1000$,
- Stähle mit in den Normen festgelegten Streckgrenzen bei 20 °C von $\leq 300 \text{ N/mm}^2$,
- Wanddicken bis zu 25 mm,
- maßgebende Berechnungstemperatur $T^* \leq 200 \text{ °C}$,
- Bauformen entsprechend einem Spannungsfaktor $\eta \leq 3$ nach Tafel 3 dieses AD 2000-Merkblattes.

1.5 Im Hinblick auf eine vorgesehene Gebrauchsdauer von 20 Jahren (365 Betriebstage) braucht AD 2000-Merkblatt S 1 ebenfalls nicht angewendet zu werden, wenn die folgenden Bedingungen erfüllt sind:

- Die auf den Druck p bezogene Druckschwankungsbreite $\left(\frac{\hat{p} - \check{p}}{p}\right)$ überschreitet nicht die Werte nach Bild 2,
- Stähle mit in den Normen festgelegten Streckgrenzen bei 20 °C von $\leq 355 \text{ N/mm}^2$.

Die Kurven in Bild 2 gelten für

- $N \leq 1000$ Lastspiele mit Druckschwankungen zwischen dem drucklosen Zustand und dem maximal zulässigen Druck (An- und Abfahrten),
- Wanddicken bis zu 25 mm,
- maßgebende Berechnungstemperatur $T^* \leq 200 \text{ °C}$,
- Schweißverbindungen der Nahtklasse K 2 und Bauformen entsprechend einem Spannungsfaktor $\eta \leq 3$ nach Tafel 3.

Bei Kehlnähten an Stützenanschlüssen fallen nur $4/5$ der bezogenen Druckschwankungsbreiten nach Bild 2 aus dem Geltungsbereich.

Bei mehr als 1000 An- und Abfahrten sind die Druckschwankungsbreiten in Bild 2 nach $\left(\frac{\hat{p} - \check{p}}{p}\right) \cdot F_p$ mit F_p nach Bild 3 zu reduzieren.

1.6 Anstelle des maximal zulässigen Druckes p können die Druckschwankungsbreiten $(\hat{p} - \check{p})$ auch auf den Berechnungsdruck p_r (fiktiver Druck) bezogen werden.

1.7 Überschreitet die Zahl der zu erwartenden betrieblichen Druckschwankungen die nach diesem AD 2000-Merkblatt errechnete zulässige Lastspielzahl, ist eine Konstruktionsänderung oder eine auf die Bedingungen der Wechselbeanspruchung abgestimmte detaillierte Berechnung nach AD 2000-Merkblatt S 2 erforderlich.

1.8 Das AD 2000-Merkblatt setzt voraus, dass keine schwingfestigkeitsabmindernden Einflüsse durch das Medium vorliegen (siehe Abschnitt 8).

1.9 Bei tiefen zulässigen Temperaturen in den Anwendungsgrenzen der Beanspruchungsfälle II und III nach AD 2000-Merkblatt W 10 ist eine Reduzierung der zulässigen Lastspielzahlen nicht erforderlich.

2 Allgemeines

2.1 Dieses AD 2000-Merkblatt ist nur im Zusammenhang mit AD 2000-Merkblatt B 0 anzuwenden.

2.2 Als Kriterium für das Versagen durch Wechselbeanspruchung gilt der technische Anriss²⁾.

2.3 Als Maß für die Wechselbeanspruchung gilt in diesem AD 2000-Merkblatt die Schwingungsbreite (doppelter Schwingungsausschlag), die aus der Einwirkung des sich wiederholt ändernden Druckes entsteht (siehe Bild 1).

2.4 Die nach dem AD 2000-Merkblatt S 1 errechnete zulässige Lastspielzahl wird durch die Dimensionierung und Gestaltung des Druckbehälters beeinflusst. Bei häufigen Lastspielen mit großer Wechselbeanspruchung werden zur Beurteilung entsprechender Änderungsmaßnahmen jedoch Berechnungen nach AD 2000-Merkblatt S 2 zweckmäßiger sein. In der Regel ergibt sich hiernach eine größere zulässige Lastspielzahl als bei der Berechnung nach AD 2000-Merkblatt S 1.

2.5 Von besonderer Bedeutung sind Schwankungen zwischen dem drucklosen Zustand und dem maximal zulässigen Druck p (An- und Abfahrten). Die Druckschwankungen können sich aber auch mit geringer Schwingungsbreite dem Betriebsüberdruck überlagern (z. B. in Puffergefäßen oder Speicherbehältern) oder mit unterschiedlicher Schwingungsbreite im Bereich zwischen 0 und p in unregelmäßiger Folge und mit unterschiedlicher Häufigkeit auftreten (Betriebslastkollektiv). Bei Beanspruchung durch äußeren Überdruck ist sinngemäß folgendermaßen vorzugehen: Bei Druckschwankungen zwischen Über- und Unterdruck in einem Druckraum ist zur Bestimmung der Druckschwankungsbreite die Summe der Beträge von Über- und Unterdruck in Rechnung zu setzen.

Treten in einem Druckraum nacheinander verschiedene Innen- und Außendruckwechselbelastungen auf, sind die Beanspruchungsfälle getrennt zu betrachten und über eine Lastkollektivrechnung zu bewerten.

Beim gleichzeitigen Auftreten von Innen- und Außendruckwechselbelastungen an einer drucktragenden Wand (z. B. bei zwei Druckräumen) sind die jeweiligen Druckzeitverläufe zu überlagern und die sich ergebenden Druckschwankungen unterschiedlicher Breite und Häufigkeit über eine Lastkollektivrechnung zu bewerten.

2.6 Die Zahl und die Höhe der Druckschwankungen, die ein Druckbehälter während seiner voraussichtlichen Lebensdauer ohne Schädigung der drucktragenden Teile er-

²⁾ Als technischer Anriss gilt eine rissartige Werkstofftrennung, die mit optischen Hilfsmitteln oder zerstörungsfreien Prüfverfahren erkennbar ist.

tragen kann, sind von einer Vielzahl verschiedenartiger Einflüsse abhängig, z. B.:

- Konstruktion,
z. B. gestaltungstechnische Bauteilausführung im Hinblick auf Vermeidung hoher Spannungsspitzen;
- Herstellung,
z. B. Vermeidung schädlicher Eigenspannungen und Schweißnahtimperfektionen;
- Werkstoff,
weichere Stähle z. B. sind in der Regel weniger kerbempfindlich als härtere Stähle. Bei den kerbempfindlichen Stählen ist zu beachten, dass die Wahrscheinlichkeit eines Versagens im Falle unbemerkter Herstellungsfehler oder ungünstiger Betriebsbedingungen größer ist. Die Festigkeit des Schweißgutes sollte gleich oder nur wenig höher als die des Grundwerkstoffes sein;
- Oberflächenbeschaffenheit,
Gestaltung mit geringer Oberflächenrauheit (mechanische Bearbeitung, Beschleifen der Schweißnähte) bei hohen Lebensdauern Anforderungen;
- Wanddicke,
zunehmende Wanddicke wirkt sich bei gleicher Spannungsschwingbreite wegen des Größeneinflusses lebensdauerabmindernd aus;
- Temperatur,
höhere Temperaturen setzen die Wechselfestigkeit der Werkstoffe und damit die Bauteillebensdauer herab.

2.7 Während des Betriebes auftretende Korrosion kann insbesondere bei kerbempfindlichen Werkstoffen die Zahl der ertragbaren Lastspiele herabsetzen. Betriebliche Maßnahmen (siehe Abschnitt 8.1) und Prüfungen während der Betriebszeit (siehe Abschnitt 7.3) sind hier von besonderer Bedeutung. Soweit sich eine Deckschicht bildet, ist bei der Dimensionierung und der Gestaltung darauf Rücksicht zu nehmen, dass ein Aufreißen der Deckschicht verhindert wird.

2.8 Für die Berechnung wird als maßgebliche Temperatur während eines betrachteten Lastzyklus (siehe Bild 1) definiert:

$$T^* = 0,75 \cdot \hat{T} + 0,25 \cdot \check{T} \quad (1)$$

Alle temperaturbedingten Größen sind auf diese maßgebende Temperatur T^* des betreffenden Lastzyklus zu beziehen.

2.9 Zur Bestimmung der zulässigen Lastspielzahl für den ganzen Behälter sind die Berechnungen nach Abschnitt 4 für die verschiedenen Teilbereiche des Behälters durchzuführen. Der Kleinstwert ist für den Behälter maßgebend.

3 Formelzeichen und Einheiten

Über die Festlegungen des AD 2000-Merkblatt B 0 hinaus und abweichend davon gilt:

f_{T^*}	Temperatureinflussfaktor	–
f_N	Lastspielzahlabminderungsfaktor für Nahtklassen	–
f_L	Lastspielzahlerhöhungsfaktor bei Druckschwankungen ($\hat{p} - \check{p}$) < p_r	–
k	Anzahl der Intervalle unterschiedlicher Druckschwankungsbreite, die zusammen das Lastkollektiv bilden	–
p_r	Druck, der sich für den ganzen Behälter oder auch als fiktiver Druck nur für Teilgebiete bei voller Ausnutzung der Berechnungsspannung K_{20}/S und der vorgesehenen Bemessung nach	–

den AD 2000-Merkblättern der Reihe B errechnet (unter Umständen sind die Formeln nach p aufzulösen) in bar

$(\hat{p} - \check{p})$	Druckschwankungsbreite (doppelter Schwingungsausschlag; siehe auch Bild 1)	in bar
F_d	Korrekturfaktor zur Berücksichtigung des Wanddickeneinflusses	–
N	hier: Betriebslastspielzahl	–
N_{zul}	hier: Zulässige Lastspielzahl bei Druckschwankungsbreiten ($\hat{p} - \check{p}$)	–
N_{100}	Zulässige Lastspielzahl bei Druckschwankungsbreiten ($p_r - 0$) bei Temperaturen $T^* \leq 100 \text{ °C}$	–
T^*	maßgebende Berechnungstemperatur während eines Lastzyklus	in °C
$2\sigma_a^*$	fiktive pseudoelastische Spannungsschwingbreite	in N/mm ²
$2\sigma_{aD}$	fiktive Dauerfestigkeitswerte	in N/mm ²
η	Spannungsfaktor	–
Kopfzeiger \wedge	= Maximalwert, z.B. \hat{p}	
Kopfzeiger \vee	= Minimalwert, z.B. \check{p}	
Fußzeiger k	= Zahlenindex, z.B. N_k	

4 Ermittlung der zulässigen Lastspielzahl

4.1 Zur Bestimmung der zulässigen Lastspielzahl ist zunächst die fiktive pseudoelastische Spannungsschwingbreite $2\sigma_a^*$ nach

$$2\sigma_a^* = \frac{\eta}{F_d \cdot f_{T^*}} \cdot \frac{(\hat{p} - \check{p})}{p_r} \cdot \frac{K_{20}}{S} \quad (2)$$

zu berechnen.

4.1.1 Hierbei ist der fiktive Druck p_r als zulässiger Druck bei voller Auslastung der Berechnungsspannung K_{20}/S für eine betrachtete Stelle eines Druckbehälters aus den Bemessungsformeln der AD 2000-Merkblätter der Reihe B zu ermitteln. Dazu müssen unter Umständen diese Bemessungsformeln nach p aufgelöst werden.

Hierbei brauchen Minus-Toleranzen (c_1) nicht und Abnutzungszuschläge (c_2) nur zu 50 % berücksichtigt zu werden. Bei Außendruckbeanspruchung an einer drucktragenden Wand kann der fiktive Druck p_r aus den Bemessungsformeln für die Berechnung gegen plastisches Verformen nach AD 2000-Merkblatt B 6 bestimmt werden.

4.1.2 Die Spannungsfaktoren η sind abhängig von der Bauteilgeometrie aus Tafel 3 zu entnehmen³⁾ 4). Dabei handelt es sich um die oberen Grenzwerte der abmessungsabhängigen Spannungsfaktoren innerhalb der praktisch auftretenden Abmessungsverhältnisse.

Werden niedrigere Spannungsfaktoren η gewählt, sind diese nachzuweisen.

4.1.3 Zur Berücksichtigung des wechselfestigkeitsabmindernden Einflusses der Bauteilgröße ist bei Wanddicken $s_e > 25 \text{ mm}$ ein Korrekturfaktor F_d nach

$$F_d = \left(\frac{25}{s_e} \right)^{0,25} \quad (3)$$

oder aus Bild 4 in Rechnung zu setzen, wobei für Wanddicken $s_e \geq 150 \text{ mm}$ der Korrekturfaktor auf $F_d = 0,64$ be-

3) Siehe Anhang 1

4) Siehe auch Abschnitt 5.2

grenzt ist. Bei Schmiedestücken ist hierbei die Wanddicke des maßgeblichen Wärmebehandlungsdurchmessers nach DIN 17 243 einzusetzen.

4.1.4 Bei Lastzyklustemperaturen $T^* > 100\text{ °C}$ bis zu Temperaturen zeitunabhängiger Festigkeitskennwerte ist ein Temperatureinflussfaktor f_{T^*} zu berücksichtigen. Der Korrekturfaktor f_{T^*} ist für ferritischen Werkstoff nach

$$f_{T^*} = 1,03 - 1,5 \cdot 10^{-4} \cdot T^* - 1,5 \cdot 10^{-6} \cdot T^{*2} \quad (4)$$

und für austenitischen Werkstoff nach

$$f_{T^*} = 1,043 - 4,3 \cdot 10^{-4} \cdot T^* \quad (5)$$

zu bestimmen oder Bild 5 zu entnehmen.

4.2 Die zulässige Lastspielzahl ist im Geltungsbereich $10^3 \leq N \leq 2 \cdot 10^6$ in Abhängigkeit von der Spannungsschwingbreite $2\sigma_a^*$ nach Abschnitt 4.1 aus

$$N_{zul} = \left(\frac{B}{2\sigma_a^*} \right)^m \quad (6)$$

mit $m = 3$ für Schweißverbindungen und $m = 3,5$ für ungeschweißte Bauteilbereiche mit Walzhautoberfläche zu berechnen oder aus Bild 6 zu entnehmen. Hierbei sind die Kerbwirkungen durch Schweißnähte bzw. Oberflächenrauheit sowie der größtmögliche Einfluss von Schweißeigen- spannungen oder Mittelspannungen aus Betriebsüber- druck bereits berücksichtigt.

4.2.1 Die Werte der Berechnungskonstanten B sind Tafel 1 zu entnehmen. Dabei gilt die Klasse K 0 für ungeschweißte Bauteilbereiche. Die übrigen Klassen beziehen sich auf Schweißverbindungen, die in Tafel 3 hinsichtlich ihrer Kerbwirkung den Klassen K 1, K 2, K 3 zugeordnet sind.

Tafel 1. Berechnungskonstanten B

Klasse	$B \text{ [N/mm}^2\text{]}$ $10^3 \leq N \leq 2 \cdot 10^6$
K 0	7890
K 1	7940
K 2	6300
K 3	5040

4.2.2 Die fiktive Dauerfestigkeit ist bei $N = 2 \cdot 10^6$ festgelegt. Bei Spannungsschwingbreiten $2\sigma_a^*$ unterhalb der Werte $2\sigma_{aD}$ nach Tafel 2 wird Dauerfestigkeit unterstellt.

Tafel 2. Dauerfestigkeitswerte $2\sigma_{aD}$

Klasse	$2\sigma_{aD} \text{ [N/mm}^2\text{]}$ $N \geq 2 \cdot 10^6$
K 0	125
K 1	63
K 2	50
K 3	40

4.3 Für den Sonderfall geschweißter Druckbehälter mit Bauformen entsprechend einem Spannungsfaktor $\eta \leq 3,0$, bei Temperaturen $T^* \leq 100\text{ °C}$, Wanddicken $s_e \leq 25\text{ mm}$ und Druckschwankungen zwischen 0 und p_r können die zulässigen Lastspielzahlen im Bereich $1000 \leq N_{zul} \leq 2 \cdot 10^6$ nach

$$N_{zul} = N_{100} \cdot f_N \cdot f_L \quad (7)$$

mit

$$N_{100} = \frac{1,854 \cdot 10^{10}}{(K_{20}/S)^3} \quad (8)$$

$$f_L = \left(\frac{p_r}{\bar{p} - \bar{p}} \right)^3 \quad (9)$$

und

$$f_N = \begin{cases} 1,0 & \text{für K 1} \\ 0,5 & \text{für K 2} \\ 0,25 & \text{für K 3} \end{cases} \quad (10)$$

ermittelt werden.

Die Werte N_{100} und f_L können auch aus Bild 7 und Bild 8 entnommen werden.

Die dauerfest ertragbare, auf p_r bezogene Druckschwankungsbreite für diese Behälter ist aus Bild 9 in Abhängigkeit von K_{20}/S zu entnehmen.

Die Kurven sind durch die Gleichung

$$\frac{(\hat{p} - \check{p})_D}{p_r} = \frac{2\sigma_{aD}}{3 \cdot K_{20}/S} \quad (11)$$

mit $2\sigma_{aD}$ aus Tafel 2 beschrieben.

4.4 Treten Druckschwankungen unterschiedlicher Breite und verschiedener Häufigkeit auf (Betriebslastkollektiv), ist die zulässige Lebensdauer nach der linearen Schädigungsakkumulationshypothese zu bestimmen.

$$\sum_k \frac{N_k}{N_{kzul}} = \left(\frac{N_1}{N_{zul1}} + \frac{N_2}{N_{zul2}} + \dots + \frac{N_k}{N_{zul k}} \right) \leq 1,0 \quad (12)$$

4.4.1 Hierin sind $N_1, N_2 \dots N_k$ die im Betrieb zu erwartenden Lastspielzahlen, wobei jeweils die Lastzyklen zusammengefasst werden, die die gleiche Druckschwankungsbreite $(\hat{p} - \check{p})$ aufweisen. Die zugehörigen zulässigen Lastspielzahlen $N_{zul1}, N_{zul2} \dots N_{zul k}$ sind dann mit der jeweiligen Spannungsschwingbreite $2\sigma_a^*$ nach Formel (2) aus den entsprechenden Lastspielzahlkurven nach Bild 6 zu entnehmen oder nach Formel (6) zu berechnen.

4.4.2 Bewirkt ein Betriebslastkollektiv Spannungsschwingbreiten $2\sigma_a^*$, die kleiner sind als die in Tafel 2 für $N \geq 2 \cdot 10^6$ angegebenen Dauerfestigkeitswerte $2\sigma_{aD}$, so sind die zugehörigen zulässigen Lastspielzahlen $N_{zul} = 2 \cdot 10^6$ zu setzen. Die Schädigungsanteile von Kollektivstufen, deren Spannungsschwingbreite $2\sigma_a^*$ kleiner als 50 % der $2\sigma_{aD}$ -Werte beträgt, können hierbei vernachlässigt werden.

5 Konstruktion

5.1 Die Lebensdauer von wechselbeanspruchten Bauteilen ist wesentlich von der Dimensionierung und konstruktiven Gestaltung abhängig. Hierbei ist besonders darauf zu achten, dass Konstruktionen mit hoher Spannungs- bzw. Dehnungskonzentration vermieden werden, z. B. durch Vermeidung scharfer Querschnittsübergänge. Eine Bewertung von im Druckbehälterbau üblichen Schweißnahtausführungen ist in der Tafel 3 gegeben. Bei hohen Anforderungen an die Lebensdauer sind die Schweißnahtgestaltungen der Klasse K 1 zu empfehlen. Ggf. sind höhere Anforderungen an die Gestaltung als nach AD 2000-Merkblatt HP 1 zu stellen (vgl. Spannungsfaktoren η in Tafel 3). Durch geeignete Gestaltung ist die Möglichkeit der Prüfung nach Abschnitt 7 zu schaffen.

5.2 Zur Lebensdauerbeurteilung von Gestaltungen, die in Tafel 3 nicht enthalten sind, ist der zu erwartende η -Wert nach entsprechenden Abschätzungen über die Strukturspannungs-Formzahl (siehe AD 2000-Merkblatt S 2 Abschnitt 4) festzulegen. In diesen Fällen ist jedoch eine detaillierte Berechnung nach AD 2000-Merkblatt S 2 zweckmäßig. Dies trifft in der Regel z. B. bei Knaggenverschlüssen und Klammerverbindungen zu.

5.3 Die Lebensdauer kann im Rahmen der Konstruktionsbewertung nach Tafel 3 beispielhaft durch folgende konstruktive Maßnahmen erhöht werden:

- (1) Halbkugel- oder Korbbogenboden anstelle Klöpperboden;
- (2) kegelförmiger Mantel mit Krempe anstelle Kegel mit Eckstoß;
- (3) Vermeidung von schrägen Stützen und aufgesetzten scheibenförmigen Verstärkungen;
- (4) Rohrplatten, Flansche und dergleichen mit konischem Ansatz zum Behältermantel;
- (5) Vermeidung von eckigen Ausschnitten.

Überdimensionierung für vorwiegend ruhende Beanspruchung führt ebenfalls zu größeren zulässigen Lastspielzahlen. Ebenso kann bei Anwendung von AD 2000-Merkblatt S 2 in der Regel eine größere Lastspielzahl zugelassen werden (siehe Anhang 2 dieses AD 2000-Merkblattes).

6 Herstellung

Für die Herstellung gelten die AD 2000-Merkblätter der Reihe HP. Zusätzlich ist bei Behältern, die nach diesem AD 2000-Merkblatt berechnet werden, Nachfolgendes zu beachten:

6.1 Bei Wechselbeanspruchung wirken sich bei der Fertigung entstandene Fehler ungünstiger aus als bei ruhender Beanspruchung. Durch Kerbstellen oder ungünstige Eigenspannungen kann die Lebensdauer von Bauteilen beträchtlich vermindert werden.

6.2 Für die Bauteile sind an die Schweißnahtausbildung besondere Anforderungen zu stellen. Bewertungsgruppe B nach EN 25817 ist einzuhalten. Hinsichtlich der Wärmeführung beim Schweißen und der Schweißfolge ist den Schweißzugspannungen besondere Bedeutung zuzumessen. Sämtliche Wärmebehandlungen sind dem Werkstoff und der Wanddicke entsprechend ordnungsgemäß auszuführen.

Glühtemperaturen, Haltezeit und Abkühlbedingungen sind möglichst so festzulegen, dass große Dehnung und Kerbschlagzähigkeit gewährleistet sind. In vielen Fällen werden sich dabei Streckgrenze und Zugfestigkeit an der unteren Grenze der zulässigen Spanne einstellen. Das Spannungsarmglühen ist so durchzuführen, dass die Eigenspannungen auf ein niedriges Niveau abgebaut werden und die oben genannten Werkstoffeigenschaften erhalten bleiben (siehe die entsprechenden Normen und Werkstoffblätter).

Stempelungen dürfen nicht an Stellen erhöhter Beanspruchung angebracht werden.

7 Prüfung

Für die Prüfung vor, während und nach der Herstellung sind zusätzlich zu den AD 2000-Merkblättern der Reihe HP die folgenden Abschnitte zu beachten:

7.1 Entwurfsprüfung

Im Rahmen der Entwurfsprüfung nach AD 2000-Merkblatt HP 511 sind von der zuständigen unabhängigen Stelle die im Hinblick auf die Wechselbeanspruchung bei den Prüfungen nach Abschnitt 7.2 und 7.3 besonders zu prüfenden Stellen festzulegen.

7.2 Prüfungen während der Fertigung und Schlussprüfung

7.2.1 Durch die während der Fertigung vom Hersteller oder im Rahmen der Schlussprüfung von der zuständigen unabhängigen Stelle durchzuführenden Prüfungen muss

sichergestellt werden, dass in dem Druckbehälter oder dem Druckbehälterteil keine Fehler vorhanden sind, die sich bei wechselnder Beanspruchung schnell vergrößern und zu einem Versagen der drucktragenden Teile vor Erreichen der zulässigen Lastspielzahl führen könnten (vgl. AD 2000-Merkblatt HP 5/1).

7.2.2 Für die zerstörungsfreie Prüfung sind die Regelungen des AD 2000-Merkblattes HP 5/3 in Verbindung mit Übersichtstafel zu HP 0 zu beachten. Ist es hiernach festgestellt, ob nach dem Durchstrahlungsverfahren oder dem US-Verfahren geprüft wird, so ist der US-Prüfung in der Regel der Vorzug zu geben. Im Betrieb hochbeanspruchte Stellen, wie z. B. Stützeinschweißungen, Lochränder oder Querschnittsübergänge, sind möglichst vollständig zerstörungsfrei zu prüfen. Die Besichtigung auf Oberflächenfehler und äußerlich sichtbare Schweißfehler ist mit der entsprechenden Sorgfalt vorzunehmen.

7.3 Prüfungen während des Betriebes

7.3.1 An jedem Druckbehälter, für den die Zahl der zulässigen Lastwechsel (Lastspielzahl N) festgelegt ist, muss spätestens bei Erreichen der Hälfte der festgelegten Lastspielzahl eine innere Prüfung durchgeführt werden.

Es können sich aufgrund des Betriebes kürzere Fristen für die innere Prüfung entsprechend den nationalen Vorschriften ergeben.

Dem Betreiber obliegt es, in geeigneter Weise die Zahl der auftretenden Lastwechsel zu erfassen und erforderlichenfalls die inneren Prüfungen zu veranlassen.

7.3.2 Weichen die bei der Berechnung nach Abschnitt 4 vorausgesetzten Betriebsbedingungen im Sinne größerer Wechselbeanspruchung ab oder sind durch andere betriebliche Einflüsse bereits vor Ablauf der Prüf Fristen Schädigungen an der drucktragenden Wandung zu erwarten, so sind die Prüf Fristen entsprechend den nationalen Vorschriften zu verkürzen.

Ggf. führen Berechnungen nach AD 2000-Merkblatt S 2 zu längeren Prüf Fristen.

7.3.3 Bei wechselnd beanspruchten Druckbehältern sind wiederkehrende Prüfungen von besonderer Bedeutung; sie erlauben, beginnende Schädigungen rechtzeitig zu erkennen. Dazu sind die inneren Prüfungen durch zerstörungsfreie Prüfungen an hochbeanspruchten Stellen zu ergänzen. Als Prüfverfahren kommen Oberflächenrissprüfungen und US-Prüfungen in Frage. Zur Überwachung gut prüfbarer Bereiche kann auch die US-Prüfung von der Außenseite des Behälters eingesetzt werden.

7.3.4 Werden bei einer inneren Prüfung keine Risse festgestellt, so ist die nächste innere Prüfung in der sich aufgrund einer besonderen Vereinbarung entsprechend den nationalen Vorschriften ergebenden kürzesten Frist, spätestens jedoch wiederum bei Erreichen der Hälfte der festgelegten Lastspielzahl, durchzuführen. Dies gilt auch, wenn die Zahl der zulässigen Lastspiele überschritten ist.

7.3.5 Auf die Prüfungen, die nach Abschnitt 7.3.1 bis 7.3.4 aufgrund der Wechselbeanspruchung während des Betriebes erforderlich sind, kann verzichtet werden, wenn das Bauteil für eine Betriebslastspielzahl $\geq 2 \cdot 10^6$ (dauerfest) ausgelegt ist.

7.3.6 Bei tiefen zulässigen Temperaturen unterhalb von -200°C sind die Prüfintervalle zur Durchführung der inneren Prüfungen nochmals auf die Hälfte zu verkürzen, d. h. die inneren Prüfungen nach Abschnitt 7.3.1 und 7.3.4 müssen spätestens bei Erreichen eines Viertels der festgelegten Lastspielzahl durchgeführt werden.

8 Berücksichtigung besonderer Betriebsbedingungen

Im Falle korrosionsgestützter Rissbildung (Schwingungsrissskorrosion, dehnungsinduzierte Rissskorrosion), wasserstoffgestützter Rissbildung in Druckwasserstoff oder vorhandener Magnetitschutzschicht sind die Festlegungen in AD 2000-Merkblatt S 2 Abschnitt 13 sinngemäß anzuwenden.

Im Zweifelsfall muss eine Berechnung nach AD 2000-Merkblatt S 2 durchgeführt werden.

9 Maßnahmen bei Erreichen der rechnerischen Lebensdauer

9.1 Ist die zulässige Lastspielzahl eines Bauteils oder der zulässige Wert für die Gesamtschädigung nach Abschnitt 4 erreicht, sind an einigen hochbeanspruchten Stellen, die mit der zuständigen unabhängigen Stelle festzulegen sind, möglichst vollständig zerstörungsfreie Prüfungen gemäß Abschnitt 7.3 durchzuführen.

9.2 Werden bei den Prüfungen gemäß Abschnitt 9.1 keine Risse gefunden, so ist ein Weiterbetrieb zulässig. Voraussetzung hierfür ist, dass bei den zerstörungsfreien Prüfungen, die in den Prüfintervallen durchzuführen sind, die 50 % der Betriebsdauer nach Abschnitt 9.1 entsprechen, keine Ermüdungsschäden festgestellt werden. Nach Erreichen dieser Betriebszeit ist das weitere Vorgehen im Einzelnen entsprechend den nationalen Vorschriften abzustimmen.

Bei tiefen zulässigen Temperaturen unterhalb von $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ verkürzen sich die Prüfintervalle für die zerstörungsfreien Prüfungen von 50 % auf 25 % der Betriebsdauer nach Abschnitt 9.1.

9.3 Sollten bei den Prüfungen gemäß Abschnitt 9.1 oder 9.2 Risse oder rissartige Fehler im Sinne des AD 2000-Merkblattes HP 5/3 Abschnitt 5.2 bzw. 5.4 oder weitergehende Schädigungen festgestellt werden, ist das Bauteil oder das betreffende Konstruktionselement auszutauschen, es sei denn, dass durch geeignete Maßnahmen, die entsprechend den nationalen Vorschriften zu vereinbaren sind, ein Weiterbetrieb zulässig erscheint.

9.4 Als konstruktive, herstellungstechnische und verfahrenstechnische Maßnahmen für einen Weiterbetrieb kommen in Frage:

- (1) Beseitigung von Rissen durch Ausschleifen. Ergibt sich durch das Ausschleifen eine zu geringe Wanddicke, sind Reparaturschweißungen nur in Zusammenarbeit mit dem Hersteller im Rahmen der nationalen Vorschriften vorzunehmen;
- (2) Kerbfreischleifen der Schweißnähte;
- (3) Beseitigen von Verformungsbehinderungen, z. B. Ersatz anrissbehafteter starrer Verstreibungen durch verschiebbare Verbindungen;
- (4) Änderung der Betriebsweise.

10 Zusätzliche Angaben

10.1 In allen Fällen, in denen die Bedingungen für den Verzicht auf Anwendung dieses AD 2000-Merkblattes nach Abschnitt 1.4 und 1.5 nicht erfüllt sind, ist dies dem Hersteller und zur Entwurfsprüfung der zuständigen unabhängigen Stelle anzugeben. Es sind in diesen Fällen der Betriebserfordernis angepasste Maßnahmen vorzusehen und gegebenenfalls zwischen Hersteller, Besteller/Betreiber und der zuständigen unabhängigen Stelle zu vereinbaren und auf der entwurfsgeprüften Zeichnung und in der Bescheinigung über die Schlussprüfung unter Hinweis auf AD 2000-Merkblatt S 1 einzutragen.

10.2 In Beachtung des Geltungsbereiches nach Abschnitt 1 (nur Innendruckschwankungen) sind anzugeben:

- Anzahl der Druckschwankungen zwischen dem drucklosen Zustand und dem maximal zulässigen Druck (An- und Abfahrten);
- Druckschwankungen konstanter Schwingbreite, die sich dem Betriebsüberdruck überlagern, und deren Betriebslastspielzahl;
- Druckschwankungen verschiedener Lastzyklusgruppen und deren Betriebslastspielzahl eines vorgegebenen Betriebslastkollektivs;
- minimale und maximale Temperatur während eines Lastzyklus oder im Falle eines Betriebskollektivs in den einzelnen Lastzyklusgruppen.

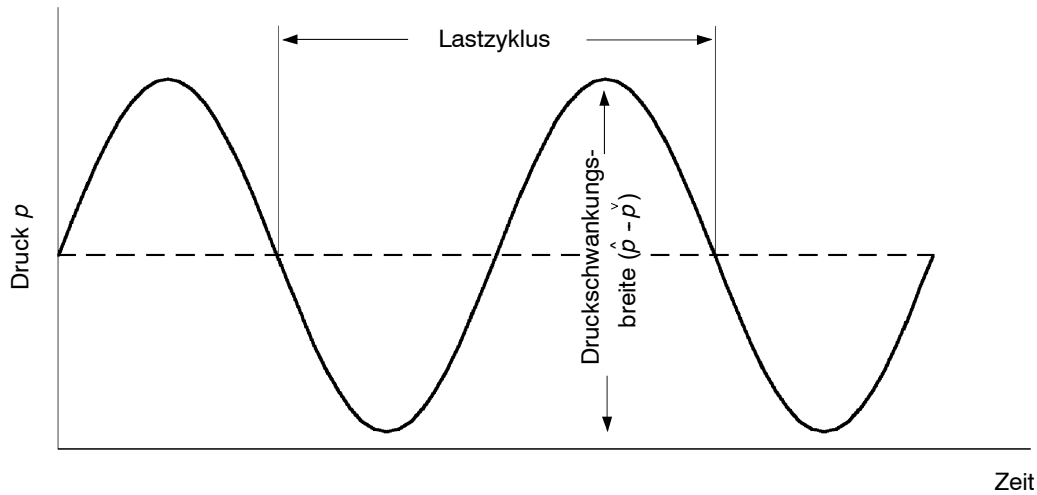


Bild 1. Druckverlauf und Lastzyklus (schematisch)

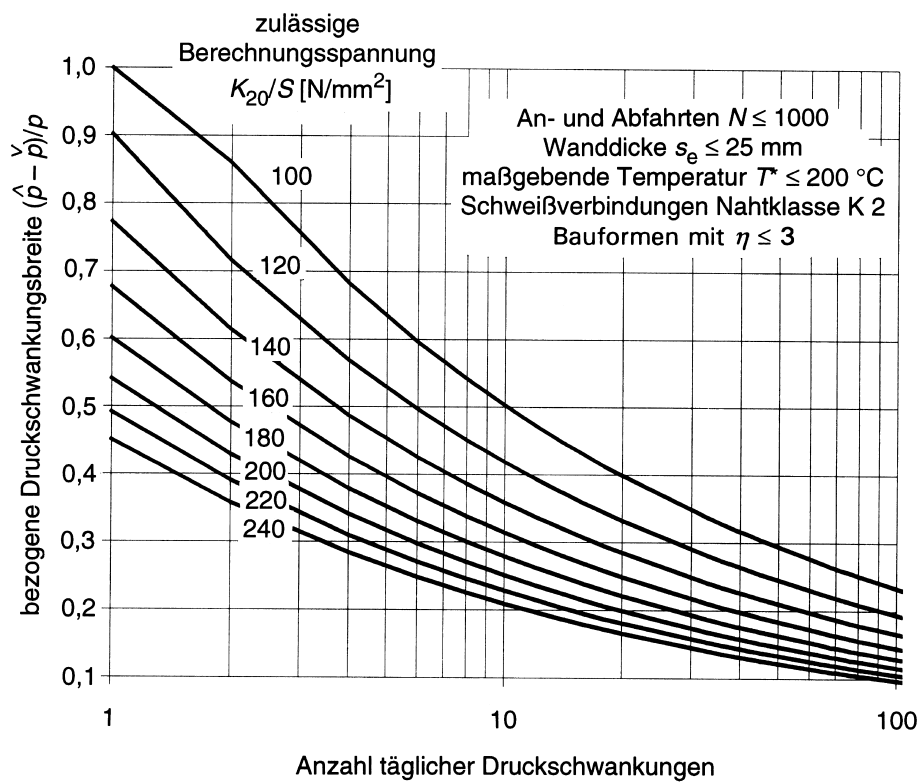


Bild 2. Abgrenzung zwischen der Berechnung gegen vorwiegend ruhende Innendruckbeanspruchung und der Berechnung gegen Wechselbeanspruchung für Druckbehälter mit einer Gebrauchsdauer bis zu 20 Jahren (365 Betriebstage)

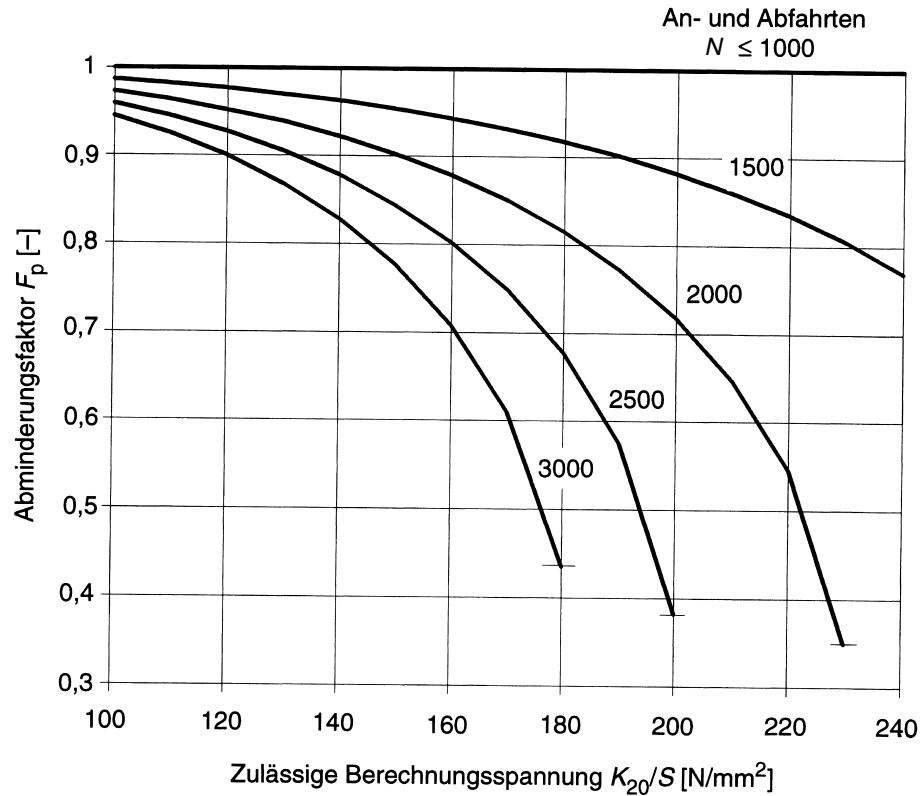


Bild 3. Abminderungsfaktor für Druckschwankungsbreiten nach Bild 2 bei mehr als 1000 An- und Abfahrten

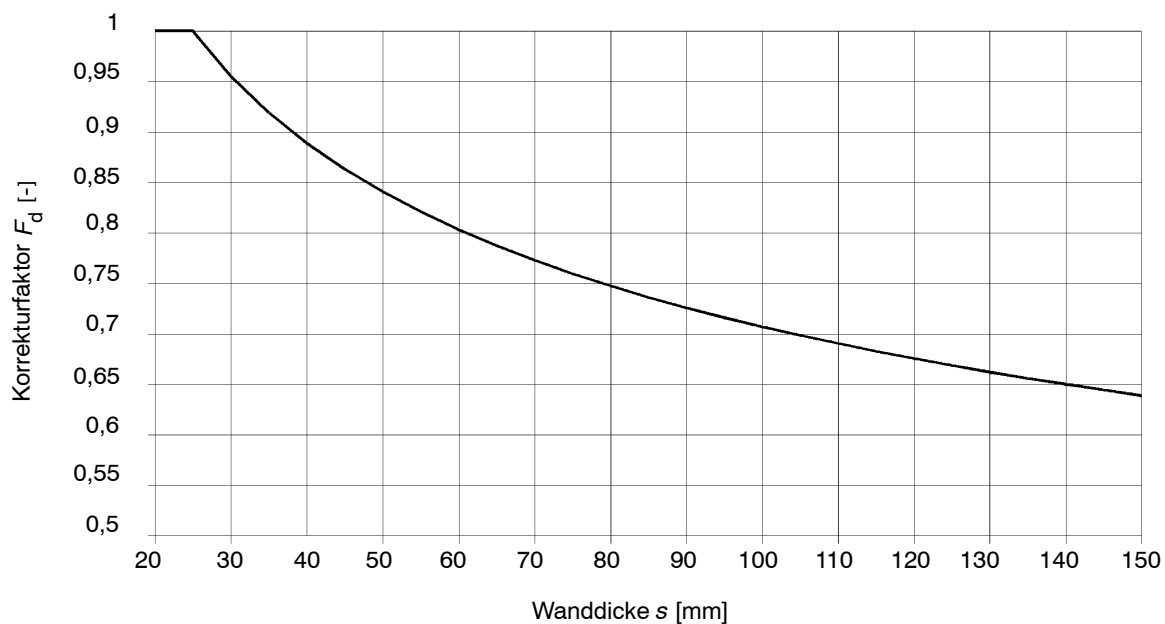


Bild 4. Korrekturfaktor F_d zur Berücksichtigung des Wanddickeneinflusses

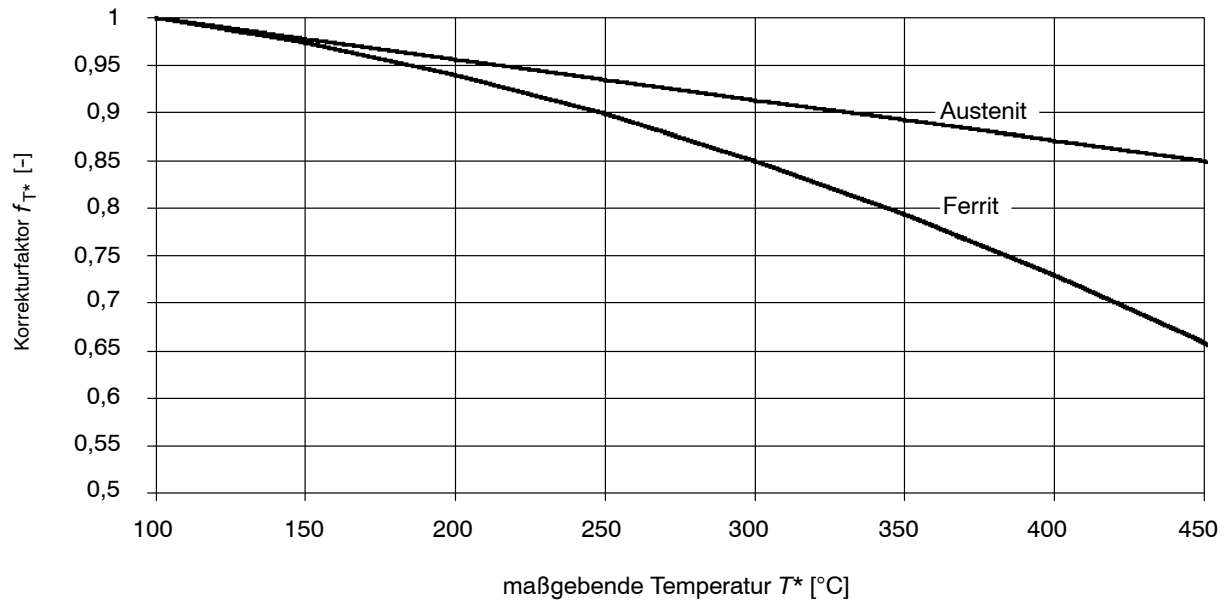


Bild 5. Korrekturfaktor f_{T^*} zur Berücksichtigung des Temperatureinflusses

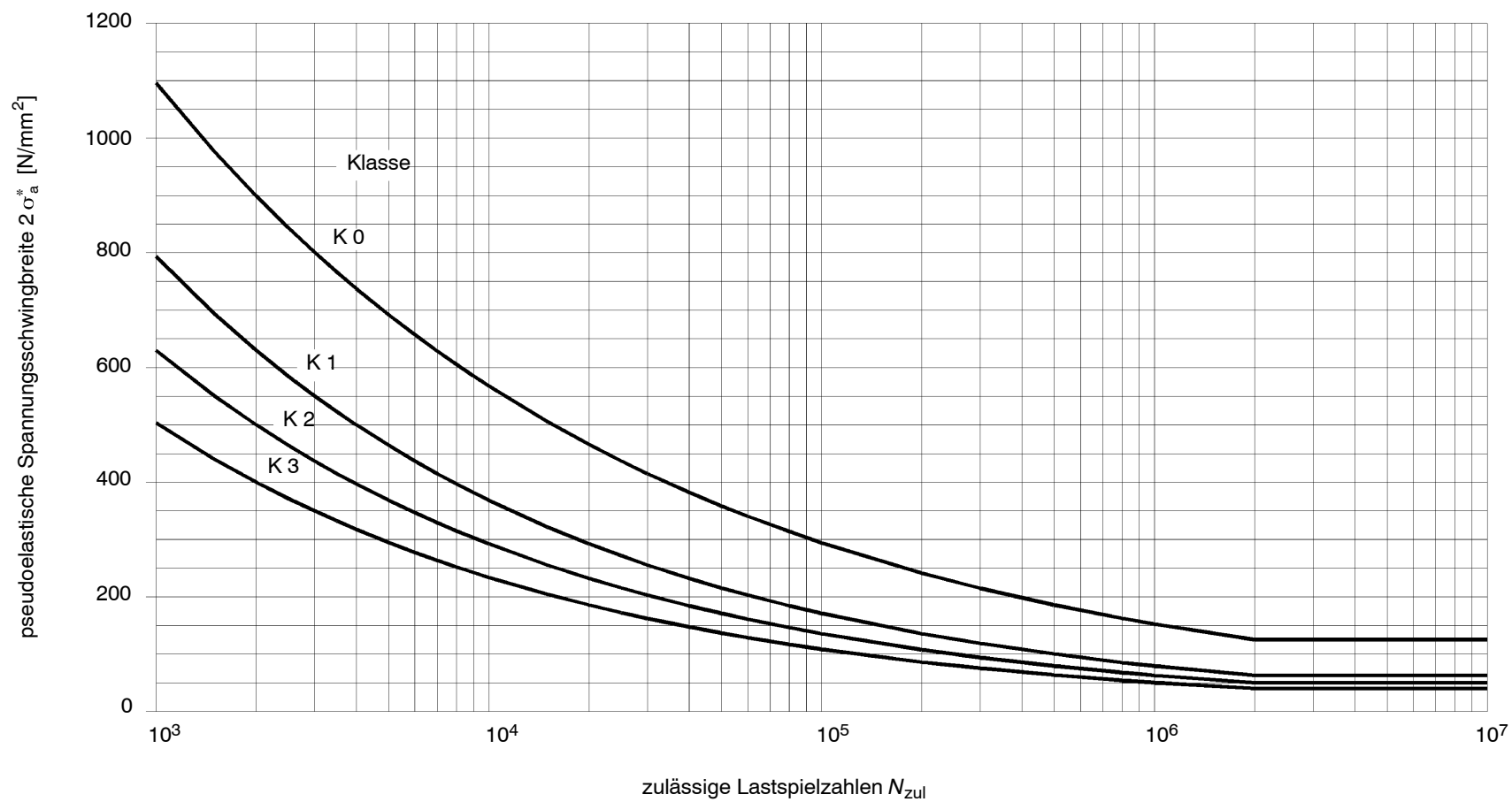


Bild 6. Zulässige Lastspielzahlen bei Berechnungstemperaturen $\leq 100^\circ\text{C}$ und Wanddicken $\leq 25\text{ mm}$

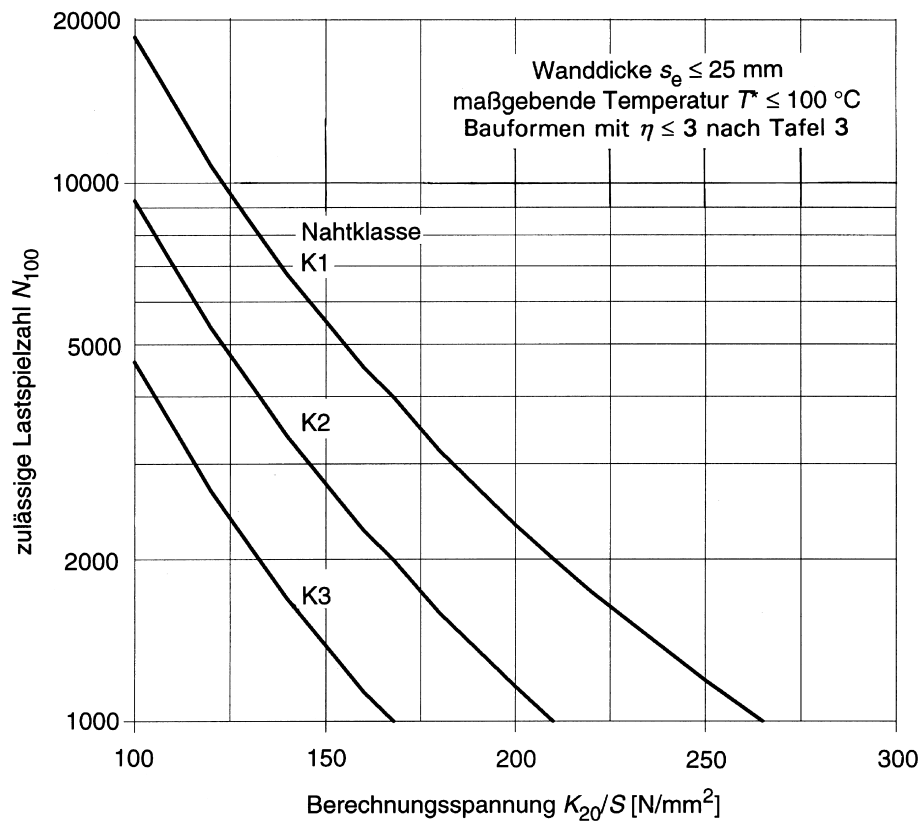


Bild 7. Zulässige Zahl der An- und Abfahrten mit Druckschwankungsbreiten $(\hat{p} - \check{p}) = (p_r - 0)$

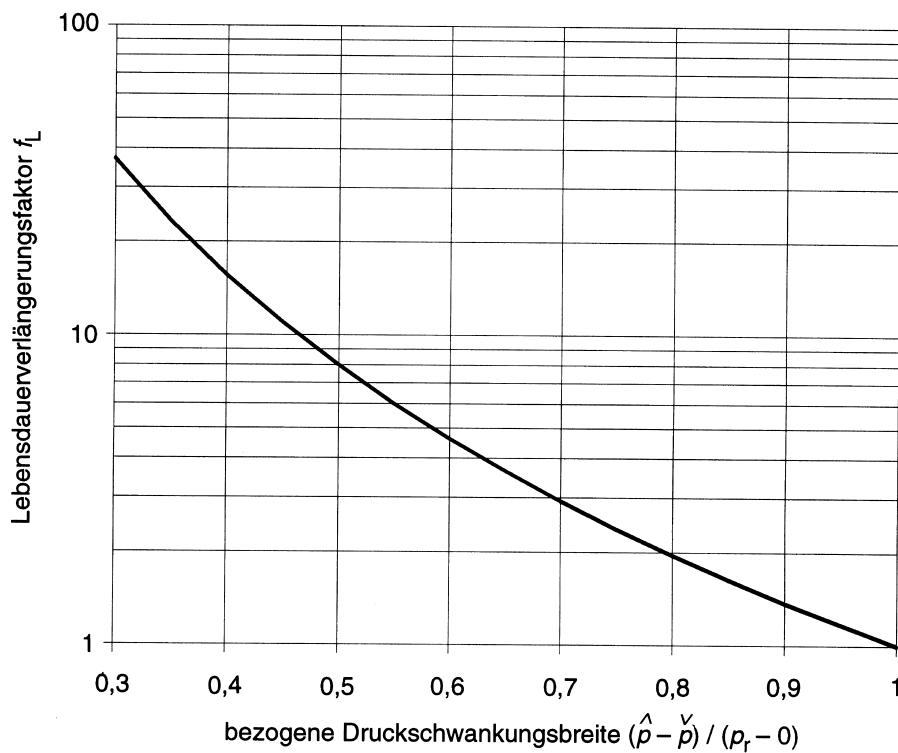


Bild 8. Lebensdauerverlängerungsfaktor bei Druckschwankungsbreiten $(\hat{p} - \check{p}) < (p_r - 0)$

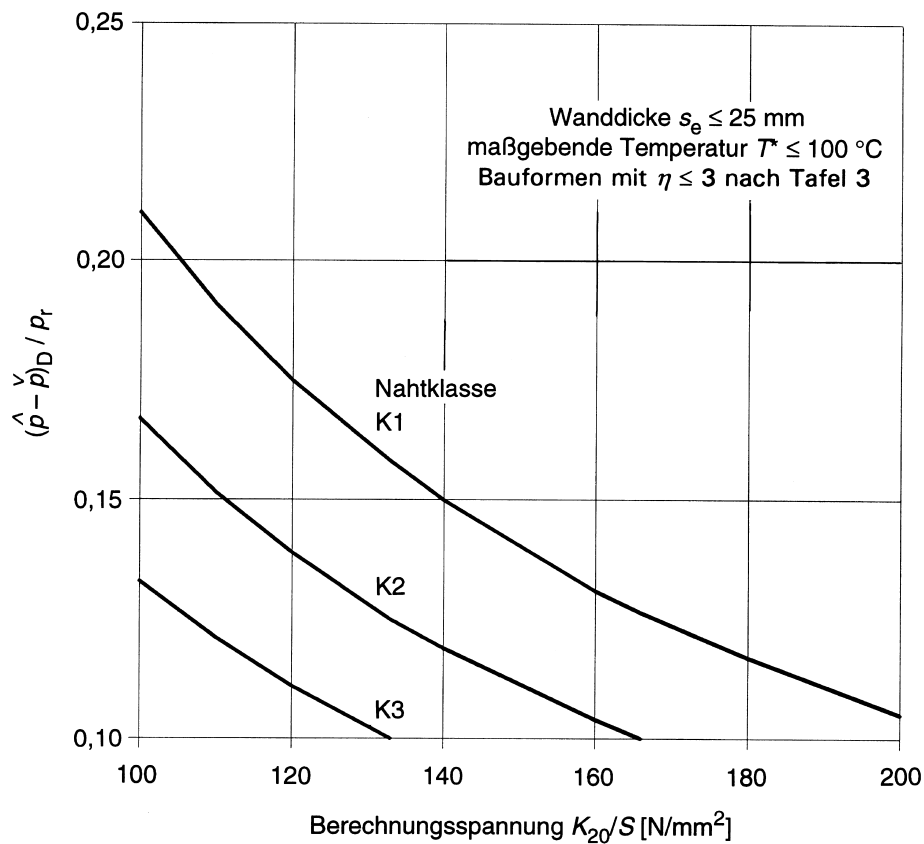


Bild 9. Dauerfest ertragbare, auf p_r bezogene Druckschwankungsbreiten $(\hat{p} - \check{p})_D / (p_r - 0)$

Tafel 3. Beispiele von Bauformen und Schweißverbindungen mit den zugeordneten Klassen (K 0, K 1, K 2, K 3) und den zugeordneten Spannungsfaktoren η (eingezeichnete Rissverläufe beispielhaft)

lfd. Nr.	Darstellung	Beschreibung	Voraussetzung	Klasse	η
1. Zylindrische und kegelförmige Mäntel, gewölbte Böden					
1.1		Längs- oder Rundnaht bei gleichen Wändicken	beidseitig geschweißt	K 1	3,0 ⁵⁾
1.2			einseitig geschweißt mit Gegennaht	K 1	
1.3			einseitig geschweißt ohne Gegennaht	K 2	
1.4		Längs- oder Rundnaht bei ungleichen Wändicken	beidseitig geschweißt	K 1	1,5 ⁶⁾
1.5				K 1	
1.6				K 1	
1.7			beidseitig geschweißt, Kantenversatz innen und außen gleich	K 1	
1.8				K 1	
1.9				K 1	

⁵⁾ Zulässige Aufdachungen und Einziehungen siehe AD 2000-Merkblatt HP 1. Sind keine Aufdachungen oder Einziehungen vorhanden, kann $\eta = 1,5$ angenommen werden.

⁶⁾ Zulässige Wändickenverhältnisse und zulässiger Versatz siehe AD 2000-Merkblatt HP 5/1. Es gelten die Werte für Längsnähte.

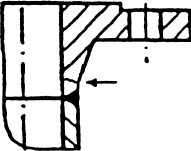
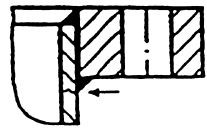
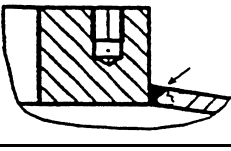
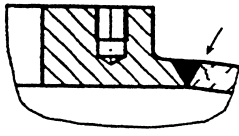
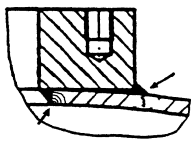
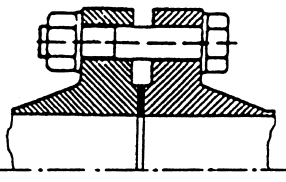
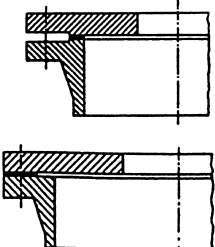
AD 2000-Merkblatt

Seite 14 AD 2000-Merkblatt S 1, Ausg. 02.2005

Tafel 3. Beispiele von Bauformen und Schweißverbindungen mit den zugeordneten Klassen (K 0, K 1, K 2, K 3) und den zugeordneten Spannungsfaktoren η (eingezeichnete Rissverläufe beispielhaft)

lfd. Nr.	Darstellung	Beschreibung	Voraussetzung	Klasse	η
1.10		Kegel mit Eckstoß	beidseitig geschweißt oder einseitig geschweißt mit Gegennaht	K 1	2,7
1.11		einseitig geschweißt ohne Gegennaht	K 3		
1.12		Kegel mit Krempe und Längsnaht	Nahtausführung und Klassenzuordnung wie lfd. Nr. 1.1-1.3	K1/K2	2,0
1.13		Bodenanschlussnaht bei gewölbten Böden mit zylindrischen Bordhöhen nach AD 2000-Merkblatt B 3	Nahtausführung und Klassenzuordnung wie lfd. Nr. 1.1-1.9	K 1	1,5
1.14		Krempe Klöpperboden	ungeschweißt	K 0	2,5
1.15		Krempe Korbbogenboden	ungeschweißt	K 0	2,0
2. Stützeinschweißungen					
2.1		Stützen durchgesteckt oder eingesetzt	beidseitig durchgeschweißt oder einseitig durchgeschweißt mit Gegennaht	K 1	3,0
2.2		einseitig durchgeschweißt ohne Gegennaht	K 2		
2.3		Stützen durchgesteckt (in der Darstellung: linke Ausführung)	beidseitig, aber nicht durchgehend verschweißt	K 2	
2.4		Stützen eingesetzt (in der Darstellung: rechte Ausführung)		K 3	
2.5		Stützen aufgesetzt	einseitig durchgeschweißt (ohne Restspalt), Stützen ausgebohrt oder Wurzel überschleift	K 1	
2.6			einseitig durchgeschweißt, ohne Gegennaht oder ohne mechanische Bearbeitung der Wurzel	K 2	
2.7		Stützen mit scheibenförmiger Verstärkung. Naht: am Außendurchmesser der Scheibe		K 3	
2.8		Stützen mit scheibenförmiger Verstärkung. Naht: Stützeinschweißung	Verbindung Stützenrohr mit Grundkörper und Verstärkungsscheibe durchgeschweißt	K 1	

Tafel 3. Beispiele von Bauformen und Schweißverbindungen mit den zugeordneten Klassen (K 0, K 1, K 2, K 3) und den zugeordneten Spannungsfaktoren η (eingezeichnete Rissverläufe beispielhaft)

lfd. Nr.	Darstellung	Beschreibung	Voraussetzung	Klasse	η
3. Flansche, Blockflansche und Schrauben					
3.1		Vorschweißflansch	beidseitig geschweißt oder einseitig geschweißt mit Gegennaht	K 1	2,0
3.2			einseitig geschweißt ohne Gegennaht	K 2	
3.3		Aufschweißflansch	Nahtausführungen nach AD 2000-Merkblatt B 8, Tafel 1	K 2	3,0
3.4		eingesetzter Blockflansch	beidseitig durchgeschweißt oder einseitig durchgeschweißt mit Gegennaht	K 1	
3.5			beidseitig, aber nicht durchgeschweißt	K 2	
3.6		eingesetzter Blockflansch mit Schweißansatz	beidseitig durchgeschweißt oder einseitig durchgeschweißt mit Gegennaht	K 1	
3.7		aufgesetzter Blockflansch, Naht am Innendurchmesser (in der Darstellung: linke Naht)		K 3	4,0
		aufgesetzter Blockflansch, Naht am Außendurchmesser (in der Darstellung: rechte Naht)		K 2	
3.8		Schrauben von Flanschverbindungen: Nachweis in der Regel nur erforderlich, wenn die Schrauben häufig gelöst werden. In diesen Fällen gelten die in Klammern gesetzten Werte K 0 und $\eta = 5,0$.		(K 0)	(5,0)
4. Verschraubte, vorgelegte oder geklemmte ebene Platten mit Ausschnitten Geltungsbereich und ergänzende Hinweise: - Die Spannungsfaktoren η gelten für Böden mit mittigen Ausschnitten, wenn folgende Bedingungen für den Ausschnitt erfüllt sind (Bezeichnungen s. AD 2000-Merkblatt B 5 bzw. B 9): $d_i / D_1 \leq 0,2$ und $s_s / s \geq 1,25 \cdot d_i / D_1 + 0,1$ für verstärkte Ausschnitte und $d_i / D_1 \leq 0,2$ für unverstärkte Ausschnitte - Verstärkte Ausschnitte: Nahtausführung und Klassenzuordnung wie lfd. Nr. 2.1-2.6, 3.3-3.7 - Unverstärkte Ausschnitte (ebene Platten ohne Schweißnaht): Klasse K 0					
4.1		verschraubte Platten mit und ohne Randmoment	s. „Geltungsbereich und ergänzende Hinweise“ zu lfd. Nr. 4	K0-K3	3,0

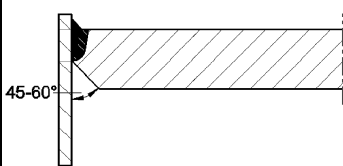
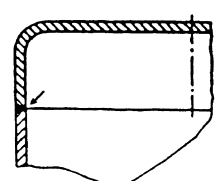
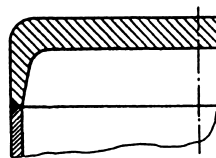
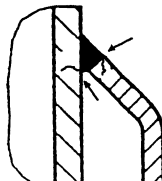
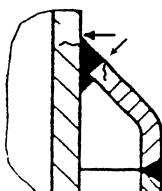


AD 2000-Merkblatt

Seite 16 AD 2000-Merkblatt S 1, Ausg. 02.2005

Tafel 3. Beispiele von Bauformen und Schweißverbindungen mit den zugeordneten Klassen (K 0, K 1, K 2, K 3) und den zugeordneten Spannungsfaktoren η (eingezeichnete Rissverläufe beispielhaft)

lfd. Nr.	Darstellung	Beschreibung	Voraussetzung	Klasse	η
4.2		von innen oder außen vorgelegte Platte	s. „Geltungsbereich und ergänzende Hinweise“ zu lfd. Nr. 4	K0-K3	3,0
4.3		beidseitig frei aufliegende Platte			
5. Anschlussschweißnähte ebener Böden					
Geltungsbereich und ergänzende Hinweise: Die Klassen K und die Spannungsfaktoren η gelten auch für Böden mit mittigen Ausschnitten, wenn folgende Bedingungen für den Ausschnitt erfüllt sind (Bezeichnungen s. AD 2000-Merkblatt B 5 bzw. B 9): $d_i / D_1 \leq 0,2$ und $s_s / s \geq 1,25 \cdot d_i / D_1 + 0,1$ für verstärkte Ausschnitte und $d_i / D_1 \leq 0,2$ für unverstärkte Ausschnitte					
5.1		aufgeschweißter Boden	beidseitig durchgeschweißt	K 1	5,0
5.2			beidseitig, aber nicht durchgeschweißt	K 2	
5.3			einseitig geschweißt ohne Gegennaht	K 3	
5.4		aufgeschweißter Boden mit Entlastungsnut	einseitig geschweißt, Nutabmessung entsprechend AD 2000-Merkblatt B 5, Tafel 1, Ausführungsform e	K 2	4,0
5.5		mit einem Auf- oder Vorschweißflansch verschweißter Boden	beidseitig mit Kehlnähten verschweißt	K 2	5,0
5.6		eingeschweißter Boden	beidseitig durchgeschweißt oder einseitig durchgeschweißt mit Gegennaht	K 1	
5.7			beidseitig, aber nicht durchgeschweißt	K 2	
5.8			einseitig geschweißt	K 3	

Tafel 3. Beispiele von Bauformen und Schweißverbindungen mit den zugeordneten Klassen (K 0, K 1, K 2, K 3) und den zugeordneten Spannungsfaktoren η (eingezeichnete Rissverläufe beispielhaft)

lfd. Nr.	Darstellung	Beschreibung	Voraussetzung	Klasse	η	
5.9		partiell durchgeschweißter Boden	einseitig geschweißt	K 3	5,0	
5.10		gekrempter Boden, Anschlusserschweißnaht	Krempenradius und Bordhöhe entsprechend AD 2000-Merkblatt B 5, Tafel 1, Ausführungsform a, Nahtausführung und Klassenzuordnung wie lfd. Nr. 1.1-1.3	K1/K2	1,5	
5.11		gekrempter Boden, Krempe	ungeschweißt	K 0	2,0	
5.12		geschmiedeter oder gepresster Boden, Anschlusserschweißnaht	Krempenradius und Bordhöhe entsprechend AD 2000-Merkblatt B 5, Tafel 1, Ausführungsform b, Nahtausführung und Klassenzuordnung wie lfd. Nr. 1.1-1.3	K1/K2	1,5	
5.13		geschmiedeter oder gepresster Boden, Krempe	ungeschweißt	K 0	4,0	
6. Doppelmantel – Anschlussnähte						
6.1		mit angeformter Krempe: Die Bewertung gilt sowohl für die Innenbehälterwand als auch für die Verbindungsnaht selbst	einseitig durchgeschweißt	K 2	3,0	
6.2		mit separater Krempe: Die Bewertung gilt sowohl für die Innenbehälterwand als auch für die Verbindungsnaht zwischen Krempe und Behälterwand. (Die Verbindungsnaht zwischen Krempe und Außenmantel wird nach lfd. Nr. 1.3 mit K 2 bewertet)	beidseitig durchgeschweißt oder einseitig durchgeschweißt mit Gegennaht	K 1	3,0	
7. Anschweißteile, allgemein						
Voraussetzung: Äußerer Befund der Anschlusserschweißnähte nach EN 25817, Bewertungsgruppe B, ausschließlich der Merkmale Nahtüberhöhung und -unterschreitung sowie Ungleichschenkligkeit						
7.1		Anschweißteile ohne Einleitung von wechselnden Zusatzkräften oder -momenten	beidseitig durchgeschweißt	K 1	2,0	
7.2			beidseitig mit Kehlnaht geschweißt	K 2		
7.3			beidseitig durchgeschweißt	K 1 ⁷⁾		
7.4			beidseitig mit Kehlnaht geschweißt	K 2 ⁷⁾		

⁷⁾ Die Bewertung bezieht sich auf die Rippenmitte. Für das Rippenende ist die Bewertung jeweils eine Klasse schlechter.

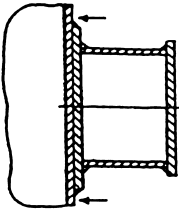
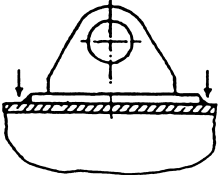
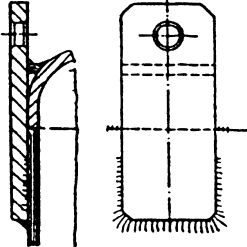
AD 2000-Merkblatt

Seite 18 AD 2000-Merkblatt S 1, Ausg. 02.2005

Tafel 3. Beispiele von Bauformen und Schweißverbindungen mit den zugeordneten Klassen (K 0, K 1, K 2, K 3) und den zugeordneten Spannungsfaktoren η (eingezeichnete Rissverläufe beispielhaft)

lfd. Nr.	Darstellung	Beschreibung	Voraussetzung	Klasse	η
7.5		Verstärkungsblech, Futterblech mit Kehlnahtanschluss. Keine Einleitung von wechselnden Zusatzkräften oder -momenten	$s_2 \leq 1,5 \cdot s_1$ $r \geq 2 \cdot s_2$	K 2	
7.6		Anschweißteile mit Einleitung von wechselnden Zusatzkräften oder -momenten	beidseitig durchgeschweißt	K 1	3,0
7.7			beidseitig, aber nicht durchgeschweißt	K 2	
8. Anschweißteile ohne Einleitung von wechselnden Zusatzkräften oder -momenten, Beispiele					
Voraussetzung: Äußerer Befund der Anschlussschweißnähte nach EN 25817, Bewertungsgruppe B, ausschließlich der Merkmale Nahtüberhöhung und -unterschreitung sowie Ungleichschenkligkeit					
8.1		Behälter mit Standzargenanschluss	einseitig geschweißt	K 2	2,0
8.2		Behälterwand mit Tragring	beidseitig, aber nicht durchgeschweißt	K 2	2,0
8.3		Behälterwand mit Versteifungsring		K 2	
8.4				in Umfangsrichtung unterbrochen geschweißt	K 3
8.5		Behälterwand mit Tragpratze (mit und ohne Futterblech)	einseitig geschweißt	K 2	
8.6		Behälterwand mit Fuß (mit und ohne Futterblech)	einseitig geschweißt	K 2	

Tafel 3. Beispiele von Bauformen und Schweißverbindungen mit den zugeordneten Klassen (K 0, K 1, K 2, K 3) und den zugeordneten Spannungsfaktoren η (eingezeichnete Rissverläufe beispielhaft)

lfd. Nr.	Darstellung	Beschreibung	Voraussetzung	Klasse	η
8.7		Behälterwand mit Tragzapfen (mit und ohne Futterblech)	einseitig geschweißt	K 2	
8.8		Behälterwand mit Tragöse (mit und ohne Futterblech)	einseitig geschweißt	K 2	
8.9		Behälterwand mit Traglasche	einseitig geschweißt	K 2	2,0

Anhang 1 zum AD 2000-Merkblatt S 1

Erläuterungen zum AD 2000-Merkblatt S 1

Das AD 2000-Merkblatt S 1 ist ein vereinfachter Ermüdungsfestigkeitsnachweis auf der Basis des AD 2000-Merkblattes S 2 „Berechnung auf Wechselbeanspruchung“, Ausgabe Oktober 2004.

Die folgenden Erläuterungen beziehen sich nur auf die Vereinfachungen gegenüber der Vorgehensweise nach AD 2000-Merkblatt S 2. Zu den Grundlagen der weiterentwickelten Ermüdungsfestigkeitsnachweise wird auf AD 2000-Merkblatt S 2 Anhang 1 verwiesen.

Folgende Vereinfachungen sind in diesem AD 2000-Merkblatt gegenüber AD 2000-Merkblatt S 2 festgelegt:

1. Berechnung nur auf Wechselbeanspruchung aus Innendruckschwankungen außerhalb Kriechbereich.
2. Überschlägige Berechnung der Spannungsschwingbreite $2\sigma_a^*$ über pauschale bauteilspezifische Spannungsfaktoren η und Ausnutzung der zulässigen Berechnungsspannung nach AD 2000-Merkblatt B 0 anstelle einer detaillierten Spannungsanalyse.
3. Keine Korrekturfaktoren für überelastische Verformung (k_e -Faktoren) und Mittelspannungseinfluss (f_m -Faktoren).
4. Keine Korrekturfaktoren f_0 zur Berücksichtigung des Oberflächeneinflusses bei ungeschweißten Bauteilen. Lastspielzahlkurve für ungeschweißte Bauteile beschränkt auf Walzhautoberfläche.
5. Einheitlicher und lastspielzahlunabhängiger Korrekturfaktor F_d zur Berücksichtigung des Wanddickeneinflusses für geschweißte und ungeschweißte Bauteile.
6. Vereinfachte Berechnung der Schädigungsakkumulation bei Betriebslastkollektiv unter Verzicht auf Angabe von fiktiven Lastspielzahlkurven (z. B. Modifikation nach *Haibach*) im Dauerfestigkeitsbereich.

Erläuterung zu Abschnitt 1.2

Bei den meisten Druckbehältern spielen Temperaturänderungen im Betrieb oder äußere Belastungen im Sinne einer Wechselbeanspruchung gegenüber der Innendruck-Betriebsbelastung eine untergeordnete Rolle. Aus Vereinfachungsgründen wird deshalb nur die Wechselbeanspruchung aus Innendruckschwankungen berücksichtigt.

Bei Dimensionierung mit Zeitstandfestigkeitskennwerten (z. B. für 100 000 h) ist der Schädigungsanteil durch Wechselbeanspruchung gegenüber der Kriechschädigung in den meisten Fällen sehr gering.

In Umkehrung dieses Sachverhaltes wird zur Vereinfachung die Anwendung dieses AD 2000-Merkblattes für höhere Temperaturen ausgeschlossen, bei denen zeitabhängige Festigkeitskennwerte für die Dimensionierung maßgebend sind.

Erläuterung zu Abschnitt 1.4

Der Verzicht auf eine vereinfachte Berechnung auf Wechselbeanspruchung unter alleiniger Wirkung von Innendruckschwankungen unter 1000 An- und Abfahrten und Druckschwankungen von nicht mehr als 10 % bzw. 20 % des maximal zulässigen Druckes (oder des fiktiven Druckes p_f) stellt für Druckbehälter mit Bauformen und Schweißverbindungen, die für Wechselbeanspruchung weniger geeignet sind, oder für Druckbehälter, die nach Ge-

sichtspunkten vorwiegend statischer Beanspruchung ausgelegt sind (z. B. Einfache Druckbehälter nach EU-Richtlinien) eine pragmatische Lösung dar.

Hierbei wird davon ausgegangen, dass eventuell auftretende Ermüdungsrisse bei wiederkehrenden Prüfungen gemäß § 10 Abs. 4 der DruckbehV rechtzeitig erkannt werden.

Erläuterung zu Abschnitt 1.5

Die Kurven in Bild 2 und 3 als Erweiterung des Verzeichtes auf eine Anwendung von AD 2000-Merkblatt S 1 sind nach

$$\frac{\hat{p} - \check{p}}{p} = \frac{B}{\eta \cdot K/S \cdot N^{1/3}}$$

und

$$F_p = \left[1 - (N_{AB/AN} - 1000) \cdot \left(\frac{0,9 \cdot \eta \cdot K/S}{B} \right)^3 \right]^{1/3}$$

mit

$B = 6300$ nach Tafel 1 für Klasse 2

$\eta = 3$

$N = 20 \cdot 365 \cdot \text{Anzahl täglicher Druckschwankungen}$

$N_{AB/AN} = \text{Anzahl der An- und Abfahrten}$

ermittelt worden.

Beim Abminderungsfaktor F_p wurden nur 90 % der vollen Druckschwankungsbreite beim An- und Abfahren berücksichtigt und die gemäß Abschnitt 1.4 vernachlässigbaren 1000 Starts in Abzug gebracht.

Erläuterung zu Abschnitt 4.1.2 und Tafel 3

Die Spannungsfaktoren η sind als Formzahlen aufzufassen, die auf Berechnungsspannungen entsprechend den Dimensionierungsformeln nach den AD 2000-Merkblättern Reihe B bezogen sind (Traglastspannungen). Der Spannungsfaktor η einer Bauteilstruktur hat i. A. einen geringeren Wertebereich als die Strukturformzahl α , die z. B. bei einer detaillierten analytischen Spannungsanalyse zur Anwendung kommt.

Die η -Werte in Tafel 3 sind Werte, die durch Berechnungen, Abschätzungen und Erfahrungen festgelegt wurden. Sie stellen in der Regel das Maximum der η -Faktoren für die praktisch auftretenden Parameterbereiche jeder Bauteilstruktur dar. Vergleiche hierzu auch Richtlinie BR-E 2 [3].

Beispiel 1: Zylindermantel mit senkrechtem Abzweig

Umstellung der Formel (2) nach AD 2000-Merkblatt B 1, mit $c_1 = c_2 = 0$ und $v = v_A$ als Ausschnitts-Verschwächungsfaktor ergibt

$$\bar{\sigma} = \frac{(D_a - s) \cdot p}{20 \cdot s \cdot v_A} = \frac{D_m \cdot p}{20 \cdot s \cdot v_A}$$

Strukturspannung $\hat{\sigma}$, bezogen auf mittlere Vergleichsspannung im ungestörten Zylinder

$$\hat{\sigma} = \alpha \cdot \frac{D_m \cdot p}{20 \cdot s}$$

Spannungsfaktor

$$\eta = \frac{\hat{\sigma}}{\bar{\sigma}} = \alpha \cdot v_A$$

Bild A 3 dieses Anhangs zeigt hierzu Spannungsfaktoren η , die aus v_A -Werten nach AD 2000-Merkblatt B 9 und Strukturformzahlen α nach XIE und LU [6] berechnet sind (vgl. [7], Bild 7).

Entsprechende Berechnungen für Kugelschalen mit Abzweig ergeben etwas höhere η -Werte. In Tafel 3 wurde deshalb für Stutzeinschweißungen (Nr. 2) in Schalen ein Wert von $\eta = 3,0$ festgelegt.

Beispiel 2: Kegelmantel mit Eckstoßverbindung

Umstellung der Dimensionierungsformel in AD 2000-Merkblatt B 2, Abschnitt 8.1.1 nach

$$\frac{K}{S} = \bar{\sigma} = \frac{p}{15 \cdot e^{z1}} \quad z1 \triangleq z \text{ nach Bildern 3.1 bis 3.7 in AD 2000-Merkblatt B 2}$$

nach Abschnitt 8.1.2

$$\frac{K}{S} = \bar{\sigma} = \frac{\left(\frac{D_K}{\cos \varphi} + s \right) \cdot p}{20 \cdot s}$$

nach Anhang zu AD 2000-Merkblatt B 2

$$\hat{\sigma} = \sigma_{vg} = \frac{p}{10} \cdot e^{z2} \quad z2 \triangleq z \text{ nach Tafel A 1}$$

$$\eta = \frac{\hat{\sigma}}{\bar{\sigma}} = \max \left[\frac{1,5 \cdot e^{z1} \cdot e^{z2}}{\frac{D_K}{\cos \varphi} \cdot \frac{1}{s} + 1}, \frac{2 \cdot e^{z2}}{\frac{D_K}{\cos \varphi} \cdot \frac{1}{s} + 1} \right]$$

Parameterberechnungen hierzu siehe Bild A 4.

Unter Ausschluss der in der Praxis kaum ausgeführten flachen Kegelmäntel ($\varphi = 60^\circ$ bis 70°) für Druckbehälter unter Druckwechselbeanspruchung wurde hiernach in Tafel 3 Nr. 1.10/1.11 der Spannungsfaktor $\eta = 2,7$ festgelegt.

Erläuterung zu Abschnitt 4.1.3 Formel (3)

Zur Berücksichtigung des wechselfestigkeitsabmindernden Einflusses der Bauteilgröße wurde der Korrekturfaktor F_d für Schweißverbindungen im Dauerfestigkeitsbereich nach AD 2000-Merkblatt S 2 Abschnitt 7.2.6 übernommen. Auf eine Lastspielzahlabhängigkeit gemäß AD 2000-Merkblatt S 2 Formel (17) wurde verzichtet.

Der F_d -Faktor wird vereinfachenderweise auch für ungeschweißte Bauteile angewendet.

Erläuterungen zu Abschnitt 4.2 und Bild 6

Zur Festlegung einer Lastspielzahlkurve für ungeschweißte Bauteile (Oberflächenzustand-Walzhaut) wurden Berechnungen nach AD 2000-Merkblatt S 2 für verschiedene Werkstoffe unter Berücksichtigung des Plastizitäts- und maximalen Mittelspannungseinflusses ($\bar{\sigma} = R_{p0,2}$) durchgeführt.

Nach Bild A 1 dieses Anhangs lässt sich hierzu näherungsweise eine „Mittelwert“-Kurve mit konstantem Steigungsexponenten $m = 3,5$ im doppelt-logarithmischen Maßstab angeben. Diese Lastspielzahlkurve Klasse K 0 ist nahezu identisch mit den Lastspielzahlkurven für ungeschweißte Bauteilbereiche nach den englischen Behälter- bzw. Stahlbauvorschriften BS 5500 : 94 [4] bzw. BS 7608 : 1993 [5] (Kurven der Klasse C).

Für Schweißverbindungen wurden die Lastspielzahlkurven der Klassen K 1, K 2 und K 3 aus AD 2000-Merkblatt S 2 übernommen.

Zur Überprüfung des Plastizitätseinflusses im Bereich niedriger Lastspielzahlen wurden Berechnungen nach

AD 2000-Merkblatt S 2 für den niedrigsten Werkstoff H II (konservativ) durchgeführt. Bild A 4 zeigt, dass die Abminderung über die k_e -Faktoren ($k_e > 1$) ab 1000 Belastungszyklen relativ gering ist und nur bei den Klassen K 1 und K 2 zur Auswirkung kommt. In Anbetracht des Geltungsbereiches ($N \geq 1000$) wurde deshalb aus Vereinfachungsgründen auf eine globale Spannungserhöhung im überelastischen Bereich über k_e -Faktoren verzichtet.

Aus Praktikabilitätsgründen (leichtere Ablesbarkeit zum schnellen Auffinden der zulässigen Lastspielzahl) wurde wie im früheren AD-Merkblatt S 1 (Ausg. 3.90) Bild 2 (N_{100} -Kurven) die halblogarithmische Darstellung für das Lastspielzahldiagramm gewählt.

Erläuterung zu Abschnitt 4.3 und Bild 7

In Anlehnung an die frühere Darstellungsweise von N_{100} - und f_L -Kurven wurden gleichartige Kurven für Druckbehälter bestimmter Konstruktions- und Betriebsrandbedingungen aufgenommen.

Formel (8) ergibt sich aus Formel (6) mit $B = 7940$ aus Tafel 1 für Klasse K 1 und $\eta = 3,0$.

Erläuterung zu Abschnitt 4.4

Zur Vereinfachung der Vorgehensweise bei der Schadensakkumulation im Falle eines Betriebslastkollektivs sind im Dauerfestigkeitsbereich ($N > 2 \cdot 10^6$) keine fiktiven Lastspielzahlkurven nach Haibach-Modifikation wie in AD 2000-Merkblatt S 2 enthalten.

Im Vergleich der Eckwerte zulässiger Spannungsschwingbreiten $2\sigma_a$ nach AD 2000-Merkblatt S 2 Tafel 4 im Bereich $N = 2 \cdot 10^6$ bis 10^8 und entsprechend Vorgehensweise nach AD 2000-Merkblatt S 2 Abschnitt 9.2 werden Spannungsschwingbreiten mit $N \geq 2 \cdot 10^6$ in Höhe von 50 % der Dauerfestigkeitswerte $2\sigma_{ad}$ nach Tafel 2 dieses AD 2000-Merkblattes als vernachlässigbar angesehen.

Schrifttum

- [1] AD 2000-Merkblatt S 2: Berechnung auf Wechselbeanspruchung, Ausgabe Oktober 2004. Heymanns Verlag, Köln.
- [2] AD 2000-Merkblätter Reihe B. Heymanns Verlag, Köln.
- [3] Richtlinienkatalog Festigkeitsberechnungen (RKF), Behälter und Apparate Teil 5. Ausgabe 1986. Linde-KCA-Dresden GmbH
- [4] British Standard BS 5500/1994: Specification for unfired fusion welded pressure vessels
- [5] British Standard BS 7608/1993: Code of practice for fatigue design and assessment of steel structures
- [6] Duan-Shou Xie u. Yong-Guo Lu: Prediction of Stress Concentration Factors for Cylindrical Pressure Vessels with Nozzles. Int. J. Pressure Vessel & Piping **21** (1985)
- [7] Gorsitzke, B.: Vorhersage der Ermüdungsfestigkeit druckführender Komponenten im Energie- und Chemieanlagenbau, Teil 1 und Teil 2. Z. Tü **30** (1989) Nr. 2 und Nr. 3
- [8] Gorsitzke, B.: Neuere Berechnungsvorschriften zur Ermüdungsfestigkeit von Druckbehältern. Z. Tü **36** (1995) Nr. 6 und Nr. 7/8.
- [9] Gorsitzke, B.: Erläuterungen zum neuen AD-Merkblatt S 1 „Vereinfachte Berechnung auf Wechselbeanspruchung und ergänzende Hinweise“. Z. Tü **37** (1996) Nr. 6 und Nr. 7/8.

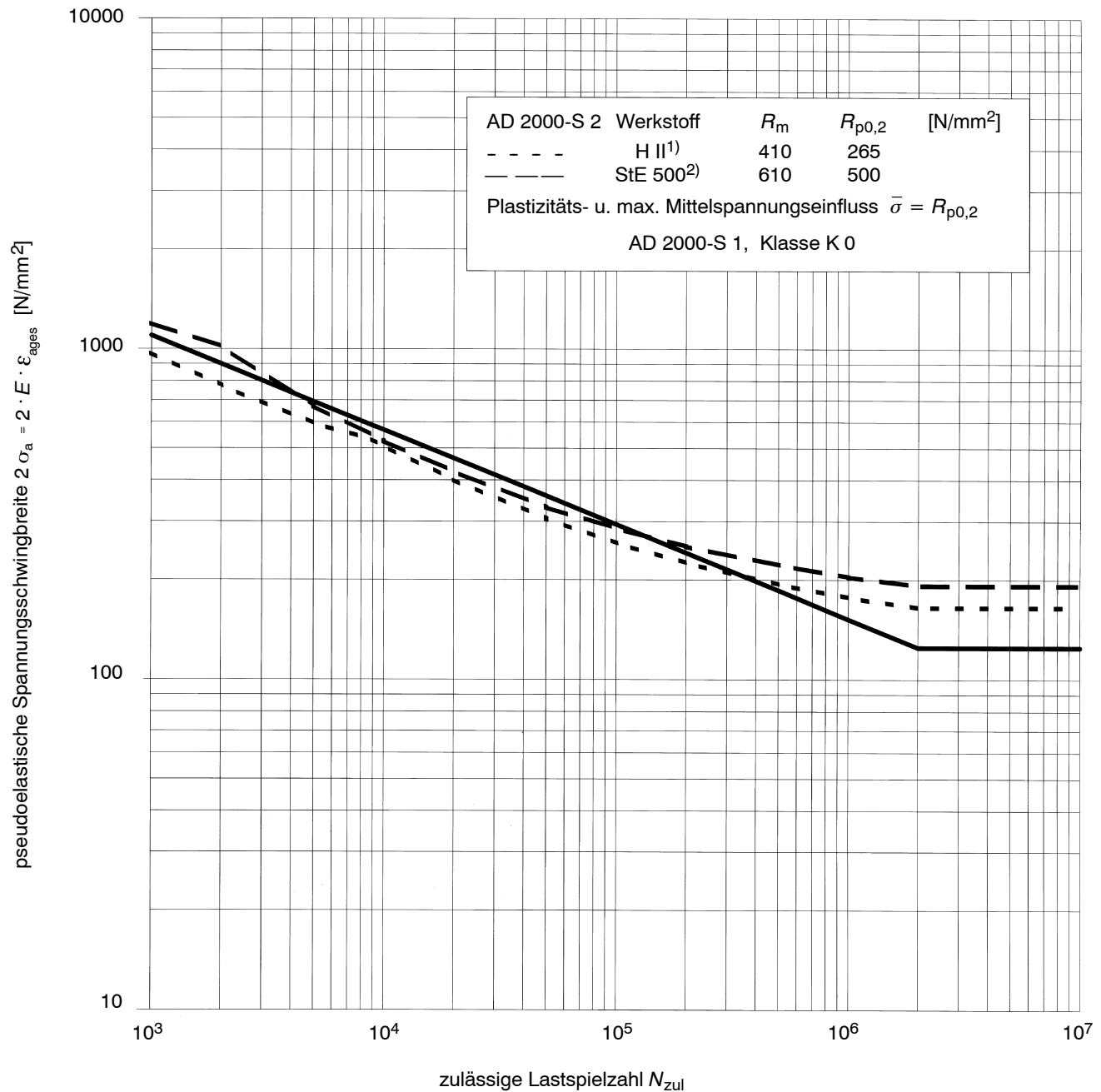


Bild A 1. Zulässige Lastspielzahlen in Abhängigkeit von der Spannungsschwingbreite nach AD 2000-S 1 und AD 2000-S 2 für ungeschweißte Bauteile mit Walzhautoberfläche bei Raumtemperatur und Wanddicken ≤ 25 mm

¹⁾ P 265 GH nach DIN EN 10028-2

²⁾ P 500 Q, P 500 QH oder P 500 QL nach DIN EN 10028-6

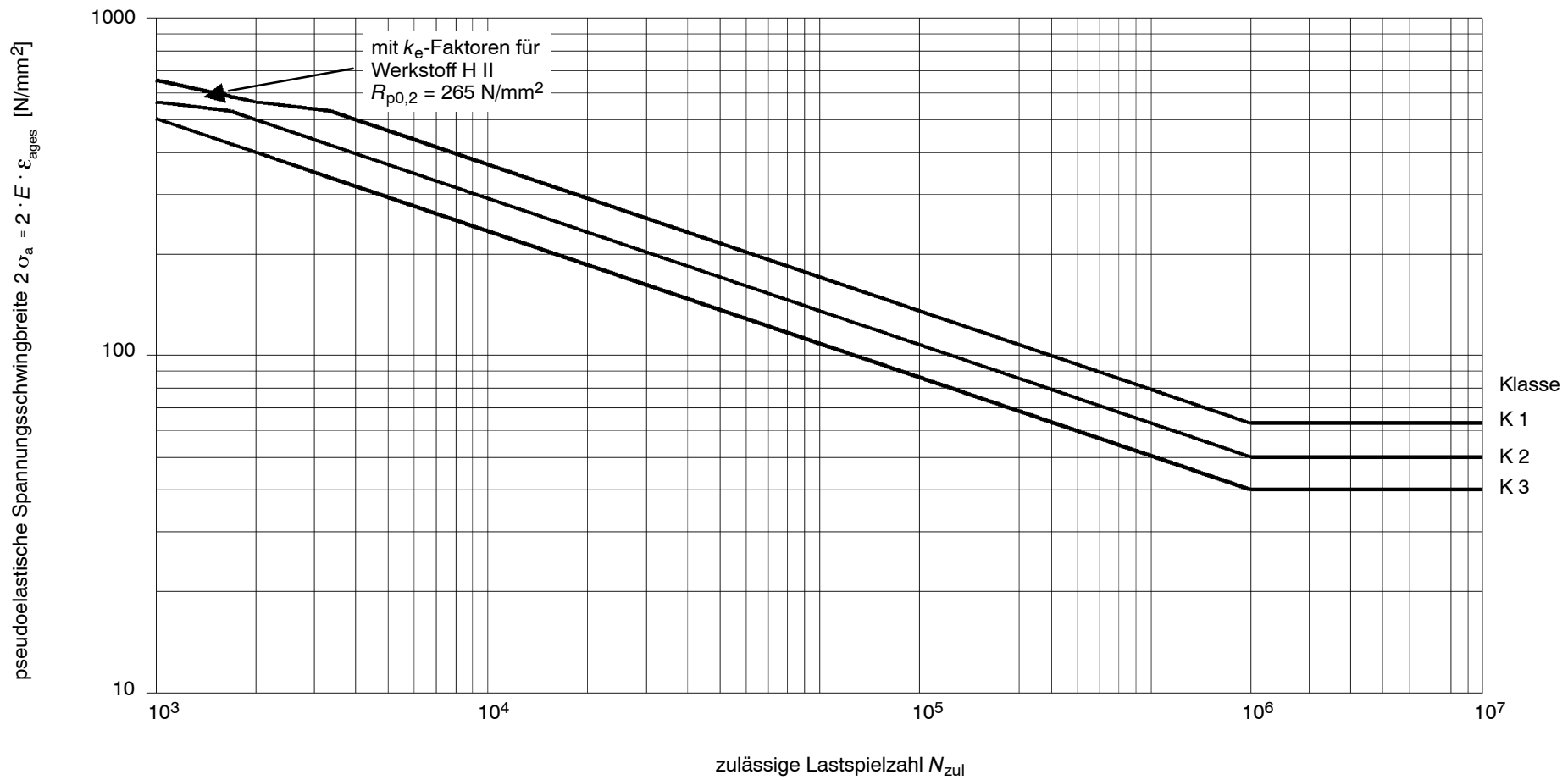


Bild A 2. Zulässige Lastspielzahlen in Abhängigkeit von der Spannungsschwingbreite nach AD 2000-S 2 für Schweißverbindungen bei Raumtemperatur und Wanddicken $\leq 25 \text{ mm}$ unter Berücksichtigung des Plastizitätseinflusses (k_e -Faktoren)

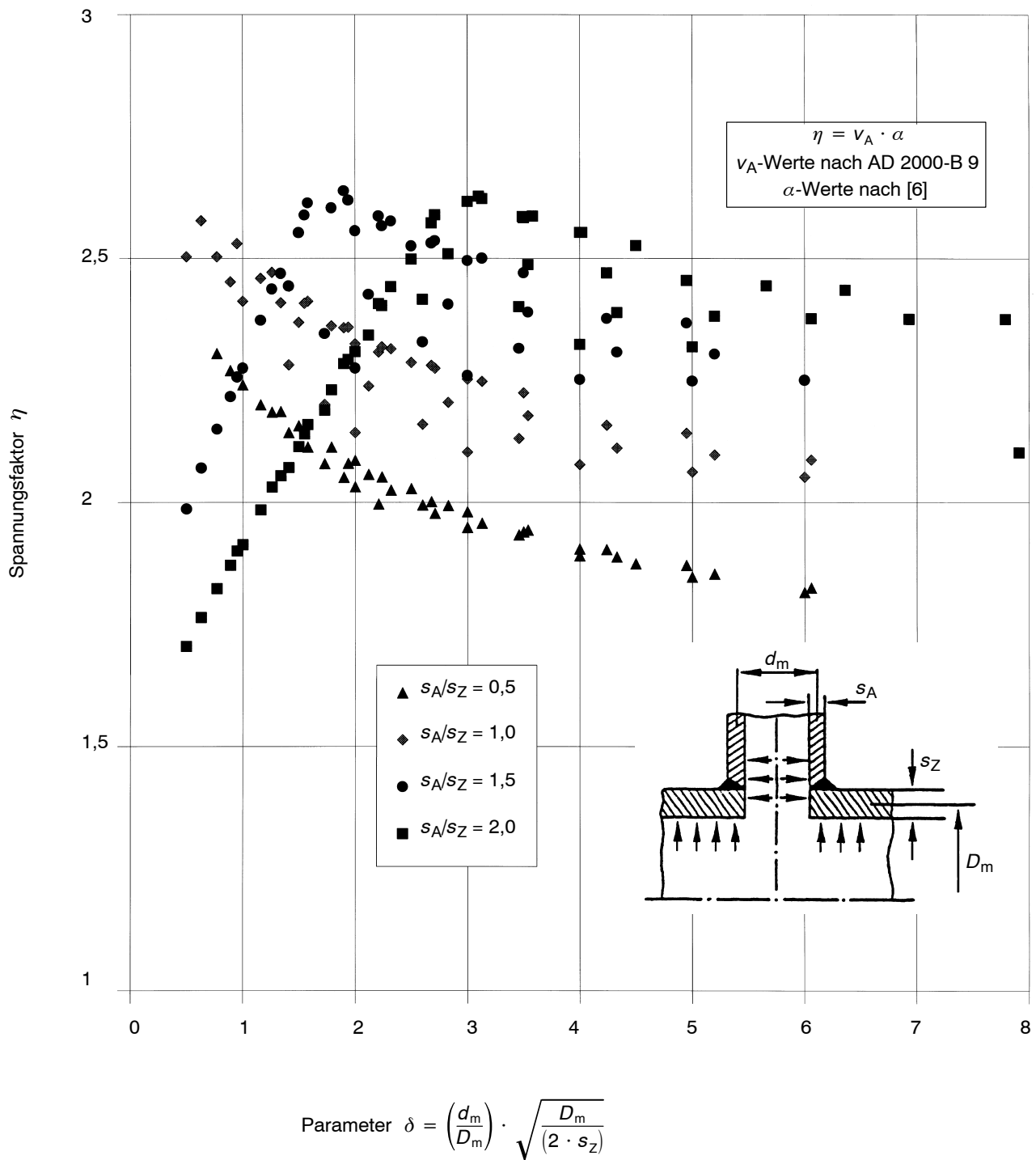


Bild A 3. Spannungsfaktoren η für Zylinderschalen mit senkrechtem Abzweig

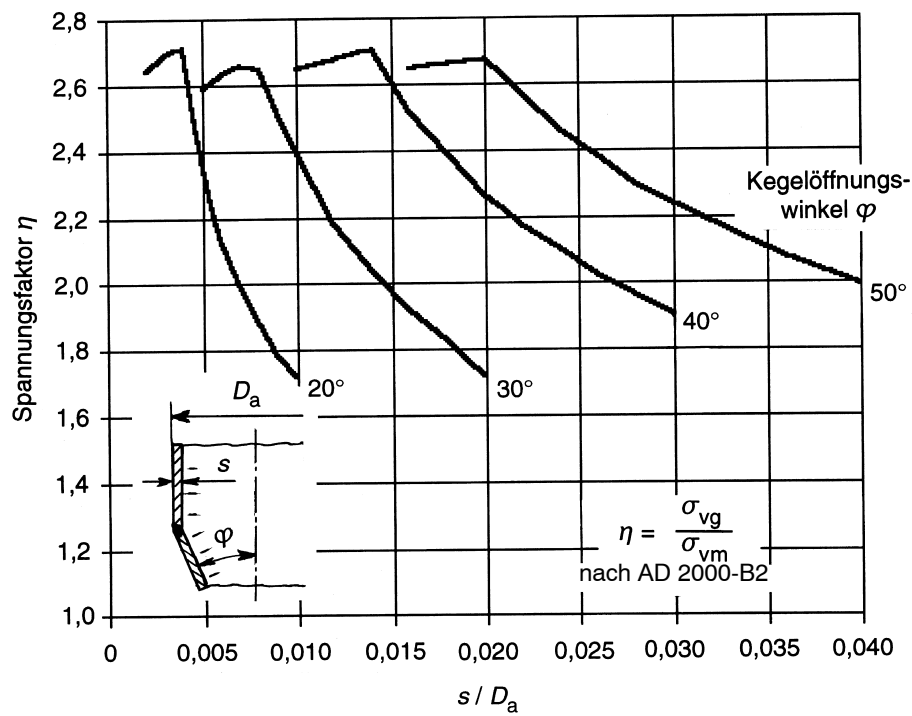


Bild A 4. Spannungsfaktoren η für konvergierende Kegel mit Eckstoß

Anhang 2 zum AD 2000-Merkblatt S 1

Berechnungsbeispiel

Druckbehälter für Kohlestaubeinblasanlage

1. Angaben zur Konstruktion

Siehe Bild A 5

Zylindermantel, Kegelmantel, Korbbogenboden, Deckel und Stutzenbleche aus H II

Stutzenrohre aus St 35.8 I

Flansche aus C22.8, Druckstufe PN 16

Blinddeckel mit durchgehender Dichtung

Gestaltung der Schweißverbindungen von drucktragenden Wandungen (Längs-, Rundnähte und Stutzenanschlüssen) entsprechend Schweißnahtklasse K 1, von Anschweißteilen Klasse K 2

Abnutzungszuschlag $c_2 = 2$ mm für Mäntel und Böden

2. Betriebsdaten

Maximal zulässiger Druck 16 bar

Zulässige maximale Temperatur 50 °C

Innendruckschwankungsbreite $\hat{p} - \check{p} = 12 - 0 = 12$ bar

Betriebsweise 3 Zyklen/h, 3-Schichtbetrieb

3. Spannungsschwingbreiten und zulässige Lastspielzahlen nach AD 2000-Merkblatt S 1 Abschnitt 4

Temperatureinflussfaktor für $T^* \leq 100^\circ\text{C}$ $f_{T^*} = 1$

Wanddicken-Korrekturfaktor

für $s_e \leq 25$ mm $F_d = 1$

Festigkeitskennwert bei 20 °C $K_{20} = 255$ N/mm²

Sicherheitsbeiwert $S = 1,5$

3.1 Zylindermantel, Längsnahbereich mit Aufdachung

Fiktiver Druck entsprechend AD 2000-Merkblatt B 1

$$p_r = \frac{20 \cdot \frac{K}{S} \cdot v \cdot \left(s_e - \frac{c_2}{2}\right)}{D_a - \left(s_e - \frac{c_2}{2}\right)}$$

$$p_r = \frac{20 \cdot \frac{255}{1,5} \cdot 0,85 \cdot (18 - 1)}{3000 - (18 - 1)} = 16,5 \text{ bar}$$

nach Tafel 3, Nr. 1.1 $\Rightarrow K 1, \eta = 3$

nach Tafel 1, K 1 $\Rightarrow B = 7940$ N/mm²

Spannungsschwingbreite nach Formel (2)

$$2\sigma_a^* = \frac{3}{1 \cdot 1} \cdot \frac{12}{16,5} \cdot \frac{255}{1,5} = 371 \text{ N/mm}^2$$

zulässige Lastspielzahl nach Formel (6)

$$N_{zul} = \left(\frac{7940}{371}\right)^3 = 9803$$

3.2 Zylindermantel, Tragpratzenbereich

$p_r = 16,5$ bar (siehe 3.1)

nach Tafel 3, Nr. 6.5 $\Rightarrow K 2, \eta = 2$

nach Tafel 1, K 2 $\Rightarrow B = 6300$ N/mm²

$$2\sigma_a^* = 2 \cdot \frac{12}{16,5} \cdot \frac{255}{1,5} = 247 \text{ N/mm}^2$$

$$N_{zul} = \left(\frac{6300}{247}\right)^3 = 16593$$

3.3 Kegelmantel, oberer Krepfenanschluss

nach AD 2000-Merkblatt B 2, Kegelmantel außerhalb Abklingbereich für p_r maßgebend

$$p_r = \frac{20 \cdot \frac{K}{S} \cdot v \cdot \left(s_e - \frac{c_2}{2}\right)}{\frac{D_K}{\cos \varphi} + s_e - \frac{c_2}{2}}$$

$D_K = 2847$ mm aus Berechnung nach AD 2000-Merkblatt B 2

$$p_r = \frac{20 \cdot \frac{255}{1,5} \cdot 0,85 \cdot (18 - 1)}{\frac{2847}{\cos 20^\circ} + 18 - 1} = 16 \text{ bar}$$

nach Tafel 3, Nr. 1.10 $\Rightarrow K 1, \eta = 2$

nach Tafel 1, K 1 $\Rightarrow B = 7940$

$$2\sigma_a^* = 2 \cdot \frac{12}{16} \cdot \frac{255}{1,5} = 255 \text{ N/mm}^2$$

$$N_{zul} = \left(\frac{7940}{255}\right)^3 = 30188$$

3.4 Kegelmantel, Stutzenbereich

nach AD 2000-Merkblatt B 9 mit

Zylinder-Ersatzdurchmesser $D_i \approx 2200$ mm

$$\Rightarrow p_r = 26 \text{ bar}$$

Tafel 3, Nr. 2.1

$$\Rightarrow K 1, \eta = 3$$

Tafel 1, K 1

$$\Rightarrow B = 7940$$

$$2\sigma_a^* = 3 \cdot \frac{12}{26} \cdot \frac{255}{1,5} = 235 \text{ N/mm}^2$$

$$N_{zul} = \left(\frac{7940}{235}\right)^3 = 38571$$

3.5 Korbbogenboden, Krepfenbereich

Nach AD 2000-Merkblatt B 3 $\Rightarrow p_r = 18$ bar

nach Tafel 3, Nr. 1.15 $\Rightarrow K 0, \eta = 2$

nach Tafel 1, K 0 $\Rightarrow B = 7890$

$$2\sigma_a^* = 2 \cdot \frac{12}{18} \cdot \frac{255}{1,5} = 227 \text{ N/mm}^2$$

$$N_{zul} = \left(\frac{7890}{227}\right)^{3,5} = 247559$$

3.6 Korbbogenboden, Stutzenbereich

Pos. 6 maßgebend

Nach AD 2000-Merkblatt B 9 $\Rightarrow p_r = 22$ bar

Tafel 3, Nr. 2.1 $\Rightarrow K 1, \eta = 3$

Tafel 1, K 1 $\Rightarrow B = 7940$

$$2\sigma_a^* = 3 \cdot \frac{12}{22} \cdot \frac{255}{1,5} = 278 \text{ N/mm}^2$$

$$N_{zul} = \left(\frac{7940}{278}\right)^3 = 23298$$

Blinddeckel sind hier nicht lebensdauerrelevant.

4. Zusammenfassendes Ergebnis und Bewertung

Die zulässige Lastspielzahl für den Behälter ergibt sich als Kleinstwert aus den zulässigen Werten für die betrachteten Stellen zu

$$N_{zul} = 9803$$

Die Waddickenbemessung nach statischen Gesichtspunkten (AD 2000-Merkblätter Reihe B) führt hier zu nicht akzeptabler Lastspielzahl bzw. Prüffrist.

Die Lastspielzahl kann beispielsweise durch Vergrößerung der Waddicken erhöht werden. Eine analoge Berechnung

mit Waddicken von 30 mm für Zylindermantel, Kegelmantel und Boden führt zu

$$N_{zul} = 49000$$

mit einem Prüfintervall von ca. 1 Jahr

$$\left(\frac{0,5 \cdot 49000}{3 \cdot 24} \approx 340 \text{ Tage} \right)$$

Ein deutlich günstigeres Ergebnis wird jedoch erzielt, wenn die Berechnungen nach AD 2000-Merkblatt S 2 durchgeführt werden. Siehe hierzu Berechnungsbeispiel für gleichen Druckbehälter mit $s_e = 30 \text{ mm}$ in AD 2000-Merkblatt S 2 Anhang 3.

$$N_{zul} = 250000, \text{ Prüfintervall 5 Jahre.}$$

AD 2000-Merkblatt

Seite 28 AD 2000-Merkblatt S 1, Ausg. 02.2005

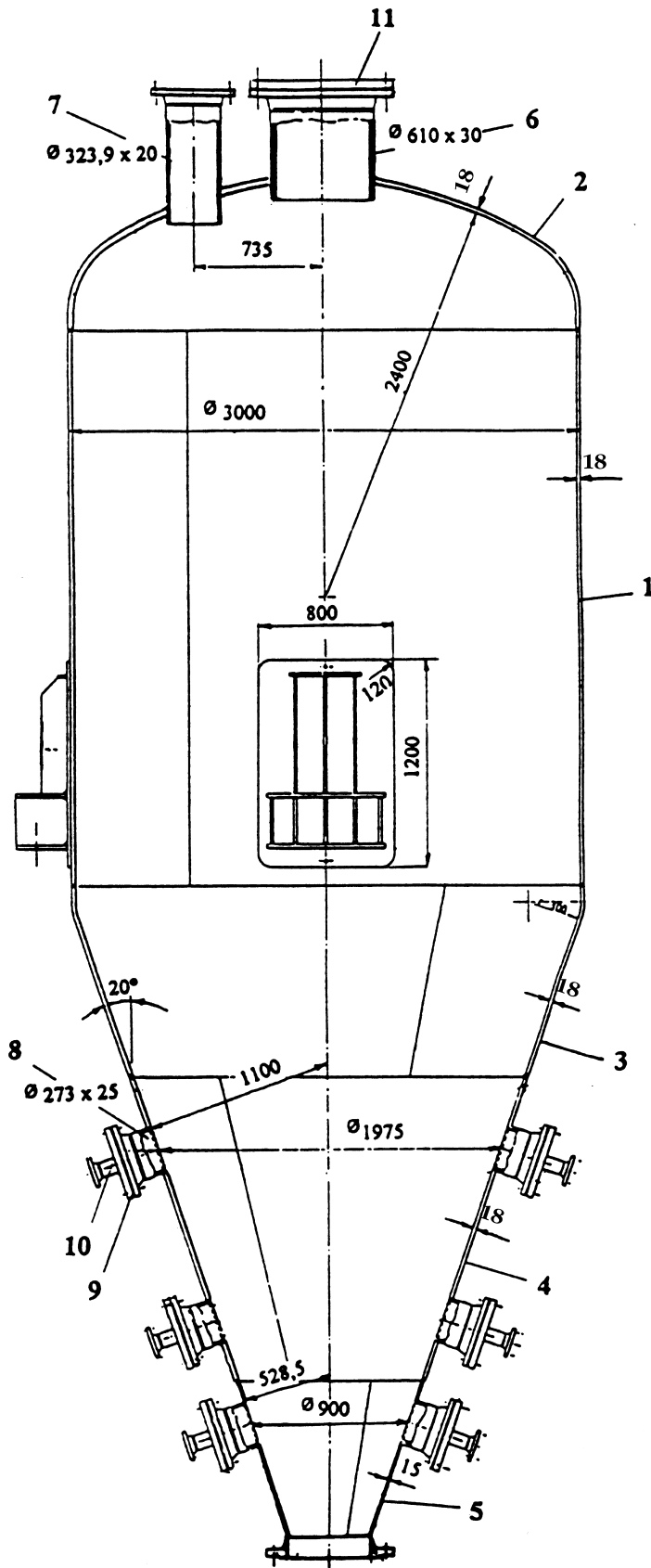


Bild A 5. Druckbehälter für Kohlestaubblasanlage (Berechnungsbeispiel)

Anhang 3 zum AD 2000-Merkblatt S 1

Vereinfachte Berechnung auf Wechselbeanspruchung für Gusseisen mit Kugelgraphit

1 Geltungsbereich und Allgemeines

1.1 Die nachstehenden Regeln einer vereinfachten Berechnung auf Wechselbeanspruchung gelten für drucktragende ungeschweißte Teile von Druckbehältern aus Gusseisen mit Kugelgraphit nach DIN EN 1563 mit Beschränkung auf die Sorten EN-GJS-400-15/15U, EN-GJS-400-18/U-LT und EN-GJS-350-22/22U-LT, die nach dem AD 2000-Merkblatt W 3/2 hergestellt und geprüft werden.

1.2 An die äußere und innere Beschaffenheit der Gussteile sind erhöhte Anforderungen zu stellen, die den Festlegungen der Qualitätsklassen A oder B nach DIN 1690 Teil 10 genügen (siehe Abschnitt 4.2).

1.3 Wenn die Anzahl der Lastspiele mit Druckschwankungen zwischen dem drucklosen Zustand und dem maximal zulässigen Druck p (An- und Abfahrten) und die auf p^1 bezogene Schwingbreite $(\hat{p} - \check{p})$ beliebig vieler Druckschwankungen folgende Werte nicht überschreiten, braucht dieser Anhang nicht angewendet zu werden.

a) $N_{100} \leq 100000$ und $(\hat{p} - \check{p}) \leq 50\%$ von p^1
bei EN-GJS-400-15/15U

b) $N_{100} \leq 6000$ und $(\hat{p} - \check{p}) \leq 35\%$ von p^1
bei EN-GJS-400-18/U-LT
bzw. EN-GJS-350-22/22U-LT

Hierbei werden Bauformen vorausgesetzt, deren Spannungsfaktoren η nicht größer als 2,5 betragen.

Die Grenzwerte der Lastspielzahlen N_{100} können auf das 2,4-fache angehoben werden, wenn die Prüfbedingungen entsprechend Qualitätsklasse A erfüllt sind.

1.4 Wenn in diesem Anhang nichts anderes angegeben, gelten alle anderen Regelungen im Hauptteil dieses AD 2000-Merkblattes.

2 Ermittlung der zulässigen Lastspielzahl

2.1 Die fiktive pseudoelastische Spannungsschwingbreite $2\sigma_a^*$ zur Bestimmung der zulässigen Lastspielzahl ist nach Formel (2) zu berechnen. Hierbei ist der Spannungsfaktor η nach Tafel 3 abzuschätzen. Dabei brauchen höhere Werte als $\eta = 2,5$ nicht berücksichtigt zu werden. Für Strukturen, die sich nach dieser Tafel nicht einstufen lassen, sind die η -Werte nachzuweisen, es sei denn, dass $\eta = 2,5$ in die Rechnung eingesetzt wird.

Der Wanddicken-Korrekturfaktor F_d ist sinngemäß nach Formel (3) zu berechnen, wobei anstelle des Exponenten 0,25 der Wert 0,1 zu setzen und für Wanddicken $s_e > 150$ mm der Korrekturfaktor auf $F_d = 0,84$ zu begrenzen ist. Für den Temperatur-Korrekturfaktor f_{T^*} gilt Formel (4).

2.2 Die zulässige Lastspielzahl für Bauteilbereiche mit Gusshautoberfläche ist im Geltungsbereich $10^3 \leq N \leq 2 \cdot 10^6$ in Abhängigkeit von der Spannungsschwingbreite nach Formel (2) sinngemäß aus Formel (6) mit $m = 8,333$ zu berechnen. Die Werte der Berechnungskonstanten B sind Tafel A 1 zu entnehmen. Hierbei sind die Kerbwirkungen durch Oberflächenrauheit sowie der größ-

mögliche Einfluss von Mittelspannungen aus Betriebsüberdruck bereits berücksichtigt.

Die Abknickpunkt-Lastspielzahl N_D , von der ab die Schwingfestigkeitswerte lastspielzahlunabhängig sind, ist bei $N = 2 \cdot 10^6$ festgelegt. Für Qualitätsklasse A kann die zulässige Lastspielzahl auch aus Bild A 6 entnommen werden.

Die Auslegungskurven nach Bild A 6 basieren auf Schädigungskurven entsprechend einer Ausfallwahrscheinlichkeit von ca. 2,3 % (vgl. [1]).

Tafel A 1. Berechnungskonstanten B und Festigkeitskennwerte $2\sigma_{aD}$

Qualitätsklasse	Konstante B $10^3 \leq N \leq 2 \cdot 10^6$		$2\sigma_{aD}$ [N/mm ²] $N \geq 2 \cdot 10^6$	
	A	B	A	B
Werkstoffsorte				
EN-GJS-400-15/15U	787	708	138	124
EN-GJS-400-18/18U-LT				
EN-GJS-350-22/22U-LT	732	659	128	116

2.3 Für den Sonderfall von drucktragenden Teilen mit Bauformen entsprechend einem Spannungsfaktor $\eta = 2,5$, bei Temperaturen $T^* \leq 100$ °C, Wanddicken $s_e \leq 25$ mm und Druckschwankungen zwischen 0 und p_r können die zulässigen Lastspielzahlen im Bereich $1000 \leq N_{zul} \leq 2 \cdot 10^6$ nach

$$N_{zul} = N_{100} \cdot f_L \quad (A1)$$

mit

$$N_{100} = [B / (2,5 \cdot K_{20}/S)]^{8,333} \quad (A2)$$

$$f_L = [p_r / (\hat{p} - \check{p})]^{8,333} \quad (A3)$$

ermittelt werden.

Die Werte N_{100} und f_L können auch aus Bild A 7 und Bild A 8 entnommen werden.

Die ertragbare, auf p_r bezogene Druckschwankungsbreite für diese Behälter bei Lastspielzahlen $N \geq 2 \cdot 10^6$ ist nach

$$(\hat{p} - \check{p}) / p_r = 2\sigma_{aD} / (2,5 \cdot K_{20}/S) \quad (A4)$$

mit $2\sigma_{aD}$ aus Tafel A 1 zu berechnen.

2.4 Der Berechnungsgang zur Berücksichtigung eines Betriebslastkollektivs ist sinngemäß nach Abschnitt 4.4 im Hauptteil dieses AD 2000-Merkblattes durchzuführen. Die Schädigungsanteile von Kollektivstufen, deren Spannungsschwingbreite $2\sigma_a^*$ kleiner als 70 % der $2\sigma_{aD}$ -Werte beträgt, können hierbei vernachlässigt werden.

3 Konstruktion

3.1 Bei der Konstruktion der Gussteile ist darauf zu achten, dass Gestaltungen ausgeführt werden, die mit einem Spannungsfaktor $\eta = 2,5$ abgedeckt sind. Ist eine Abschätzung des zu erwartenden η -Wertes (vgl. Spannungsfaktoren η in Tafel 3) nicht möglich, ist ein detaillierter Nachweis des Spannungsfaktors η oder eine Berechnung nach AD 2000-Merkblatt S 2 Anhang 5 durchzuführen.

¹⁾ Anstelle p kann auch auf den Berechnungsdruck p_r bezogen werden.

3.2 Bei schroffen Querschnittsänderungen drucktragender Wandungen muss der Übergang mit einer Neigung von max. 1:3 ausgeführt werden.

Übergangsradien von angegossenen Stützen, Stützfüßen usw. dürfen nicht kleiner als das 1,5-fache der dünnsten angrenzenden Wand betragen.

4 Prüfung

Für wechselbeanspruchte Bauteile ist die einwandfreie Beschaffenheit des Bauteils von besonderer Bedeutung. Insbesondere wirken sich Oberflächenfehler ungünstig auf die Lebensdauer aus. Aus diesen Gründen kommt der zerstörungsfreien Prüfung im Rahmen der Herstellung und bei wiederkehrenden Prüfungen besondere Bedeutung zu.

4.1 Entwurfsprüfung

Im Rahmen der Entwurfsprüfung sind die hoch beanspruchten Bauteilbereiche festzulegen, die bei der Herstellung sowie den wiederkehrenden Prüfungen an jedem Druckgerät zerstörungsfrei zu prüfen sind. Die zu prüfenden Bauteilbereiche sind zwischen Hersteller und der zuständigen unabhängigen Stelle festzulegen.

4.2 Prüfung während der Fertigung

4.2.1 An den hochbeanspruchten Stellen sind Oberflächenrissprüfungen, vorzugsweise nach dem Magnetpulverprüfverfahren, durchzuführen. Für zulässige Oberflächenfehler durch Sand-, Schlacken- und Gaseinschlüsse gelten sinngemäß die Festlegungen nach DIN 1690 Teil 10, Qualitätsklasse A oder B. Hierbei können Eindringprüfungen erforderlich sein. Rissartige Oberflächenfehler sind nicht zulässig.

4.2.2 Zusätzlich sind diese hochbeanspruchten Stellen einer Volumenprüfung an mindestens 10 % der Bauteile eines jeden Loses mittels einer Durchstrahlungsprüfung zu unterziehen. Dabei sind die höchstzulässigen Anzeigenmerkmale nach Qualitätsklasse A oder B nach DIN 1690 Teil 10 einzuhalten.

4.2.3 Für jedes Los ist die Graphitausbildung mittels mikroskopischer Untersuchung zu prüfen. Die Graphitausbildung muss DIN EN 1563 Abschnitt 7.5 entsprechen.

4.3 Prüfungen während des Betriebes

4.3.1 Die Prüfintervalle für Prüfungen während des Betriebes und nach Erreichen der rechnerischen Lebensdauer sind abweichend von Abschnitt 7.3.1 im Hauptteil dieses AD 2000-Merkblattes wegen der in den Auslegungskurven nach Bild A 6 zugrunde liegenden höheren Ausfallwahrscheinlichkeit auf 25 % der berechneten zulässigen Lastspielzahl verkürzt. Hierbei ist bei Bauteilen, die für eine Betriebslastspielzahl $\geq 2 \cdot 10^6$ berechnet sind, $N = 2 \cdot 10^6$ einzusetzen.

4.3.2 Wenn die Spannungsschwingbreite $2\sigma_a^*$ abweichend von Tafel A 1 80 N/mm^2 nicht übersteigt, kann auf die Prüfungen aufgrund der Wechselbeanspruchung verzichtet werden.

5 Reparaturen von festgestellten Oberflächenfehlern

Beseitigung von Oberflächenfehlern an wechselbeanspruchten Druckgeräten ist ausschließlich durch Beschleifen durchzuführen. Die zulässige Schleiftiefe ist erforderlichenfalls im Rahmen einer Entwurfsprüfung zu ermitteln.

Druckgeräte, an denen Schweißarbeiten (Fertigungsschweißungen oder Reparaturschweißungen) durchgeführt werden, können bis zum Vorliegen gesicherter Erkenntnisse über zulässige Lastspielzahlen nur für vorwiegend ruhende Beanspruchung verwendet werden.

6 Schrifttum

[1] *Gorsitzke, B.*: Berechnung der Ermüdungslebensdauer wechselbeanspruchter Druckbehälter aus Gusseisen mit Kugelgratit.

Empfehlungen zur Ermüdungsfestigkeitsberechnung in Anlehnung an die AD-Merkblätter S 1/S 2 und DIN EN 13445-3, 17/18:1999 – Vorschläge zum Europäischen Normenentwurf prEN 13445, Teil 7 (12.99): Zusätzliche Anforderungen an Druckbehälter und Druckbehälterteile aus Gusseisen mit Kugelgratit.

Z. TÜ 41 (2000) Nr. 11/12, S. 46–52.

[2] *Hück, M.; Schütz, W.; Walter, H.*: Moderne Schwingfestigkeitsunterlagen für die Bemessung von Bauteilen aus Sphäroguss und Temperguss.

ATZ 86 (1984) Nr. 7/8, S. 325–331 und Nr. 9, S. 385–388.

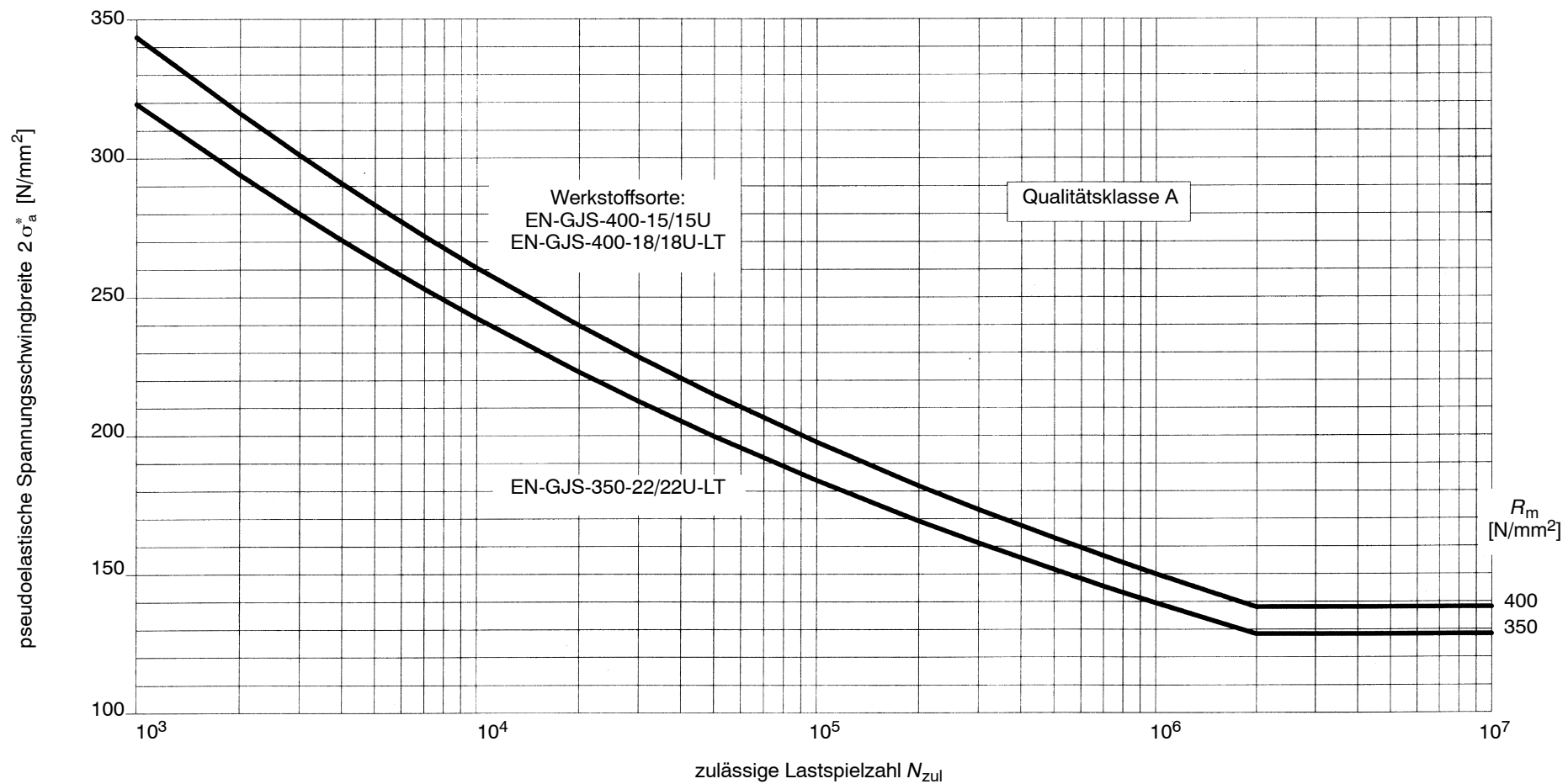


Bild A 6. Zulässige Lastspielzahlen in Abhängigkeit von der Spannungsschwingbreite bei Berechnungstemperaturen ≤ 100 °C und Wanddicken ≤ 25 mm

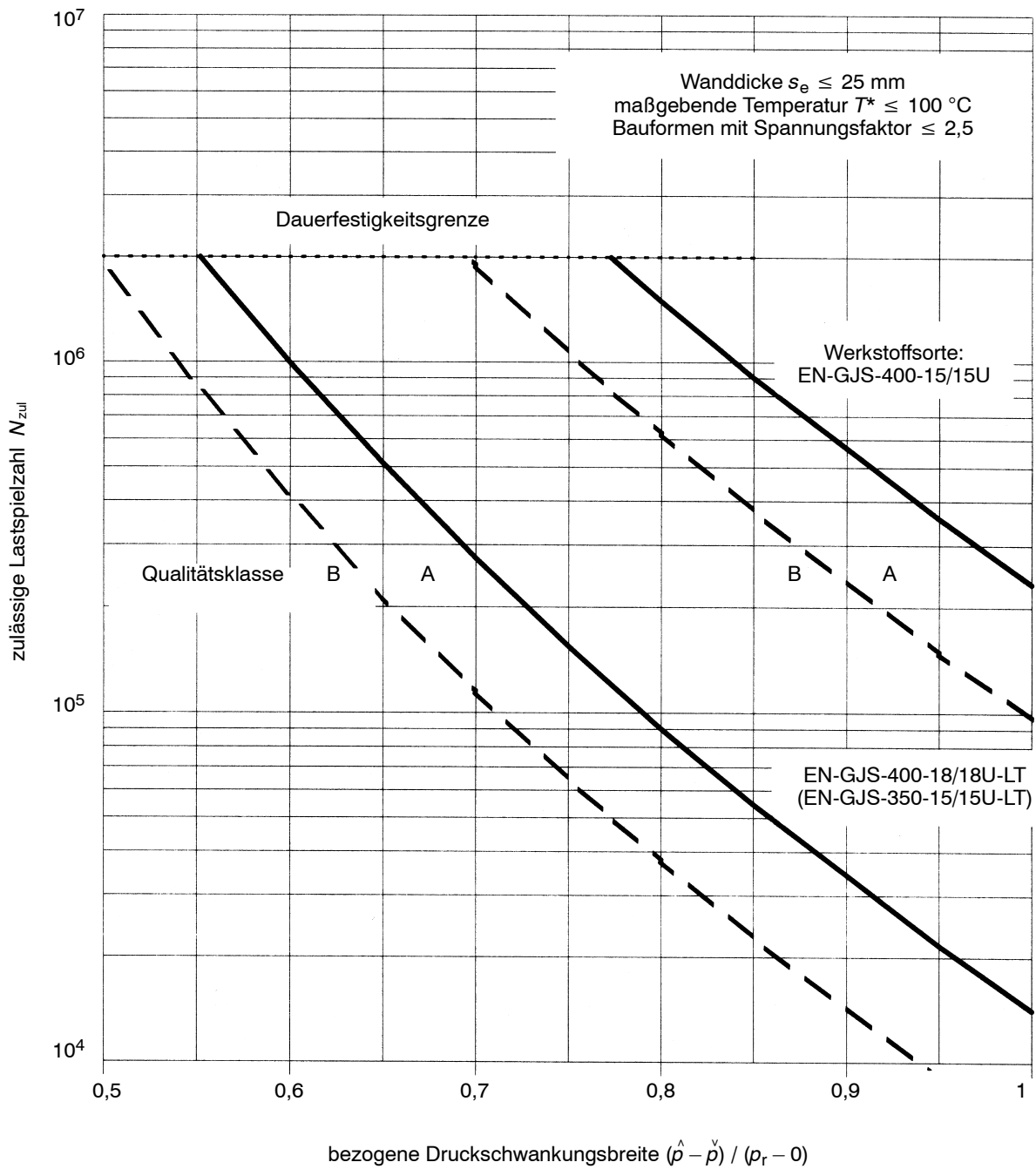


Bild A 7. Zulässige Lastspielzahlen bei Druckschwankungsbreiten $(\hat{p} - \check{p}) \geq (p_r - 0)$

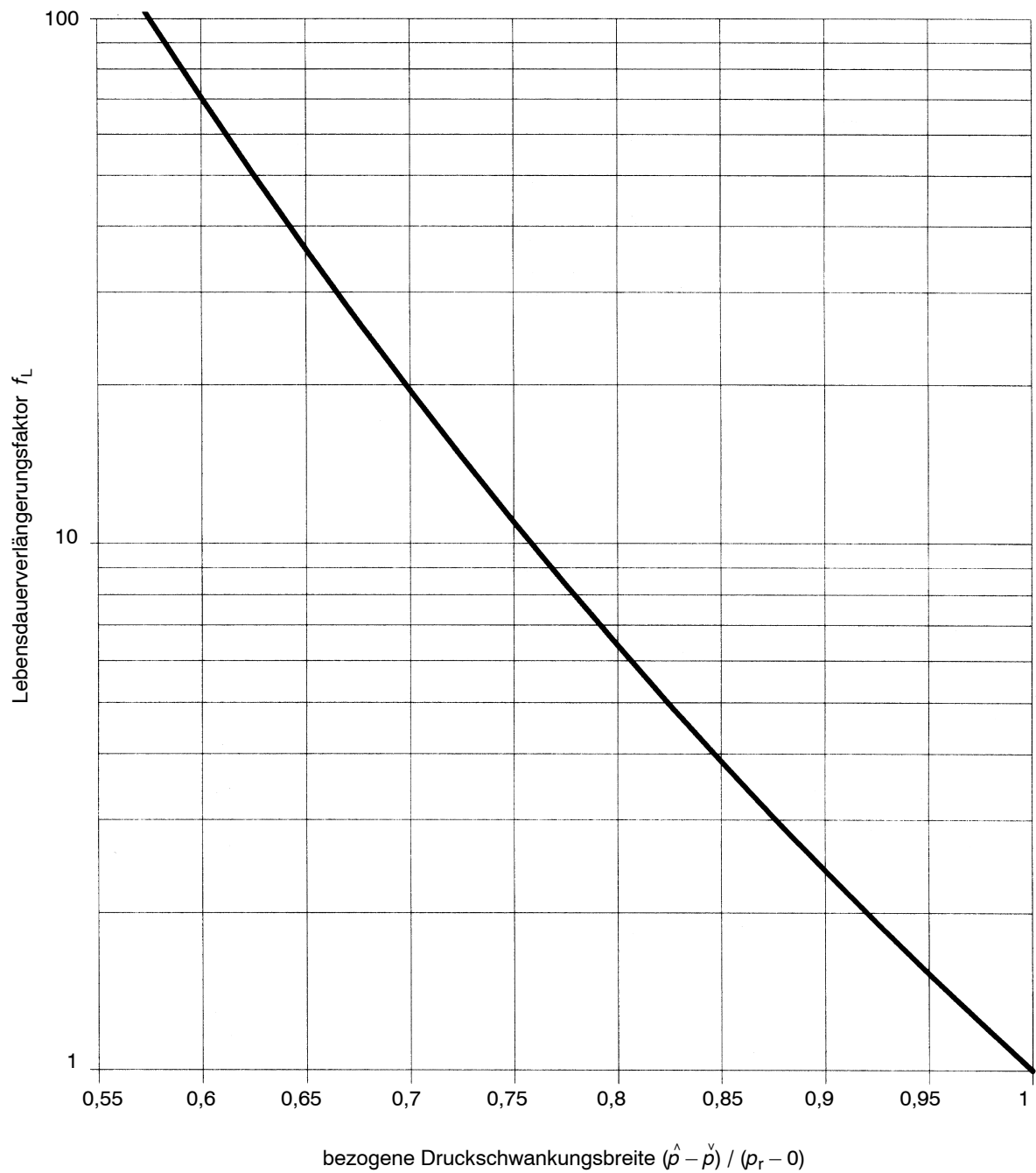


Bild A 8. Lebensdauererlängerungsfaktor bei Druckschwankungsbreiten $(\hat{p} - \check{p}) < (p_r - 0)$

Herausgeber:



E-Mail: berlin@vdtuev.de
<http://www.vdtuev.de>

Bezugsquelle:

Beuth

Beuth Verlag GmbH
10772 Berlin
Tel. 030/26 01-22 60
Fax 030/26 01-12 60
info@beuth.de
www.beuth.de