

AD 2000-Merkblatt

ICS 23.020.30

Ausgabe Juli 2012

Sonderfälle	Berechnung auf Wechselbeanspruchung	AD 2000-Merkblatt S 2
--------------------	--	----------------------------------

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 G 1.

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

Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (DGUV), Berlin

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 TÜV 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 TÜV e. V., Friedrichstraße 136, 10117 Berlin.

Inhalt		
	Seite	Seite
0 Präambel	2	
1 Geltungsbereich	2	
2 Allgemeines	2	
3 Formelzeichen und Einheiten	3	
4 Grundlagen der Spannungsberechnung	3	
5 Vergleichsspannungsschwingbreite und Vergleichsmittelspannung bei ein- und mehrachsiger Wechselbeanspruchung	4	
6 Maßgebende Vergleichsspannungsschwingbreite im überelastisch beanspruchten Bereich	5	
7 Zulässige Spannungsschwingbreite bei bekannter Lastspielzahl	6	
8 Zulässige Lastspielzahl bei bekannter Spannungsschwingbreite	9	
9 Berücksichtigung eines Betriebslastkollektivs	10	
10 Konstruktive Voraussetzungen	11	
11 Herstellungstechnische Voraussetzungen	11	
12 Prüftechnische Voraussetzungen	12	
13 Berücksichtigung besonderer Betriebsbedingungen		12
14 Maßnahmen bei Erreichen der rechnerischen Lebensdauer		13
15 Zusätzliche Angaben		14
Anhang 1: Erläuterungen zum AD 2000-Merkblatt S 2		28
Anhang 2: Hinweise zur Beurteilung von Wechselbeanspruchung aus Schwingfestigkeitsversuchen		44
Anhang 3: Hinweise zur Durchführung der Spannungsberechnung		46
Anhang 4: Alternative Berechnung für höhere zulässige Spannungsschwingbreiten oder Lastspielzahlen bei verkürzten Prüffristen ..		55
Anhang 5: Berechnung auf Wechselbeanspruchung für Gusseisen mit Kugelgraphit		60
Anhang 6: Berechnung auf Wechselbeanspruchung für Behälter aus Aluminiumlegierungen – Knetwerkstoffe		64

Ersatz für Ausgabe November 2010; | = 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.

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 Berechnungsregeln gelten für die Berechnung drucktragender Teile von Druckbehältern aus

- ferritischen und austenitischen Walz- und Schmiedestählen,
- Gusseisensorten mit Kugelgraphit nach Anhang 5,
- Aluminiumlegierungen – Knetwerkstoffe nach Anhang 6,

die nach den AD 2000-Merkblättern der Reihe B in Verbindung mit den AD 2000-Merkblättern der Reihen W und HP hergestellt und geprüft werden, zur Berücksichtigung von Wechselbeanspruchungen¹⁾, die durch Innendruck, Temperaturdifferenzen oder durch zusätzliche äußere Kräfte und Momente an den höchstbeanspruchten Stellen entstehen (vgl. Anhang 1).

1.2 Dieses AD 2000-Merkblatt braucht nicht angewendet zu werden, wenn die Bedingungen nach AD 2000-Merkblatt S 1 erfüllt sind.

1.3 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 Für die Berechnung der Wechselbeanspruchung ist die Kenntnis der Belastungen und ihrer zeitlichen Änderungen erforderlich, vgl. auch Abschnitt 15. Die Belastungsverhältnisse des Bauteils ergeben sich aus der Betriebsweise des Druckbehälters und müssen entweder vom Verfahren oder von den Betriebsverhältnissen her bekannt sein.

2.3 Die Ermittlung der Spannungen bzw. Dehnungen kann rechnerisch oder experimentell erfolgen. Ihr zeitlicher Verlauf wird anhand einer Ermüdungsanalyse beurteilt. Dabei ist nach ein-, zwei- oder dreiachsigen Beanspruchungszuständen zu unterscheiden.

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

2.5 Bei der Berechnung der Beanspruchungen ist von den ungünstigsten zulässigen Formabweichungen nach den AD 2000-Merkblättern auszugehen, sofern nicht die tatsächlichen Formabweichungen bekannt sind. In diesen Fällen werden die Istmaße in die Berechnung eingesetzt. Hinsichtlich der Wanddicken kann im Rahmen der Entwurfsprüfung von der Nennwanddicke s_e abzüglich der Hälfte des Abnutzungszuschlages (c_2) ausgegangen werden. Mindestwanddicken sind auf eine mittlere Wanddicke umzurechnen.

2.6 Für die Berechnung wird als maßgebliche Temperatur während eines betrachteten Lastzyklus 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 beziehen³⁾.

2.7 Die Ermittlung der Vergleichsspannungsschwingbreite und Vergleichsmittelspannung kann nach der von Mises-Hypothese (Gestaltänderungsenergiehypothese, GEH) oder nach der Tresca-Hypothese (Schubspannungshypothese, SSH) erfolgen, wovon die erstgenannte die genauere und die zweitgenannte die konservativere ist. Neben den allgemeinen Definitionen ist aus Gründen der Einfachheit und Übersichtlichkeit bei der Anwendung des Abschnittes 5.2 die Bildung der Vergleichsspannungsschwingbreite und Vergleichsmittelspannung nach der Tresca-Hypothese dargestellt.

2.8 Soll von den Ermüdungskurven und Korrekturfaktoren dieses AD 2000-Merkblattes abgewichen werden, ist die Vorgehensweise zur Bestimmung der zulässigen Spannungsschwingbreite bzw. der zulässigen Betriebslastspielzahl aus Schwingfestigkeitsversuchen an Probestäben oder Bauteilen nach Art, Randbedingungen, Anzahl der Prüfkörper und Sicherheitsbeiwerte im Einzelfall mit der zuständigen unabhängigen Stelle zu vereinbaren (vgl. Anhang 2).

2.9 Nicht prüfbare Schweißverbindungen sind dauerhaft auszulegen. Abweichende Vorgehensweisen sind mit der zuständigen unabhängigen Stelle abzustimmen. Abschnitt 14.2 ist in diesem Fall nicht anzuwenden.

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

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

3) Stoffwerte nach VDI-Richtlinie 3128

3 Formelzeichen und Einheiten

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

e	hier: Erschöpfungszahl	–
f_0	Korrekturfaktor zur Berücksichtigung der Kerbwirkung von Oberflächenrauheit	–
f_d	Korrekturfaktor zur Berücksichtigung des Wanddickeneinflusses	–
f_{T^*}	Temperatureinflussfaktor	–
f_M	Korrekturfaktor zur Berücksichtigung des Mittelspannungseinflusses	–
f_M^*	Korrekturfaktor zur Berücksichtigung des Mittelspannungseinflusses bei geschweißten spannungsarmgeglühten Bauteilen	–
f_N	Lastspielzahlabminderungsfaktor zur Berücksichtigung des Mediumeinflusses	–
k_e	Vergrößerungsfaktor für mechanische Spannungen im überelastisch beanspruchten Bereich	–
k_v	Vergrößerungsfaktor für Wärmespannungen im überelastisch beanspruchten Bereich	–
t	hier: Betriebszeit mit Zeitstandbeanspruchung	in h
t_m	rechnerische Lebensdauer für Zeitstandbeanspruchung	in h
N	hier: Betriebslastspielzahl	–
R_m	Mindestwert der Zugfestigkeit bei 20 °C für den kleinsten Wanddickenbereich	in N/mm ²
$R_{p0,2/T^*}$	Warmstreckgrenze oder 0,2 %-Dehngrenze bei Berechnungstemperatur T^* für den kleinsten Wanddickenbereich	in N/mm ²
T	Temperatur	in °C
T^*	maßgebende Berechnungstemperatur für Wechselbeanspruchung	in °C
σ_v	Vergleichsspannung	in N/mm ²
$\bar{\sigma}_{vr}$	reduzierte Vergleichsmittelspannung	in N/mm ²
$2 \sigma_a$	pseudoelastische Spannungsschwingbreite für ungekerbte Probestäbe und Schweißverbindungen	in N/mm ²
$2 \sigma_{va}$	Vergleichsspannungsschwingbreite	in N/mm ²
$2 \sigma_{vap}$	Vergleichsspannungsschwingbreite aus mechanischer Belastung	in N/mm ²
$2 \sigma_{vaw}$	Vergleichsspannungsschwingbreite aus thermischer Belastung	in N/mm ²
$2 \sigma_{va}^*$	maßgebende pseudoelastische Vergleichsspannungsschwingbreite	in N/mm ²
$\Delta\sigma$	Hauptspannungsdifferenz	in N/mm ²

Kopf- und Fußzeiger:

Kopfzeiger * = korrigierter Wert, z. B. $2 \sigma_{va}^*$

Kopfzeiger ^ = Maximalwert, z. B. $\hat{\sigma}$, $\Delta\hat{\sigma}_{12}$

Kopfzeiger ~ = Minimalwert, z. B. $\check{\sigma}$, $\Delta\check{\sigma}_{12}$

Kopfzeiger – = Mittelwert z. B. $\bar{\sigma}$

Fußzeiger i, j, k = Zahlenindex, z. B. $\Delta\sigma_{ij}$, N_k , t_j

4 Grundlagen der Spannungsberechnung

4.1 Strukturspannungsnachweis

Bei geschweißten Bauteilen erfolgt die Ermittlung der maßgebenden Spannungen auf der Basis eines Strukturspannungsnachweises. Die Strukturspannungen (gegebenenfalls eine Vergleichsspannung) kennzeichnen die Grundbeanspruchung, die sich aus den äußeren Lastgrößen (Kräften und Momenten) und der gegenseitigen mechanischen Beeinflussung der einzelnen Strukturteile in Form linear verteilter Spannungen über die Wanddicke ergibt. Sie können nach technischen Tragwerkstheorien (z. B. Theorie der Schalen und Platten), mittels Finite-Element-Verfahren oder experimentell bestimmt werden. Die Strukturspannung gibt den Formeinfluss der Grobstruktur unter Belastung wieder, beinhaltet jedoch keine Kerbwirkung. Der lokale Kerbeinfluss der Feinstruktur ist in den Lastspielzahlkurven für Schweißverbindungen (siehe Bild 12) bereits berücksichtigt.

Im Falle von FE-Berechnungen oder Dehnungsmessungen mittels Dehnungsmessstreifen darf der Strukturspannungshöchstwert näherungsweise durch lineare Extrapolation der Strukturspannungen an der Bauteiloberfläche in hinreichendem Abstand⁴⁾ von der Naht auf den Ort des Nahtüberganges ermittelt werden (siehe Bild 1). Bei der Interpretation von gemessenen Strukturspannungen als linear verteilte Membran- und Biegespannungen ist auf die Möglichkeit auftretender Nichtlinearitäten im Querschnitt, z. B. infolge Dickwandigkeit und/oder infolge örtlicher Krafteinleitungen, zu achten (vgl. Anhang 1).

4.2 Kerbspannungsnachweis

Bei ungeschweißten Bauteilen ist die Spannungsermittlung auf der Basis eines Kerbspannungsnachweises durchzuführen. Die Kerbspannung berücksichtigt über die jeweilige Strukturspannung hinaus den lokalen Kerbeinfluss der Feinstruktur.

Die Kerbformzahlen können nach der Kerbspannungslehre, nach speziellen analytischen Lösungsverfahren oder alternativ auch über Dehnungsmessstreifen in der Kerbe oder mittels FE-Berechnung bestimmt werden.

In Sonderfällen kann ein Kerbspannungsnachweis auch bei Schweißverbindungen mittels FE-Berechnung durchgeführt werden, wenn die Feinstruktur der Schweißnaht durch ausreichend feine Netzteilung erfasst wird und die Realisierung der zugrunde gelegten Kerbformparameter (Nahtform, Nahtdicke, Nahtwurzel, Nahtrestspalt) in der Praxis gewährleistet ist.

Hinweise zur Struktur- und Kerbspannungsberechnung siehe Anhang 3.

5 Vergleichsspannungsschwingbreite und Vergleichsmittelspannung bei ein- und mehrachsiger Wechselbeanspruchung

Die Vergleichsspannungsschwingbreite eines Beanspruchungszyklus an einer zu untersuchenden Stelle ist die Differenz der Vergleichsspannung zweier zugehöriger Spannungstensoren im gleichen Koordinatensystem, deren Zeitpunkte innerhalb des Beanspruchungszyklus so zu wählen sind, dass diese Vergleichsspannung ein Maximum wird.

Hierzu muss für jeden wesentlichen Zeitpunkt während eines Lastzyklus der Beanspruchungszustand bekannt sein. Diese Definition gilt allgemein und unabhängig von der verwendeten Vergleichsspannungshypothese. Für ungeschweißte Bauteile oder Bauteilbereiche ist außerdem die zugehörige Vergleichsmittelspannung zu bestimmen. Die nachfolgenden Berechnungen gelten für σ_{vap} aus mechanischen und σ_{vaw} aus thermischen Belastungen nach der Tresca-Hypothese bei konstanten Hauptspannungsrichtungen.

Für den Fall zeitlich sich ändernder Lage der Hauptspannungsrichtungen wird auf Anhang 1 in diesem Merkblatt verwiesen.

5.1 Einachsiger Spannungszustand

Bei einachsiger Beanspruchung, wie im Bild 2 dargestellt, ist die Vergleichsspannungsschwingbreite $2 \sigma_{va}$ nach der Tresca-Hypothese

$$2 \sigma_{va} = (\hat{\sigma} - \check{\sigma}) \quad (2)$$

und die Vergleichsmittelspannung

$$\bar{\sigma}_v = \frac{1}{2} (\hat{\sigma} + \check{\sigma}) \quad (3)$$

5.2 Mehrachsiger Spannungszustand bei konstanten Hauptspannungsrichtungen

Um die Vergleichsspannungsschwingbreite nach der Tresca-Hypothese zu bilden, sind für einen dreiachsigen Spannungszustand, wie in Bild 3 schematisch dargestellt, zunächst die Spannungsverläufe der Hauptspannungen σ_1 , σ_2 und σ_3 zu bestimmen.

Sodann sind die zeitlichen Verläufe der drei Hauptspannungsdifferenzen $\Delta\sigma_{12}$, $\Delta\sigma_{23}$, $\Delta\sigma_{31}$ nach Formel (4) zu bestimmen:

$$\begin{aligned} \Delta\sigma_{12} &= \sigma_1 - \sigma_2 \\ \Delta\sigma_{23} &= \sigma_2 - \sigma_3 \\ \Delta\sigma_{31} &= \sigma_3 - \sigma_1 \end{aligned} \quad (4)$$

Für jeden dieser drei Verläufe der Hauptspannungsdifferenzen sind unter Beachtung der Vorzeichen die Größt- und Kleinstwerte herauszusuchen. Die Vergleichsspannungsschwingbreite $2 \sigma_{va}$ ergibt sich aus der Formel (5) wie folgt (siehe auch Bild 4):

$$2 \sigma_{va} = \max \begin{bmatrix} \Delta\hat{\sigma}_{12} - \Delta\check{\sigma}_{12} \\ \Delta\hat{\sigma}_{23} - \Delta\check{\sigma}_{23} \\ \Delta\hat{\sigma}_{31} - \Delta\check{\sigma}_{31} \end{bmatrix} \quad (5)$$

4) Siehe z. B. Iida [94]

Die zur Vergleichsspannungsschwingbreite $2 \sigma_{va}$ zugehörige Vergleichsmittelspannung $\bar{\sigma}_v$ ist aus denjenigen beiden Spannungsverläufen σ_i und σ_j zu ermitteln, aus denen die für die Vergleichsspannungsschwingbreite $2 \sigma_{va}$ maßgebenden Hauptspannungsdifferenzen $\Delta \hat{\sigma}_{ij}$ und $\Delta \check{\sigma}_{ij}$ bestimmt wurden. Sodann ist der zeitliche Verlauf der Hauptspannungssumme nach

$$\sum \sigma_{ij} = (\sigma_i + \sigma_j) \quad (6a)$$

zu bestimmen und der Maximalwert $\sum \hat{\sigma}_{ij}$ und Minimalwert $\sum \check{\sigma}_{ij}$ herauszusuchen. Die Vergleichsmittelspannung $\bar{\sigma}_v$ ergibt sich dann aus

$$\bar{\sigma}_v = \frac{1}{2} \left(\sum \hat{\sigma}_{ij} + \sum \check{\sigma}_{ij} \right) \quad (6b)$$

Eine vereinfachte Vorgehensweise bei der Wirkung von nur einer Belastungsart und unter Vernachlässigung von Schubspannungen wird im Anhang 3 beschrieben.

Bei einem dreiachsigen Zugspannungszustand sind die Bedingungen nach AD 2000-Merkblatt S 4 zu beachten.

6 Maßgebende Vergleichsspannungsschwingbreite im überelastisch beanspruchten Bereich

6.1 Mechanische Belastungen

Bei mechanischen Belastungen ist die maßgebende pseudoelastische Vergleichsspannungsschwingbreite nach

$$2 \sigma_{vap}^* = 2 \sigma_{vap} \cdot k_e \quad (7)$$

zu ermitteln.

Der Vergrößerungsfaktor k_e berücksichtigt die überelastischen Verformungen und ist aus Bild 5 zu entnehmen. Die k_e -Kurven des Bildes 5 können im Bereich $1,0 < \sigma_{vap}/R_{p0,2/T^*} \leq 1,5$ durch die Formel

$$k_e = A_1 \cdot \sqrt{\frac{\sigma_{vap}}{R_{p0,2/T^*}}} - 1 + 1 \quad (8)$$

und im Bereich $\sigma_{vap}/R_{p0,2/T^*} > 1,5$ durch

$$k_e = A_2 + A_3 \cdot \frac{\sigma_{vap}}{R_{p0,2/T^*}} \quad (9)$$

beschrieben werden. Die vom Werkstoffgefüge abhängigen Werte A 1, A 2 und A 3 sind aus Tafel 1 zu entnehmen.

Tafel 1 — Werte A 1, A 2 und A 3

Werkstoffgruppe	A 1	A 2	A 3
Ferrit, $R_m = 800 \text{ N/mm}^2$ bis 1000 N/mm^2	0,518	0,718	0,432
Ferrit, $R_m \leq 500 \text{ N/mm}^2$ und Austenit	0,443	0,823	0,327

Bei Ferriten mit R_m zwischen 500 N/mm^2 und 800 N/mm^2 kann linear interpoliert werden.

6.2 Thermische Belastungen

Bei thermischen Belastungen in Dickenrichtung der Wandungen berechnet sich die maßgebende pseudoelastische Vergleichsspannungsschwingbreite aus

$$2 \sigma_{vaw}^* = 2 \sigma_{vaw} \cdot k_v \quad (10)$$

mit k_v aus Bild 5 oder nach der Formel

$$k_v = \frac{0,7}{0,5 + \frac{0,2}{\sigma_{vaw} / R_{p0,2/T^*}}} \quad (11)$$

Im Bereich lokaler Störstellen muss anstelle k_v auch für thermische Belastungen k_e nach Formel (8) bzw. (9) angewendet werden, sofern kein detaillierter Nachweis erfolgt. Andere thermische Belastungen sind wie mechanische Belastungen nach Abschnitt 6.1 zu behandeln.

6.3 Kombinierte Belastungen

Liegt ein kombinierter Belastungszustand aus mechanischen und thermischen Belastungen vor, sind die anteilmäßigen Spannungskomponenten linear zu überlagern. Anschließend ist eine Vergleichsspannungsschwingbreite $2 \sigma_{\text{vap} + w}$ nach Abschnitt 5 zu bilden.

Die maßgebende pseudoelastische Vergleichsspannungsschwingbreite ist nach Formel (12) zu berechnen.

$$2 \sigma_{\text{va}}^* = 2 \sigma_{\text{vap} + w} \cdot k_e \quad (12)$$

Die Formeln (7) bis (12) finden keine Anwendung, wenn die Vergleichsspannungsschwingbreite $2 \sigma_{\text{va}}$ als fiktive Spannung aus der Gesamtdehnung $2 \varepsilon_{\text{ages}}$ (elastisch + plastisch) einer rechnerischen oder experimentellen Festigkeitsuntersuchung aus $2 \sigma_{\text{va}} = 2 E \cdot \varepsilon_{\text{ages}}$ ermittelt wurde.

7 Zulässige Spannungsschwingbreite bei bekannter Lastspielzahl

Die Spannungsschwingbreite $2 \sigma_{\text{va}}$ nach Abschnitt 5 bzw. $2 \sigma_{\text{va}}^*$ nach Abschnitt 6 darf die nach den folgenden Abschnitten zu bildende zulässige Spannungsschwingbreite $2 \sigma_{\text{azul}}$ nicht überschreiten. Dabei ist zwischen ungeschweißten und geschweißten Bauteilbereichen zu unterscheiden.

7.1 Ungeschweißte Bauteilbereiche

Die zulässige Spannungsschwingbreite ist nach

$$2 \sigma_{\text{azul}} = 2 \sigma_a \cdot f_0 \cdot f_d \cdot f_M \cdot f_{T^*} \quad (13)$$

zu berechnen. Falls die Korrekturfaktoren f nicht durch Schwingfestigkeitsversuche bestimmt werden (vgl. Anhang 2), sind diese den folgenden Abschnitten zu entnehmen.

7.1.1 Zulässige Spannungsschwingbreite für ungekerbte Probestäbe

Dabei ist die Spannungsschwingbreite $2 \sigma_a$ für ungekerbte, polierte Probestäbe aus ferritischen und austenitischen Walz- und Schmiedestählen bei Raumtemperatur und reiner Wechselbeanspruchung (Mittelspannung $\bar{\sigma} = 0$) nach Formel (14) im Geltungsbereich $10^2 \leq N \leq 2 \cdot 10^6$ und $R_m \leq 1000 \text{ N/mm}^2$ zu berechnen oder aus Bild 11 zu ermitteln. In den Kurven ist ein Lastspielzahlsicherheitsbeiwert von $S_N = 10$ bzw. ein Spannungssicherheitsbeiwert von $S_\sigma = 1,5$ gegenüber den mittleren Anrisskurven berücksichtigt (vgl. Anhang 1). Für Zwischenwerte der Zugfestigkeit ist linear zu interpolieren.

$$2 \sigma_a = \frac{4 \cdot 10^4}{\sqrt{N}} + 0,55 \cdot R_m - 10 \quad (14)$$

Die Spannungsschwingbreite $2 \sigma_a$ für den Dauerfestigkeitsbereich ($N \geq 2 \cdot 10^6$) kann auch aus Tafel 2 entnommen werden.

Tafel 2 — Spannungsschwingbreite $2 \sigma_a$ im Dauerfestigkeitsbereich für ungekerbte Probestäbe aus ferritischen und austenitischen Walz- und Schmiedestählen bei Raumtemperatur und Mittelspannung $\bar{\sigma} = 0$

Zugfestigkeit $R_m \text{ [N/mm}^2\text{]}$	$2 \sigma_a = \text{konst. [N/mm}^2\text{]}$	
	$N \geq 2 \cdot 10^6$	$N \geq 10^8$ bei Lastkollektiv
400	240	162
600	350	236
800	460	310
1000	570	385

7.1.2 Korrekturfaktor zur Berücksichtigung des Oberflächeneinflusses

Der Korrekturfaktor f_0 zur Berücksichtigung des Oberflächeneinflusses ist in Abhängigkeit von der Rautiefe R_z , der Zugfestigkeit R_m und der Lastspielzahl $N \leq 2 \cdot 10^6$ nach

$$f_0 = F_o^{\frac{0,4343 \cdot \ln N - 2}{4,301}} \quad (15)$$

mit

$$F_o = 1 - 0,056 \cdot (\ln R_z)^{0,64} \cdot \ln R_m + 0,289 \cdot (\ln R_z)^{0,53} \quad (16)$$

zu ermitteln. Für $N > 2 \cdot 10^6$ ist $f_0 = F_o$.

Falls nicht spezifiziert, sind folgende herstellungsbedingte Rautiefen in Formel (16) einzusetzen.

Tafel 3 — Richtwerte für Oberflächen-Rautiefen

Oberflächenzustand	R_Z [μm]
gewalzt oder stranggepresst	200
mechanisch bearbeitet	50
kerbfrei geschliffen	10

Für polierte Oberflächen mit Rautiefen $R_Z < 6 \mu\text{m}$ kann mit $f_0 = 1$ gerechnet werden. Der Abminderungsfaktor f_0 für Walzhaut kann auch aus Bild 6 entnommen werden.

7.1.3 Korrekturfaktor zur Berücksichtigung des Wanddickeneinflusses

Die auf der Basis von Schwingfestigkeitsversuchen an kleinen Probestäben abgeleiteten Spannungsschwingbreiten $2 \sigma_a$ nach Bild 11 sind bei Wanddicken $s > 25 \text{ mm}$ abzumindern. Als s ist in der Berechnung die ausgeführte Wanddicke s_e einzusetzen.

Der Korrekturfaktor f_d ist für $N \leq 2 \cdot 10^6$ nach

$$f_d = F_d^{\frac{0,4343 \cdot \ln N - 2}{4,301}} \quad (17)$$

mit

$$F_d = \left(\frac{25}{s_e} \right)^{\frac{1}{Z}} \quad (18)$$

und $Z = 10$ zu berechnen, wobei mit einer beeinflussenden Wanddicke von maximal $s = 150 \text{ mm}$ der Faktor f_d auf $F_d = 0,84$ zu begrenzen ist. Für $N > 2 \cdot 10^6$ ist $f_d = F_d$.

Bei Schmiedestücken ist als Wanddicke die gleichwertige Dicke eines runden Querschnitts nach DIN EN 10222-1, Anhang B einzusetzen. Der Korrekturfaktor f_d ist in Bild 7 dargestellt.

7.1.4 Korrekturfaktor zur Berücksichtigung des Mittelspannungseinflusses

Eine Zugmittelspannung wirkt sich schwingfestigkeitsabmindernd und eine Druckmittelspannung schwingfestigkeits-erhöhend aus.

7.1.4.1 Elastischer Bereich

Im Falle $2 \sigma_{va} < R_{p0,2/T^*}$ ist der Mittelspannungs-Korrekturfaktor f_M in Abhängigkeit von der Mittelspannungsempfindlichkeit M im Bereich

$$-R_{p0,2/T^*} \leq \bar{\sigma}_v \leq \frac{\sigma_a}{1+M}$$

nach der Formel

$$f_M = \sqrt{1 - \frac{M(2+M)}{1+M} \cdot \frac{\bar{\sigma}_v}{\sigma_a}} \quad (19)$$

und im Bereich $\frac{\sigma_a}{1+M} \leq \bar{\sigma}_v \leq R_{p0,2/T^*}$

nach der Formel

$$f_M = \frac{1+M/3}{1+M} - \frac{M}{3} \cdot \frac{\bar{\sigma}_v}{\sigma_a} \quad (20)$$

mit

$$M = 0,00035 \cdot R_m - 0,1 \quad (21)$$

für Walz- und Schmiedestahl zu ermitteln.

Für den Dauerfestigkeitsbereich ($N \geq 2 \cdot 10^6$) kann der Korrekturfaktor f_M auch aus Bild 9 entnommen werden.

7.1.4.2 Teilplastischer Bereich

Übersteigt die aus der größten absoluten Hauptspannungsdifferenz gebildete maximale Vergleichsspannung $\hat{\sigma}_v$

$$\hat{\sigma}_v = \max(|\Delta \hat{\sigma}_{12}|, |\Delta \hat{\sigma}_{23}|, |\Delta \hat{\sigma}_{31}|) \quad (22)$$

die Streckgrenze $R_{p0,2/T^*}$ oder ist $R_{p0,2/T^*} \leq 2 \sigma_{va} \leq 2 R_{p0,2/T^*}$, werden ebenso die Formeln (19) oder (20) zur Ermittlung des Korrekturfaktors f_M herangezogen, wobei jedoch anstelle $\bar{\sigma}_v$ die reduzierte Vergleichsmittelspannung

$$\bar{\sigma}_{vr} = R_{p0,2/T^*} - \sigma_{va} \quad (23)$$

unter Einhaltung der Bedingung $|\bar{\sigma}_{vr}| \leq |\bar{\sigma}_v|$ einzusetzen ist.

7.1.5 Korrekturfaktor zur Berücksichtigung des Temperatureinflusses

Bei Lastzyklustemperatur $T^* > 100 \text{ °C}$ muss der temperaturbedingte Abfall der Schwingfestigkeit durch einen Korrekturfaktor f_{T^*} berücksichtigt werden. Der Korrekturfaktor f_{T^*} ist aus Bild 10 zu entnehmen oder im Temperaturbereich von $100 \text{ °C} \leq T^* \leq 600 \text{ °C}$ für ferritischen Werkstoff nach

$$f_{T^*} = 1,03 - 1,5 \cdot 10^{-4} \cdot T^* - 1,5 \cdot 10^{-6} \cdot T^{*2} \quad (24)$$

und für austenitischen Werkstoff nach

$$f_{T^*} = 1,043 - 4,3 \cdot 10^{-4} \cdot T^* \quad (25)$$

zu bestimmen.

7.2 Geschweißte Bauteilbereiche

7.2.1 Die zulässige Spannungsschwingbreite ist nach

$$2 \sigma_{azul} = 2 \sigma_a \cdot f_d \cdot f_{T^*} \quad (26)$$

zu berechnen.

Dabei ist die Spannungsschwingbreite $2 \sigma_a$ in Abhängigkeit von der Schweißnahtgestaltung für ferritische und austenitische Walz- und Schmiedestähle bei Raumtemperatur aus Bild 12 zu entnehmen. In diesen aus spannungs- und dehnungsgesteuerten Schwingfestigkeitsversuchen an Schweißverbindungen abgeleiteten Lastspielzahlkurven sind die Schweißnahtkerbwirkung, die Schweißeigenspannungen und der noch verbleibende Mittelspannungseinfluss bereits berücksichtigt. Oberflächen- und Mittelspannungseinfluss brauchen deshalb hier nicht gesondert in Abzug gebracht zu werden⁵⁾.

Die Kurven des Bildes 12 können durch die Formel (27) im Bereich $10^2 \leq N \leq 2 \cdot 10^6$ und Konstanten der Tafel 4 beschrieben werden.

$$2 \sigma_a = \left(\frac{B \cdot 1}{N} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (27)$$

Tafel 4 — Konstanten B 1, B 2 und Spannungsschwingbreite $2 \sigma_a$ im Dauerfestigkeitsbereich für Schweißverbindungen aus ferritischen und austenitischen Walz- und Schmiedestählen bei Raumtemperatur

Klasse	Konstante		Spannungsschwingbreite $2 \sigma_a = \text{konst. [N/mm}^2\text{]}$	
	B 1 $10^2 \leq N \leq 2 \cdot 10^6$	B 2 $2 \cdot 10^6 \leq N \leq 10^8$	$N \geq 2 \cdot 10^6$	$N \geq 10^8$ bei Lastkollektiv
K 0	$1,56 \cdot 10^{12}$	$1,32 \cdot 10^{16}$	92	42
K 1	$5,0 \cdot 10^{11}$	$1,98 \cdot 10^{15}$	63	29
K 2	$2,5 \cdot 10^{11}$	$6,25 \cdot 10^{14}$	50	23
K 3	$1,28 \cdot 10^{11}$	$2,05 \cdot 10^{14}$	40	18

7.2.2 In der Tafel 5 sind die für Druckbehälter üblichen Schweißverbindungen dargestellt und hinsichtlich ihrer Kerbwirkung vier Schweißnahtklassen K 0, K 1, K 2 und K 3 zugeordnet.

Tafel 5 enthält zwei Alternativen für den Spannungsnachweis:

- Spannungsnachweis 1: Zusätzliche Spannungen durch Wanddickenversatz (s. auch Fußnote 9) in Tafel 5) oder durch Anschweißteile werden beim Strukturspannungsnachweis gemäß Abschnitt 4.1 vernachlässigt und
- Spannungsnachweis 2: Diese Zusatzspannungen werden beim Strukturspannungsnachweis berücksichtigt.

Spannungsnachweis 1 wird in der Regel bei Beanspruchung der Wandung durch wechselnden Druck angewandt. Bei anderen wechselnden Beanspruchungsarten (z. B. bei Wärmespannungen) kann insbesondere bei Anschweißteilen eine andere Klassenzuordnung bzw. der Spannungsnachweis 2 erforderlich sein.

5) Angaben über Sicherheiten in Vorbereitung

7.2.3 Die Zuordnung für andere, hier nicht angesprochene Schweißnahtverbindungen ist im Einzelfall mit der zuständigen unabhängigen Stelle zu vereinbaren.

7.2.4 Sofern bei komplizierten Bauteilen die Schweißnahtkerbspannungen nach Abschnitt 4.2 ermittelt werden und die Schweißverbindung die Anforderungen der Klasse K 1 erfüllt, kann die Bewertung der Spannungen nach Klasse K 0 erfolgen.

7.2.5 Längs- oder Rundnähte von drucktragenden Wandungen nach Tafel 5, die zur Erhöhung der Lebensdauer beidseitig blecheben geschliffen und unabhängig von den entsprechenden Anforderungen nach AD 2000-Merkblatt HP 5/3 zu 100 % zerstörungsfrei geprüft sind, können in die Klasse K 0 eingestuft werden.

7.2.6 Der Korrekturfaktor f_d ist sinngemäß nach Abschnitt 7.1.3 zu berechnen, wobei in Formel (18) $Z = 4$ zu setzen und der Faktor f_d auf $F_d = 0,64$ zu begrenzen ist. Der Faktor f_d kann auch aus Bild 8 entnommen werden. Bei blecheben geschliffenen Nähten nach Abschnitt 7.2.5 oder bei Ermittlung der Schweißnahtkerbspannungen nach Abschnitt 4.2 darf in Formel (18) $Z = 10$ gesetzt und bei einer beeinflussenden Wanddicke von maximal $s = 150$ mm der Faktor f_d auf $F_d = 0,84$ begrenzt werden. Der Korrekturfaktor f_d kann auch aus Bild 7 entnommen werden. Bei geschweißten Schmiedestücken gelten die Regelungen nach Abschnitt 7.1.3. Für den Korrekturfaktor f_{T^*} gelten die Formeln (24) bzw. (25) oder Bild 10.

7.2.7 Bei spannungsarmgeglühten Bauteilen wird die Schwingfestigkeit durch den Abbau von Schweißeigenstress gegenüber dem Schweißzustand erhöht. Die zulässige Spannungsschwingbreite kann unter Einbezug des Korrekturfaktors f_M zur Berücksichtigung des Mittelspannungseinflusses aus der Belastung nach Abschnitt 7.1.4 aus

$$2 \sigma_{\text{zul}} = 2 \sigma_a \cdot f_d \cdot f_{T^*} \cdot f_M^* \quad (28)$$

$$\text{mit } f_M^* = 1,3 \frac{0,4343 \cdot \ln N - 4,699}{1,602} \cdot f_M \quad (28a)$$

bestimmt werden, wobei für f_M^* keine kleineren Werte als 1,0 berücksichtigt zu werden brauchen.

7.3 Alternative Berechnungsmethode

Die zulässige Spannungsschwingbreite darf alternativ zu der in den Abschnitten 7.1 und 7.2 beschriebenen Methode auch nach der im Anhang 4 erläuterten Vorgehensweise ermittelt werden. Hierbei ergeben sich bei verkürzten Prüfintervallen höhere zulässige Spannungswerte.

8 Zulässige Lastspielzahl bei bekannter Spannungsschwingbreite

Bei der Ermittlung der zulässigen Lastspielzahl N_{zul} ist analog zu Abschnitt 7 ebenfalls zwischen ungeschweißten und geschweißten Bauteilbereichen zu unterscheiden.

8.1 Ungeschweißte Bauteile

Die zulässige Lastspielzahl ist aus der Formel (29) zu berechnen oder aus Bild 11 zu entnehmen.

$$N_{\text{zul}} = \left(\frac{4 \cdot 10^4}{2 \sigma_a^* - 0,55 \cdot R_m + 10} \right)^2 \quad (29)$$

Hierbei ist $2 \sigma_a^*$ die Spannungsschwingbreite, die aus der Vergleichsspannungsschwingbreite $2 \sigma_{va}$ nach Abschnitt 5 bzw. $2 \sigma_{va}^*$ nach Abschnitt 6 und den Korrekturfaktoren f_0, f_d, f_M und f_{T^*} nach Abschnitt 7.1 aus

$$2 \sigma_a^* = \frac{2 \sigma_{va}}{f_0 \cdot f_d \cdot f_M \cdot f_{T^*}} \quad (30)$$

zu ermitteln ist.

Die lastspielzahlabhängigen Korrekturfaktoren $f_0(N, R_m)$ und $f_d(N, s)$ müssen für $N = N_{\text{zul}}$ iterativ bestimmt werden.

Bei Werten für $2 \sigma_a^*$ unterhalb der Kurven nach Bild 11 im Bereich $N \geq 2 \cdot 10^6$ oder bei $2 \sigma_a^* \leq 2 \sigma_a$ für $N \geq 2 \cdot 10^6$ nach Tafel 2 liegt Dauerfestigkeit vor.

8.2 Geschweißte Bauteile

Die zulässige Lastspielzahl wird nach

$$N_{\text{zul}} = \frac{B 1}{(2 \sigma_a^*)^3} \quad (31)$$

mit den Konstanten B 1 aus Tafel 4 und der Spannungsschwingbreite $2 \sigma_a^*$ aus

$$2 \sigma_a^* = \frac{2 \sigma_{va}}{f_d \cdot f_{T^*}} \quad (32)$$

oder aus Bild 12 ermittelt, wobei $2 \sigma_{va}$ nach Abschnitt 5 bzw. $2 \sigma_{va}^*$ nach Abschnitt 6 sowie die Korrekturfaktoren f_d und f_{T^*} nach Abschnitt 7.2.6 einzusetzen sind.

Liegen Randbedingungen nach den Abschnitten 7.2.4, 7.2.5 oder 7.2.7 vor, sind die dort angegebenen Vorgehensweisen sinngemäß anzuwenden. Dabei ist die Spannungsschwingbreite bei spannungsarmgeglühten Bauteilen nach

$$2 \sigma_a^* = \frac{2 \sigma_{va}}{f_d \cdot f_{T^*} \cdot f_M^*} \quad (33)$$

zu ermitteln (vgl. Abschnitt 7.2.7).

8.3 Alternative Berechnungsmethode

Die zulässige Lastspielzahl darf alternativ zu der in den Abschnitten 8.1 und 8.2 beschriebenen Methode auch nach der im Anhang 4 erläuterten Vorgehensweise ermittelt werden. Hierbei ergeben sich bei verkürzten Prüfintervallen höhere zulässige Lastspielzahlen.

9 Berücksichtigung eines Betriebslastkollektivs

9.1 Bei unterschiedlichen Belastungsvorgängen müssen zu jeder Belastungsart der Beanspruchungszustand, die Vergleichsspannungsschwingbreite, gegebenenfalls die maßgebende Vergleichsspannungsschwingbreite im überelastischen Bereich und bei ungeschweißten Bauteilen außerdem die Vergleichsmittelspannung bestimmt werden.

Der folgende Berechnungsgang ist nur anzuwenden, wenn die größte Spannungsschwingbreite die Dauerfestigkeit übersteigt.

Die Schädigung durch Wechselbeanspruchung wird nach der linearen Schädigungsakkumulationshypothese zu

$$\sum_k \frac{N_k}{N_{zul k}} = \left(\frac{N_1}{N_{zul 1}} + \frac{N_2}{N_{zul 2}} + \dots + \frac{N_k}{N_{zul k}} \right) \leq 1,0 \quad (34)$$

ermittelt. Hierin sind $N_1, N_2 \dots N_k$ die im Betrieb zu erwartenden Lastspielzahlen, wobei jeweils die Lastzyklen zusammengefasst werden, die die gleiche Spannungsschwingbreite $2 \sigma_{va}$ bzw. $2 \sigma_{va}^*$ hervorrufen. Somit tritt die Spannungsschwingbreite $2 \sigma_{va1}$ ($2 \sigma_{va1}^*$) während der gesamten Betriebszeit N_1 mal auf, $2 \sigma_{va2}$ ($2 \sigma_{va2}^*$) tritt N_2 mal auf usw. Die zugehörigen zulässigen Lastspielzahlen $N_{zul 1}, N_{zul 2} \dots N_{zul k}$ sind dann mit der jeweiligen Spannungsschwingbreite $2 \sigma_a^*$ aus den entsprechenden Lastspielzahlkurven für ungeschweißte und geschweißte Bauteile zu entnehmen, wobei im Bereich $N > 2 \cdot 10^6$ die in Bild 11 bzw. Bild 12 gestrichelt angegebenen fiktiven Lastspielzahlkurven gelten. Die fiktiven Lastspielzahlkurven können für ungeschweißte Bauteile nach Formel (35)

$$N_{zul k} = \left(\frac{2,35 \cdot R_m + 80}{2 \sigma_a^*} \right)^{10} \quad (35)$$

und für Schweißverbindungen nach Formel (36)

$$N_{zul k} = \frac{B 2}{(2 \sigma_a^*)^5} \quad (36)$$

mit den in Tafel 4 angegebenen Konstanten B 2 beschrieben werden.

9.2 Enthält ein Betriebslastkollektiv Belastungsvorgänge mit Spannungsschwingbreiten $2 \sigma_{va}$ ($2 \sigma_{va}^*$), die kleiner sind als die in Tafel 2 bzw. 4 für $N \geq 10^8$ angegebenen Werte, so können die Schädigungsanteile dieser Kollektivstufen in Formel (34) vernachlässigt werden.

9.3 Wird ein Bauteil im Hochtemperaturbereich⁶⁾ betrieben, tritt neben der Ermüdung infolge Wechselbeanspruchung eine zusätzliche Kriechschädigung auf, deren Schädigungsanteil mit

$$\sum_j \frac{t_j}{t_{mj}} = \left(\frac{t_1}{t_{m1}} + \frac{t_2}{t_{m2}} + \dots + \frac{t_j}{t_{mj}} \right) \leq 1,0 \quad (37)$$

zu bestimmen ist.

Die Kriechschädigungsanteile $\frac{t_1}{t_{m1}} + \frac{t_2}{t_{m2}} + \dots + \frac{t_j}{t_{mj}}$ sind analog zu den Ermüdungsschädigungsanteilen aus entsprechenden

Zeitstandfestigkeitsdiagrammen unter Zugrundelegung der Mindestwerte des Streubandes zu ermitteln (siehe z. B. EN 10028-2:1992, Tabelle A.1, Fußnote 1).

Für vollbeanspruchte Schweißnähte ist AD 2000-Merkblatt S 6, Abschnitt 4.5 zu beachten.

6) Temperaturbereich, in dem zeitabhängige Festigkeitskennwerte für die Dimensionierung nach den AD 2000-Merkblättern der Reihe B maßgebend sind.

9.4 Zur Abschätzung der Überlagerung von Ermüdungs- und Kriechschädigung im Hinblick auf die Prüfungen nach Abschnitt 14.5 kann nach einer modifizierten linearen Schädigungsakkumulationshypothese verfahren werden. Dabei werden die Schädigungsanteile nach den Formeln (34) und (37) zu einer Erschöpfungskennzahl

$$e = \sum_k \frac{N_k}{N_{zul\ k}} + \sum_j \frac{t_j}{t_{mj}} \leq 1,0 \quad (38)$$

zusammengefasst.

Ggf. ist für spezielle Anwendungen der zulässige Betrag von e zu ermitteln (vgl. Abschnitt 14.5).

10 Konstruktive Voraussetzungen

10.1 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 eine spannungsflussgerechte Gestaltung von Querschnittsübergängen. Eine Bewertung von im Druckbehälterbau üblichen Schweißnahtausführungen ist in der Tafel 5 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. Durch geeignete Gestaltung ist die Möglichkeit der Prüfung nach Abschnitt 12 zu schaffen.

10.2 Die Lebensdauer kann beispielhaft durch folgende konstruktive Maßnahmen erhöht werden:

- (1) Halbkugel- oder Korbbogenboden anstelle Klöpperboden;
- (2) kegelförmiger Mantel mit Krempe anstelle Kegel mit Eckstoß;
- (3) Überdimensionierung des ebenen Bodens einer unverankerten Boden-Mantel-Eckverbindung (bei Lastfall Innendruck);
- (4) Vergrößerung der Wanddicken von Stützen in Zylinder- und Kugelschalen, jedoch höchstens bis zu einem Wanddickenverhältnis $s_S/s_A = 2$. Hierbei ist zu beachten, dass die Strukturspannung auf der Außenseite des Stützenanschlusses jene auf der Innenseite erreichen oder übersteigen kann;
- (5) Vermeidung von schrägen Stützen und aufgesetzten scheibenförmigen Verstärkungen;
- (6) Rohrplatten, Flansche und dergleichen mit konischem Ansatz zum Behältermantel;
- (7) Unterlegbleche von Auflagerpratzen oder Ähnliches mit abgerundeten Ecken;
- (8) Vermeidung von eckigen Ausschnitten.

10.3 Durch weitere besondere Maßnahmen, z. B. das Aufbringen von Druckeigenspannungen oder durch mechanische oder thermische Oberflächenbehandlung, lässt sich die Lebensdauer eines Bauteils ebenfalls erhöhen. Ihre Berücksichtigung bei der Ermittlung des Oberflächenkorrekturfaktors oder der zulässigen Spannungsschwingbreiten nach Abschnitt 7 ist im Einzelfall mit der zuständigen unabhängigen Stelle abzustimmen.

11 Herstellungstechnische Voraussetzungen

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

11.1 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.

11.2 Für die Bauteile sind an die Schweißnahtausführung besondere Anforderungen zu stellen. Bewertungsgruppe B nach DIN EN ISO 5817 ist einzuhalten. Hinsichtlich der Wärmeführung beim Schweißen und der Schweißfolge ist den Schweißigenspannungen 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 entsprechende Normen und Werkstoffblätter).

Stempelungen dürfen nicht an Stellen erhöhter Beanspruchung angebracht werden.

12 Prüftechnische Voraussetzungen

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

12.1 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 den Abschnitten 12.2 und 12.3 besonders zu prüfenden Stellen festzulegen.

12.2 Prüfungen während der Fertigung und Schlussprüfung

12.2.1 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 dynamischer Beanspruchung schnell vergrößern und zu einem Versagen der drucktragenden Teile vor Erreichen der zulässigen Lastspielzahl führen könnten (vgl. AD 2000-Merkblatt HP 5/1).

12.2.2 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 freigestellt, ob nach dem Durchstrahlungsverfahren oder dem US-Verfahren geprüft wird, so ist der US-Prüfung in der Regel der Vorrang zu geben. Im Betrieb hochbeanspruchte Stellen, wie z. B. Stutzeinschweißungen, Lochränder oder Querschnittsübergänge, sind möglichst vollständig zerstörungsfrei zu prüfen. Die Besichtigung auf Oberflächenfehler und äußerlich sichtbare Schweißfehler ist mit der entsprechenden Sorgfalt vorzunehmen.

12.3 Prüfungen während des Betriebes

12.3.1 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.

Ergeben sich aufgrund einer besonderen Vereinbarung entsprechend den nationalen Vorschriften kürzere Fristen für die innere Prüfung, so ist davon die kürzeste Frist einzuhalten. Dem Betreiber obliegt es, in geeigneter Weise die Zahl der auftretenden Lastwechsel zu erfassen und erforderlichenfalls die inneren Prüfungen zu veranlassen.

12.3.2 Sind durch andere betriebliche Einflüsse bereits vor Ablauf der Prüf Fristen Schädigungen an der drucktragenden Wand zu erwarten, so sind die Prüf Fristen entsprechend den nationalen Vorschriften zu verkürzen.

12.3.3 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.

12.3.4 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.

12.3.5 Auf die Prüfungen, die nach den Abschnitten 12.3.1 bis 12.3.4 aufgrund der Wechselbeanspruchung während des Betriebes erforderlich sind, kann verzichtet werden, wenn das Bauteil für eine Betriebslastspielzahl $\geq 2 \cdot 10^6$ oder für $\geq 5 \cdot 10^6$ bei alternativer Berechnungsmethode nach Anhang 4 (dauerfest) ausgelegt ist.

12.3.6 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 den Abschnitten 12.3.1 und 12.3.4 müssen spätestens bei Erreichen eines Viertels der festgelegten Lastspielzahl durchgeführt werden.

13 Berücksichtigung besonderer Betriebsbedingungen

13.1 Falls korrosionsgestützte Rissbildung (Schwingungsrissskorrosion, dehnungsinduzierte Risskorrosion) oder wasserstoffgestützte Rissbildung in Druckwasserstoff zu erwarten ist, ist zu berücksichtigen, dass die Schwingfestigkeit nicht nur beträchtlich unter die Werte ohne diese Einwirkungen absinkt, sondern auch noch Ermüdungsbrüche nach sehr hohen Lastspielzahlen ($> 10^7$) auftreten können.

Bei der Werkstoffwahl ist im Hinblick auf Korrosionsbeständigkeit zu berücksichtigen, dass bei einem Werkstoff unter Wechselbeanspruchung auch eine Schädigung durch Korrosionsermüdung auftreten kann, wenn bei ruhender Beanspruchung noch keine wesentliche Korrosionsanfälligkeit festzustellen ist.

Der Spannungsrisskorrosion ist durch Verwendung weitgehend korrosionsbeständiger Werkstoffe, eines kathodischen Schutzes, eines Korrosionsschutzöl-Zusatzes im Beschickungsmedium oder durch konstruktive Maßnahmen (Vermeidung von Oberflächenkerben oder sonstigen Ungängen mit entsprechender Kerbwirkung) zu begegnen.

Bei Behältern mit sehr niedrigfrequenter zyklischer Innendruckbeanspruchung (z. B. ein- oder zweimaliges Füllen und Entleeren pro Tag) unter Druckwasserstoff kommt konstruktiven und fertigungstechnischen spannungsvermindernden Maßnahmen zur Vermeidung von Rissbildungen besondere Bedeutung zu (vgl. Abschnitte 10 und 11). Aufgrund von Erkenntnissen aus Schadensfällen sind hier bei zylindrischen Mantelschüssen im Längsschweißnahtbereich verlaufende dachförmige Formabweichungen oder Einziehungen möglichst gering zu halten. Die Zulässigkeit dieser Formabweichungen ist unabhängig von den im AD 2000-Merkblatt HP 1 angegebenen oberen Grenzwerten gesondert nachzuweisen.

13.2 Bei Stahlflaschen und nahtlos hergestellten Druckgasbehältern aus Vergütungsstählen (z. B. 34CrMo4) zum Transport von kaltem Druckwasserstoff kann zur Berechnung der zulässigen Lastspielzahl im Bereich von $10^3 \leq N \leq 5 \cdot 10^4$ sinngemäß nach Abschnitt 8.1 vorgegangen werden. Dabei ist der Oberflächen-Korrekturfaktor f_0 nach Formel (15) für den Oberflächenzustand „gewalzt oder stranggepresst“ zu berechnen.

Zur Berücksichtigung des Wasserstoffeinflusses ist die Lastspielzahl N_{zul} nach Formel (29) mit einem Abminderungsfaktor $f_N = 1/10$ entsprechend

$$N_{zul}^* = N_{zul} \cdot f_N \quad (39)$$

zu reduzieren.

13.3 Bei geschweißten Behältern unter Druckwasserstoff aus ferritischen Stählen mit Festigkeitskennwerten $K_{20} \leq 500 \text{ N/mm}^2$ kann bei unbeschleunigten Schweißnähten sinngemäß nach Abschnitt 8.2 oder Anhang 4, Abschnitt 4.2 vorgegangen werden. Hierbei ist die nach Formel (31) berechnete Lastspielzahl sinngemäß Formel (39) mit einem spannungsabhängigen Abminderungsfaktor

$$f_N = \left(\frac{215}{2 \sigma_{va}} \right)^5 \leq 1 \quad (40)$$

herabzusetzen, sofern $K_{20} \leq 355 \text{ N/mm}^2$ beträgt (z. B. Feinkornbaustahl P355). Die Schweißnähte müssen hierbei den Anforderungen der Schweißnahtklasse K 1 genügen.

Bei Festigkeitskennwerten $K_{20} > 355 \text{ N/mm}^2$ (z. B. Feinkornbaustahl P460) sind nur 50 % der unter Verwendung der Formeln (39) und (40) ermittelten Lastspielzahl als zulässig anzusetzen.

Bei Behältern aus ferritischen Stählen mit Festigkeitskennwerten K_{20} von $355 < K_{20} \leq 500 \text{ N/mm}^2$, deren Bauteilbereiche ungeschweißt oder deren Schweißnähte kerbfrei geschliffen sind, kann die zulässige Lastspielzahl nach Abschnitt 8.1 bzw. 8.2 oder Anhang 4, Abschnitt 4.1 bzw. 4.2 unter Anwendung von Formel (39) mit einem Abminderungsfaktor

$$f_N = \left(\frac{215}{2 \sigma_{va}} \right)^{1,6} \leq 1 \quad (41)$$

bestimmt werden, wobei ebenfalls Schweißnahtklasse K 1 vorausgesetzt wird und kleinere Werte als 0,5 nicht berücksichtigt zu werden brauchen. Eine weitere Abminderung bei $K_{20} > 355 \text{ N/mm}^2$ ist nicht erforderlich.

13.4 Bei wasserberührten Teilen aus ferritischen und martensitischen Stählen, die mit Temperaturen über 200°C betrieben werden, ist auf die Erhaltung der Magnetitschutzschicht zu achten.

Siehe TRD 301 Anlage 1.

14 Maßnahmen bei Erreichen der rechnerischen Lebensdauer

14.1 Ist die bei der Lebensdauerberechnung eines Bauteils zugrunde gelegte Lastspielzahl N oder der zulässige Wert für die Gesamtschädigung nach Abschnitt 9, Formel (38) erreicht, sind an einigen hochbeanspruchten Stellen, die mit der zuständigen unabhängigen Stelle festzulegen sind, möglichst vollständig zerstörungsfreie Prüfungen gemäß Abschnitt 12.2 durchzuführen.

14.2 Werden bei den Prüfungen gemäß Abschnitt 14.1 keine Risse gefunden, so ist ein Weiterbetrieb bis zum Erreichen des zehnfachen Wertes der zulässigen Lastspielzahl N_{zul} oder der Schädigungssumme nach Formel (34) zulässig. Voraussetzung hierfür ist, dass bei den zerstörungsfreien Prüfungen, die in Prüfintervallen durchzuführen sind, die 50 % der Betriebsdauer nach Abschnitt 14.1 entsprechen, keine Ermüdungsschäden festgestellt werden. Nach Erreichen dieser Betriebszeit ist das weitere Vorgehen im Einzelnen entsprechend den nationalen Vorschriften mit den jeweils zuständigen Stellen abzustimmen.

Bei tiefen zulässigen Temperaturen unterhalb von -200°C verkürzen sich die Prüfintervalle für die zerstörungsfreien Prüfungen von 50 % auf 25 % der Betriebsdauer nach Abschnitt 14.1.

14.3 Sollten bei den Prüfungen gemäß Abschnitt 14.1 oder Abschnitt 14.2 Risse oder rissartige Fehler im Sinne des AD 2000-Merkblattes HP 5/3, Abschnitt 5.2 bzw. Abschnitt 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 mit den jeweils zuständigen Stellen zu vereinbaren sind, ein Weiterbetrieb zulässig erscheint.

14.4 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 und der zuständigen unabhängigen Stelle vorzunehmen;
- (2) Kerbfreischleifen der Schweißnähte;
- (3) Beseitigen von Verformungsbehinderungen, z. B. Ersatz anrissbehafteter starrer Verstrebungen durch verschiebbare Verbindungen;
- (4) Konstruktionsänderungen im Hinblick auf günstigere Wärmeleitung zwecks Vermeidung von Thermoschockbeanspruchungen, z. B. Stützdurchführung durch die Behälterwandung in Doppelrohrausführung;
- (5) Änderung der Betriebsweise.

14.5 Wird das Bauteil im Bereich hoher Temperaturen wechselnd betrieben, sind nach Erreichen von $e = 0,6$ die Prüfungen nach Abschnitt 14.1 durchzuführen. Nach Erreichen von $e = 1,0$ ist der Prüfumfang auf Oberflächengefügeuntersuchungen zu erweitern.

15 Zusätzliche Angaben

15.1 In allen Fällen, in denen Behälter für mehrere An- und Abfahrten pro Tag oder nach Abschnitt 9 vergleichbaren Druckschwankungen und für Betriebsweisen vorgesehen sind, die die Lebensdauer verringern (z. B. Korrosion, Wärmespannungen), ist dies dem Hersteller und der zuständigen unabhängigen Stelle vor der Entwurfsprüfung anzugeben. Es sind in diesen Fällen dem Betriebserfordernis angepasste Maßnahmen vorzusehen und gegebenenfalls zwischen Hersteller, Besteller/Betreiber und einer zuständigen unabhängigen Stelle zu vereinbaren und auf der entwurfsgeprüften Zeichnung und in der Bescheinigung über die Schlussprüfung einzutragen.

15.2 Im Falle von wechselndem Innendruck und/oder schnellen Temperaturänderungen sind anzugeben:

15.2.1 Anzahl der Druckschwankungen zwischen dem drucklosen Zustand und dem maximal zulässigen Druck (An- und Abfahrten).

15.2.2 Größter und kleinster Druck von Druckschwankungen konstanter Schwingbreite, die sich der Grundlast überlagern, und deren Betriebslastspielzahl.

15.2.3 Treten die Druckschwankungen der verschiedenen Lastzyklusgruppen eines vorgegebenen Betriebslastkollektivs bevorzugt in bestimmten Zeitabschnitten während der Gebrauchsdauer auf, ist die zeitliche Aufeinanderfolge der einzelnen Intervalle anzugeben.

15.2.4 Anfangs- und Endtemperaturen der Bauteilwandungen. Bei linearer Änderung der Temperatur ist außerdem die Aufheiz- und Abkühlungszeit oder die Temperaturänderungsgeschwindigkeit anzugeben. Für genauere Berechnungen sind Angaben über die zeitliche Zuordnung zwischen Druck- und Temperaturänderungen sowie über die Wärmeübergangszahlen zu machen. Diese Angaben sind in der Regel einer wärmetechnischen Berechnung zu entnehmen oder durch entsprechende Messungen zu ermitteln.

15.2.5 Treten Temperaturänderungen unterschiedlicher Schwingbreite auf, ist sinngemäß wie bei unregelmäßigen Druckschwankungen ein Temperatur-Lastkollektiv erforderlich.

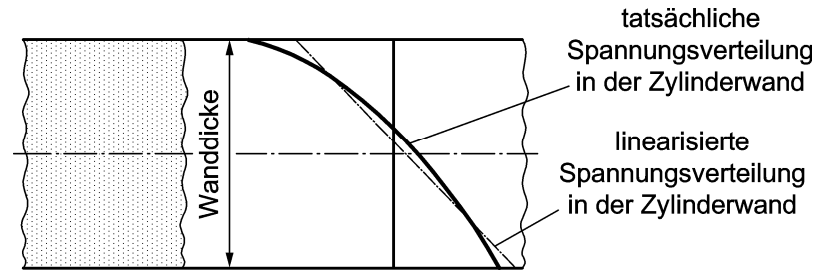


Bild 1a — Spannungsverteilung über die Wanddicke

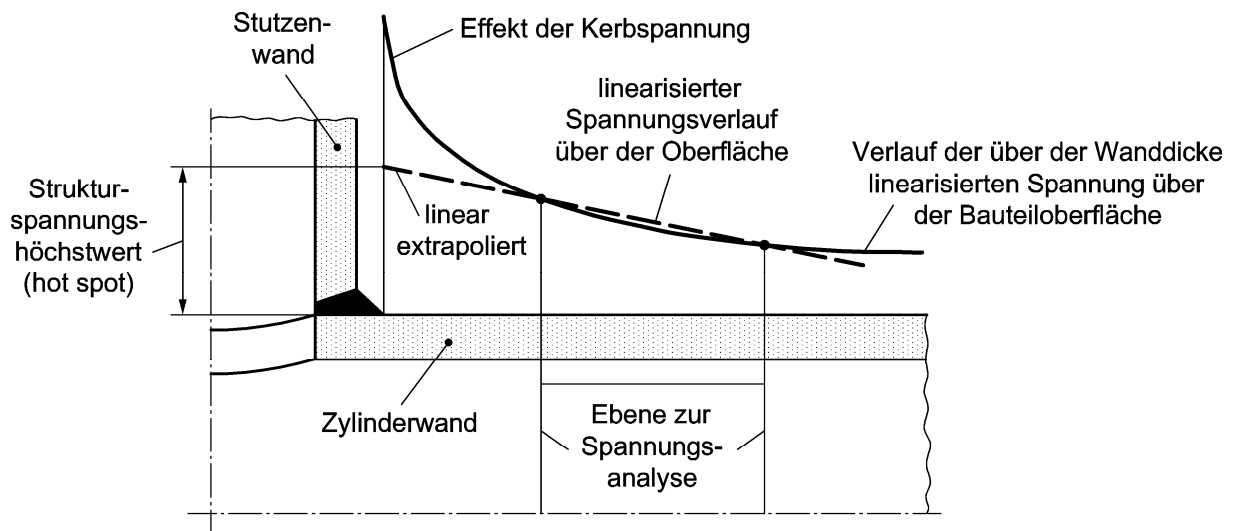


Bild 1b — Strukturspannungshöchstwerte am Schweißnahtübergang

Bild 1 — Beispiele für Spannungsverläufe

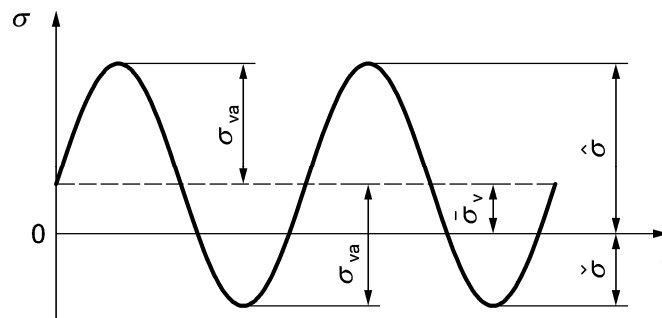


Bild 2 — Spannungsverlauf bei einachsiger Beanspruchung (schematisch)

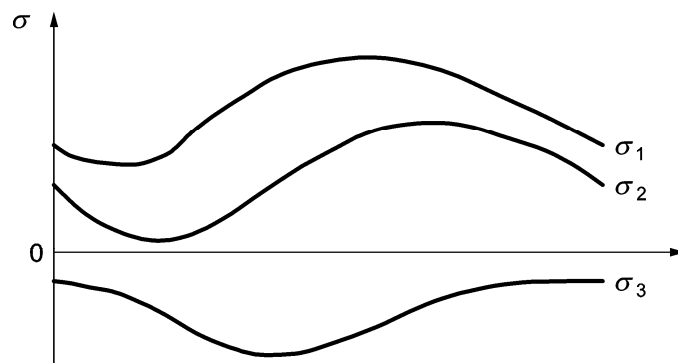


Bild 3 — Spannungsverlauf bei dreiachsiger Beanspruchung mit phasenverschobenen Hauptspannungen (schematisch)

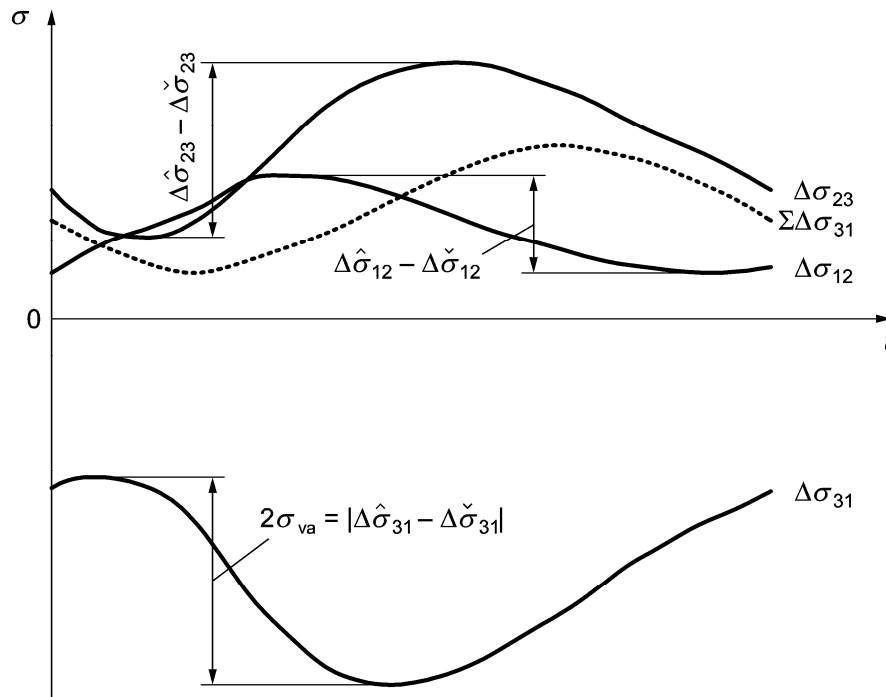


Bild 4 — Verlauf der Hauptspannungsdifferenzen, der maßgebenden Hauptspannungssumme und der Vergleichsspannungsschwingbreite $2\sigma_{va}$ nach Bild 3

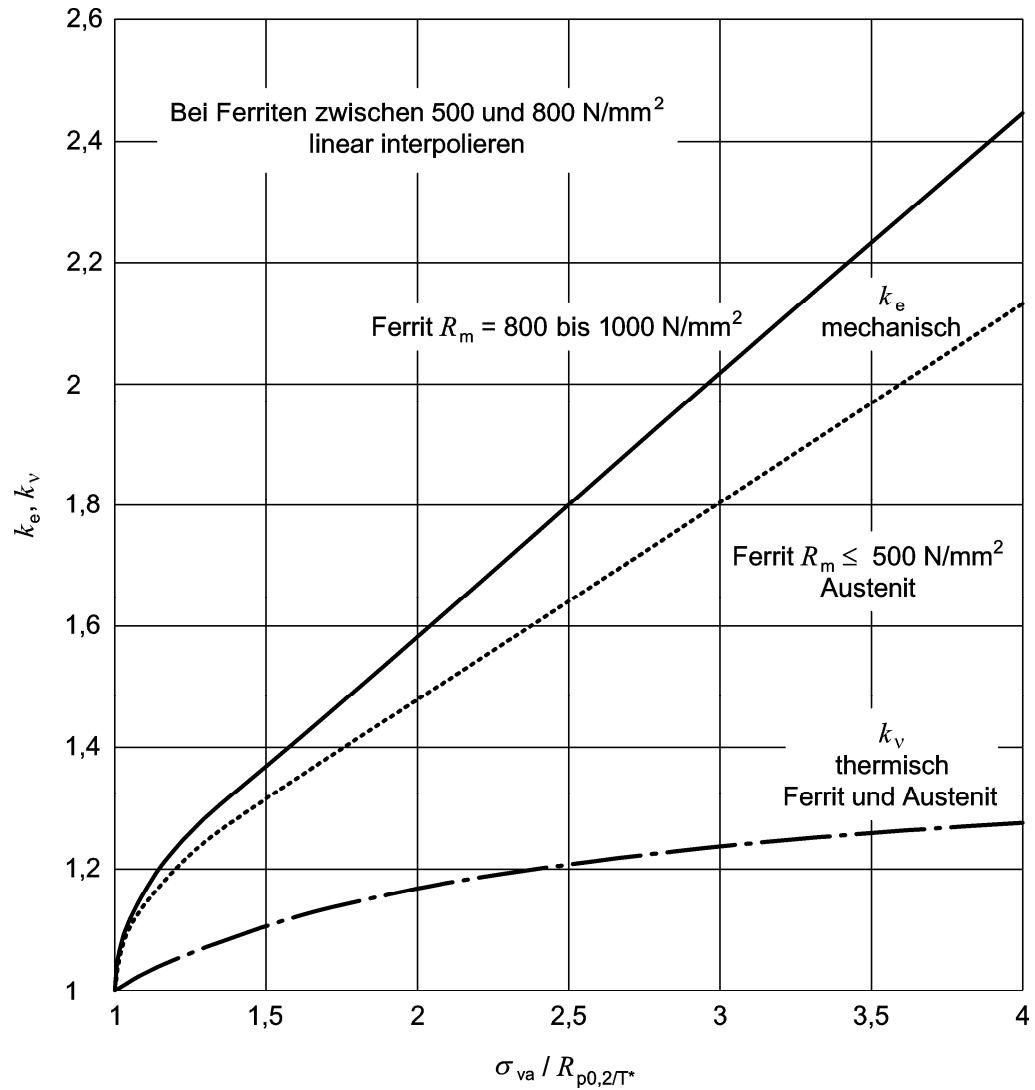


Bild 5 — Vergrößerungsfaktoren k_e und k_v zur Berücksichtigung überelastischer Dehnungen bei Überschreiten der zweifachen Streckgrenze

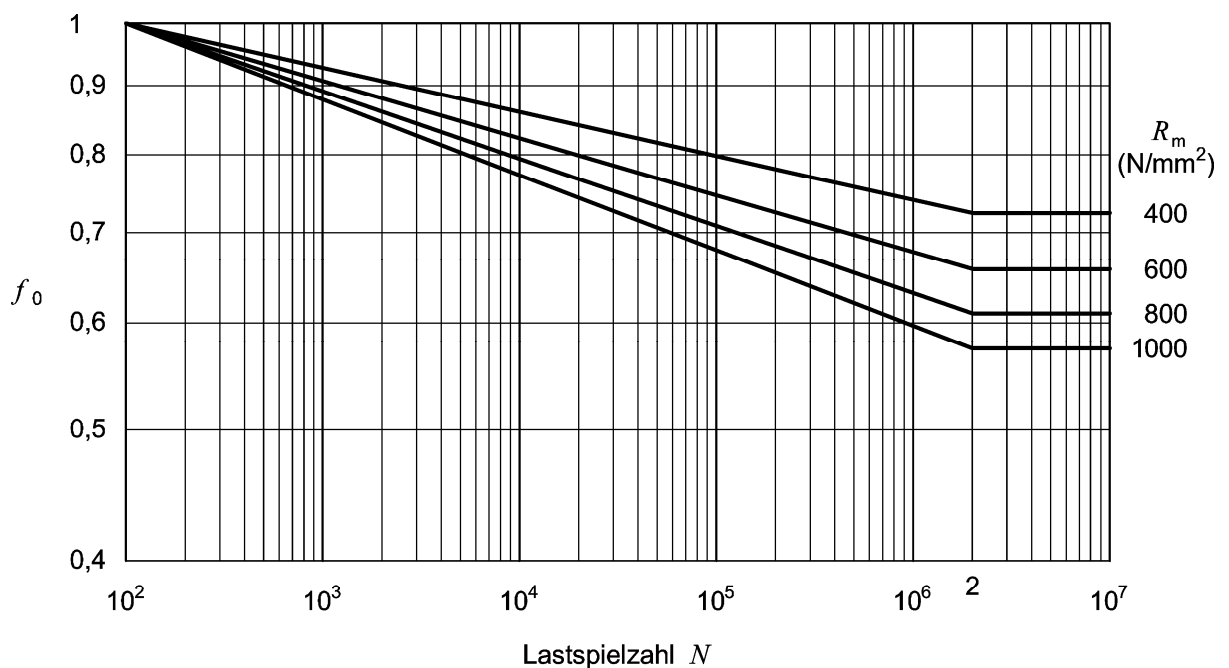


Bild 6 — Korrekturfaktor f_0 zur Berücksichtigung der Oberflächenkerbwirkung durch Walzhaut

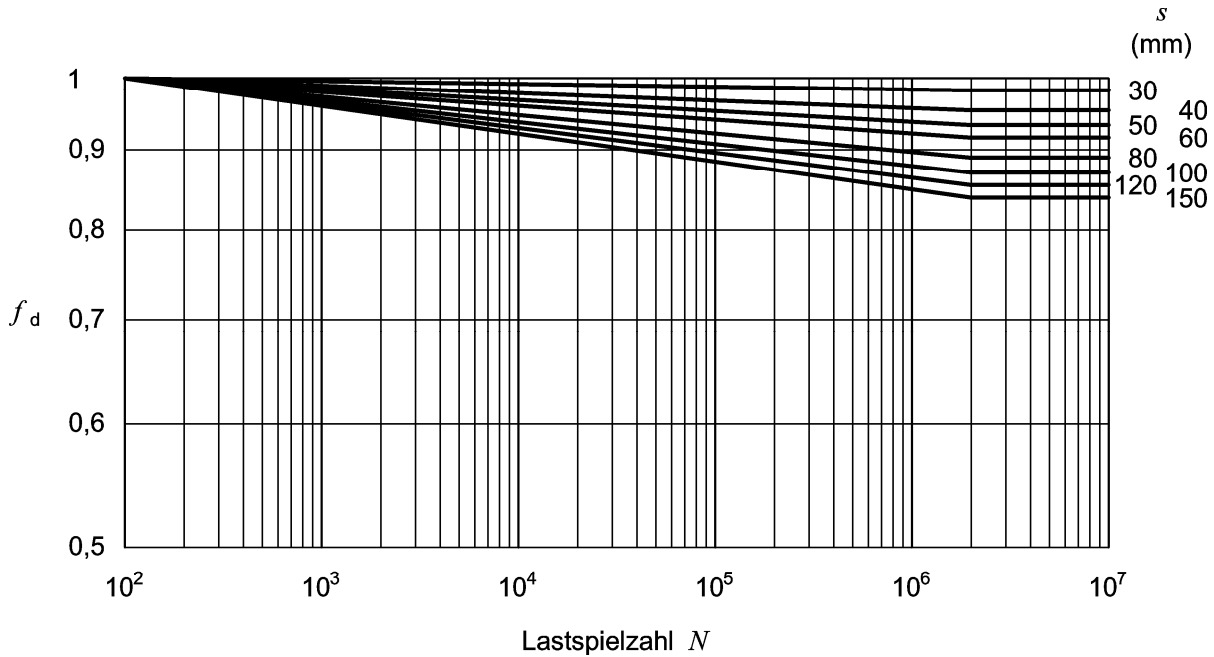


Bild 7 — Korrekturfaktor f_d zur Berücksichtigung des Waddickeneinflusses bei ungeschweißten Bauteilen, blechen geschliffenen Nähten und beim Kerbspannungsnachweis von Schweißverbindungen

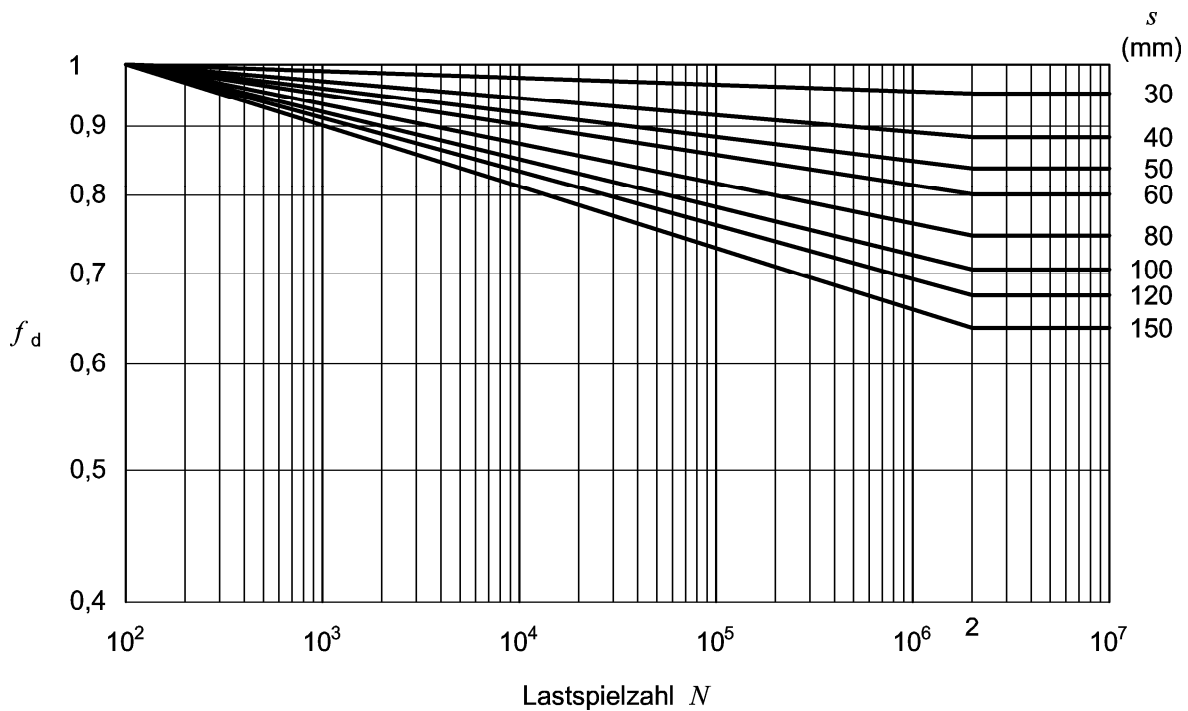


Bild 8 — Korrekturfaktor f_d zur Berücksichtigung des Waddickeneinflusses bei unbearbeiteten oder nicht eben geschliffenen Schweißverbindungen

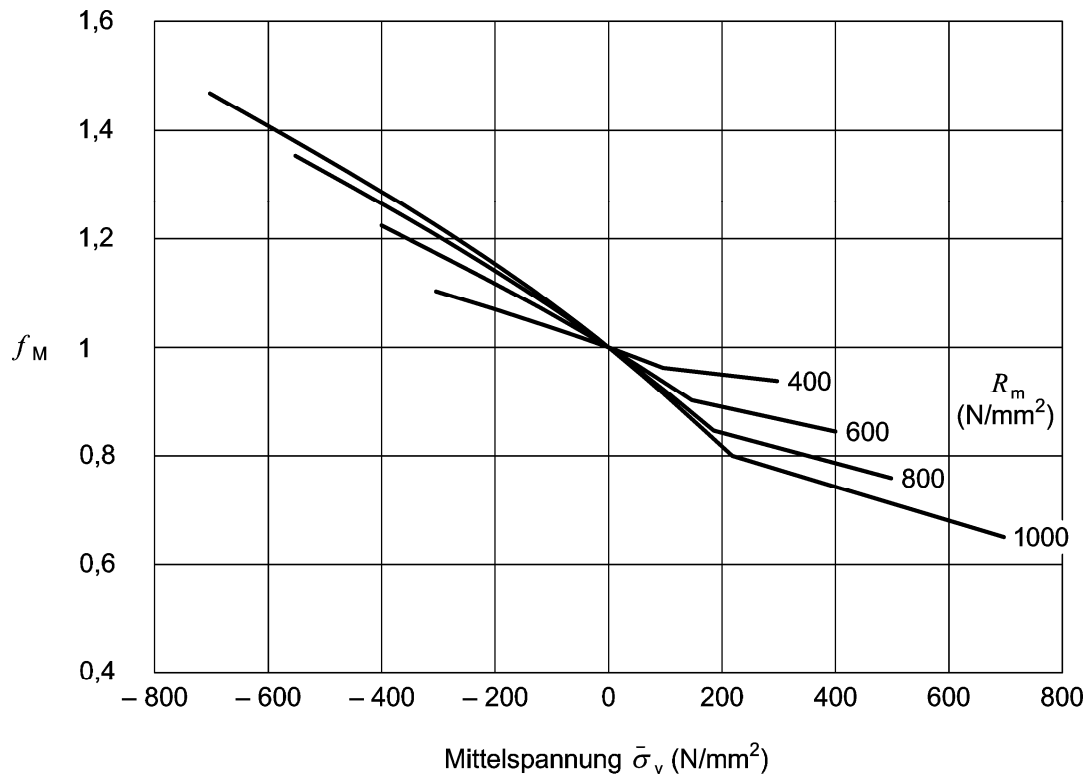


Bild 9 — Korrekturfaktor f_M zur Berücksichtigung des Mittelspannungseinflusses für den Dauerfestigkeitsbereich ($N \geq 2 \cdot 10^6$)

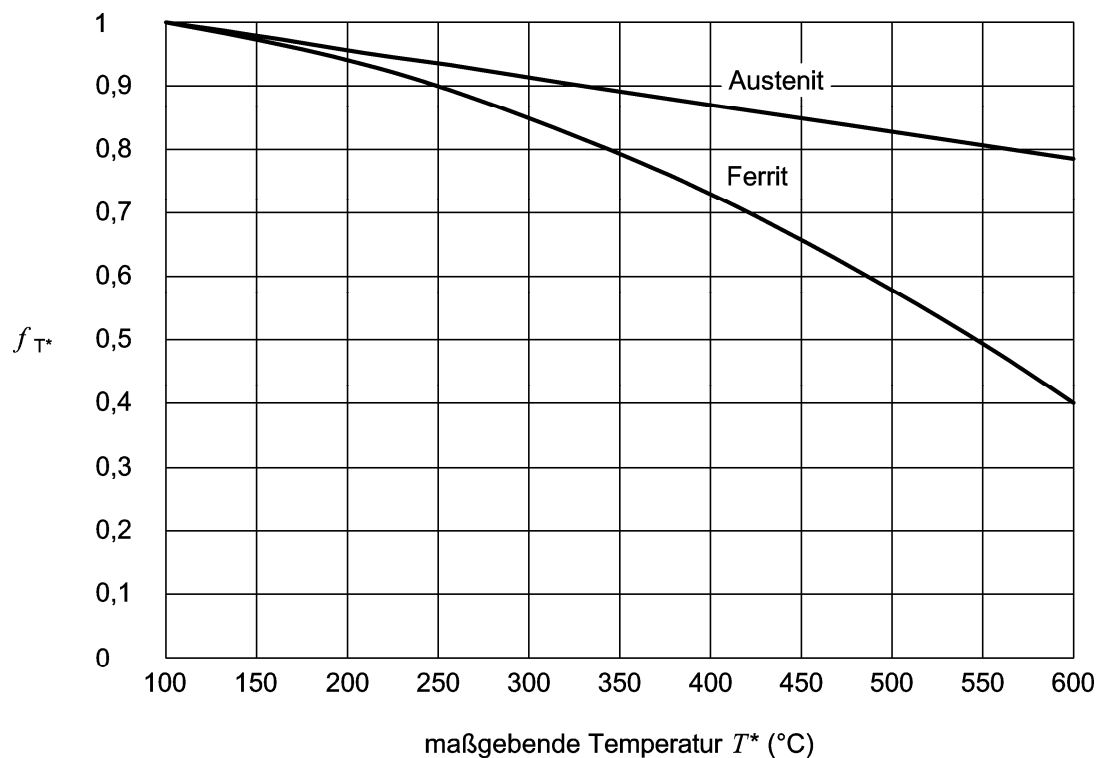


Bild 10 — Korrekturfaktor f_{T^*} zur Berücksichtigung des Temperatureinflusses

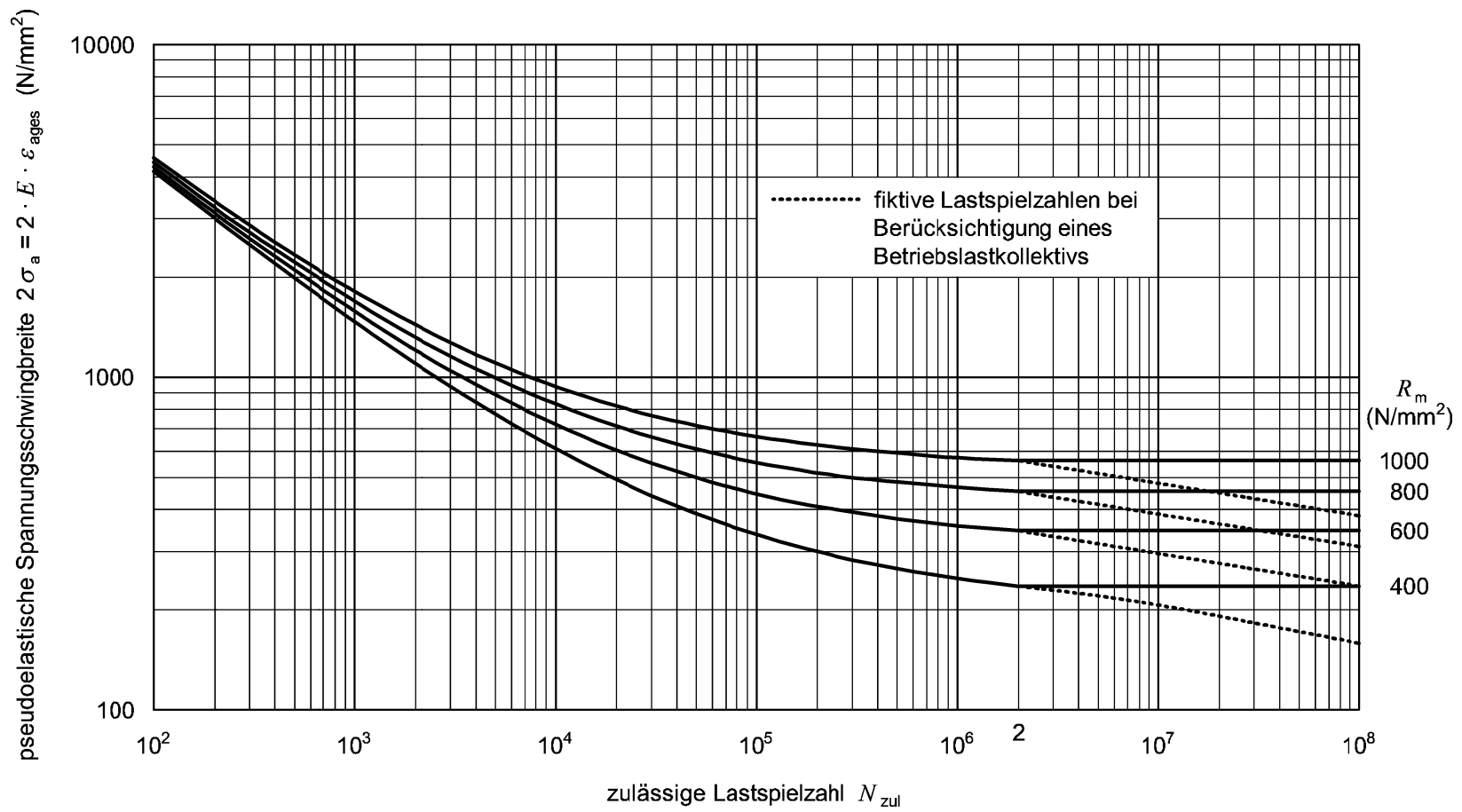


Bild 11 — Zulässige Lastspielzahlen in Abhängigkeit von der Spannungsschwingbreite für ungekerbte Probestäbe aus warmfesten ferritischen und austenitischen Walz- und Schmiedestählen bei Raumtemperatur und $\bar{\sigma} = 0$

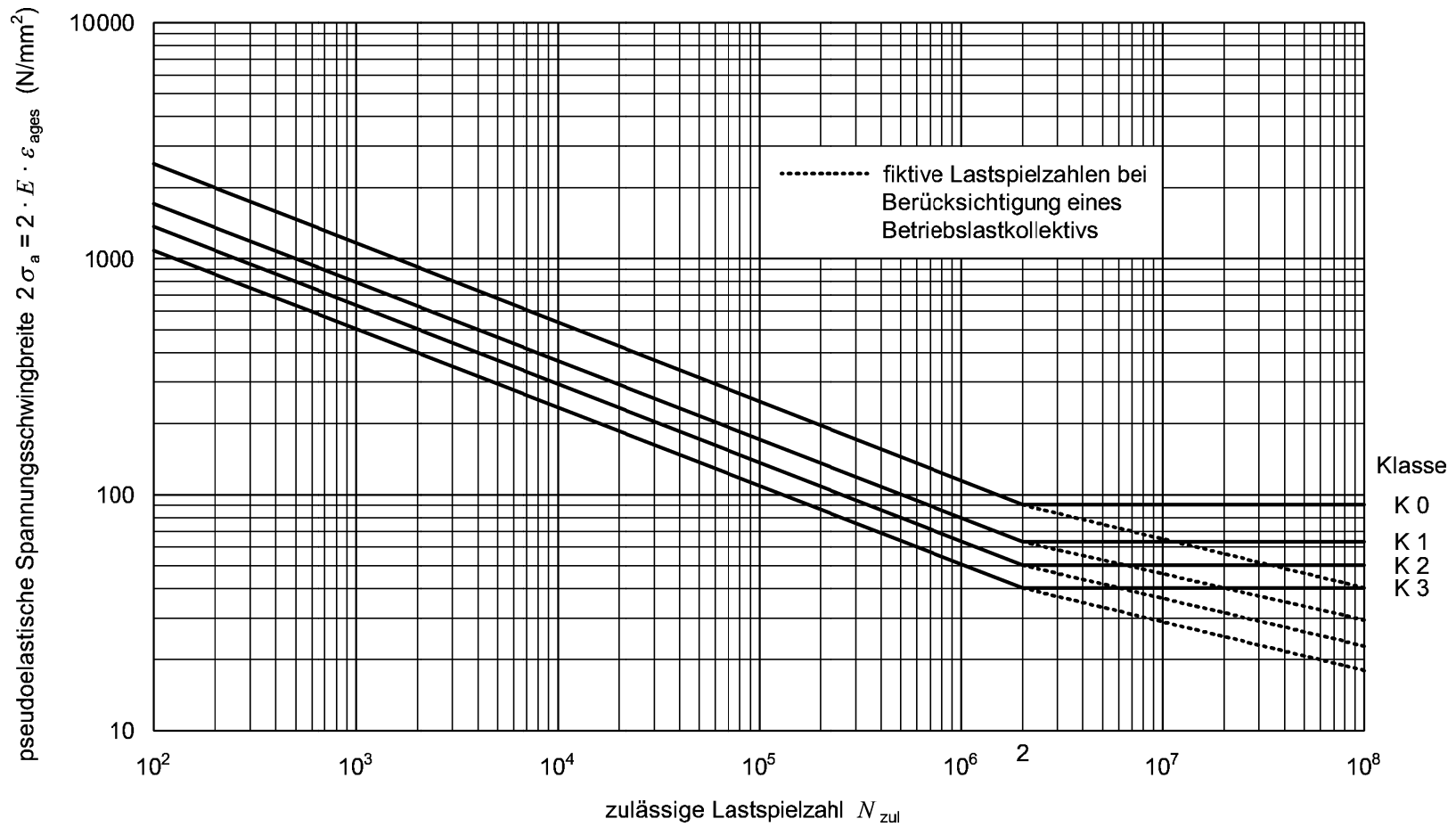



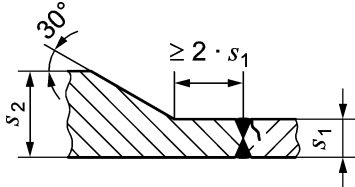

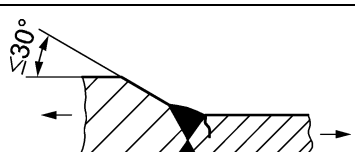

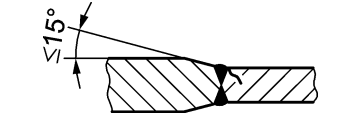
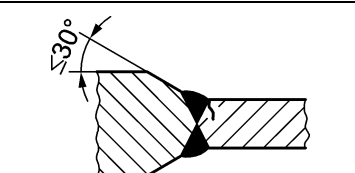
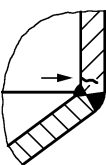
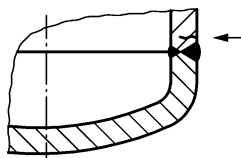
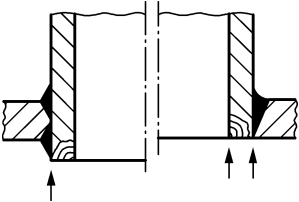
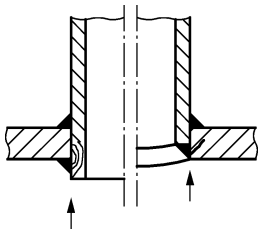
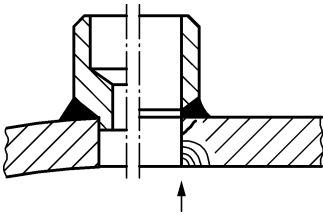
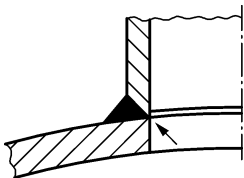
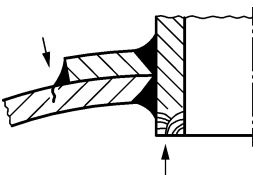
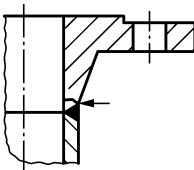
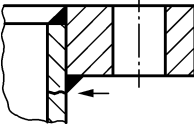


Bild 12 — Zulässige Lastspielzahlen in Abhängigkeit von der Spannungsschwingbreite für Schweißverbindungen aus warmfesten ferritischen und austenitischen Walz- und Schmiedestählen bei Raumtemperatur ($\bar{\sigma}$ -unabhängig)

Tafel 5 — Beispiele von Schweißverbindungen mit den zugeordneten Nahtklassen K 1, K 2 und K3, abhängig von der Art des Spannungsnachweises (eingezeichnete Rissverläufe beispielhaft)

lfd. Nr.	Darstellung	Beschreibung	Voraussetzung	Nahtklasse für Spannungsnachweis 1 o. 2	
				1	2
1. Zylindrische und kegelförmige Mäntel, gewölbte Böden					
1.1		Längs- oder Rundnaht bei gleichen Wanddicken	beidseitig geschweißt	K 1	K 1
1.2			einseitig geschweißt mit Gegennaht	K 1	K 1
1.3			einseitig geschweißt ohne Gegennaht	K 2	K 2
1.4		Längs- oder Rundnaht bei ungleichen Wanddicken	beidseitig geschweißt	K 1	K 1
1.5				K 2 ⁷⁾	K 1
1.6				K 3	K 1
1.7			beidseitig geschweißt, Kantenversatz innen und außen gleich	K 1 ⁷⁾	K 1
1.8				K 1	K 1
1.9				K 2	K 1
1.10		Kegelanschlussnaht	beidseitig geschweißt oder einseitig geschweißt mit Gegennaht	–	K 1
1.11			einseitig geschweißt ohne Gegennaht	–	K 3
1.12		Bodenanschlussnaht bei gewölbten Böden mit zylindrischen Bordhöhen nach AD 2000-Merkblatt B 3	Spannungsnachweis 2: Beschreibung der Schweißverbindungen, Voraussetzungen und zugeordnete Nahtklassen siehe Beispiele lfd. Nr. 1.1 bis 1.9		

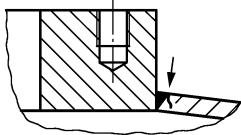
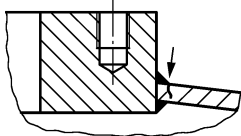
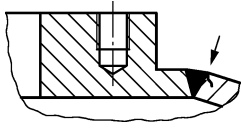
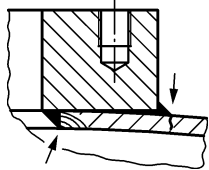
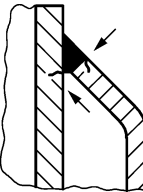
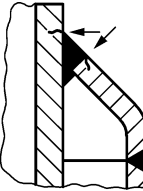
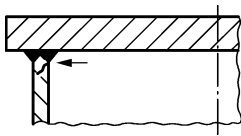
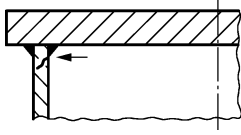
Tafel 5 (fortgesetzt)

lfd. Nr.	Darstellung	Beschreibung	Voraussetzung	Nahtklasse für Spannungs- nachweis 1 o. 2	
				1	2
2. Stutzeinschweißungen					
2.1		Stutzen durchgesteckt oder eingesetzt	beidseitig durchgeschweißt oder einseitig durchgeschweißt mit Gegennaht	—	K 1
2.2			einseitig durchgeschweißt ohne Gegennaht	—	K 2
2.3		Stutzen durchgesteckt (in der Darstellung: linke Ausführung)	beidseitig, aber nicht durchgeschweißt	—	K 2
2.4		Stutzen eingesetzt (in der Darstellung: rechte Ausführung)		—	K 3
2.5		Stutzen aufgesetzt	einseitig durchgeschweißt (ohne Restspalt), Stutzen ausgebohrt oder Wurzel überschliffen	—	K 1
2.6				einseitig durchgeschweißt, ohne Gegennaht oder ohne mechanische Bearbeitung der Wurzel	—
2.7		Stutzen mit scheibenförmiger Verstärkung. Naht: Scheiben-Außen- durchmesser		—	K 3
2.8		Stutzen mit scheibenförmiger Verstärkung. Naht: Stutzeinschweißung	Verbindung Stutzenrohr mit Grundkörper und Verstärkungs- scheibe durchgeschweißt	—	K 1
3. Flansche und Blockflansche					
3.1		Vorschweißflansch	beidseitig geschweißt oder einseitig geschweißt mit Gegennaht	—	K 1
3.2				einseitig geschweißt ohne Gegennaht	—
3.3		Aufschweißflansch	Nahtausführung nach AD 2000-Merkblatt B 8, Tafel 1	—	K 2

AD 2000-Merkblatt

Seite 24 AD 2000-Merkblatt S 2, Ausg. 07.2012

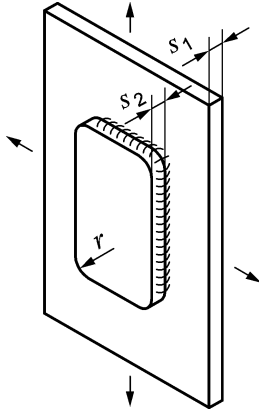
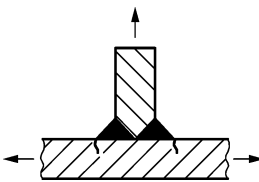
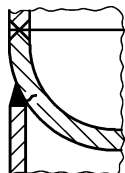
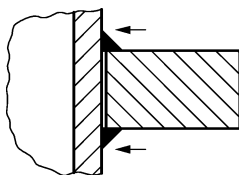
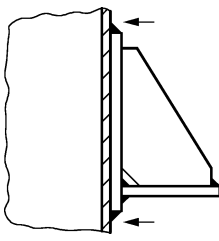
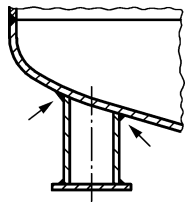
Tafel 5 (fortgesetzt)

lfd. Nr.	Darstellung	Beschreibung	Voraussetzung	Nahtklasse für Spannungsnachweis 1 o. 2	
				1	2
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
		aufgesetzter Blockflansch, Naht am Außendurchmesser (in der Darstellung: rechte Naht)		—	K 2
4. Doppelmantel — Anschlussnähte					
4.1		mit angeformter Krempe: Die Bewertung gilt sowohl für die Innenbehälterwand als auch für die Verbindungsnaht selbst.	einseitig durchgeschweißt	—	K 2
4.2		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
5. Anschlusschweißnähte ebener Böden					
5.1		aufgeschweißter Boden	beidseitig durchgeschweißt	—	K 1
5.2			beidseitig, aber nicht durchgeschweißt	—	K 2

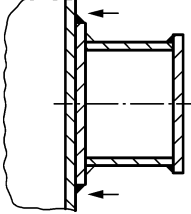
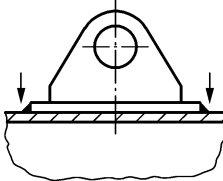
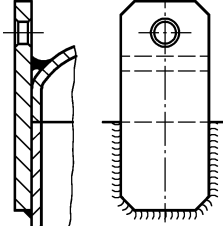
Tafel 5 (fortgesetzt)

lfd. Nr.	Darstellung	Beschreibung	Voraussetzung	Nahtklasse für Spannungs- nachweis 1 o. 2	
				1	2
5.3		aufgeschweißter Boden	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
5.5		mit einem Auf- oder Vorschweiß- flansch verschweißter Boden	beidseitig mit Kehlnähten verschweißt	—	K 2
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
5.9		partiell durchgeschweißter Boden	einseitig geschweißt	—	K 3
5.10		gekrempter, geschmiedeter oder gepresster Boden	Krempenradius und Bordhöhe entsprechend AD 2000-Merkblatt B 5, Tafel 1, Ausführungsformen a und b. Beschreibung der Schweißverbindungen, Voraussetzungen und zugeordnete Nahtklassen siehe Beispiele lfd. Nr. 1.1 bis 1.3		
6. Anschweißteile, allgemein ⁸⁾					
6.1		Anschweißteile ohne Einleitung von wechselnden Zusatzkräften oder -momenten	beidseitig durchgeschweißt	K 1	—
6.2			beidseitig mit Kehlnaht verschweißt	K 2	—
6.3			beidseitig durchgeschweißt	K 2	K 1 ⁹⁾
6.4			beidseitig mit Kehlnaht verschweißt	K 3	K 2 ⁹⁾

Tafel 5 (fortgesetzt)

lfd. Nr.	Darstellung	Beschreibung	Voraussetzung	Nahtklasse für Spannungsnachweis 1 o. 2	
				1	2
6.5		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	—
6.6		Anschweißteile mit Einleitung von wechselnden Zusatzkräften oder -momenten	beidseitig durchgeschweißt	—	K 1
6.7			beidseitig, aber nicht durchgeschweißt	—	K 2
7. Anschweißteile ohne Einleitung von wechselnden Zusatzkräften oder -momenten, Beispiele ⁹⁾					
7.1		Behälter mit Standzargenanschluss	einseitig geschweißt	K 2	—
7.2		Behälterwand mit Tragring	beidseitig, aber nicht durchgeschweißt	K 2	—
7.3		Behälterwand mit Versteifungsring			
7.4		(bei Beanspruchung durch äußeren Überdruck)	in Umfangsrichtung unterbrochen geschweißt	K 3	—
7.5		Behälterwand mit Tragpratze (mit und ohne Futterblech)	einseitig geschweißt	K 2	—
7.6		Behälterwand mit Fuß (mit und ohne Futterblech)	einseitig geschweißt	K 2	—

Tafel 5 (fortgesetzt)

Ifd. Nr.	Darstellung	Beschreibung	Voraussetzung	Nahtklasse für Spannungsnachweis 1 o. 2	
				1	2
7.7		Behälterwand mit Tragzapfen (mit und ohne Futterblech)	einseitig geschweißt	K 2	–
7.8		Behälterwand mit Tragöse (mit und ohne Futterblech)	einseitig geschweißt	K 2	–
7.9		Behälterwand mit Traglasche	einseitig geschweißt	K 2	–
<p>7) Zulässige Wanddickenverhältnisse und zulässiger Versatz siehe AD 2000-Merkblatt HP 5/1. Es gelten die Werte für Längsnähte.</p> <p>8) Voraussetzung: Äußerer Befund nach DIN EN ISO 5817, Bewertungsgruppe B, ausschließlich der Merkmale Nahtüberhöhung und Deckenlagenunterwölbung sowie Ungleichschenkligkeit, für die Bewertungsgruppe C gilt.</p> <p>9) Die Bewertung bezieht sich auf die Rippenmitte. Für das Rippenende ist die Bewertung jeweils eine Klasse schlechter.</p>					

Anhang 1 zum AD 2000-Merkblatt S 2

Erläuterungen zum AD 2000-Merkblatt S 2

Die Ausgabe des AD 2000-Merkblattes S 2 stellt eine Weiterentwicklung unter Berücksichtigung des in den letzten Jahren angefallenen Erkenntniszuwachses auf dem Fachgebiet „Ermüdung“ und anderer internationaler Vorschriften über Schwingfestigkeitsnachweise (z. B. Eurocode Nr. 3, [76]) dar.

Es sind folgende Teilaspekte überarbeitet bzw. neu aufgenommen:

1. Getrennte Angabe von Ermüdungskurven für ungeschweißte und geschweißte Bauteile unter Einbezug austenitischer Werkstoffe,
2. Berechnung der maßgebenden Spannungsschwingbreite im überelastisch beanspruchten Bereich über Vergrößerungsfaktoren k_e und k_v für mechanische und thermische Beanspruchungen,
3. Änderung bzw. Ergänzung von Korrekturfaktoren zur Berücksichtigung von Oberflächen-, Mittelspannungs-, Größen- und Temperatureinfluss,
4. Berücksichtigung des Einflusses von Druckwasserstoff-Medium auf das Ermüdungsverhalten.

Erläuterung zu Abschnitt 1

Die Lastspielzahlkurven sowie die eingearbeiteten Lastspielzahl- und Spannungssicherheitsbeiwerte sind auf zähe Walz- und Schmiedestähle im Sinne des AD 2000-Regelwerkes abgestimmt, die ein lineares Spannungs-Dehnungs-Verhalten aufweisen und deren Eigenschaften hinreichend homogen und isotrop sind. Bei hochfesten Stählen mit großem Streckgrenz-Zugfestigkeits-Verhältnis ist deshalb auf strikte Einhaltung aller Werkstoffanforderungen nach den Werkstoffblättern besonders zu achten (siehe auch Erläuterungen zu Formel (14)). Dieses AD 2000-Merkblatt kann nicht auf Stahlguss oder andere metallische Werkstoffe, z. B. Nichteisenmetalle, übertragen werden, da diese Werkstoffe andere Ermüdungseigenschaften aufweisen.

Die Anwendung dieses AD 2000-Merkblattes im Bereich kleiner Lastspielzahlen ersetzt nicht eine eventuell erforderliche Absicherung gegen Spröbruch-Versagen beim Einsatz hochfester Stähle.

Erläuterung zu Formel (1)

Bei der Lebensdauervorhersage für Lastzyklen mit wechselnden Temperaturen wird davon ausgegangen, dass die aus isothermischen Ermüdungsversuchen ermittelten Versuchsergebnisse auf nicht isothermische Belastungsvorgänge übertragbar sind. Nach Versuchen von *Wellinger* und *Idler* [28] liegen bei Ermüdungsversuchen mit wechselnden Temperaturen die erreichten Lastspielzahlen zwischen den Versuchspunkten, die bei konstanten Lastzyklustemperaturen erzielt wurden. In keinem Fall wurde beobachtet, dass bei wechselnder Temperatur die Bruch- oder Anrisslastspielzahl niedriger lag als bei konstanter Höchsttemperatur mit jeweils gleicher Schwingbreite.

Als für die Ermüdung durch Wechselbeanspruchung maßgebende Temperatur eines Lastzyklus wird deshalb eine Temperatur bestimmt, die zwischen der oberen und unteren Temperaturgrenze liegt. Bis zum Vorliegen weiterer Erkenntnisse wird hierfür mit der Formel (1) dieses Merkblattes gerechnet.

Erläuterung zu Abschnitt 4.1

Bei örtlichen Krafteinleitungen können gemäß dem Prinzip von *St. Venant* nichtlineare Spannungsverteilungen im Querschnitt auftreten. Dies gilt umso mehr, je näher die zu untersuchende Stelle am Kraftangriff liegt.

Dieses Prinzip von *St. Venant* sagt aus, dass dann, wenn die auf einen kleinen Teil der Oberfläche eines elastischen Körpers wirkende Kraft durch ein äquivalentes Kräftesystem ersetzt wird, diese Belastungsumverteilung wesentliche Änderungen der örtlichen Spannungen hervorruft, aber einen vernachlässigbaren Spannungseffekt bei solchen Entfernungen hat, die groß sind im Vergleich zu den Abmessungen der belasteten Oberfläche.

Erläuterung zu Abschnitt 5

Im Abschnitt 5 dieses Merkblattes wurde die Tresca-Hypothese (Schubspannungshypothese, SSH) bevorzugt verwendet, da die in den AD 2000-Merkblättern der Reihe B enthaltenen Berechnungsregeln in den meisten Fällen auf der Tresca-Hypothese beruhen. Gemäß Abschnitt 2.7 dieses Merkblattes bleibt es dem Benutzer freigestellt, auch die Hypothese von *Mises* (Gestaltänderungsenergiehypothese, GEH) anzuwenden. Einerseits führt die Berechnung der Vergleichsspannungen nach der GEH zu etwas günstigeren Ergebnissen als nach der SSH, andererseits kann die Anwendung der SSH, insbesondere bei mehrachsiger Beanspruchung, wegen ihres einfacheren Aufbaues vorteilhafter sein.

Bei zeitlich sich verändernder Lage der Hauptspannungsrichtungen gibt [2] eine Methode an, wie die Vergleichsspannungsschwingbreite zur Ermittlung der maßgebenden Spannungsschwingbreite bestimmt werden kann.

Die Berechnungsvorschrift zur Bestimmung der Vergleichsspannungsschwingbreite nach [2] führt im Falle konstanter Hauptspannungsrichtungen zu dem gleichen Ergebnis wie nach Abschnitt 5 dieses Merkblattes.

Erläuterungen zu Formeln (8) und (9)

Ist die Vergleichsspannungsschwingbreite $2 \sigma_{va}$ rein linear-elastisch berechnet und wird die zweifache Streckgrenze überschritten, muss die überproportionale Dehnungszunahme im überelastischen Bereich durch Ermittlung einer globalen plastischen Spannungsschwingbreite (maßgebende Spannungsschwingbreite $2 \sigma_{va}^*$) berücksichtigt werden.

Anstelle der bisher angewendeten Neuber-Regel, die bei großen linear-elastisch gerechneten Kerbspannungen die Gesamtdehnung überschätzt [63, 64], wurden analog der Vorgehensweise im ASME-Code Spannungs-Vergrößerungsfaktoren k_e bzw. k_v für mechanische und thermische Beanspruchungen eingeführt.

Hierzu wurden unter Anwendung von Näherungsformeln nach *Dixon/Strannigan* und *Kühnapfel/Troost* [65] Kennwerte des zyklischen Werkstoff-Verhaltens aus zahlreichen Versuchsreihen aus der Werkstoff-Datensammlung von *Boller* und *Seeger* [69] ausgewertet. Die beiden im Bild 5 dieses AD 2000-Merkblattes angegebenen k_e -Kurven, die mit den Formeln (8) und (9) beschrieben werden können, entsprechen etwa der oberen Begrenzung des Streufeldes der hiernach ermittelten k_e -Kurven für die verschiedenen Werkstoffgruppen. Hierbei wurde das überelastische Verhalten einiger Werkstoffe unterhalb der „statischen“ Streckgrenze (Werkstofffestigung) außer Acht gelassen und die untere Grenze für eine Korrektur der linear-elastisch berechneten Spannung auf $\sigma_{\text{vap}}/R_{p0,2/T^*} = 1,0$ pragmatisch festgelegt. Die hiernach berechneten k_e -Faktoren sind auch vergleichbar mit den im AD 2000-Merkblatt B 13 Formel (12) zu ermittelnden f_2 -Faktoren zur Berücksichtigung überelastischer Verformungen. Weitere Einzelheiten hierzu sind in [92] beschrieben.

Erläuterung zu Formel (11)

Mit Formel (11) wird die globale Spannungserhöhung für thermische Belastung in Dickenrichtung der Wandungen bei Spannungsschwingbreiten oberhalb der zweifachen Streckgrenze berechnet. Die Formel wurde aus [80] übernommen und basiert auf einer Betrachtung zu Wärmedehnungen im elastischen und überelastischen Bereich und vereinfachender Annahme eines ideal elastisch-plastischen Werkstoffverhaltens.

Erläuterung zu Formel (12)

Formel (12) beinhaltet eine Näherungslösung zur Überlagerung mechanischer und thermischer Belastungen.

Erläuterung zu Formel (14)

Zwecks einfacherer Handhabung werden in dieser Neuauflage Lastspielzahlkurven angegeben, in denen Lastspielzahl- und Spannungssicherheitsbeiwerte bereits eingearbeitet sind.

Grundlagen der Formel (14) sind die in den bisherigen Ausgaben dieses AD 2000-Merkblattes enthaltenen Anrisslastspielzahlkurven (vgl. Bild A.7 dieses Anhangs). Diesem Bild liegen dehnungs- und spannungskontrollierte Schwingversuche unter Zug-Druck bzw. Biegung mehrerer Institute zugrunde, deren Ergebnisse in [4] bis [26] veröffentlicht wurden. Hierbei wurde die Lebensdauer überwiegend für das Versagenskriterium Bruch ermittelt. Die Ergebnisse von Anriss-Lebensdauerversuchen liegen im Streufeld von Bruch-Lastspielzahlen entsprechender Werkstoffproben. Bei kleinen ungekerbten Proben steht nach Auftreten eines technischen Anrisses der Bruch bald bevor ($N_a \approx 0,8 \cdot N_{\text{Bruch}}$). Es ist deshalb statthaft, die auf der Basis sowohl von Bruch- als auch von Anrisslebensdauerwerten kleiner Proben festgelegten Lebensdauerkurven eines Bauteils (mit in der Regel größeren Abmessungen als denen der Proben) als Lebensdauerkurven bis zum technischen Anriss zu betrachten, zumal auch die Bauteile mehr oder weniger große Mikro- und Makrokerbwirkung aufweisen und damit rissempfindlicher sind.

Zwecks optimaler Werkstoffausnutzung (z. B. bei der Dimensionierung von ungeschweißten Hochdruckbehältern) wurde das Ansteigen der Schwingfestigkeit im Bereich höherer Lastspielzahlen mit zunehmender Zugfestigkeit durch Einführung von R_m als Lastspielzahl-Parameter berücksichtigt. Die Lastspielzahl, von der ab die Lastspielzahlkurven horizontal verlaufen, wurde einheitlich zu $2 \cdot 10^6$ festgelegt (fiktive Dauerfestigkeit). Das mittlere Verhältnis der Zug-Druck-Dauerwechselfestigkeit zur Zugfestigkeit ungekerbter glatter Proben aus Stählen mit Zugfestigkeiten bis zu 1300 N/mm^2 ist mit 0,46 statistisch genügend abgesichert [26]. Unter Berücksichtigung eines pauschalen Abminderungsfaktors von 1,15 für einen evtl. zu berücksichtigenden Dauerfestigkeits-Größeneinfluss ist deshalb für die Spannungsschwingbreite bei Dauerfestigkeit und Mittelspannung Null bisher $2 \sigma_{va} = 0,8 \cdot R_m$ angesetzt worden.

Im Zeitfestigkeitsbereich können die Kurven nach Bild A.7 ebenfalls als Mittelwertkurven bewertet werden.

Im Rahmen der Überarbeitung dieses AD 2000-Merkblattes wurden ergänzende Auswertungen von Versuchsdaten für ungekerbte Probestäbe aus der Datensammlung von *Boller* und *Seeger* [69] durchgeführt. Die Auswertungen haben gezeigt, dass die Anrisslastspielzahlkurven nach Bild A.7 auch nach derzeitigem Kenntnisstand als Grundlage für Auslegungs-Lastspielzahlkurven benutzt und hiernach auch austenitische Werkstoffe beurteilt werden können. Bild A.8 dieses Anhangs zeigt beispielsweise einen Vergleich zwischen Versuchsdaten hochfester zäher Stähle mit zulässigen Lastspielzahlen für $R_m = 1000 \text{ N/mm}^2$ nach diesem AD 2000-Merkblatt. Weitere Einzelheiten hierzu siehe [92].

Zur Festlegung von Auslegungs-Lastspielzahlkurven sind Sicherheitsbeiwerte nach statistischen Gesichtspunkten festgelegt worden.

Der Lastspielsicherheitsbeiwert S_N berechnet sich unter Voraussetzung Gauß'scher Normalverteilung der Lastspielzahlstreuung in Abhängigkeit vom Streumaß $1/T_N$ und von der Ausfallwahrscheinlichkeit P_A aus

$$S_N = 10^{\frac{z \cdot \lg(1/T_N)}{2,564}}$$

mit $z = f(P_A)$ nach folgender Tabelle

P_A	z
50 %	0
10 %	1,28
1 %	2,33
0,1 %	3,09
0,01 %	3,72

Statistische Auswertungen zur Lebensdauerstreuung von glatten Probestäben, Schweißverbindungen, Rohrleitungen und zylindrischen Behälterschüssen mit Abzweigungen im Lastspielbereich von ca. 10^4 bis 10^6 [6, 25, 39, 52 u. a.] haben gezeigt, dass in erster Näherung von einer Gauß'schen Normalverteilung der Messergebnisse ausgegangen werden kann und dass bei der Lebensdauervorhersage von Bauteilen im Bereich von $2 \cdot 10^4 < N_A < 10^6$ je nach Höhe der Spannungsschwingbreiten mit Streuspannen $T_N = 1:3$ bis $1:6$ gerechnet werden muss (vgl. Bild A.3 dieses Anhangs). Unter Bezugnahme auf die als Mittelwerte zu bewertenden Anriss-Lebensdauercurven des Bildes A.7 und auf eine für viele Druckbehälter praktikable Ausfallwahrscheinlichkeit von $P_A = 0,01\%$ bis $0,1\%$ ergibt sich unter der Voraussetzung Gauß'scher Normalverteilung z. B. für die Streuspanne $T_N = 1:5$ eine statistisch begründete Mindest-Lastspielsicherheit von $S_L \approx 10$ (vgl. Bild A.5b dieses Anhangs). Gleichartige Betrachtungen zur Streuung der Spannungsschwingbreite im Dauerfestigkeitsbereich führen zu einer Spannungs-Streuspanne $T_\sigma = 1:1,4$ zwischen $P_{\bar{u}} = 10$ und 90% und unter Zugrundelegung oben genannter Ausfallwahrscheinlichkeit von $0,01\%$ zu einer Mindest-Spannungssicherheit von $1,63$ für die Dauerfestigkeit (vgl. Bild A.5a dieses Anhangs).

Die Berücksichtigung der o. a. Sicherheitsabstände, die Eliminierung des pauschalen Größeneinflussfaktors $1,15$ im Dauerfestigkeitsbereich und die Glättung der Unstetigkeitsstellen führen zu Auslegungs-Lastspielzahlkurven, die mit ausreichender Genauigkeit mit der Approximationsformel (14) beschrieben werden können. Bezogen auf eine mittlere Dauerfestigkeit $2 \sigma_a = 2 \cdot 0,45 \cdot R_m$ nach Schätzformel von Schütz u. a. [68] ergeben sich hiernach Spannungssicherheiten bei $N \geq 2 \cdot 10^6$ von $S = 1,5$ bis $1,57$, was einer Ausfallwahrscheinlichkeit von ca. $0,1\%$ entspricht (vgl. Bild A.5a dieses Anhangs).

Erläuterung zu Formeln (15) und (16)

Aufgrund fehlender detaillierter Angaben zur Oberflächenfeingestalt in den meisten Beschreibungen von Ermüdungsversuchen hängen die Ergebnisse aus einzelnen Versuchsreihen von weitgehend unbekannten Einflüssen ab, was wiederum zu einer relativ großen Streubreite der Versuchsergebnisse führt.

Die bisher in der Ausgabe 3.90 des AD-Merkblattes S 2 enthaltenen Oberflächenkorrekturfaktoren orientierten sich nach den in verschiedenen Veröffentlichungen und Technischen Regeln [6, 16, 32 bis 35] vorgeschlagenen Näherungsformeln und Diagrammen zur Abschätzung der Kerbwirkung von Walzhautoberflächen im Dauerfestigkeitsbereich von $R_m = 400$ bis 1000 N/mm^2 . In dieser Ausgabe wurde mit Formel (16) der Oberflächeneinfluss im Dauerfestigkeitsbereich nach [54] übernommen. Hiernach ergeben sich teilweise etwas geringere Korrekturfaktoren, jedoch eine bessere Anpassung an die Lebensdauercurven für Schweißverbindungen.

Dehnungs- sowie spannungsgesteuerte Ermüdungsversuche im Zeitfestigkeitsgebiet zeigen, dass der Oberflächeneinfluss mit abnehmender Lastspielzahl kleiner wird und im Bereich unterhalb von ca. 10^2 Lastspielen nicht mehr vorhanden ist [6, 11, 36 bis 38]. Ausgehend von diesen Untersuchungen wurde mit Formel (15) eine lineare Lastspielzahlabhängigkeit im doppeltlogarithmischen Maßstab postuliert.

Erläuterung zu Formeln (17) und (18)

Formel (18) basiert auf einer Literaturschau in [85] zur Problematik des Schwingfestigkeitsabfalls mit zunehmender Bauteilgröße. Mit Formel (17) wurde die gleiche Gesetzmäßigkeit der Lastspielzahlabhängigkeit wie nach (15) angenommen.

Erläuterung zu Formeln (19) bis (21)

Der Mittelspannungseinfluss auf die Schwingfestigkeit wurde bisher nach der Gerber-Formel berücksichtigt, die nach neueren Erkenntnissen die Festigkeitsabhängigkeit (R_m) nicht richtig wiedergibt und für Druckmittelspannungen nicht anwendbar ist. Mit Formeln (19) bis (21) werden deshalb Berechnungsvorschläge von Schütz/Haibach und Mertens [70] aufgegriffen, die diese Einflüsse wirklichkeitsnäher beschreiben.

Erläuterung zu Abschnitt 7.1.4.2

Wird an der höchstbeanspruchten Stelle des Bauteils die Streckgrenze überschritten, ist zu berücksichtigen, dass sich die Dehnung nicht mehr proportional zur Spannung verhält. Infolge der Spannungsumlagerung verringern sich die Mittelspannungen.

Im Bild A.1 dieses Anhangs ist für einen einachsigen Spannungszustand unter der vereinfachten Annahme eines ideal plastischen Werkstoffverhaltens dargestellt, wie die zu den elastisch gerechneten Hauptspannungen $\hat{\sigma}$ und $\hat{\sigma}$ zugehörige Mittelspannung $\bar{\sigma}$ im Falle $R_{p0,2/T^*} \leq 2 \sigma_{va} \leq 2 R_{p0,2/T^*}$ auf $\bar{\sigma}_{vr} = R_{p0,2/T^*} - \sigma_{va}$ reduziert wird (vgl. Formel (23) des AD 2000-Merkblattes). Im Falle $2 \sigma_{va} > 2 R_{p0,2/T^*}$ entspricht dem elastisch gerechneten Spannungszyklus ABA im Bild A.2 dieses Anhangs der Dehnungszyklus CDEFC. Damit wird $\bar{\sigma}_{vr} = 0$ (vgl. Abschnitt 6 des AD 2000-Merkblattes). Beim mehrachsigen Spannungszustand sind hierbei sinngemäß die Vergleichsspannungen zu betrachten.

Erläuterung zu Formel (24)

Die Formel (24) zur Berücksichtigung des Temperatureinflusses auf die Schwingfestigkeit entspricht Formel (15) in der bisherigen Ausgabe 3.90. Der Korrekturfaktor f_{T+} basiert im Wesentlichen auf den isothermischen Ermüdungsversuchen von *Wellinger/Luft* [21] sowie *Sautter* [7] und entspricht etwa der unteren Grenze des Streufeldes der Schwingfestigkeitsabminderung für unlegierte und niedriglegierte ferritische Walz- und Schmiedestähle im Bereich von ca. 10^2 bis 10^5 Lastspielen. Sie enthalten keine Einflüsse zeitabhängiger Verformung (Kriechen, Relaxation). Die bei ferritischen, besonders bei unlegierten Stählen im Temperaturbereich von ca. 250 °C bis 350 °C (Blaubruchgebiet) teilweise auftretende Erhöhung der Schwingfestigkeit [31] wurde hierbei nicht berücksichtigt.

Erläuterung zu Formel (25)

Die Auswertung zahlreicher Versuchsdaten von Dehnungs-Wechselversuchen für ungeschweißte austenitische Proben bei Raumtemperatur und Temperaturen bis 600 °C aus [69] hat gezeigt, dass für Austenite ein schwingfestigkeitsabmindernder Temperatureinflussfaktor entsprechend dem temperaturbedingten Abfall des E-Moduls in Rechnung gesetzt werden kann. Unter Berücksichtigung dieses Sachverhaltes wurde auf der Grundlage der E-Modulangaben für Austenite in [58] die Formel (25) abgeleitet.

Erläuterungen zu Abschnitt 7.2.1

Die Lebensdauerbeurteilung von Schweißverbindungen erfolgt nicht mehr wie bisher auf der Grundlage von Anrisslastspielzahlkurven für glatte Probestäbe und Schweißnahtkorrekturfaktoren f_K , sondern in Anlehnung an das europäische Stahlbau-Regelwerk Eurocode Nr. 3 [76]. Hiernach erfolgt die Lebensdauerbeurteilung von Schweißverbindungen nach normierten Wöhlerlinien, in denen die Schweißnahtkerbwirkung und der größtmögliche Einfluss von Schweiß-eigenspannungen bereits berücksichtigt sind (Nennspannungs-Wöhlerlinien).

Bild A.9 dieses Anhangs beschreibt nach diesem Code das Schema paralleler Wöhlerlinien, die stahlbautypischen Schweißverbindungen zugeordnet sind. Die Kurven sind nach der Normzahlreihe R 20 abgestuft; die Bezeichnung der Schweißnahtklassen entspricht dem Zahlenwert der Spannungsschwingbreite bei $2 \cdot 10^6$ Lastspielen. Die Dauerfestigkeit ist bei $N = 5 \cdot 10^6$ angesetzt. Für Schadensakkumulationsrechnungen sind die Wöhlerlinien mit verringerter Neigung bis zu einem Grenzwert $N = 10^8$ fortgesetzt.

Die Lebensdauerlinien basieren sowohl auf spannungsgesteuerten als auch dehnungsgesteuerten Versuchen, wobei die zulässigen Spannungen im Abstand der zweifachen logarithmischen Standardabweichung der Streuverteilung der Versuchsergebnisse von den Mittelwerten festgelegt sind und damit einer Überlebenswahrscheinlichkeit von $P_{\bar{U}} = 97,7\%$ entsprechen. Zur Größe der Standardabweichung von Anriss- oder Bruchlastspielzahlen sind Werte von $s_N = 0,22$ bis $0,29$ bekannt geworden, die im Bereich üblicher Streumaße $1/T_N = 3$ bis 6 liegen (vgl. Bild A.6 dieses Anhangs). Angaben zu den Standardabweichungen von Spannungsschwingbreiten im Dauerfestigkeitsbereich und Mittelwerten der Datenbasis werden bedauerlicherweise vermisst und müssen im Bedarfsfall als Erfahrungswert aus anderen Quellen übernommen werden [70].

Die Lebensdauerkurven nach Bild 12, Formel (27) und den Konstanten in Tafel 4 dieses Merkblattes sind aus dem Eurocode nach folgenden Gesichtspunkten abgeleitet worden: Die Schweißnaht-Gestaltungsgruppen K 0, K 1, K 2 und K 3 nach Tafel 5 wurden den Eurocode-Klassen 112, 90, 71 und 56 mit vergleichbaren Schweißnahtverbindungen zugeordnet.

Zwecks Anpassung an die bei Druckbehältern zugrunde gelegte übliche Überlebenswahrscheinlichkeit von $P_{\bar{U}} = 99,9$ bis $99,99\%$ ($P_A = 0,1\%$ bis $0,01\%$) wurden die Kurven im Zeitschwingfestigkeitsbereich um den Faktor 2,5 von der „Ecklastspielzahl“ $N = 5 \cdot 10^6$ als Übergang in den Dauerfestigkeitsbereich nach Eurocode auf die entsprechende Dauerfestigkeits-Lastspielzahl $N = 2 \cdot 10^6$ nach diesem Blatt unter Beibehaltung der Spannungsschwingbreiten bei $N = 5 \cdot 10^6$ nach Eurocode transformiert. Dieser Lastspielzahl-Abminderungsfaktor von 2,5 lässt sich ausgehend von einem mittleren Wert der o. a. Standardabweichungen $s_N = 0,25$ aus dem Zusammenhang zwischen Standardabweichung und Streumaß (vgl. Bild A.6 dieses Anhangs) sowie aus der Verknüpfung zwischen Sicherheitsbeiwert, Streumaß und Ausfallwahrscheinlichkeit (vgl. Bild A.5b dieses Anhangs) begründen.

Die nach o. a. Betrachtungen aus den Eurocode-Schweißnahtklassen 112, 90, 71 und 56 abgeleiteten Lebensdauerkurven für die Gestaltungsgruppen K 0, K 1, K 2 und K 3 verlaufen im Zeitfestigkeitsbereich nahezu deckungsgleich mit den Ermüdungskurven der Klassen 80, 63, 50 und 40, die u. a. von *Maddox* in CEN TC 54 WG C SG-Design Criteria, basierend auf Eurocode 3, vorgeschlagen wurden. Zwecks Konsistenz zu dieser CEN-Norm wurden die dort enthaltenen Wöhlerlinien-Konstanten für den Zeitfestigkeitsbereich als Konstanten B 1 in Tafel 4 übernommen.

Eine weitere Absenkung der zulässigen Spannungen bis zum Knickpunkt $5 \cdot 10^6$ Lastspiele wird nach den Untersuchungsergebnissen mehrerer deutscher Institute [71, 77] für nicht erforderlich und auch nicht praktikabel gehalten. Der Abknickpunkt in die Dauerfestigkeit wird wie bei ungeschweißten Bauteilen einheitlich auf $2 \cdot 10^6$ Lastspiele festgelegt.

Erläuterung zu Abschnitt 7.2.5

Aus Schwingfestigkeitsversuchen mit geschweißten Probestäben ist bekannt, dass durch Abarbeiten der Schweißraupen die Lebensdauer erhöht werden kann [16, 25, 27, 69, 88]. Die Versuchsergebnisse zeigen jedoch aufgrund von schwingfestigkeitsmindernden Schweißnahteinflüssen, die durch Nacharbeit nicht oder nur wenig beseitigt werden können (z. B. Werkstoffzusammensetzung, Nahtausbildung, Mikrofehler), eine starke Streuung der möglichen Erhöhung der Lebensdauer bzw. der Schwingfestigkeit. Eine Höherbewertung in die Klasse K 0 ist nur zulässig, wenn die Fehlerfreiheit von beidseitig blechen geschliffenen Nähten durch eine 100%ige zerstörungsfreie Prüfung nachgewiesen ist.

Erläuterung zu Abschnitt 7.2.6

Der schwingfestigkeitsabmindernde Einfluss der Bauteilgröße bei Schweißverbindungen (Exponent $Z = 4$) wurde aus dem Eurocode Nr. 3 übernommen.

Erläuterung zu Abschnitt 7.2.7

Die Lebensdauerkurven für Schweißverbindungen nach Abschnitt 7.2 decken den denkbar ungünstigsten Fall der Überlagerung von Last- und Schweißeigenstress ab, dass sich summarisch eine wirksame Oberspannung in Höhe der Streckgrenze einstellt. Folgerichtig muss aber auch in Ansatz gebracht werden dürfen, dass nach Spannungsarmglühen nur sehr geringe Schweißeigenstress vorliegen und nur Lastmittelspannungen wirksam sind. Basierend auf entsprechenden Versuchsergebnissen wird in [71, 78] empfohlen, im Dauerfestigkeitsbereich einen Bonus von 30 % in Rechnung zu setzen. Ausgehend von diesem maximalen Bonusfaktor 1,3 und in Anlehnung an die Lastspielzahlabhängigkeit des Lastmittelspannungs-Korrekturfaktors f_M als oberem Grenzwert möglicher Schweißeigenstress-Einflüsse wurde für den Korrekturfaktor f_M^* eine lineare Abhängigkeit von der Lastspielzahl im doppeltlogarithmischen Maßstab nach Formel (28a) pragmatisch festgelegt.

Damit in Formel (28) bei hochfesten Werkstoffen (z. B. $R_m = 1000 \text{ N/mm}^2$) trotz Spannungsarmglühen die zulässigen Werte nicht kleiner als ohne Glühen werden, wird der Wert f_M^* nach unten auf 1,0 begrenzt.

Erläuterung zu Formeln (29) bis (33)

Die in Abschnitt 8 angegebenen Formeln (29) bis (33) sind durch entsprechende Umformung der Formeln aus Abschnitt 7 entwickelt.

Erläuterung zu Formeln (34) und (37)

Die mit Formel (34) angegebene lineare Schädigungsakkumulationshypothese zur Überlagerung verschiedener Lastzyklen mit unterschiedlichen Beanspruchungszuständen sowohl im Temperaturbereich zeitunabhängiger als auch in dem zeitabhängiger Verformungen wurde aus Gründen der Plausibilität und der einfachen Handhabung gewählt. Eine allgemein gültige Aussage über die Zuverlässigkeit dieser Hypothese, besonders im Hochtemperaturbereich, kann z. z. noch nicht gemacht werden. Ihre Bedeutung bei der Lebensdauervorhersage liegt vielmehr in der Ermittlung eines „Warnzeitpunktes“, von dem ab gemäß den Festlegungen im Abschnitt 12 des Merkblattes besondere Prüfmaßnahmen durchzuführen sind.

Zur Berücksichtigung des Schädigungsanteils von Spannungsschwingbreiten unterhalb der Dauerfestigkeit sind in Anlehnung an die modifizierte lineare Schadensakkumulationshypothese nach *Haibach* [62] die zulässigen Spannungsschwingbreiten $2\sigma_a$ im Dauerfestigkeitsbereich durch fiktive Verlängerung der Lastspielzahlkurven bis 10^8 Lastspiele fortgesetzt.

Erläuterung zu Formel (35)

Formel (35) beschreibt den linearen Abfall der Lastspielzahlkurven im doppeltlogarithmischen Maßstab im Bereich $2 \cdot 10^6$ bis 10^8 Lastspielen. Die Formel ist aus (14) und $N = 2 \cdot 10^6$ unter Berücksichtigung einer Kurvenneigung $m = 10$ abgeleitet, die aus der bisherigen Ausgabe 3.90 des AD-Merkblattes S 2 übernommen wurde.

Erläuterung zu Formel (36)

Bei Schweißverbindungen wurde die Neigung der Lastspielzahlkurven für Schadensakkumulationsrechnung aus dem Eurocode mit $m = 5$ übernommen. Formel (36) ist sinngemäß aus (27) entwickelt. Die Berechnungskonstanten sind unter Berücksichtigung der Dauerfestigkeitswerte $N = 2 \cdot 10^6$ und $2\sigma_a = \text{konst.}$ nach Tafel 4 ermittelt.

Erläuterung zu Formel (39)

Nach Versuchsergebnissen in [87] liegen bei hochfesten Wasserstofftransportbehältern die Bruchlastspielzahlen gegenüber unteren Grenzkurven aus Referenzversuchen (Anriss) mit Öl um einen Faktor 6,5, nach anderen unveröffentlichten Ergebnissen gegenüber Laborluft um einen Faktor 10 niedriger. Der Anrissbeginn wird in [86] im Mittel zu 81 % der im Versuch erreichten Bruchlastspielzahlen angegeben. Statistische Auswertungen haben Streuspannen von $T_N = 1:3,5$ bis $1:4$ ergeben, die unter Einbezug von Risikobeiwerten wegen der relativ geringen Datenzahl (vgl. Anhang 2, Abschnitt 3) zu erforderlichen Sicherheitsabständen von $S_N = 8$ bis 10 gegenüber den Mittelwerten führen, wenn eine zulässige Ausfallwahrscheinlichkeit von $P_A = 0,01 \%$ unterstellt wird.

Die Bruch-Lebensdauerlinie (Mittelwerte) verläuft nahezu parallel zu einer auf die Festigkeitskennwerte der Prüflinge abgestimmten Walzhaut-Auslegungskurve nach Abschnitt 7.1 dieses AD 2000-Merkblattes und liegt geringfügig unterhalb der Auslegungskurve für Luftmedium. Hiernach ist es also statthaft, die Lebensdauerbeurteilung dieser Behälter auf der Grundlage der Vorgehensweise für Behälter ohne Medieneinfluss durchzuführen und die Lastspielzahlen über einen Abminderungsfaktor zu reduzieren. Die Größe dieses Faktors wird pragmatisch auf $f_N = 1/10$ festgelegt und entspricht nach derzeitigen Kenntnissen einer Anrissausfallwahrscheinlichkeit von ca. 0,1 %, die noch als akzeptabel angesehen wird.

Erläuterung zu Abschnitt 13.3

Für Schweißverbindungen aus Feinkornbaustählen unter Wasserstoffeinfluss liegen nur sehr wenige brauchbare und vergleichbare Versuchswerte aus [86] vor. Die formal nach statistischer Vorgehensweise berechneten Mittelwerte sind deshalb nur als grobe Anhaltswerte für 50 %-Werte einer größeren Grundgesamtheit zu werten.

Auffallend ist die flache Neigungscharakteristik der mittleren Anrisskurven gegenüber „Luft“-Kurven. Die Referenz-Versuchsdaten unter Luft mit Proben aus der gleichen Charge liegen nur wenig oberhalb einer entsprechenden Auslegungskurve für Schweißnahtklasse K 1 nach Abschnitt 7.2 dieses Merkblattes, woraus geschlossen werden kann, dass die Versuchswerte sowohl für Luft als auch für Wasserstoff dem unteren Bereich des Streufeldes für Stumpfnähte Klasse K 1 und die „Mittelwertkurve“ einer kleineren Ausfallwahrscheinlichkeit $P_A < 50\%$ zuzuordnen sind. Es erscheint deshalb gerechtfertigt, hierfür nur einen Sicherheitsabstand von 5 ($f_N = 1/5$) gegenüber den Versuchsmittelwerten in Rechnung zu setzen. Unter Bezugnahme auf eine Berechnung nach Abschnitt 8.2 lässt sich damit eine einfache Näherungsformel für den schwingfestigkeitsabmindernden Wasserstoffeinfluss für Werkstoffe mit Festigkeitsbeiwerten $K_{20} \leq 355 \text{ N/mm}^2$ (P355) gemäß der Formel (40) ableiten. Hiernach beginnt der schwingfestigkeitsabmindernde Einfluss von Druckwasserstoff oberhalb einer Vergleichsspannungsschwingbreite $2 \sigma_{va} = 215 \text{ N/mm}^2$.

Aus einigen vergleichbaren Versuchsergebnissen von Schweißproben aus P355 und P460 sowie aus vorliegenden Rissbefunden an Wasserstofflagerbehältern geht hervor, dass der höherfeste Feinkornbaustahl wasserstoffempfindlicher ist.

Eine Abminderung auf die Hälfte der für Stähle mit $K_{20} \leq 355 \text{ N/mm}^2$ berechneten Werte wird als realistisch angesehen.

Ein Vergleich der Versuchsdaten kerbfrei geschliffener Schweißproben aus P460 unter Wasserstoff- und Luftbedingungen lässt keine signifikanten Unterschiede zwischen Wasserstoff und Luft erkennen. Es ist deshalb sinnvoll, auch bei kerbfrei geschliffenen Nähten die Berechnung für Luftmedium gemäß Abschnitt 7.2.5 durchzuführen und die Lastspielzahl über einen Abminderungsfaktor f_N nach Formel (41) zu reduzieren, der unter Einbezug höherfester Feinkornbaustähle (z. B. P460) ausreichenden Sicherheitsabstand gewährleistet.

Weitere Einzelheiten siehe [92, 95].

Schrifttum

- [1] Technische Regeln für Dampfkessel; hier: TRD 301 Anlage 1 (8.96) „Berechnung auf Wechselbeanspruchung durch schwellenden Innendruck bzw. durch kombinierte Innendruck- und Temperaturänderungen“. Hrsg.: VdTÜV Essen; Carl Heymanns Verlag KG, Köln.
- [2] KTA-Regel 3201.2: „Komponenten des Primärkreises von Leichtwasserreaktoren, Teil: Auslegung, Konstruktion und Berechnung“, Ausgabe 1981.
- [3] *Dietmann, H., u. F. Baier*: Spannungszustand und Festigkeitsverhalten (Literaturauswertung); 2. Teil: Schwingende Beanspruchung. Techn.-wiss. Ber. MPA-Stuttgart (1971) H. 71-02.
- [4] *Zenner, H.*: Festigkeitsverhalten von schwingend beanspruchten Bauteilen mit schräger Kerbe in Abhängigkeit vom Beanspruchungszustand. Techn.-wiss. Ber. MPA-Stuttgart (1970) H. 70-01.
- [5] *Betz, U.*: Zur Rissbildung wechselbeanspruchter glatter Proben. Techn.-wiss. Ber. MPA-Stuttgart (1970) H. 70-02.
- [6] *Mall, G.*: Innendruckschwellverhalten von Hohlzylindern mit eingeschweißten Stutzen. Techn.-wiss. Ber. MPA-Stuttgart (1970) H. 70-03.
- [7] *Sautter, S.*: Der Einfluss von Temperatur, Dehnungsgeschwindigkeit und Haltezeit auf das Zeitfestigkeitsverhalten von Stählen. Techn.-wiss. Ber. MPA-Stuttgart (1971) H. 71-04.
- [8] *Friedrich, W.*: Festigkeitsberechnung einwandiger Balgkompensatoren. Techn.-wiss. Ber. MPA-Stuttgart (1973) H. 73-01.
- [9] *Maier, H.-J.*: Über den Einfluss einer Kaltverformung auf die Zeitfestigkeit biegewechselbeanspruchter glatter Proben. Techn.-wiss. Ber. MPA-Stuttgart (1975) H. 75-02.
- [10] *Grubisic, V., u. C. M. Sonsino*: Festigkeit von Hochdruckbehältern für neuartige Fertigungsverfahren. Forsch. Ber. Lab. f. Betriebsfest. Darmstadt (1979), Nr. FB-148.
- [11] *Grubisic, V., u. C. M. Sonsino*: Festigkeitsbeurteilung von Bauteilen aus Stahl im Bereich der Kurzzeitschwingfestigkeit. Forsch. Ber. Lab. f. Betriebsfest. Darmstadt (1975), Nr. TB-134.
- [12] *Saal, H.*: Der Einfluss von Formzahl und Spannungsverhältnis auf die Zeit- und Dauerfestigkeiten und Rissfortschreitungen bei Flachstäben aus St 52. Veröff. Inst. f. Statik u. Stahlbau der TH Darmstadt (1971) H. 17.
- [13] *Klee, St.*: Das zyklische Spannungs-Dehnungs- und Bruchverhalten verschiedener Stähle. Veröff. Inst. f. Statik u. Stahlbau der TH Darmstadt (1973) H. 22.
- [14] *Schütz, H.*: Schwingfestigkeit von Werkstoffen. VDI-Bericht Nr. 214, S. 45/47.
- [15] *Just, E.*: Beabsichtigte Einflüsse der Fertigungsverfahren auf das Dauerfestigkeitsverhalten von Stählen ohne Randschichtbehandlung. VDI-Bericht Nr. 214, S. 75/84.

- [16] *Broichhausen, J.*: Beeinflussung der Dauerhaltbarkeit von Konstruktionswerkstoffen und Werkstoffverbindungen durch konstruktive Kerben, Oberflächenkerben und metallurgische Kerben.
Fortschr.-Ber. VDI.Z., Reihe 1, Nr. 20.
- [17] *Schmidt, W.*: Werkstoffkennwerte bei Dauerfestigkeitsuntersuchungen.
DEW-Techn. Ber. 11 (1971), S. 8/21.
- [18] *Pomp, A., u. M. Hempel*: Wechselfestigkeit und Kerbwirkungszahlen von unlegierten und legierten Baustählen bei +20 °C und -78 °C.
Archiv Eisenhüttenw. **21** (1950) H. 1/2, S. 53/66.
- [19] *Hempel, M.*: Dauerfestigkeit von unterschiedlich erschmolzenen Baustählen USt 37-2, St 37.3 und St 52.3.
Archiv Eisenhüttenw. **43** (1972) H. 5, S. 439/46.
- [20] *Wellinger, K., u. K. Kußmaul*: Festigkeitsverhalten von Stählen bei wechselnder überelastischer Beanspruchung.
Mitt. VGB (1964) H. 92, S. 342/57.
- [21] *Wellinger, K., u. G. Luft*: Wechselverformungsverhalten von Stählen.
Mitt. VGB (1968) H. 1, S. 33/45.
- [22] *Degenkolbe, J., u. H. Dißelmeyer*: Schwingverhalten eines hochfesten wasservergüteten Chrom-Molybdän-Zirkonium-legierten Feinkornbaustahles mit 700 N/mm² Mindeststreckgrenze im geschweißten und ungeschweißten Zustand.
Schweißen u. Schneiden **25** (1973) H. 3, S. 205/07.
- [23] *Haibach, E.*: Schwingfestigkeit hochfester Feinkornbaustähle im geschweißten Zustand.
Schweißen u. Schneiden **27** (1975) H. 5, S. 179/81.
- [24] *Wellinger, F., u. M. Liebrich*: Kerbempfindlichkeit von Stählen im Gebiet der Zeitfestigkeit.
Z. Konstruktion **20** (1968) H. 3, S. 81/89.
- [25] Interne Versuchsberichte der Firma Thyssen Niederrhein AG.
- [26] *Hempel, M.*: Dauerfestigkeit von Stahl. Merkblatt Nr. 457d. Beratungsstelle f. Stahlverwendung, Düsseldorf.
- [27] *Hempel, M.*: Zug-Druck-Wechselfestigkeit ungekerbter und gekerbter Proben warmfester Werkstoffe im Temperaturbereich von 500 bis 700 °C.
Archiv Eisenhüttenw. **43** (1972) H. 6, S. 479/88.
- [28] *Wellinger, K., u. R. Idler*: Der Einfluss wechselnder Temperaturen auf das Zeitfestigkeitsverhalten von Stählen.
Archiv Eisenhüttenw. **48** (1977) H. 6, S. 347/52.
- [29] *Schieferstein, U., u. W. Wiemann*: Anwendung von Bemessungsregeln auf Bauteile mit gleichzeitiger Kriech- und Dehnungswechsel-Beanspruchung.
Chem.-Ing. Tech. **49** (1977) Nr. 9, S. 726/37.
- [30] *Zenner, H.*: Niedriglastwechselermüdung bei hohen Temperaturen.
VDI-Berichte Nr. 302 (1977), S. 29/44.
- [31] VDI-Richtlinie 2227, Entwurf 1974 „Festigkeit bei wiederholter Beanspruchung“.
- [32] *Siebel, E., u. M. Gaier*: Untersuchungen über den Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit auf die Dauerschwingfestigkeit metallischer Bauteile.
VDI-Zeitschr. **98** (1956), S. 1715/23.
- [33] *Hänchen, R., u. H. Decker*: Neue Festigkeitsberechnung für den Maschinenbau.
Carl Hanser-Verlag, München 1967.
- [34] *Wellinger-Dietmann*: Festigkeitsberechnung.
Alfred Körner-Verlag, 3. Auflage (1976).
- [35] *Buch, A.*: Einige Bemerkungen über das Einflussfaktorenverfahren zur Berechnung der Dauerfestigkeit von Maschinenteilen.
Materialprüf. **19** (1976) Nr. 6, S. 194/99.
- [36] Unveröffentlichte Diskussionsbeiträge der MPA-Stuttgart zur Aufstellung der TRD 301 Anlage 1 (1974).
- [37] *Zirn, R.*: Schwingfestigkeitsverhalten geschweißter Rohrknotenpunkte von Rohrlaschenverbindungen.
Techn.-wiss. Bericht MPA-Stuttgart (1975) H. 75-01.
- [38] *Kloos, K.-H.*: Einfluss des Oberflächenzustandes und der Probengröße auf die Schwingfestigkeitseigenschaften.
VDI-Bericht Nr. 268 (1976), S. 63/76.
- [39] *Haibach, E.*: Schwingfestigkeitsverhalten von Schweißverbindungen.
VDI-Bericht Nr. 268 (1976), S. 179/92.
- [40] *Nowak, B., u. a.*: Ein Vorschlag zur Schwingfestigkeitsbemessung von Bauteilen aus hochfesten Baustählen.
Der Stahlbau **44** (1975) H. 9, S. 257/68 u. H. 10, S. 306/12.

- [41] DIN 15018-1 „Krane, Grundsätze für Stahltragwerke, Berechnung“, Ausg. 4.74.
- [42] DAST-Richtlinie 011 „Hochfeste schweißgeeignete Feinkornbaustähle StE 460 und StE 690 [Anmerkung des Herausgebers: heute P460 und P690], Anwendung für Stahlbauten“, Ausg. Febr. 1979; Deutscher Ausschuss für Stahlbau, Köln.
- [43] *Issler, L.*: Festigkeitsverhalten metallischer Werkstoffe bei mehrachsiger phasenverschobener Schwingbeanspruchung.
Diss. Uni. Stuttgart 1973.
- [44] *El-Magd, E.*, u. *S. Mielke*: Dauerfestigkeit bei überlagerter zweiachsiger statischer Beanspruchung.
Z. Konstruktion **29** (1977) H. 7, S. 253/57.
- [45] *Nowak, B., Saal, H.*, u. *T. Seeger*: Ein Vorschlag zur Schwingfestigkeitsbemessung von Bauteilen aus hochfesten Baustählen.
Der Stahlbau **44** (1975), S. 257/68.
- [46] *Troost, A.*, u. *E. El-Magd*: Allgemeine Formulierung der Schwingfestigkeitsamplitude in Haighscher Darstellung.
Materialprüf. **17** (1975) Nr. 2, S. 47/49.
- [47] *Neuber, A.*: Über die Berücksichtigung der Spannungskonzentration bei Festigkeitsberechnungen.
Konstruktion **20** (1968) H. 7, S. 245/51.
- [48] *Gorsitzke, B.*: Betriebsfestigkeitsuntersuchungen zur Lebensdauerabschätzung; Bericht über das Kolloquium „Sicherheitstechnische Bauteilbegutachtung“ des TÜV Rheinland am 27.05.1975 in Köln-Poll.
Verlag TÜV Rheinland GmbH, S. 77/93.
- [49] *Krägeloh, E.*: Überlagerung von thermischer und mechanischer Beanspruchung bei Stählen – Einfluss von Kerben und Schweißungen.
VDI-Bericht Nr. 301 (1977), S. 45/52.
- [50] *Kloos, K.-H.*: Einfluss des Oberflächenzustandes und der Probengröße auf die Schwingfestigkeitseigenschaften.
VDI-Bericht Nr. 268 (1976), S. 63/76.
- [51] *Tauscher, H.*: Dauerfestigkeit von Stahl und Gusseisen.
VEB Fachbuchverlag Leipzig (1969).
- [52] *Haibach, E.*: Dauerfestigkeit von Schweißverbindungen bei Grenzlastspielzahlen größer als $2 \cdot 10^6$.
Archiv Eisenhüttenw. **42** (1971) H. 12, S. 901/08.
- [53] Fachausschussbericht 5.016: „Höhere Zuverlässigkeit im Schwermaschinenbau (Beitrag der Betriebsfestigkeit für die Verfügbarkeit von Hüttenwerksanlagen)“.
Verein Deutscher Eisenhüttenleute (VDEh) Düsseldorf, Ausschuss für Anlagentechnik, Gemeinschaftsausschuss Betriebsfestigkeit, 1974.
- [54] Bericht der Arbeitsgemeinschaft Betriebsfestigkeit beim VDEh Nr. ABF 19: „Leitfaden für eine Betriebsfestigkeitsberechnung“.
Verlag Stahleisen mbH, Düsseldorf 1985, 2. Auflage.
- [55] *Haibach, E., Ostermann, H.*, u. *H.-G. Köbler*: Abdecken des Risikos aus den Zufälligkeiten weniger Schwingfestigkeitsversuche.
Lab. f. Betriebsfest. Darmstadt, TM Nr. 68/73.
- [56] *Uebing, D.*, u. *P. Jaeger*: Bedeutung der Druckprüfung und des Sicherheitsbeiwertes für die Lebensdauer von Rohr-Fernleitungen.
3 R international, H. 3 (1973), S. 137/39.
- [57] *Uebing, D.*: Neue Wege der Sicherheitsbetrachtung bei Pipelinesystemen.
3 R international, H. 1 (1976), S. 7/10.
- [58] *Richter, F.*: Physikalische Eigenschaften von Stählen und ihre Temperaturabhängigkeit. Stahleisen-Sonderbericht Heft 10.
Verlag Stahleisen mbH, Düsseldorf 1983.
- [59] *Dengel, D.*: Einige grundlegende Gesichtspunkte für die Planung und Auswertung von Dauerschwingversuchen.
Materialprüfung **13** (1971) Nr. 5, S. 145/80.
- [60] DIN 50100 „Dauerschwingversuch“, Ausg. 2.78.
- [61] VDI-Richtlinie 2227: „Festigkeit bei wiederholter Beanspruchung; Zeit- und Dauerfestigkeit metallischer Werkstoffe, insbesondere von Stählen“, Entwurf 4.74.
- [62] *Haibach, E.*: Modifizierte lineare Schadens-Akkumulations-Hypothese zur Berücksichtigung des Dauerfestigkeitsabfalls mit fortschreitender Schädigung.
Lab. f. Betriebsfest. Darmstadt, TM Nr. 50/70.

- [63] *Neuber, H.*: Theory of Stress Concentration for Shear Strained Prismatical Bodies with Arbitrary Non-Linear Stress-Strain Law.
Trans. ASME, J. of. Appl. Mech. 1969, S. 544/50.
- [64] *Saal, H.*: Näherungsformeln für die Dehnungsformzahl.
Z. Materialprüf. **17** (1975) Nr. 11, S. 395/98.
- [65] *Kühnapfel, K.-F.*, u. *A. Troost*: Näherungslösungen zur rechnerischen Ermittlung von Kerbdehnungen und Kerbspannungen bei elastoplastischer Beanspruchung.
Z. Konstruktion **31** (1979) H. 5, S. 183/90.
- [66] *Dahl, W.*: Das Verhalten von Stahl bei schwingender Beanspruchung; Bericht aus Kontaktstudium „Werkstoffkunde Eisen und Stahl III“.
Verlag Stahleisen mbH, Düsseldorf 1978.
- [67] *Hoffmann, G.*, u. *F. Huba*: Sichere Dimensionierung geschweißter Radiallüfter.
VDI-Zeitschr. **122** (1980) Nr. 5, S. 177/81.
- [68] *Schütz, W.* u. a.: Berechnung von Wöhlerlinien für Bauteile aus Stahl, Stahlguss und Grauguss – Synthetische Wöhlerlinien. VDEh-Arbeitsgemeinschaft Betriebsfestigkeit, Bericht Nr. ABF 11, Düsseldorf (1983).
- [69] *Boller, Chr.*, u. *T. Seeger*: Materials Data for Cyclic Loading; Part A, B, C, D u. E. Elsevier 1987.
- [70] *Haibach, E.*: Betriebsfestigkeit. Verfahren und Daten zur Bauteilberechnung.
VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf 1989.
- [71] *Olivier, R.*, u. *W. Ritter*: Wöhlerlinienkatalog für Schweißverbindungen aus Baustählen; Teil 1 bis 5.
Deutscher Verlag für Schweißtechnik (DVS) GmbH, Düsseldorf 1979.
- [72] *Gurney, T. R.*, u. *S. J. Maddox*: A re-analysis of fatigue data for welded joints in steel.
Welding Research International, Volume 3 (1973) Nr. 4.
- [73] *Maddox, S. J.*: Third Draft (June 1994) of proposed detailed Fatigue Assessment Method based on Draft Euro-code 3. CEN TC 54 WG C SG-DC.
- [74] British Standard BS 5500/1994: Specification for unfired fusion welded pressure vessels.
- [75] British Standard BS 7608/1993: Code of practice for Fatigue design and assessment of steel structures.
- [76] Eurocode Nr. 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten. Deutsche Fassung der europäischen Vornorm ENV 1993-1-1.
- [77] *Seeger, T.*, u. a.: Zulässige Spannungen für den Betriebsfestigkeitsnachweis bei wetterfesten Baustählen nach sechsjähriger Bewitterung.
Z. Stahlbau **60** (1991) H. 11.
- [78] *Seeger, T.*, u. *R. Olivier*: Neigung und Abknickpunkt der Wöhlerlinie von schubbeanspruchten Kehlnähten.
Z. Stahlbau **61** (1992), H. 5.
- [79] *Autrosson, B.*, u. a.: Simplified Elastoplastic Fatigue Analysis.
Int. J. Pres. Ves. & Piping **37** (1989).
- [80] *Grandemange, J. M.*, u. a.: Corrections de plasticité dans les analyses de fatigue.
AFIAP-Conference, October 1992, Vol. 2, 109.
- [81] *Hübel, H.*: Plastic Strain Concentration in a Cylindrical Shell Subjected to an Axial or a Radial Temperature Gradient.
Transactions of the ASME, Vol. 109, Mai 1987.
- [82] *Hübel, H.*: Erhöhungsfaktor K_e zur Ermittlung plastischer Dehnungen aus elastischer Berechnung.
Z. TÜ Bd. **35** (1994) Nr. 6.
- [83] *Sonsino, C. M.*, u. *D. Hanewinkel*: Schwingfeste Bauteilbemessung mit höherfesten Stählen. Teil 1: Hinweise zu Konstruktion und Bemessung
Z. Stahl u. Eisen **112** (1992) Nr. 1.
- [84] *Dittmar, S.*: Lebensdauernachweise nach deutschen Regelwerken für druckbelastete Bauteile; Vorgehensweise, Lücken, Abhilfemaßnahmen.
Vortrag 18. MPA-Seminar, Oktober 1992.
- [85] *Bucak, Ö.*: Ermüdung von Hohlprofilknoten.
Dissertation Univers. Karlsruhe, Fak. f. Bauing.- u. Vermessungswesen, 1990.
- [86] *Kerkhoff, H.*, u. a.: Untersuchungen zur wasserstoffinduzierten Rissbildung im Schweißnahtbereich von Feinkornbaustahl bei low-cycle-Beanspruchung unter dem Einfluss von Druckwasserstoff.
VdTÜV-Forschungsvorhaben Nr. 250, Schlussbericht SB 2000/85, TÜV Rheinland 1990.

- [87] *Schlegel, D.*, u. a.: Sicherheitstechnisches Gutachten zum Betrieb von Wasserstofftransportbehältern und -Druckgasflaschen.
TÜV Rheinland 1981.
- [88] *Maddox, S. J.*: Fatigue Aspects of Pressure Vessel Design. Auszug aus: Pressure Vessel Design Philosophy; a short Course.
Univ. Strathclyde, 1992.
- [89] *Niemi, E.*: Recommendations Concerning Stress Determination for Fatigue Analysis of Welded Components.
IIW Doc. XIII-1458-92, Version 15.08.1994.
- [90] *Radaj, D.*, *H. D. Gerlach* u. *B. Gorsitzke*: Experimentell-rechnerischer Kerbspannungsnachweis für eine geschweißte Kesselkonstruktion.
Z. Konstruktion **40** (1988), H. 11, S. 447/452.
- [91] *Gorsitzke, B.*: Vorhersage der Ermüdungsfestigkeit druckführender Komponenten im Energie- und Chemieanlagenbau; Teil 1 u. Teil 2.
Z. Tü Bd. **30** (1989) Nr. 2 u. Nr. 3.
- [92] *Gorsitzke, B.*: Neuere Berechnungsvorschriften zur Ermüdungsfestigkeit von Druckbehältern.
Z. Tü Bd. **36** (1995) Nr. 6 u. Nr. 7/8.
- [93] *Dietmann, H.*, u. *H. Kockelmann*: Verwendung der Gestaltänderungsenergiehypothese im Anwendungsbereich der KTA-Regeln.
VGB Kraftwerkstechnik **74** (1994), H. 6, S. 498/508.
- [94] *Iida, K.*: Application of hot spot strain to fatigue life prediction.
IIW-Doc. XIII-941-80.
- [95] *Gorsitzke, B.*: Erläuterungen zu den Neuausgaben der AD-Merkblätter S 1 und S 2 (1998) und ergänzende Hinweise – Empfehlungen für sinnngemäße Anwendung auf Bauteile außerhalb des Gültigkeitsbereiches dieser Blätter. Teil 1 u. Teil 2.
Z. Tü Bd. **40** (1999) Nr. 3, S. 20–25 u. Nr. 4, S. 43–48.

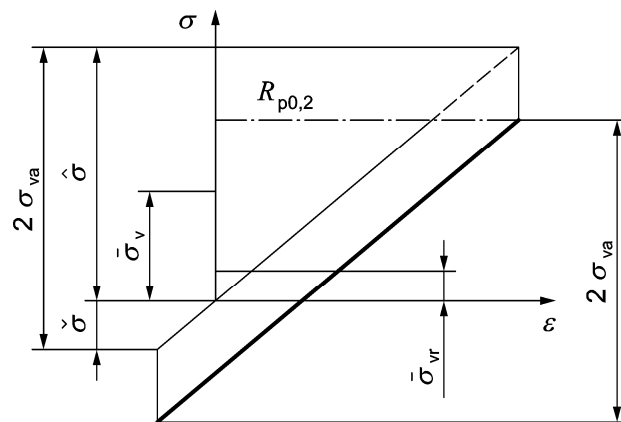


Bild A.1 — Reduzierte Mittelspannung $\bar{\sigma}_{vr}$ für $R_{p0,2} \leq 2 \sigma_{va} < 2 R_{p0,2}$

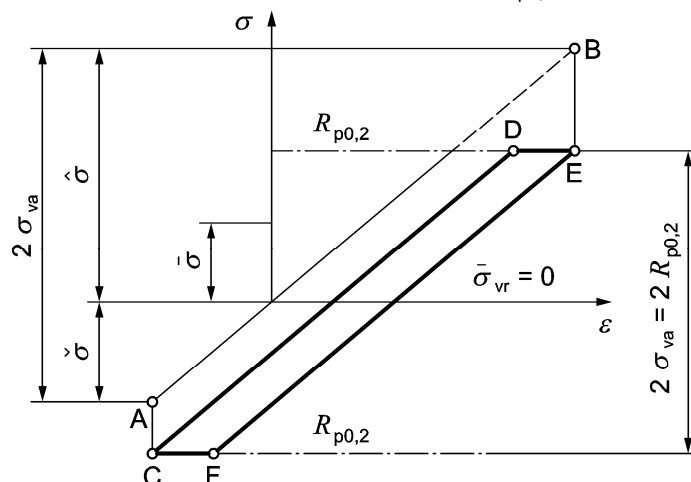


Bild A.2 — Reduzierte Mittelspannung $\bar{\sigma}_{vr} = 0$ für $2 \sigma_{va} \geq 2 R_{p0,2}$

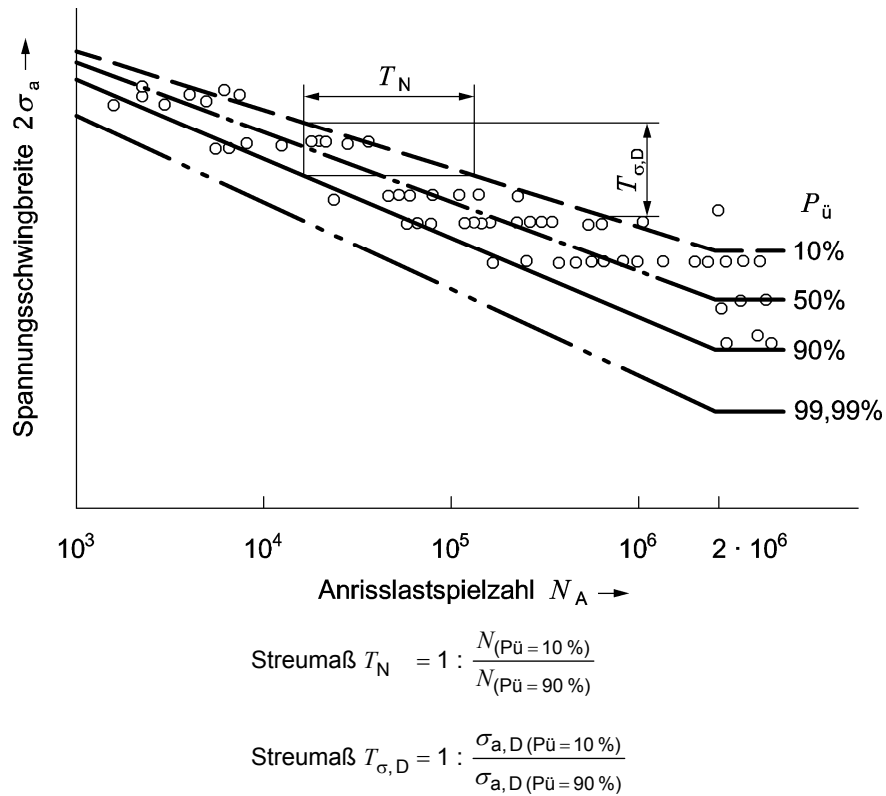


Bild A.3 — Beispiel einer statistisch abgesicherten Bauteil-Wöhlerkurve und Streubereiche (schematisch)

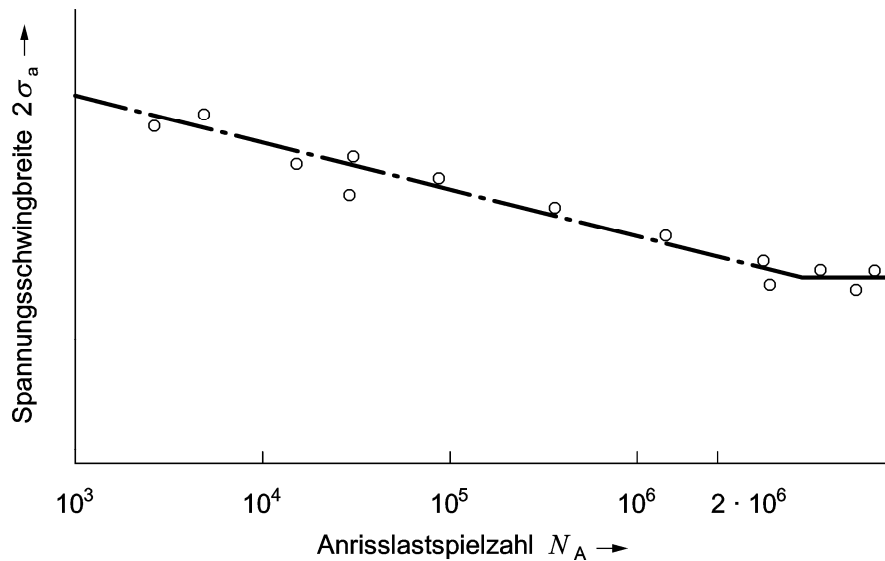


Bild A.4 — Beispiel einer statistisch nicht abgesicherten Bauteil-Wöhlerkurve (schematisch)

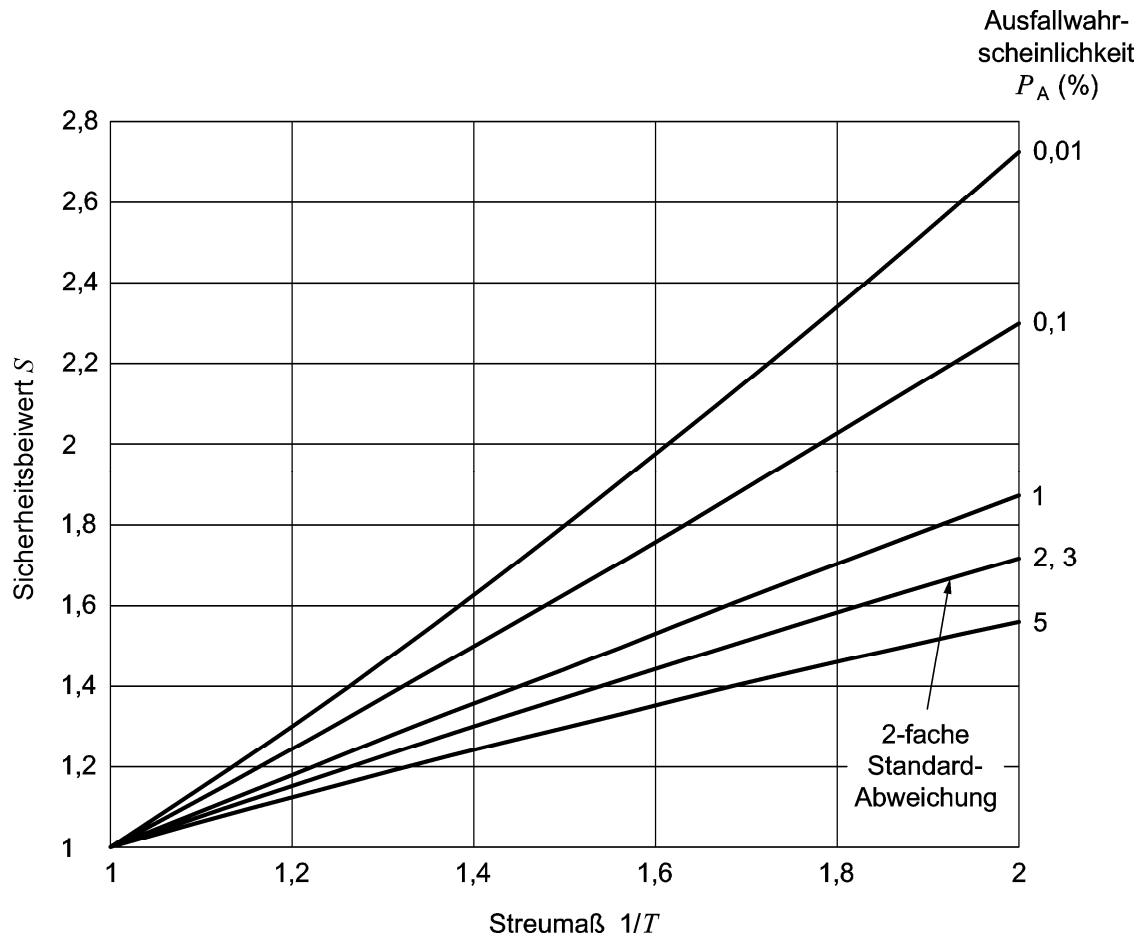


Bild A.5a — Bestimmung eines statistisch begründeten Sicherheitsbeiwertes bei bekanntem Streumaß

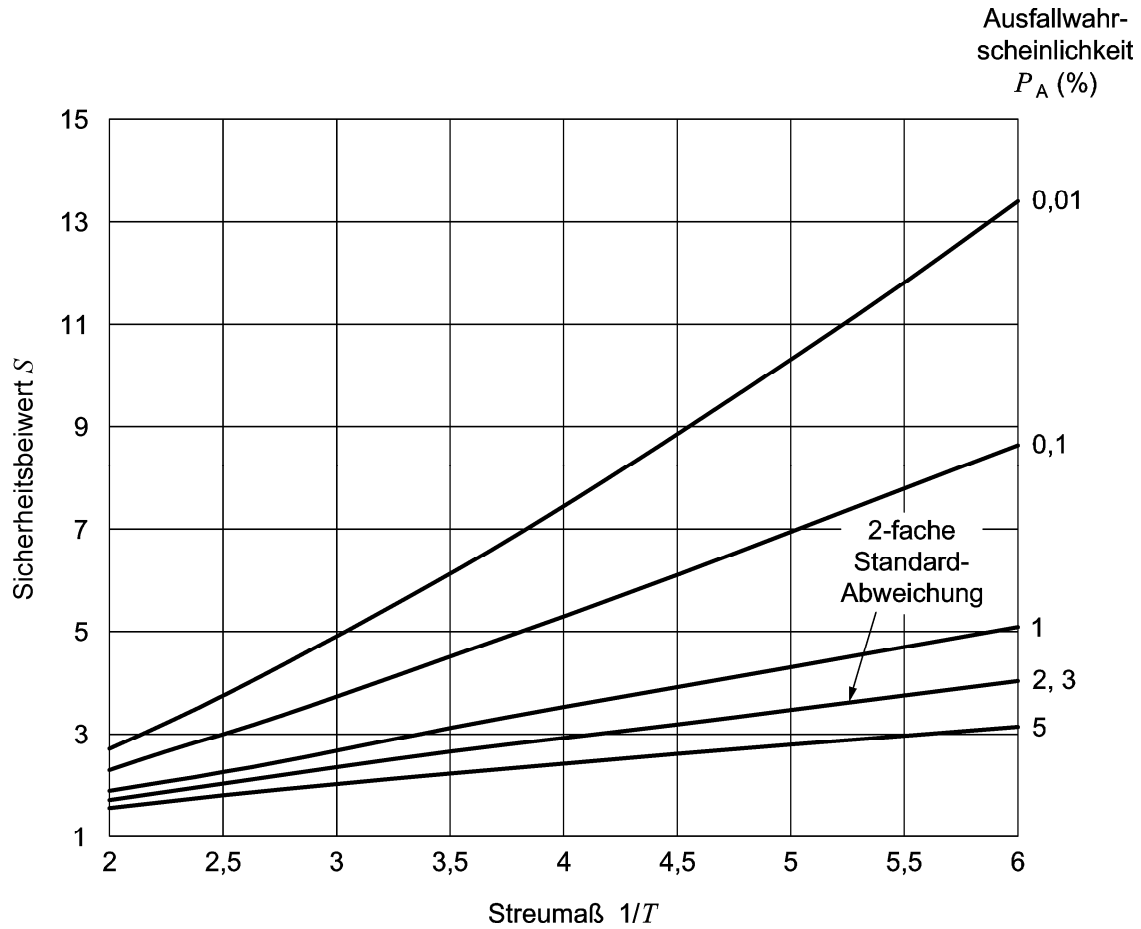


Bild A.5b — Bestimmung eines statistisch begründeten Sicherheitsbeiwertes bei bekanntem Streumaß

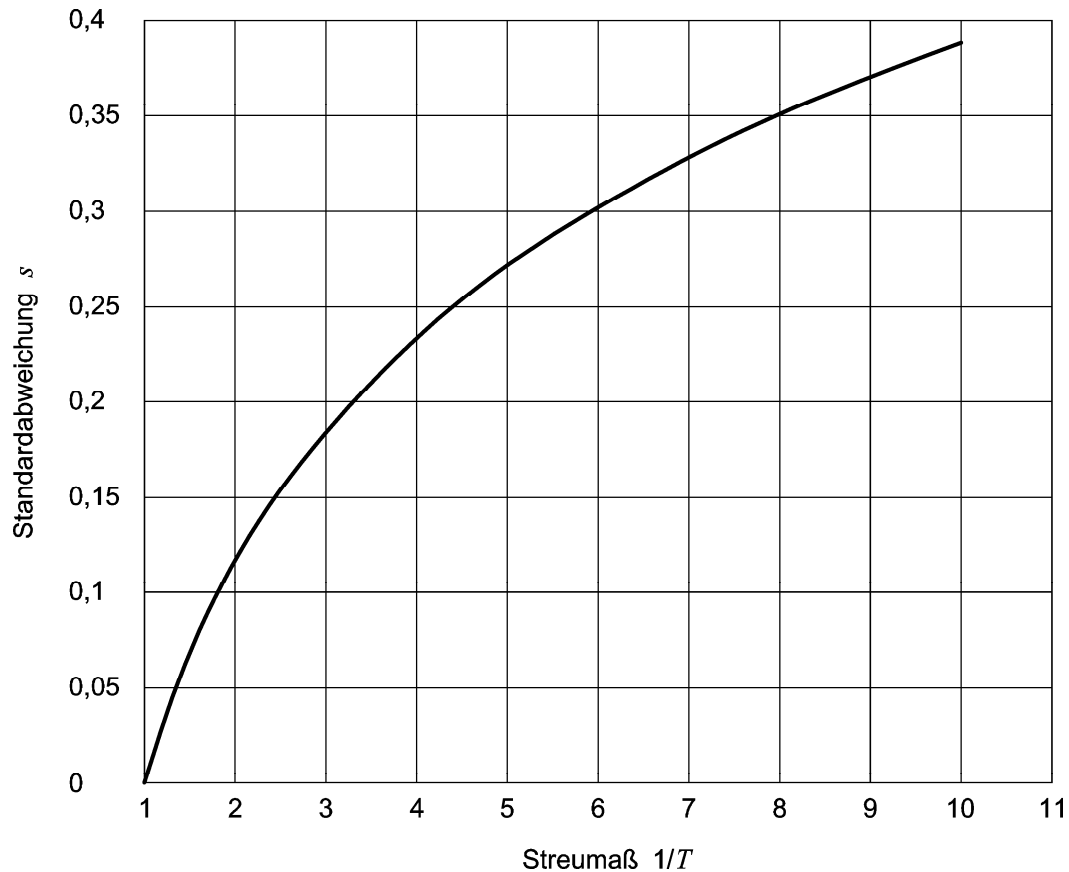


Bild A.6 — Zusammenhang zwischen Streumaß und Standardabweichung bei logarithmischer Normalverteilung

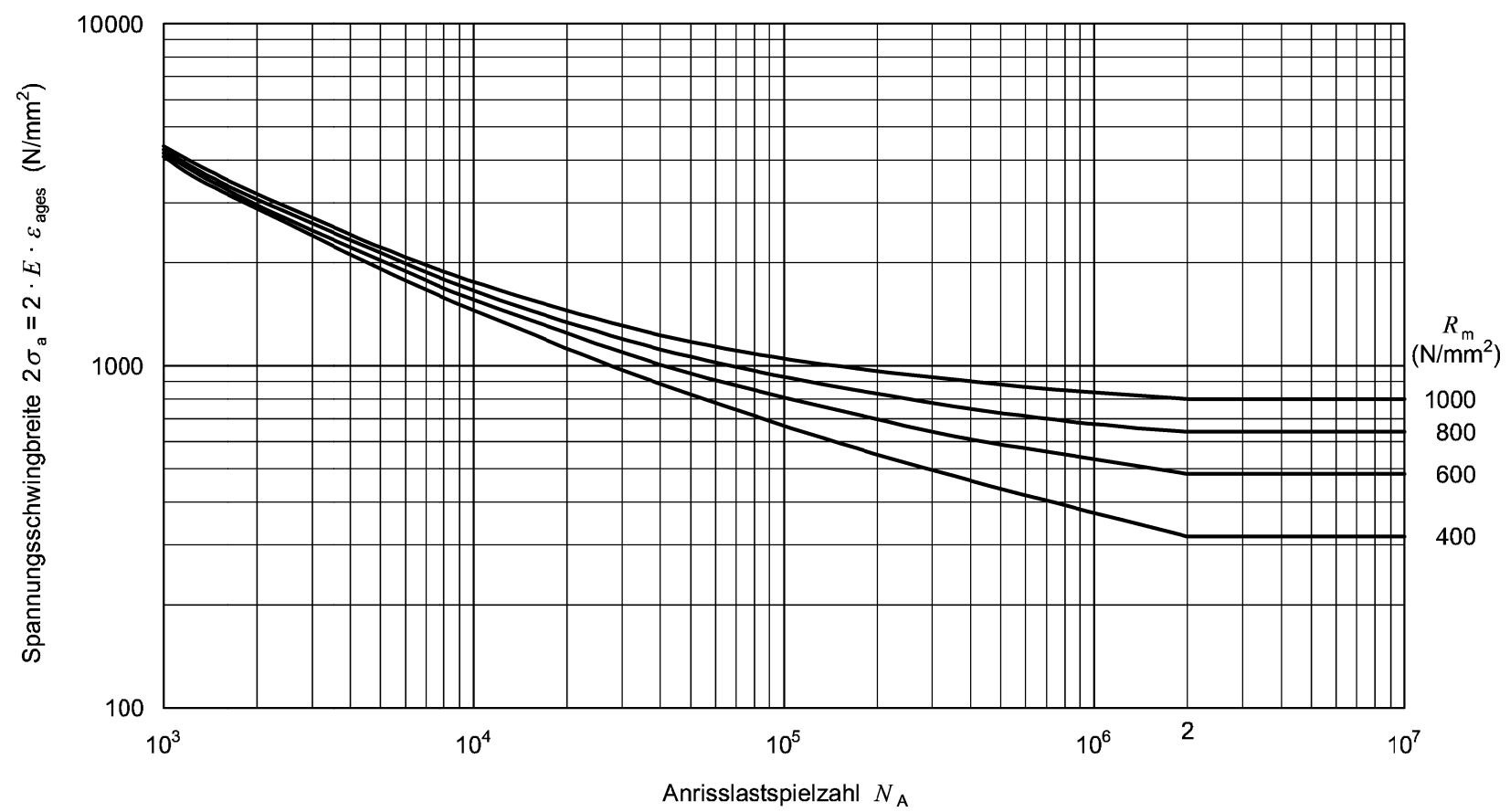


Bild A.7 — Anrisslastspielzahlen (Streuband-Mittelwert) in Abhängigkeit von der Spannungsschwingbreite für ungekerbte Probestäbe aus warmfesten ferritischen Walz- und Schmiedestählen bei Raumtemperatur und $\bar{\sigma} = 0$ (AD-Merkblatt S 2, Ausg. 3.90)

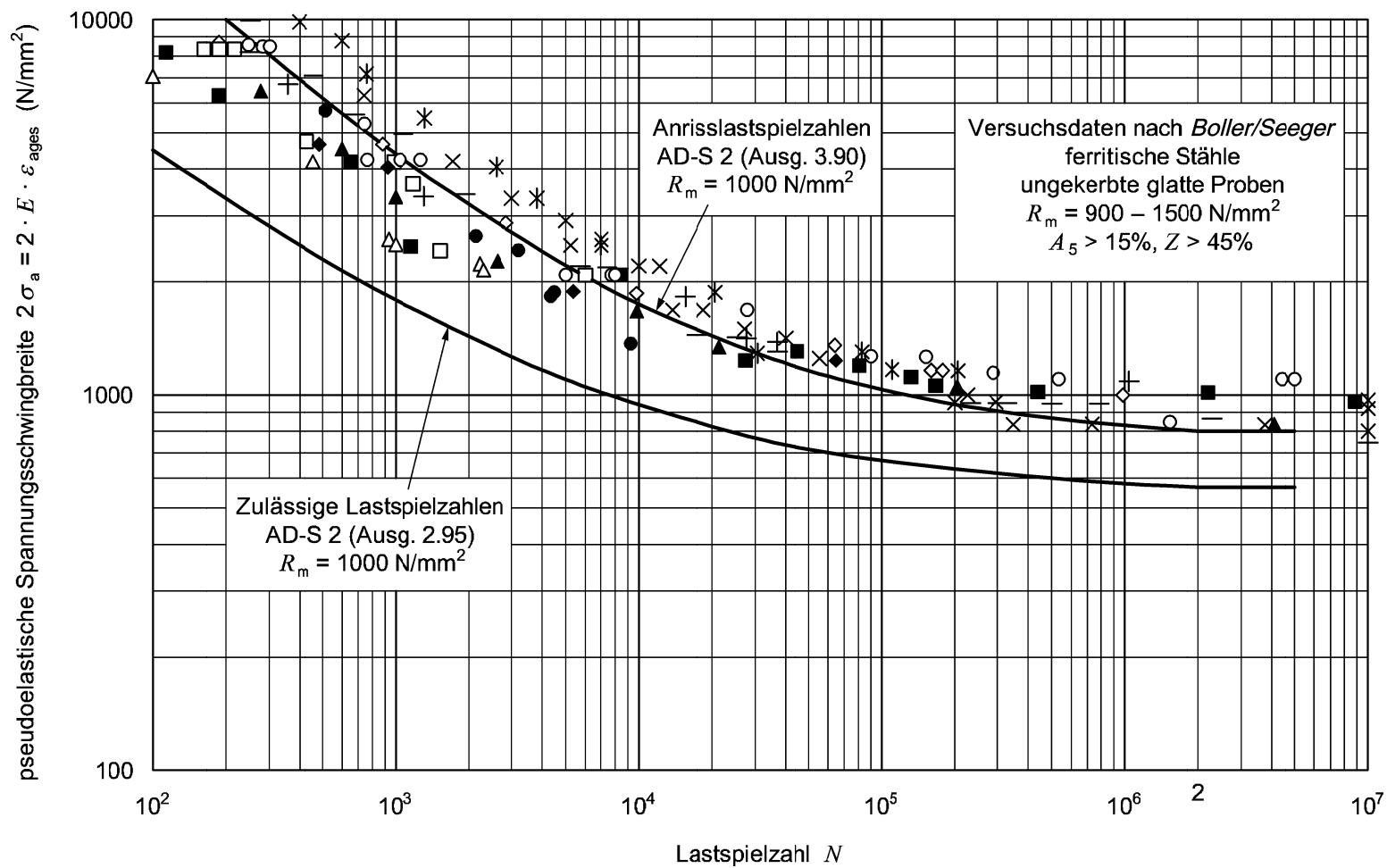


Bild A.8 — Vergleich zwischen Versuchsdaten und AD 2000-Merkblatt S 2

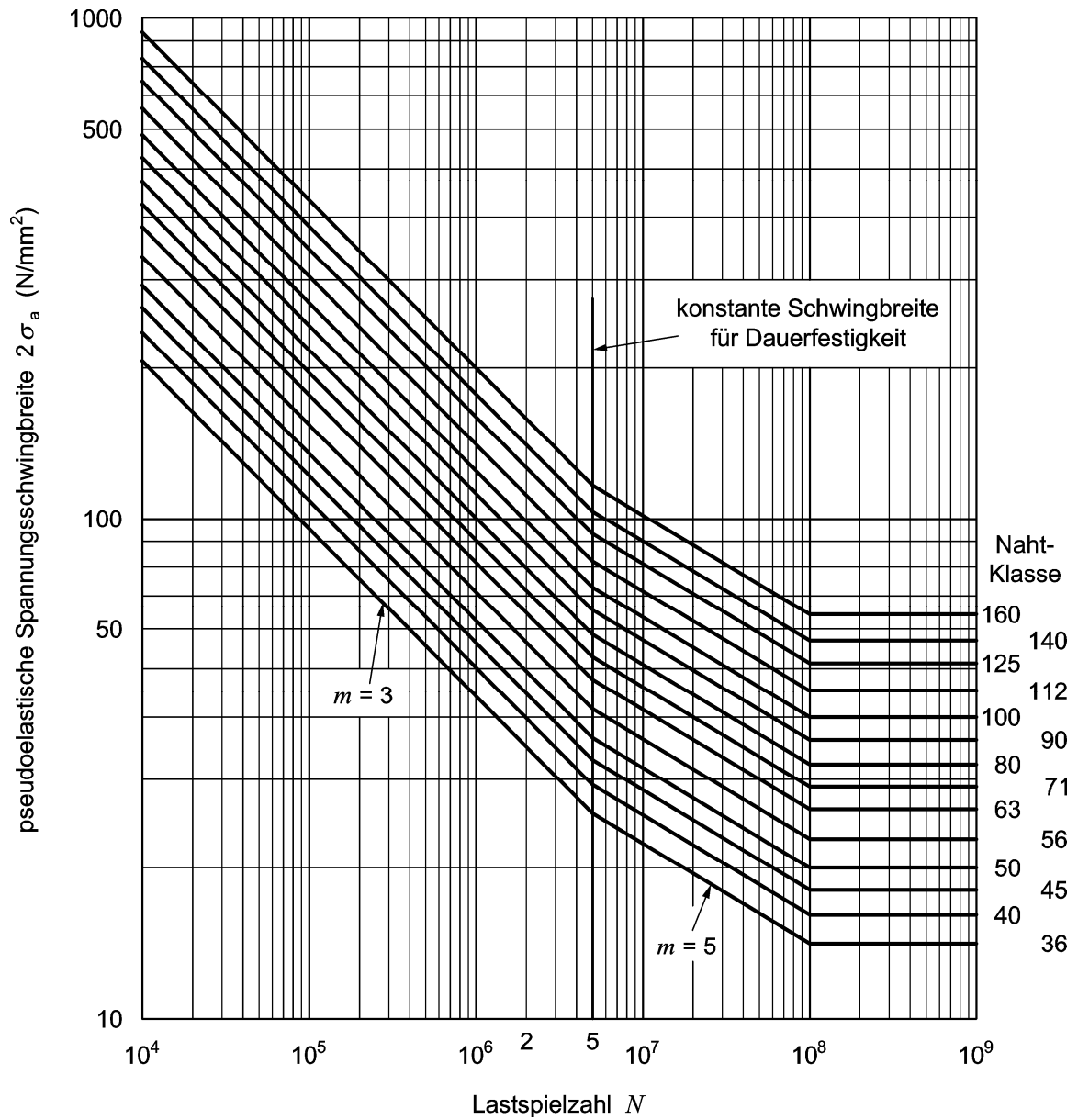


Bild A.9 — Ermüdungskurven für Schweißverbindungen unter Normalspannung nach Eurocode Nr. 3

Anhang 2 zum AD 2000-Merkblatt S 2

Hinweise zur Beurteilung von Wechselbeanspruchung aus Schwingfestigkeitsversuchen

1 Festlegung der Prüflast

Die Prüflasten sind auf die jeweiligen Betriebsbedingungen abzustimmen. Wird ein warmbetriebenes Bauteil bei Raumtemperatur geprüft, so muss bei der Festlegung der Prüflast die temperaturbedingte Schwingfestigkeitsverminderung des Werkstoffs berücksichtigt werden. Hierzu kann näherungsweise die $\frac{1}{f_{T^*}}$ -fache Betriebslast angesetzt werden.

Sollen die Versuchsergebnisse auf geometrisch ähnliche, jedoch größere Bauteile oder auf Bauteile mit größeren Oberflächenrauheiten übertragen werden, sind ggf. Größen- und Oberflächeneinfluss bei der Prüflast zu berücksichtigen. Bei Schwingfestigkeitsversuchen im Bereich höherer Lastspielzahlen (etwa oberhalb 10^5) ist über die Ermittlung der Anrisslastspielzahl hinaus mit der 1,5fachen auf die Betriebsbedingungen abgestimmten Prüflast mit einer Prüflastspielzahl gleich der Betriebslastspielzahl zu prüfen, um die Spannungssicherheit $S = 1,5$ nach Abschnitt 7.1.1 dieses Merkblattes nachzuweisen.

2 Ermittlung einer Bauteil-Wöhlerkurve

Soll für ein Bauteil die zulässige Spannungs- oder Betriebslast-Schwingbreite für verschiedene Betriebslastspielzahlen aufgenommen werden, ist bei der Aufstellung des Versuchsprogramms zu berücksichtigen, dass die Streuung von Schwingfestigkeits-Wöhlerkurven im Allgemeinen sehr groß ist.

Zur quantitativen Erfassung dieser Streuung mit Hilfe statistischer Auswertungsmethoden muss das Streuband der Lebensdauerverteilung durch hinreichend viele Versuchspunkte belegt sein, wie im Bild A.3 des Anhangs 1 schematisch dargestellt ist. Auf mehreren Belastungshorizonten sollten mindestens sieben bis acht Bauteile geprüft werden, um für die jeweilige Prüflasthöhe eine statistische Auswertung hinsichtlich der Ausfallwahrscheinlichkeit durchführen zu können. Eine Belegung von Bauteil-Wöhlerkurven, wie in Bild A.4 des Anhangs 1 schematisch dargestellt, kann aufgrund zufallsbedingter Lage der Messpunkte zu keiner Aussage über die Streuung führen. Die durch die Punkte, evtl. durch Ausgleichsrechnungen gezogene „Mittelwert“-Kurve kann bestenfalls mit einer Überlebenswahrscheinlichkeit von $P_{\bar{u}} = 50 \%$ bewertet werden.

Bei Schwingfestigkeitsversuchen im Dauerfestigkeitsbereich oder bei Berücksichtigung eines Betriebslastkollektivs (Betriebsfestigkeitsversuch) wird es ratsam sein, wegen der zu beachtenden Prüftechnik noch weiteres Schrifttum heranzuziehen [59 bis 61].

3 Abschätzung des Risikos bei nur wenigen Versuchsergebnissen

In vielen Fällen ist zur Beurteilung eines Bauteils auf Wechselbeanspruchung ein rechnerischer oder experimenteller Nachweis nur für eine Belastungshöhe ausreichend, so dass bei Schwingfestigkeitsversuchen auf die aufwändige Ermittlung einer Bauteil-Lebensdauerkurve verzichtet werden kann. Liegen dann aber noch die beim Versuch ermittelten Anrisslastspielzahlen von nur wenigen Bauteilen derselben Größe vor, kann nicht davon ausgegangen werden, dass der Mittelwert aus diesen wenigen Einzelergebnissen mit dem Mittelwert aller übrigen nichtgeprüften gleichartigen Bauteile (z. B. einer Baureihe) übereinstimmt.

Es besteht die Gefahr, dass aufgrund zufällig sehr günstiger Versuchsergebnisse die Schwingfestigkeits-Sicherheiten überschätzt werden. Über die auf den Mittelwert der Versuchsergebnisse N_{Versuch} bezogene Lastspielsicherheit $S_L = 10$ hinaus wird deshalb empfohlen, einen Risiko-Beiwert j_N [55] zu berücksichtigen, der das Risiko einer Fehleinschätzung aufgrund zufallsbedingter überdurchschnittlicher Ergebnisse abgrenzt.

Unter der Voraussetzung Gauß'scher Normalverteilung für die Streuung der Anrisslastspielzahlen und auf der Basis einer statistischen Sicherheit von 95 % kann der Risiko-Beiwert j_N in Abhängigkeit von der Anzahl n der geprüften Bauteile (Anzahl der Prüfergebnisse) und von der zu erwartenden Streuspanne $1/T_N$ aus Bild A.10 dieses Anhangs entnommen oder aus

$$j_N = \left(\frac{1}{T_N} \right)^{\frac{1}{1,56\sqrt{n}}} \quad (1)$$

berechnet werden.

Die zulässige Lastspielzahl N_{zul} aus nur wenigen Ergebnissen, die für eine statistische Auswertung nicht ausreichen, ist dann zu ermitteln aus:

$$N_{\text{zul}} = \frac{\bar{N}_{\text{Versuch}}}{S_L \cdot j_N} \quad (2)$$

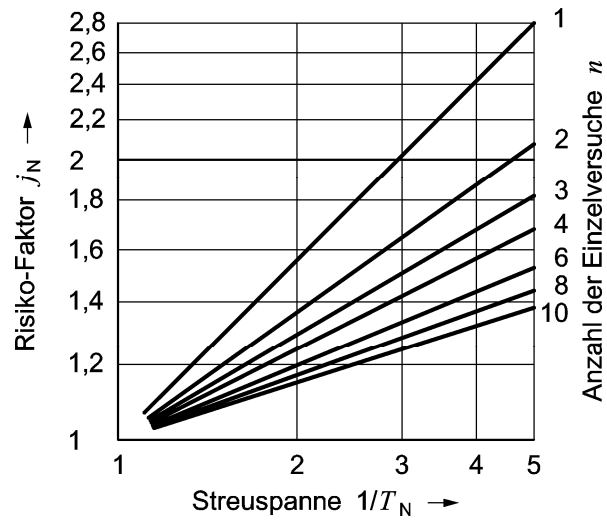


Bild A.10 — Risiko-Beiwert j_N auf der Basis einer statistischen Sicherheit von 95 %

Anhang 3 zum AD 2000-Merkblatt S 2

Hinweise zur Durchführung der Spannungsberechnung

Inhalt

- 1 Allgemeines
- 2 Formelzeichen und Einheiten
- 3 Empfehlungen für Spannungsnachweise
 - 3.1 Zylinderschale mit Ausschnitten
 - 3.2 Verbindung Zylinderschale – Versteifungsring
 - 3.3 Zylinderschale mit Formabweichungen
 - 3.4 Verbindung Zylinderschale – Kegelschale
 - 3.5 Gewölbter Boden mit Ausschnitten
 - 3.6 Verbindung Zylinderschale – Tellerboden mit Eckring oder verstärktem Flansch
 - 3.7 Verbindung Zylinderschale – unverankerter ebener Boden
 - 3.8 Runde unverankerte ebene Platten mit Ausschnitten
 - 3.9 Schraubverbindungen
- 4 Berechnungsbeispiel
- 5 Schrifttum

1 Allgemeines

Mit den nachstehenden Hinweisen werden einfache ingenieurmäßige Berechnungsmethoden angegeben, nach denen Struktur- und Kerbspannungen für häufig ausgeführte und lebensdauerrelevante Behälterstrukturen ermittelt werden können.

Die Berechnungsverfahren beschränken sich auf die alleinige Wirkung von innerem Überdruck. Zur Berechnung für andere Belastungsarten wie z. B. aus instationären Temperaturdehnungen wird z. B. auf die Quellen [1] und [4] hingewiesen.

Als Strukturspannung wird hier die nach technischen Tragwerkstheorien (z. B. Theorie der Schalen, Platten, Träger) berechnete Spannung auf der Oberfläche ohne Berücksichtigung der Kerbwirkung (Mikro-Kerben) bezeichnet. Die Strukturformzahl α_s drückt das Verhältnis der Strukturspannung σ_s zur Nennspannung σ_n aus, die in der Regel mit einer mittleren Spannung im Querschnitt einer betrachteten Stelle identisch ist. Die Kerbspannung σ_K ist die über die Strukturspannung hinausgehende maximale örtliche Spannung im Kerbgrund. Mit der Kerbformzahl α_K wird hier das Verhältnis von elastischer Kerbspannung σ_K zur Strukturspannung σ_s definiert. Für die Verknüpfung von Strukturformzahl und Kerbformzahl wird näherungsweise ein multiplikatives Überlagerungsgesetz angenommen, so dass gilt:

$$\sigma_K = \alpha_K \cdot \sigma_s = \alpha_K \cdot \alpha_s \cdot \sigma_n \quad (1)$$

Eine scharfe Abgrenzung zwischen Strukturspannung und Kerbspannung ist nicht immer möglich.

Bei der Beurteilung von Schweißnahtbereichen nach AD 2000-Merkblatt S 2, Abschnitt 7.2 ist die Schweißnahtkerbwirkung bereits in den Lastspielzahlkurven berücksichtigt. Im ungestörten Bereich ungeschweißter Bauteile entspricht α_K dem Oberflächen-Korrekturfaktor f_0 .

Bei scharfen Kerben tritt ein von der Spannungsverteilung und vom Werkstoff abhängiger dynamischer Kerbstützeffekt auf, der zu etwas abgeminderten Kerbspannungen als nach Formel (1) berechnet führt. Dieser Stützeffekt wird jedoch im Rahmen der hier angegebenen Näherungsberechnungen vernachlässigt.

Bei Berechnungen mit direkter Ermittlung der Vergleichsspannung (ohne Verwendung der Spannungskomponenten) sind unter Voraussetzung vernachlässigbarer Schubspannungen und bei Wirkung von nur einer Belastungsart die maximale Vergleichsspannung $\hat{\sigma}_v$, die Vergleichsspannungsschwingbreite $2 \sigma_{va}$ und die Vergleichsmittelspannung $\bar{\sigma}_v$ nach den allgemeinen Formeln (2) bis (4) zu bilden.

$$2 \sigma_{va} = (\hat{B} \cdot \alpha_{SB} - \check{B} \cdot \alpha_{SB}) \cdot G \quad (2)$$

$$\bar{\sigma}_v = f \left(\frac{\hat{B} \cdot \alpha_{SB} + \check{B} \cdot \alpha_{SB}}{2} \cdot G \right) \quad (3)$$

$$\hat{\sigma}_v = f \left(\max \{ |\hat{B}| \cdot \alpha_{SB}; |\check{B}| \cdot \alpha_{SB} \} \cdot G \right) \quad (4)$$

Hierin bedeuten:

- \hat{B}, \check{B} Extremwerte einer Belastungsgröße, z. B. Innendruck p
- $\alpha_{S\hat{B}}, \alpha_{S\check{B}}$ den Belastungsgrößen \hat{B} und \check{B} zugeordnete Strukturformzahlen (bei linearer Abhängigkeit von Belastung und Spannung ist $\alpha_{S\hat{B}} = \alpha_{S\check{B}}$).
- G spezielle von geometrischen Größen abhängige Funktion, z. B. auf p bezogene mittlere Vergleichsspannung nach SSH für Zylinderschale

$$G = \frac{D_m}{20 \cdot s}$$

Die Formeln (4) bis (6) nach AD 2000-Merkblatt S 2, Abschnitt 5.2 zur Bildung der Vergleichsspannungsschwingbreite $2 \sigma_{va}$ und der zugehörigen Vergleichsmittelspannung $\bar{\sigma}_v$ kommen dann nicht zur Anwendung. Liegt ein kombinierter Belastungszustand aus mehreren Belastungsarten vor, sind im Allgemeinen andere Berechnungsverfahren anzuwenden, nach denen die anteilmäßigen Spannungskomponenten zur Überlagerung und Bildung der Vergleichsspannungen ermittelt werden können. Entsprechende Literatur-Hinweise sind in den folgenden Abschnitten enthalten.

Die nachstehenden Berechnungsempfehlungen basieren auf der Grundlage der linearen Elastizitätstheorie (pseudoelastische Spannungen) und gelten für den Sonderfall $\nu = 0,3$ und gleichen E-Moduls von miteinander verbundenen Teilen.

2 Formelzeichen und Einheiten

Über die Festlegungen des AD 2000-Merkblattes B 0 hinaus gilt:

d	Durchmesser eines Abzweiges	mm
f_u	Unrundheitsfaktor	–
h	Höhe eines Kantenversatzes, einer Aufdachung oder Einziehung	mm
s	Nennwanddicke abzüglich der Hälfte des Abnutzungszuschlages	mm
D	Durchmesser eines Grundkörpers	mm
a_b	Biegespannungsformzahl	–
α_k	Kerbformzahl	–
α_s	Strukturformzahl	–
α_{so}	Membranspannungsformzahl	–

Fußzeiger

a	außen
i	innen
k	Kegelschale, Kugelschale
m	mittlerer Wert
z	Zylinderschale
A	Abzweig
B	Boden, z. B. gewölbter Boden, Platte
D	Dichtung

3 Empfehlungen für Spannungsnachweise

3.1 Zylinderschale mit Ausschnitten

Bei Zylinderschalen mit rohrförmig verstärkten Ausschnitten im Geltungsbereich der AD 2000-Merkblätter B 1 bzw. B 9 liegt das Spannungsmaximum in vielen Fällen am Innenrand der Stutzen-Zylinder-Durchdringung in der Längsschnittebene. Bei relativ großen Ausschnitten und/oder großer Stutzenverstärkung kann sich die Stelle größter Spannung auf die Außenseite der Durchdringung in Richtung Querschnittebene verlagern. Die aus der Literatur bekannten einschlägigen Formzahlgleichungen gestatten eine überschlägige Berechnung des Strukturspannungshöchstwertes, jedoch nicht die Bestimmung für dessen Lage und Richtung. Falls nicht durch andere Berechnungen nachgewiesen, ist deshalb unabhängig von der Art des Stutzen-Schweißnahtanschlusses an der Durchdringungsstelle (aufgesetzt oder durchgesteckt) die z. B. nach [3] zu berechnende Vergleichsspannung als maßgebende Strukturspannung sowohl für die Innen- als auch die Außenseite der Zylinderschale anzusetzen.

Liegen Ausschnitte im Bereich von elliptischen Formabweichungen (Unrundheiten U), ist außer der Formzahl α_{so} für Membranspannung ein Biegespannungsterm $f_u \cdot \alpha_b$ in Anlehnung an [1] zu berücksichtigen.

Bei Stutzen, die Schrägstellungen in Zylinderlängsrichtung aufweisen, ist die Strukturformzahl α_{so} in Anlehnung an [2] zu korrigieren.

Bei elliptischen rohrförmigen Ausschnitten, z. B. für Befahr- und Besichtigungsöffnungen mit einem Verhältnis von großer Achse zu kleiner Achse $\leq 1,5$, kann sinngemäß wie bei kreisrunden Ausschnitten vorgegangen werden. Dabei ist der maßgebende mittlere Stutzendurchmesser d_m aus der in Längsrichtung des Zylindermantels liegenden Ausschnittsachse zu bestimmen.

Für andere Ausschnittsgeometrien, wie z. B. rechteckige Befüllöffnungen oder langlochartige Schauglaseinsätze, sind keine ausreichend genauen analytischen Berechnungsmethoden zur Ermittlung der Strukturformzahlen bekannt. Bekannte Lösungen für Scheiben oder Platten mit Ausschnitten, z. B. nach [4, 5], können auf Schalen nicht übertragen werden, da infolge der Schalenkrümmung den Strukturmembranspannungen zusätzliche Strukturbiegespannungen überlagert werden.

Bei Blockflanschen oder dickwandigen Einschweißringen (vgl. AD 2000-Merkblatt B 9, Bilder 3a/3b), die den Bedingungen

$$s_A \geq 2 \cdot s_Z, \quad b \cdot s_A \geq d_i \cdot s_Z \quad (5)$$

genügen, ist mindestens $\alpha_{so} = 2,5$ zu setzen.

Für kombinierte rohr- und scheibenförmige Verstärkungen sind keine geschlossenen analytischen Näherungslösungen bekannt. Eine komponentenspezifische Berechnung über Formzahldiagramme ist in [4] enthalten.

Bei unverstärkten kreisförmigen Ausschnitten kann die Strukturspannung nach [4] ermittelt werden.

3.2 Verbindung Zylinderschale – Versteifungsring

Bei Zylinderschalen, an deren Innen- oder Außenwandung Versteifungsringe (vgl. AD 2000-Merkblatt B 6, Bilder 2 und 3) oder Halterungsringe (z. B. für Einbauten) angeschlossen sind, bewirken diese Anschweißteile durch Dehnungsbehinderung Biegespannungen, die sich mit den Membranspannungen aus dem Innendruck überlagern. Die maximale Vergleichsspannung tritt auf der Innenseite auf und kann den rund doppelten Wert der Membranspannung im ungestörten Bereich annehmen. Im Falle von innen angeschweißten Ringen in Verbindung mit einer kerbintensiven Schweißnahtgestaltung können deshalb auch derartige „untergeordnete“ Bauteilbereiche lebensdauerbestimmend sein. Die Vergleichsspannung auf der Außenseite liegt stets unter der Membranspannung im ungestörten Bereich.

Die Berechnung kann nach [12] durchgeführt werden.

3.3 Zylinderschale mit Formabweichungen

Bei Zylinderschalen können auch fertigungsbedingte Formabweichungen mit den hierdurch verursachten Zusatzspannungen ermüdungsrelevante Auswirkungen haben (vgl. AD 2000-Merkblätter HP 1 und HP 5/1). Dies trifft insbesondere für Zylinderschalen ohne sonstige Störstellen zu (z. B. ohne Ausschnitte), deren Dimensionierung auf glatte Zylinderschalen abgestimmt ist und die Stelle maximaler Formabweichung mit einer voll beanspruchten Schweißnaht (Längsnaht) zusammenfällt.

Bei ovaler Formabweichung kann sinngemäß nach [1] vorgegangen werden, wobei $\alpha_{so} = 1$ und $\alpha_b = 1$ zu setzen ist.

Bei Kantenversatz der Längsnaht wird die Berechnung nach [4] empfohlen.

Bei Aufdachungen oder Einziehungen kann die Strukturspannung konservativ nach AD 2000-Merkblatt HP 1, Anhang 1 bestimmt werden.

Sofern im Einzelfall hierzu genauere Berechnungen durchgeführt werden sollen, können Berechnungen nach der Theorie 2. Ordnung vorgenommen werden [9], d. h. unter Berücksichtigung der sich einstellenden Verformung unter Druckbelastung und damit Verringerung der Biegespannungen. Auf die Notwendigkeit einer ausreichenden Anzahl der Fourieramplituden (Stützstellen) zur Erzielung realer Spannungswerte wird hingewiesen.

3.4 Verbindung Zylinderschale – Kegelschale

Der Übergang kegelförmiger Mäntel zum zylindrischen Teil kann entweder als Eckstoß oder als Torus ausgebildet sein. Die maximale Strukturspannung tritt im Eckstoß bzw. in der Krempe auf.

Der eckgeschweißte Kegelmantel ist für Ermüdungsbeanspruchung sehr ungünstig, da bei dieser Ausführung die höchsten Strukturspannungen auftreten und an der Stelle maximaler Strukturspannung zusätzlich Schweißnahtkerbspannungen wirken.

Die Berechnung kann auf der Grundlage des Anhangs zu AD 2000-Merkblatt B 2 durchgeführt werden.

Bei unmittelbarem Anschluss von Böden, insbesondere von ebenen Böden, sind infolge gegenseitiger Beeinflussung deutlich höhere Spannungen gegenüber dieser Berechnung zu erwarten.

Kegelausschnitte sind unter Beachtung von AD 2000-Merkblatt B 2, Abschnitt 6 sinngemäß nach Abschnitt 3 dieses Anhangs zu berechnen.

3.5 Gewölbter Boden mit Ausschnitten

Bei gewölbten Böden mit Ausschnitten kann sowohl die Bodenkrempe als auch der Kalottenbereich mit Ausschnitten lebensdauerbestimmend sein. Es sind deshalb beide Bereiche einer Spannungsberechnung zu unterziehen.

Die für Ausschnitte in Zylinderschalen in Abschnitt 3.2 angegebenen Hinweise gelten grundsätzlich auch für Ausschnitte im Kalottenbereich von gewölbten Böden. Die örtlichen Spannungen wirken jedoch hier am gesamten Ausschnittsrand.

Die Strukturspannung an der Bodenkrempe kann nach [4] oder über die α -Kurven in den Bildern 2 und 3 im Anhang 1 zu AD 2000-Merkblatt B 3 ermittelt werden.

Die Bodenkalotte mit rohrförmig verstärktem oder unverstärktem Ausschnitt kann nach [6] berechnet werden. Die Berechnung gilt jedoch nicht für Ausschnitte im Krempenbereich (außerhalb $0,6 \cdot D_a$, vgl. AD 2000-Merkblatt B 3, Abschnitt 8.1.4 und Bild 2).

Bei Blockflanschen oder dickwandigen Einschweißringen kann mit einer Strukturformzahl $\alpha_s = 2,0$ gerechnet werden, sofern die Bedingungen sinngemäß nach Formel (5) erfüllt sind.

Detailliertere analytische Berechnungsverfahren, die auch eine Ermittlung der Strukturspannungen im Stutzen an der Durchdringung gestatten, sind in [4] und [7] angegeben.

3.6 Verbindung Zylinderschale – Tellerboden mit Eckring oder verstärktem Flansch

Die Strukturspannungen für Tellerböden, die über einen Eckring oder eine verstärkte Flanschverbindung mit durchgehender Dichtung an eine Zylinderschale angeschlossen sind, können nach [4] berechnet werden. Dabei wird vorausgesetzt, dass die Flanschverbindung ausreichend vorgespannt ist und nicht im Zyklus der Wechselbelastung gelöst wird. Spannungsmaxima treten auf der Innenseite auf, und zwar im Übergangsbereich von Tellerboden bzw. Zylindermantel zum Eckring oder zu den Flanschblättern, an der in vielen Fällen auch die Anschlussschweißnähte liegen.

3.7 Verbindung Zylinderschale – unverankerter ebener Boden

Die Verbindungsstelle eines ebenen Bodens an einen Zylindermantel ist ebenfalls ein ermüdungskritischer Bereich. Im Falle eines Vollbodens mit $s_B/s_Z > 1$ tritt die maximale Vergleichsspannung immer in der Zylinderwandung (Innenseite) an der Anschlussstelle auf, die z. B. nach [11] ermittelt werden kann. Detailliertere Berechnungen können auch nach [4] durchgeführt werden. Die Berechnungen setzen voraus, dass die ebenen Böden volltragend an- oder eingeschweißt sind (vgl. AD 2000-Merkblatt B 5, Tafel 1, Ausführungen c, f und h).

3.8 Runde unverankerte ebene Platten mit Ausschnitten

Als ermüdungskritische Stelle bei Platten mit Ausschnitten ist in der Regel der Ausschnittsbereich anzusehen. Bei verstärkten Ausschnitten kann dabei das Spannungsmaximum je nach den Abmessungsverhältnissen sowohl im Stutzenrohr als auch in der Platte liegen.

Liegen Abmessungs-Randbedingungen nach Formel (6) vor,

$$0,05 \leq \frac{d_a}{d_D} \leq 0,3, \quad 0,1 \leq \frac{s_A}{s_B} \leq 0,3 \quad (6)$$

liegt die maximale Vergleichsspannung immer an der Anschlussstelle des Stutzenrohres an die Platte, so dass das Stutzenrohr lebensdauerbestimmend für die Platte ist. Eine Berechnungsmethode ist in [4] angegeben.

Zur Berechnung von ebenen Platten für andere Lastfälle und Lastkombinationen wird auf die Literatur [4], [13] und [14] hingewiesen.

3.9 Schraubverbindungen

Schraubverbindungen als lösbare Verbindungselemente von Druckbehälterteilen können lebensdauerrelevanten Beanspruchungen ausgesetzt sein, wenn bei veränderlicher Betriebsbelastung hohe wechselnde Schraubenkräfte wirksam werden wie z. B. bei nicht oder nicht ausreichend vorgespannten Verbindungen sowie beim häufigen Lösen der Verschraubung.

Bei üblicherweise ungleichartiger Beanspruchung von Schrauben- und Mutterteil (Schraube: Zug; Mutter: Druck) befindet sich die höchstbeanspruchte Stelle im Allgemeinen im Bereich des ersten tragenden Gewindeganges. Die extreme Spannungsüberhöhung an dieser Stelle ist bedingt durch die Kerbwirkung des Gewindes und die Krafteinleitung in die Gewindeflanke sowie durch die zusätzliche Biegebeanspruchung infolge der Flankenbelastung. Die Lastverteilung im Gewindeeingriff sowie die Gewindekerbwirkung hängen im Wesentlichen von der Gewindeform und der Nachgiebigkeit der Gewindeträger (Abmessungsverhältnisse) ab. Die Spannungserhöhungsfaktoren (Kerbformzahlen α_k) liegen bei üblichen Gewindeträgerabmessungen für Spitzgewinde (metrisches ISO-Gewinde, Whitworth-Gewinde) am niedrigsten. Für Sägen- oder Trapezgewinde können zwei- bis dreifache Werte gegenüber Spitzgewinde auftreten.

Zur analytischen Berechnung der Gewindelastverteilung und der Kerbformzahl α_k wird auf die Literatur [16] bis [19] hingewiesen. Zur Optimierung einer Schraubverbindung sind wegen der vielfältigen Einflussgrößen detaillierte Berechnungen mit großem Berechnungsaufwand erforderlich [20].

4 Berechnungsbeispiel

Druckbehälter für Kohlestaubeinblasanlage

1 Angaben zur Konstruktion

Siehe Bild A.11

Zylindermantel, Kegelmantel, Korbbogenboden, Deckel und Stützenbleche aus P265GH

Stützenrohre aus P235GH

Flansche aus P250GH, Druckstufe PN 16

Blindeckel mit durchgehender Dichtung

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

Spezifischer Abnutzungszuschlag für Mäntel und Böden: 2 mm (Wanddicken sind Nennwanddicken)

2 Betriebsdaten

Maximal zulässiger Druck	16 bar
Betriebstemperatur	50 °C
Innendruckschwankungsbreite	$\hat{p} - \check{p} = 12 - 0 = 12 \text{ bar}$
Betriebslastspielzahl	$N = 250000$
(entsprechend 3 Zyklen/h, 3-Schichtbetrieb, 10 Jahre)	

3 Zulässige Spannungsschwingbreiten nach AD 2000-Merkblatt S 2, Abschnitt 7

3.1 Ungeschweißter Bereich, Walzhaut

$$P265GH \Rightarrow R_m = 410 \text{ N/mm}^2$$

$$R_{p0,2/T^*} = 255 \text{ N/mm}^2$$

Spannungsschwingbreite, polierte Oberfläche nach Formel (14)

$$2 \sigma_a = \frac{4 \cdot 10^4}{\sqrt{250000}} + 0,55 \cdot 410 - 10 = 296 \text{ N/mm}^2$$

Oberflächenfaktor nach Tafel 3, Formeln (15), (16)

$$F_o = 1 - 0,056 \cdot (\ln 200)^{0,64} \cdot \ln 410 + 0,289 \cdot (\ln 200)^{0,53} = 0,72$$

$$f_o = (0,72)^{\frac{0,4343 \cdot \ln 250000 - 2}{4,301}} = 0,77$$

Wanddickenfaktor nach Formeln (17), (18)

$$F_d = \left(\frac{25}{30} \right)^{\frac{1}{10}} = 0,982$$

$$f_d = 0,982^{\frac{0,4343 \cdot \ln 250000 - 2}{4,301}} = 0,986$$

Mittelspannungsfaktor nach Formeln (19), (21)

$$\hat{\sigma}_v = 2 \sigma_{va} = 119 \text{ N/mm}^2 \text{ (siehe 4.2.1)}$$

$$\bar{\sigma}_v = 59,5 \text{ N/mm}^2$$

$$M = 0,00035 \cdot 410 - 0,1 = 0,0435$$

$$f_M = \sqrt{1 - \frac{0,0435(2 + 0,0435)}{1 + 0,0435} \cdot \frac{59,5}{148}} = 0,98$$

Temperatureinflussfaktor $f_{T^*} = 1$

Zulässige Spannungsschwingbreite nach Formel (13) für Walzhautoberfläche (WH)

$$2 \sigma_{azul/WH} = 296 \cdot 0,77 \cdot 0,98 \cdot 0,986 \cdot 1 = 220 \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

3.2 Geschweißter Bereich, Klassen K 1 und K 2

Spannungsschwingbreiten nach Tafel 4, Formel (27)

$$2 \sigma_{a/K 1} = \left(\frac{5 \cdot 10^{11}}{250000} \right)^{\frac{1}{3}} = 126 \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

$$2 \sigma_{a/K 2} = \left(\frac{2,5 \cdot 10^{11}}{250000} \right)^{\frac{1}{3}} = 100 \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

Wanddickenfaktor

$$F_d = \left(\frac{25}{30} \right)^{\frac{1}{4}} = 0,955$$

$$f_d = 0,955 \frac{0,4343 \cdot \ln 250000 - 2}{4,301} = 0,97$$

Zulässige Spannungsschwingbreiten nach Formel (26) für Klassen K 1 und K 2

$$2 \sigma_{azul/K 1} = 126 \cdot 0,97 = 122 \text{ N/mm}^2$$

$$2 \sigma_{azul/K 2} = 100 \cdot 0,97 = 97 \text{ N/mm}^2$$

4 Vergleichsspannungsschwingbreiten

Bei reiner Schwellbeanspruchung und alleiniger Wirkung von Innendruck können die Vergleichsspannungsschwingbreiten vereinfacht nach der allgemeinen Formel (2) mit $\check{B} \cdot \alpha_{SB} = 0$ gebildet werden.

4.1 Zylinderschale mit Formabweichungen (Aufdachung)

Spannungsschwingbreite nach [8]

$$\begin{aligned} 2 \sigma_{va} &\hat{=} \sigma_u = \frac{D_i \cdot p}{20 \cdot s_z} + 6 \cdot \frac{D_i \cdot h \cdot p}{20 \cdot s_z^2} \\ &= \frac{2942 \cdot 12}{20 \cdot 29} + 6 \cdot \frac{2942 \cdot 5 \cdot 12}{20 \cdot 29^2} = 124 \text{ N/mm}^2 \\ &\approx 2 \sigma_{azul/K 1} = 122 \end{aligned}$$

4.2 Gewölbter Boden mit Ausschnitten

4.2.1 Bodenkrempe

Strukturformzahl nach AD 2000-Merkblatt B 3, Anhang 1

$$\alpha_s \hat{=} \alpha = 3,9$$

Spannungsschwingbreite

$$\begin{aligned} 2 \sigma_{va} &= \alpha_s \cdot \frac{D_i \cdot p}{40 \cdot s_k} \\ &= 3,9 \cdot \frac{2942 \cdot 12}{40 \cdot 29} = 119 \text{ N/mm}^2 \\ &< 2 \sigma_{azul/WH} = 220 \end{aligned}$$

4.2.2 Bodenkuppe mit Ausschnitt, Stutzen Pos. 6

Strukturformzahl nach [6], Abschnitt G.2.5.2

$$\alpha_s \hat{=} \text{s.c.f.} = 2,0$$

Spannungsschwingbreite

$$\begin{aligned}
 2 \sigma_{va} &= \alpha_s \cdot \frac{(R_i + s_k / 2) \cdot p}{20 \cdot s_k} \\
 &= 2,0 \cdot \frac{(2400 + 29 / 2) \cdot 12}{20 \cdot 29} = 100 \text{ N/mm}^2 \\
 &< 2 \sigma_{azul/K 1} = 122
 \end{aligned}$$

4.3 Kegelschale

4.3.1 Krempe am oberen Kegelschuss

Spannungsschwingbreite nach AD 2000-Merkblatt B 2, Anhang

$$\begin{aligned}
 \frac{e^z}{10} &= 6,83 \\
 2 \sigma_{va} &\hat{=} \sigma_{vg} = \frac{e^z}{10} \cdot p \\
 &= 6,83 \cdot 12 = 82 \text{ N/mm}^2 < 2 \sigma_{azul/K 1} = 122
 \end{aligned}$$

4.3.2 Ausschnitt im mittleren Kegelschuss, Stutzen Pos. 8

Strukturformzahl nach [3] unter Berücksichtigung eines Zylinder-Ersatzdurchmessers $D_i = 2200 \text{ mm}$ nach AD 2000-Merkblatt B 2

$$\alpha_s = 2,61$$

Hier im speziellen Fall keine Formabweichung berücksichtigt ($\alpha_s = \alpha_{so}$).

Spannungsschwingbreite

$$\begin{aligned}
 2 \sigma_{va} &= \alpha_s \cdot \frac{D_m \cdot p}{20 \cdot s_k} \\
 &= 2,61 \cdot \frac{2229 \cdot 12}{20 \cdot 29} = 120 \text{ N/mm}^2 \\
 &< 2 \sigma_{azul/K 1} = 122
 \end{aligned}$$

4.4 Ebene Platten

Blindeckel Pos. 9 mit Stutzen Pos. 10

Strukturformzahl aus BR-E13 [4]

$$\alpha_s \hat{=} K_5 = 2,85$$

Spannungsschwingbreite

$$\begin{aligned}
 2 \sigma_{va} &\hat{=} \sigma_v = 0,31 \cdot \left(\frac{d_D}{s_B} \right)^2 \cdot \frac{p}{10} \cdot \alpha_s \\
 &= 2,85 \cdot 0,31 \cdot \left(\frac{370}{35} \right)^2 \cdot \frac{12}{10} = 118 \text{ N/mm}^2 \\
 &< 2 \sigma_{azul/K 1} = 122
 \end{aligned}$$

4.5 Zylinderschale mit Tragpratzen

Tragpratzenkonstruktion mit Verstärkungsblech, Stege und Auflagerblech im Hinblick auf dehnungsbehindernde Wirkung für Zylinderschale konservativerweise als rechteckförmigen „Kern“ in Scheibe unter zweiachsiger Zugbeanspruchung betrachtet.

Berechnung der Strukturformzahl nach [5], Abschnitt 2.4, Formeln (51) bis (54) mit Polynomkoeffizienten nach Tabelle 4 oder aus Bild 36.

Strukturformzahl $\alpha_s = 2,1$

Spannungsschwingbreite

$$\begin{aligned}
 2 \sigma_{va} &\hat{=} \sigma_u = \alpha_s \cdot \frac{D_m \cdot p}{20 \cdot s_z} \\
 &= 2,1 \cdot \frac{2942 \cdot 12}{20 \cdot 29} = 128 \text{ N/mm}^2 \\
 &> 2 \sigma_{\text{azul/K } 2} = 97
 \end{aligned}$$

Die zulässige Spannungsschwingbreite wird überschritten. Die Zulässigkeit der vorgesehenen Konstruktion kann ggf. durch genauere Spannungsberechnung nachgewiesen werden. Anderenfalls ist eine Konstruktionsänderung erforderlich.

5 Schrifttum

- [1] TRD 301 Anlage 1: Berechnung auf Wechselbeanspruchung durch schwellenden Innendruck bzw. durch kombinierte Innendruck- und Temperaturänderungen.
Ausgabe April 1975. Heymanns Verlag, Köln; Beuth Verlag, Berlin.
- [2] KTA 3211.2: Druck- und aktivitätsführende Komponenten von Systemen außerhalb des Primärkreises. Teil 2: Auslegung, Konstruktion und Berechnung, 6/1992.
- [3] *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).
- [4] Richtlinienkatalog Festigkeitsberechnungen (RKF), Behälter und Apparate Teil 6.
Ausgabe 1986. Linde-KCA-Dresden GmbH.
- [5] *Radaj, D.*, u. *G. Schilberth*: Kerbspannungen an Ausschnitten und Einschlüssen.
Deutscher Verlag für Schweißtechnik, Düsseldorf 1977.
- [6] BS 5500:1994 Specification for Unfired fusion welded pressure vessels. British Standard Institution: London 1994.
- [7] *Varga, L.*: Bestimmung der in der Umgebung der Ausschnitte von innendruckbeanspruchten Druckbehälterdeckeln auftretenden Spannungen.
Forsch. Ing.-Wes. **29** (1963).
- [8] *Schmidt, K.*: Beanspruchung unrunder Druckbehälter.
VDZ-Z. (1960) Nr. 1, S. 11/15.
- [9] *Pich, R.*: Der Zusammenhang zwischen der Unrundheit von Kesseltrommeln und den zugehörigen Biegezusatzspannungen.
Mitt. VGB (1966) H. 103, S. 270/279.
- [10] *John H. H.*, *G. Lässig* u. *D. Niedermeyer*: Ursache für Risschäden im Längsnahtbereich von zylindrischen Apparatemänteln.
Chem. Techn. (1990) H. 6, S. 242/245.
- [11] *Sterr, G.*: Die genaue Ermittlung des C-Wertes für die am Rande mit einem Schuss verschweißte Kreisvollplatte unter Berücksichtigung der im Schuss auftretenden Spannungen.
Techn. Überwach. **4** (1963) Nr. 4, S. 140/143.
- [12] *Zellerer E.*, u. *H. Thiel*: Beitrag zur Berechnung von Druckbehältern mit Ringversteifungen.
Die Bautechnik **44** (1967) H. 10, S. 333/339.
- [13] *Warren C. Young*: Roark's Formulas for Stress and Strain.
McGraw-Hill Book Company 1989, 6. Edition.
- [14] DIN 3840 „Armaturengehäuse – Festigkeitsberechnung gegen Innendruck“. Entwurf August 1989.
Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- [15] VDI-Richtlinie 2230 „Systematische Berechnung hochbeanspruchter Schraubenverbindungen“.
VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf 1986.
- [16] *Maduschka, L.*: Beanspruchung von Schraubenverbindungen und zweckmäßige Gestaltung der Gewindeträger.
Forschung **7** (1936) H. 6, S. 299–304.
- [17] *Hase, R.*: Verformung der Gewindegänge bei Belastung der Gewindeverbindung.
Werkstatt und Betrieb **111** (1978) H. 12, S. 813–815.
- [18] *Neuber, H.*, *J. Schmidt* u. *K. Heckel*: Ein dauerschwingfestes Gewindeprofil.
Konstruktion **27** (1975) H. 11, S. 419–421.
- [19] *Neuber, H.*: Kerbspannungslehre.
3. Aufl., Springer-Verlag, Berlin/Göttingen/Heidelberg 1985.
- [20] *Gorsitzke, B.*: Kerbspannungsberechnung von Schraubverbindungen.
Interner Berechnungsbericht des RWTÜV (1994).
- [21] *Zeman, J. L.*: Aufdachung an Längsnähten zylindrischer Schüsse.
Techn. Überwach. **34** (1993) Nr. 7/8, S. 292/295.

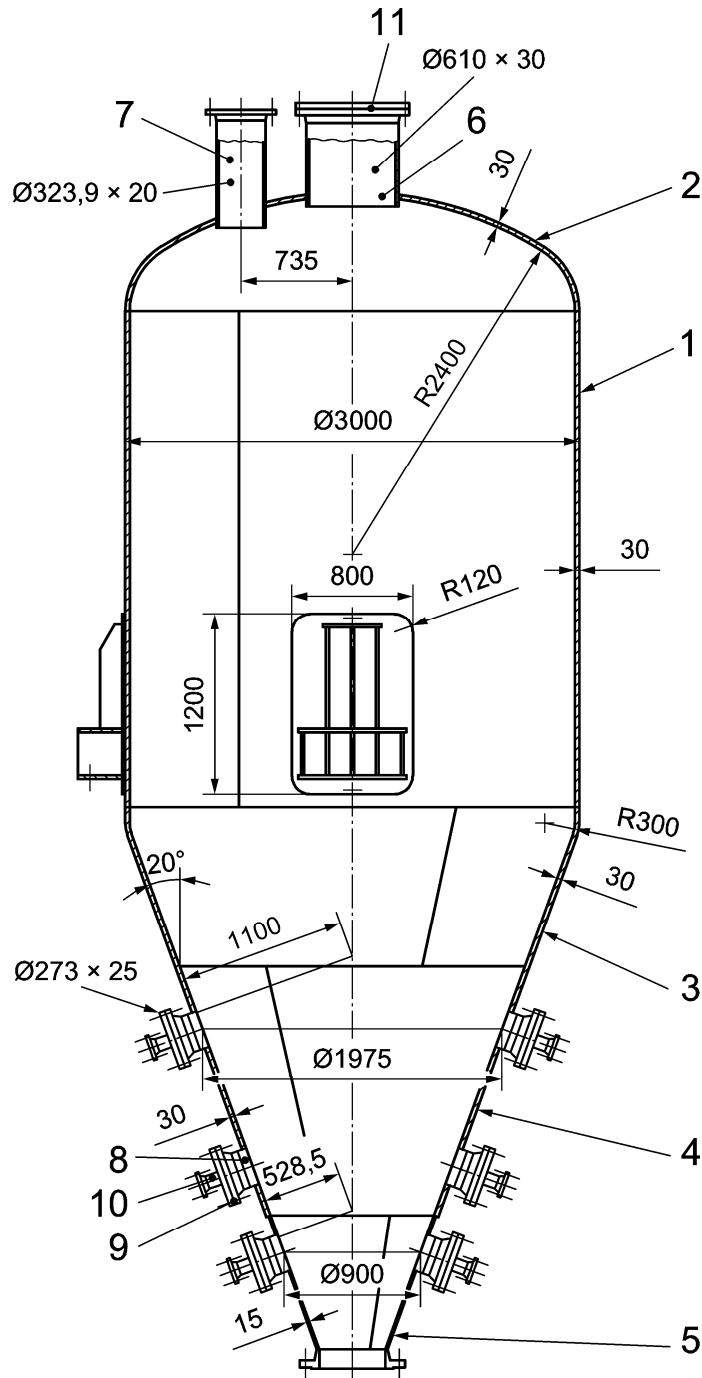


Bild A.11 — Druckbehälter für Kohlestaubblasanlage (Berechnungsbeispiel)

Anhang 4 zum AD 2000-Merkblatt S 2

Alternative Berechnung für höhere zulässige Spannungsschwingbreiten oder Lastspielzahlen bei verkürzten Prüffristen

1 Geltungsbereich

Die nachstehende alternative Berechnungsmethode kann angewendet werden, wenn die Prüfintervalle für die Prüfungen während des Betriebes und nach Erreichen der rechnerischen Lebensdauer gemäß den Abschnitten 12.3 und 14.2 dieses AD 2000-Merkblattes von 50 % der festgelegten Lastspielzahl auf 25 % verkürzt werden.

2 Allgemeines

Die Lastspielzahlkurven nach den Bildern A.12 und A.13 sind nach wirtschaftlichen Aspekten unter Zugrundelegung kleinerer Lastspielzahlsicherheit S_N bzw. größerer Ausfallwahrscheinlichkeit P_A unter Beibehaltung der zulässigen Spannungsschwingbreiten im Dauerfestigkeitsbereich nach höheren zulässigen Spannungen bzw. Lastspielzahlen angehoben worden.

Die Lastspielzahl, von der ab die Lastspielzahlkurven horizontal verlaufen („Ecklastspielzahl“), wurde einheitlich von $2 \cdot 10^6$ auf $5 \cdot 10^6$ (Bilder A.12 und A.13) verschoben.

Diese alternative Berechnungsmethode kann im Hinblick auf das rechtzeitige Erkennen von eventuell auftretenden Ermüdungsanrissen als sicherheitstechnisch gleichwertig mit der Berechnung nach dem Hauptteil dieses Merkblattes betrachtet werden.

Bei ungünstiger Lage der realen Werkstoffkennwerte im Streufeld der Lebensdauerkurven kann sich jedoch die Gebrauchsdauer nach Überschreitung der rechnerischen Lebensdauer ggf. verkürzen.

Wenn in diesem Anhang nicht anders angegeben, gelten alle anderen Regelungen im Hauptteil dieses Merkblattes.

3 Zulässige Spannungsschwingbreite bei bekannter Lastspielzahl

3.1 Ungeschweißte Bauteilbereiche

Die zulässige Spannungsschwingbreite $2 \sigma_{\text{azul}}$ ist nach Formel (13) zu berechnen, wobei die Spannungsschwingbreite $2 \sigma_a$ für ungekerbte, polierte Probestäbe nach Formel (A.1) im Geltungsbereich $10^2 \leq N \leq 5 \cdot 10^6$ zu ermitteln oder aus Bild A.12 zu entnehmen ist.

Die Kurven enthalten gegenüber den mittleren Anrisskurven eine Lastspielzahlsicherheit von $S_N = 3$ bis 5 und eine Spannungssicherheit von ca. $S_\sigma = 1,5$.

$$2 \sigma_a = \frac{6,7 \cdot 10^4}{\sqrt{N}} + 0,55 \cdot R_m - 10 \quad (\text{A.1})$$

Die Spannungsschwingbreite $2 \sigma_a$ für den Dauerfestigkeitsbereich ($N \geq 5 \cdot 10^6$) kann auch aus Tafel A.1 entnommen werden.

Tafel A.1 — Spannungsschwingbreite $2 \sigma_a$ im Dauerfestigkeitsbereich für ungekerbte Probestäbe

Zugfestigkeit R_m [N/mm ²]	$2 \sigma_a = \text{konst. [N/mm}^2\text{]}$	
	$N \geq 5 \cdot 10^6$	$N \geq 10^8$ bei Lastkollektiv
400	240	178
600	350	259
800	460	341
1000	570	422

3.2 Geschweißte Bauteilbereiche

Die zulässige Spannungsschwingbreite $2 \sigma_{\text{azul}}$ ist nach Formel (26) zu berechnen. Dabei ist die Spannungsschwingbreite $2 \sigma_a$ aus Bild A.13 zu entnehmen.

Die Kurven des Bildes A.13 sind durch die Formel (27) im Bereich $10^2 \leq N \leq 5 \cdot 10^6$ und Konstanten der Tafel A.2 beschrieben.

Den Lastspielzahlkurven liegt eine Ausfallwahrscheinlichkeit von $P_A = 2,3 \%$ zugrunde.

Tafel A.2 — Konstanten B 1, B 2 und Spannungsschwingbreite $2 \sigma_a$ im Dauerfestigkeitsbereich für Schweißverbindungen

Klasse	Konstante		Spannungsschwingbreite $2 \sigma_a = \text{konst. [N/mm}^2\text{]}$	
	B 1 $10^2 \leq N \leq 5 \cdot 10^6$	B 2 $5 \cdot 10^6 \leq N \leq 10^8$	$N \geq 5 \cdot 10^6$	$N \geq 10^8$ bei Lastkollektiv
K 0	$3,89 \cdot 10^{12}$	$3,30 \cdot 10^{16}$	92	51
K 1	$1,25 \cdot 10^{12}$	$4,96 \cdot 10^{15}$	63	35
K 2	$6,25 \cdot 10^{11}$	$1,56 \cdot 10^{15}$	50	28
K 3	$3,2 \cdot 10^{11}$	$5,12 \cdot 10^{14}$	40	22

4 Zulässige Lastspielzahl bei bekannter Spannungsschwingbreite

4.1 Ungeschweißte Bauteile

Die zulässige Lastspielzahl ist aus Formel (A.2) zu berechnen oder aus Bild A.12 zu entnehmen.

$$N_{\text{zul}} = \left(\frac{6,7 \cdot 10^4}{2 \sigma_a^* - 0,55 \cdot R_m + 10} \right)^2 \quad (\text{A.2})$$

Hierbei ist $2 \sigma_a^*$ die Spannungsschwingbreite nach Formel (30).

Bei Werten für $2 \sigma_a^*$ unterhalb der Kurven nach Bild A.12 im Bereich $N \geq 5 \cdot 10^6$ oder bei $2 \sigma_a^* \leq 2 \sigma_a$ für $N \geq 5 \cdot 10^6$ nach Tafel A.1 liegt Dauerfestigkeit vor.

4.2 Geschweißte Bauteile

Die zulässige Lastspielzahl wird nach Formel (31) mit den Konstanten B 1 aus Tafel A.2 und der Spannungsschwingbreite $2 \sigma_a^*$ aus Formel (32) oder aus Bild A.13 ermittelt.

5 Berücksichtigung eines Betriebslastkollektivs

Der Berechnungsgang ist sinngemäß nach AD 2000-Merkblatt S 2, Abschnitt 9 durchzuführen, wobei die entsprechenden Lastspielzahlkurven aus Bild A.12 bzw. Bild A.13 anzuwenden sind. Die fiktiven Lastspielzahlkurven können für ungeschweißte Bauteile nach Formel (A.3)

$$N_{\text{zulk}} = \left(\frac{2,57 \cdot R_m + 95}{2 \sigma_a^*} \right)^2 \quad (\text{A.3})$$

und für Schweißverbindungen nach Formel (36) mit den in Tafel A.2 angegebenen Konstanten B 2 beschrieben werden.

6 Prüfungen während des Betriebes

Die Prüfintervalle für die Prüfungen nach AD 2000-Merkblatt S 2, Abschnitt 12.3 sind von der Hälfte auf ein Viertel der festgelegten Lastspielzahl zu verkürzen.

Bei tiefen zulässigen Temperaturen unterhalb von -200°C sind die Prüfintervalle auf ein Achtel zu verkürzen.

7 Berücksichtigung besonderer Betriebsbedingungen

7.1 Für Stahlflaschen und nahtlos hergestellte Druckgasbehälter aus Vergütungsstählen zum Transport von kaltem Druckwasserstoff gilt sinngemäß AD 2000-Merkblatt S 2, Abschnitt 13.2, wobei die reduzierte Lastspielzahl N_{zul}^* nach Formel (39) mit N_{zul} nach Formel (A.2) und $f_N = 1/10$ zu berechnen ist.

7.2 Bei geschweißten Behältern entsprechend AD 2000-Merkblatt S 2, Abschnitt 13.3 ist die nach Formel (31) unter Anwendung der Konstanten B 1 bzw. B 2 nach Tafel A.2 berechnete Lastspielzahl mit einem Abminderungsfaktor nach Formel (40) herabzusetzen, sofern $K_{20} \leq 355 \text{ N/mm}^2$ beträgt.

Für Behälter mit Festigkeitskennwerten K_{20} von $355 < K_{20} \leq 500 \text{ N/mm}^2$ sind nur 50 % der unter Verwendung der Formel (40) ermittelten Lastspielzahlen als zulässig anzusetzen.

Bei ungeschweißten Bauteilen oder kerbfrei geschliffenen Nähten an der wasserstoffbenetzten Wandungsseite kann die zulässige Lastspielzahl nach Abschnitt 3.1 bzw. 3.2 unter Anwendung von Formeln (39) und (41) bestimmt werden. Eine weitere Abminderung bei $K_{20} > 355 \text{ N/mm}^2$ ist nicht erforderlich.

8 Maßnahmen bei Erreichen der rechnerischen Lebensdauer

Werden bei den Prüfungen gemäß AD 2000-Merkblatt S 2, Abschnitt 14.1 keine Risse gefunden, so ist ein Weiterbetrieb bis zum Erreichen des 5fachen Wertes der rechnerischen Lastspielzahl N_{zul} oder der Schädigungssumme nach Formel (34) zulässig. Voraussetzung hierfür ist, dass bei den zerstörungsfreien Prüfungen mit Prüfintervallen von 25 % von N_{zul} keine Ermüdungsschäden festgestellt werden. Für das weitere Vorgehen gelten die Regelungen nach AD 2000-Merkblatt S 2, Abschnitte 14.3 bis 14.5.

Bei tiefen zulässigen Temperaturen unterhalb von -200 °C verkürzen sich die Prüfintervalle für die zerstörungsfreien Prüfungen von 25 % auf 12,5 % von N_{zul} .

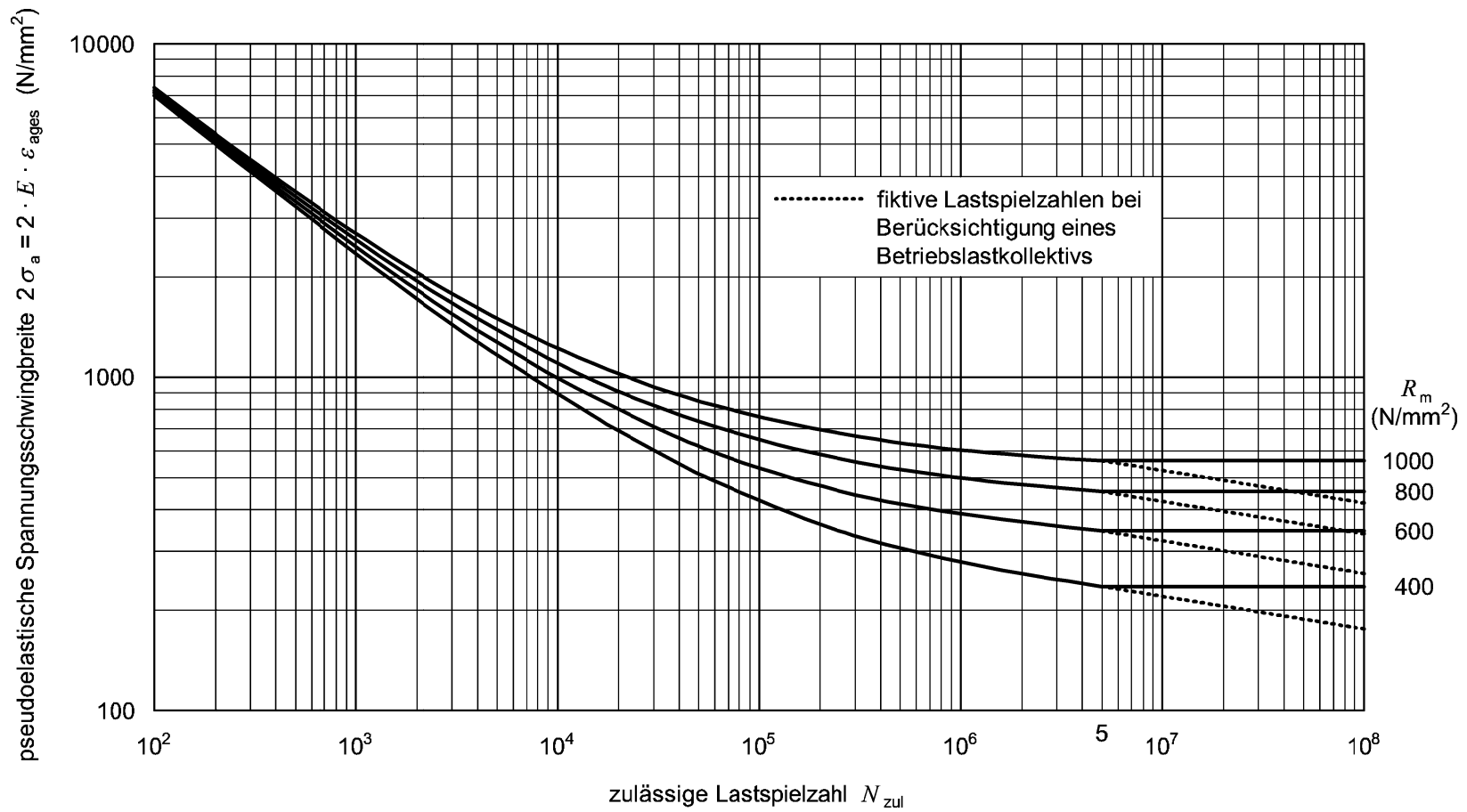


Bild A.12 — Zulässige Lastspielzahlen in Abhängigkeit von der Spannungsschwingbreite für ungekerbte Probestäbe aus warmfesten ferritischen und austenitischen Walz- und Schmiedestählen bei Raumtemperatur und $\bar{\sigma} = 0$

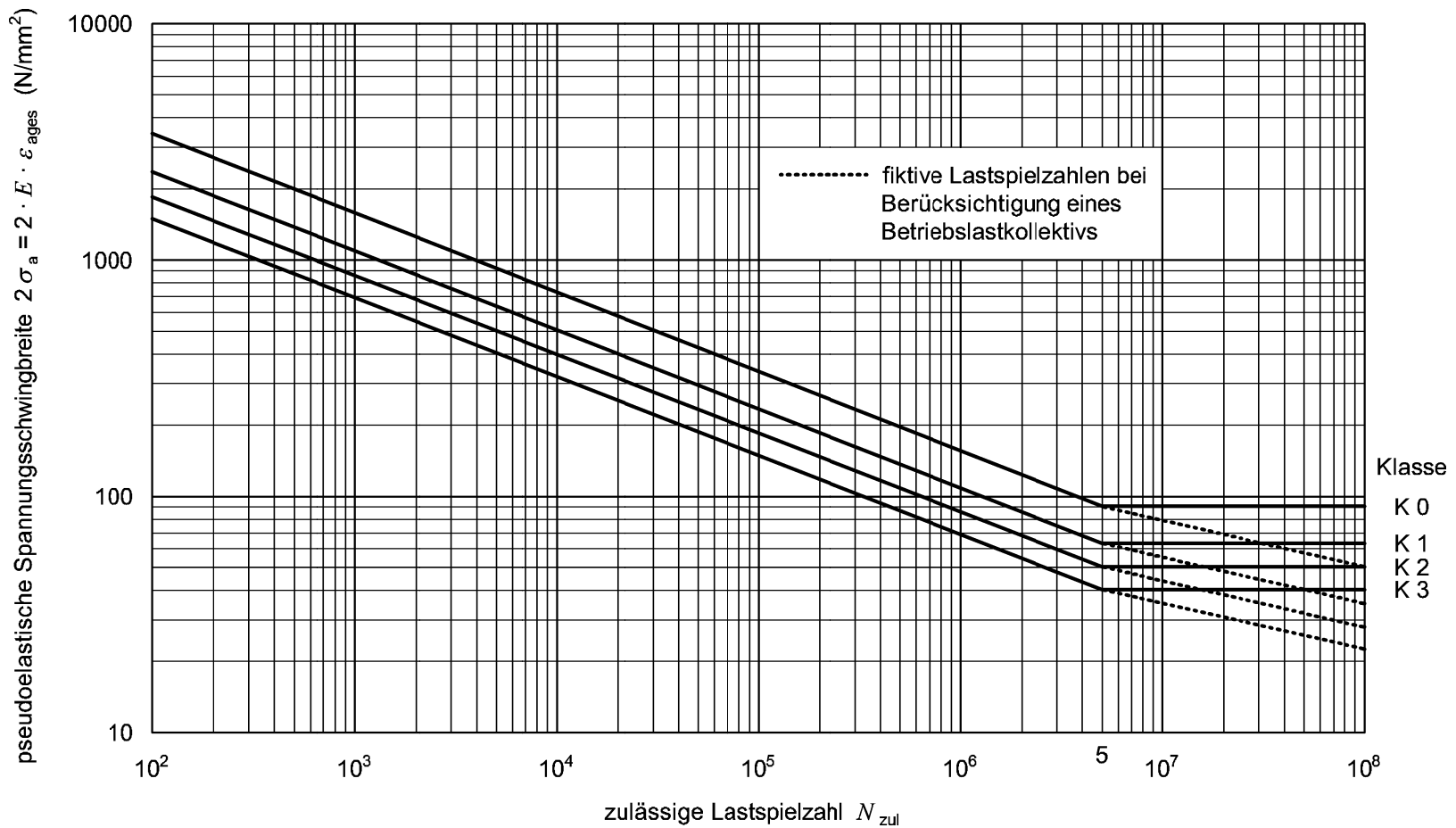


Bild A.13 — Zulässige Lastspielzahlen in Abhängigkeit von der Spannungsschwingbreite für Schweißverbindungen aus warmfesten ferritischen und austenitischen Walz- und Schmiedestählen bei Raumtemperatur ($\bar{\sigma}$ -unabhängig)

Anhang 5 zum AD 2000-Merkblatt S 2

Berechnung auf Wechselbeanspruchung für Gusseisen mit Kugelgraphit

1 Geltungsbereich

1.1 Die nachstehenden Regeln einer ausführlichen 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 AD 2000-Merkblatt W 3/2 hergestellt und geprüft werden.

1.2 Dieser Anhang braucht nicht angewendet zu werden, wenn die Bedingungen nach AD 2000-Merkblatt S 1, Anhang 3 erfüllt sind.

1.3 An die äußere und innere Beschaffenheit der Gussteile sind erhöhte Anforderungen zu stellen, die den Festlegungen der Qualitätsklasse A oder B nach DIN 1690-10 genügen (siehe Abschnitt 8.2.1).

2 Allgemeines

2.1 Die Lastspielzahlkurven nach Bild A.14 sind auf eine Ausfallwahrscheinlichkeit von ca. 2,3 % abgestimmt.

Die Abknickpunkt-Lastspielzahl N_D , von der ab die Lastspielzahlkurven für Einstufenbelastung horizontal verlaufen (Schwingfestigkeitswerte lastspielzahlunabhängig), ist auf $2 \cdot 10^6$ festgelegt.

Wenn in diesem Anhang nicht anders angegeben, gelten alle anderen Regelungen im Hauptteil dieses AD 2000-Merkblattes.

3 Spannungsberechnung

Die Spannungsermittlung für die ungeschweißten Gussstrukturen ist auf der Basis eines Kerbspannungsnachweises durchzuführen (vgl. Abschnitt 4.2 im Hauptteil dieses AD 2000-Merkblattes). In Sonderfällen kann hierbei die bei Kugelgraphitguss gegenüber Stählen niedrigere Kerbempfindlichkeit berücksichtigt werden. Bei Kerbformzahlen $\alpha_K \geq 5$ (vgl. Anhang 3, Abschnitt 1) kann hierbei die Kerbspannung um den Faktor 1,3 vermindert werden.

Für die Ermittlung der Kerbformzahl aus einem nichtlinearen Spannungsverlauf einer FE-Berechnung bietet sich z. B. das Hot-spot-Verfahren an (siehe Abschnitt 4.1 und Bild 1 im Hauptteil dieses AD 2000-Merkblattes). Die Kerbformzahl α_K ist dabei aus dem Verhältnis der Höchstwerte von Kerbspannung zu Strukturspannung zu bestimmen.

Vergrößerungsfaktoren k_e oder k_v für mechanische Spannungen bzw. Wärmespannungen im überelastischen Bereich brauchen nicht in die Rechnung eingesetzt zu werden, da der Einfluss überelastischer Verformungen in den Lastspielzahlkurven bereits berücksichtigt ist.

4 Zulässige Spannungsschwingbreite bei bekannter Lastspielzahl

4.1 Zulässige Spannungsschwingbreite für ungekerbte Probestäbe

Die zulässige Spannungsschwingbreite $2 \sigma_{a,zul}$ ist nach Formel (13) zu berechnen. Dabei ist die Spannungsschwingbreite $2 \sigma_a$ für Bauteile der Qualitätsklasse A aus Bild A.14 zu entnehmen. Für Qualitätsklasse B sind die $2 \sigma_a$ -Werte auf 90 % abzumindern.

Die Kurven des Bildes A.14 sind durch die Formel (A.4) mit den Konstanten B aus Tafel A.3 beschrieben.

$$2 \sigma_a = B/N^{0,1} \quad (A.4)$$

Die Spannungsschwingbreite $2 \sigma_a$ für $N \geq 2 \cdot 10^6$ bei Einstufenbelastung oder für $N = 10^8$ bei Betriebslastkollektiv kann auch aus Tafel A.3 entnommen werden.

Der Korrekturfaktor f_d ist nach Abschnitt 7.1.3, Formeln (17) und (18), der Korrekturfaktor f_{T^*} nach Abschnitt 7.1.5 Formel (24) im Hauptteil dieses AD 2000-Merkblattes zu bilden. Die Korrekturfaktoren f_0 und f_M sind den folgenden Abschnitten zu entnehmen.

4.2 Korrekturfaktor zur Berücksichtigung des Oberflächeneinflusses

Der Oberflächen-Korrekturfaktor f_0 ist analog Abschnitt 7.1.2 im Hauptteil dieses AD 2000-Merkblattes zu ermitteln, wobei F_0 anstelle nach Formel (16) nach Formel (A.5)

$$F_0 = 1 - 0,03 \cdot \ln(R_Z) \cdot \ln(R_m/200) \quad (A.5)$$

zu berechnen ist.

Falls nicht anders spezifiziert, ist für Gusshaut-Oberfläche eine Rautiefe $R_Z = 200$ mm einzusetzen.

4.3 Korrekturfaktor zur Berücksichtigung des Mittelspannungseinflusses

Zur Ermittlung des Mittelspannungs-Korrekturfaktors f_M sind Abschnitt 7.1.4 im Hauptteil dieses AD 2000-Merkblattes, ausschließlich Formel (21), und Bild 9 heranzuziehen.

Die größere Mittelspannungsempfindlichkeit von Kugelgraphitguss gegenüber Stählen wird durch Formel (A.6) berücksichtigt.

$$M = 0,00035 \cdot R_m + 0,08 \quad (\text{A.6})$$

5 Zulässige Lastspielzahl bei bekannter Spannungsschwingbreite

Die zulässige Lastspielzahl wird nach Formel (A.7) mit der Konstante B aus Tafel A.3 und der Spannungsschwingbreite $2 \sigma_a^*$ nach Formel (30) berechnet.

$$N_{zul} = (B/2 \sigma_a^*)^{10} \quad (\text{A.7})$$

6 Berücksichtigung eines Betriebslastkollektivs

Der Berechnungsgang ist sinngemäß nach Abschnitt 9 im Hauptteil dieses AD 2000-Merkblattes mit den entsprechenden Lastspielzahlkurven aus Bild A.14 durchzuführen. Die im Bereich $2 \cdot 10^6 \leq N \leq 10^8$ des Bildes A.14 gestrichelt angegebenen fiktiven Kurvenverläufe können ebenfalls nach Formel (A.7) beschrieben werden, wobei die Berechnungskonstanten B in Tafel A.3 auch für diesen Lastspielzahlbereich gelten.

7 Konstruktive Voraussetzungen

Sinngemäß gelten die Hinweise nach Abschnitt 10 im Hauptteil dieses AD 2000-Merkblattes.

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 1,5fache der dünnsten angrenzenden Wand betragen.

8 Prüfungstechnische Voraussetzungen

Für wechselbeanspruchte Gussstücke 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.

8.1 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.

8.2 Prüfung während der Fertigung

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

8.2.2 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 1690-10 einzuhalten.

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

8.3 Prüfungen während des Betriebes

8.3.1 Die Prüfintervalle für Prüfungen während des Betriebes und nach Erreichen der rechnerischen Lebensdauer sind abweichend von Abschnitt 12.3.1 bzw. 12.3.4 im Hauptteil dieses AD 2000-Merkblattes wegen der in den Lastspielzahlkurven nach Bild A.14 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.

8.3.2 Wenn die Spannungsschwingbreite $2 \sigma_a^*$ abweichend von Tafel A.3 80 N/mm^2 nicht übersteigt, kann auf die Prüfungen aufgrund der Wechselbeanspruchung verzichtet werden.

9 Reparaturen von festgestellten Oberflächenfehlern

Eine 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.

10 Schrifttum

- [1] *Gorsitzke, B.*: Berechnung der Ermüdungslebensdauer wechselbeanspruchter Druckbehälter aus Gusseisen mit Kugelgrafit.
Empfehlungen zur Ermüdungsfestigkeitsberechnung in Anlehnung an die AD-Merkblätter S 1/S 2 und DIN EN 13445-3, 17/18:1999 – Vorschläge zum Europäischen Norm-Entwurf prEN 13445 Teil 7 (12.99): Zusätzliche Anforderungen an Druckbehälter und Druckbehälterteile aus Gusseisen mit Kugelgrafit.
 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.

Tafel A.3 — Berechnungskonstante B und Spannungsschwingbreiten bei $N \geq 2 \cdot 10^6$

Lastspielzahlbereich	Berechnungs- konstante B		Spannungsschwingbreite $2 \sigma_a = \text{konstant [N/mm}^2\text{]}$			
	$10^3 \leq N \leq 10^8$		Einstufenlast $N \geq 2 \cdot 10^6$		Lastkollektiv $N = 10^8$	
Qualitätsklasse	A	B	A	B	A	B
Werkstoffsorte						
EN-GJS-400-15/15U	1173	1056	275	247	186	167
EN-GJS-400-18/18U-LT						
EN-GJS-350-22/22U-LT	1091	982	256	230	173	156

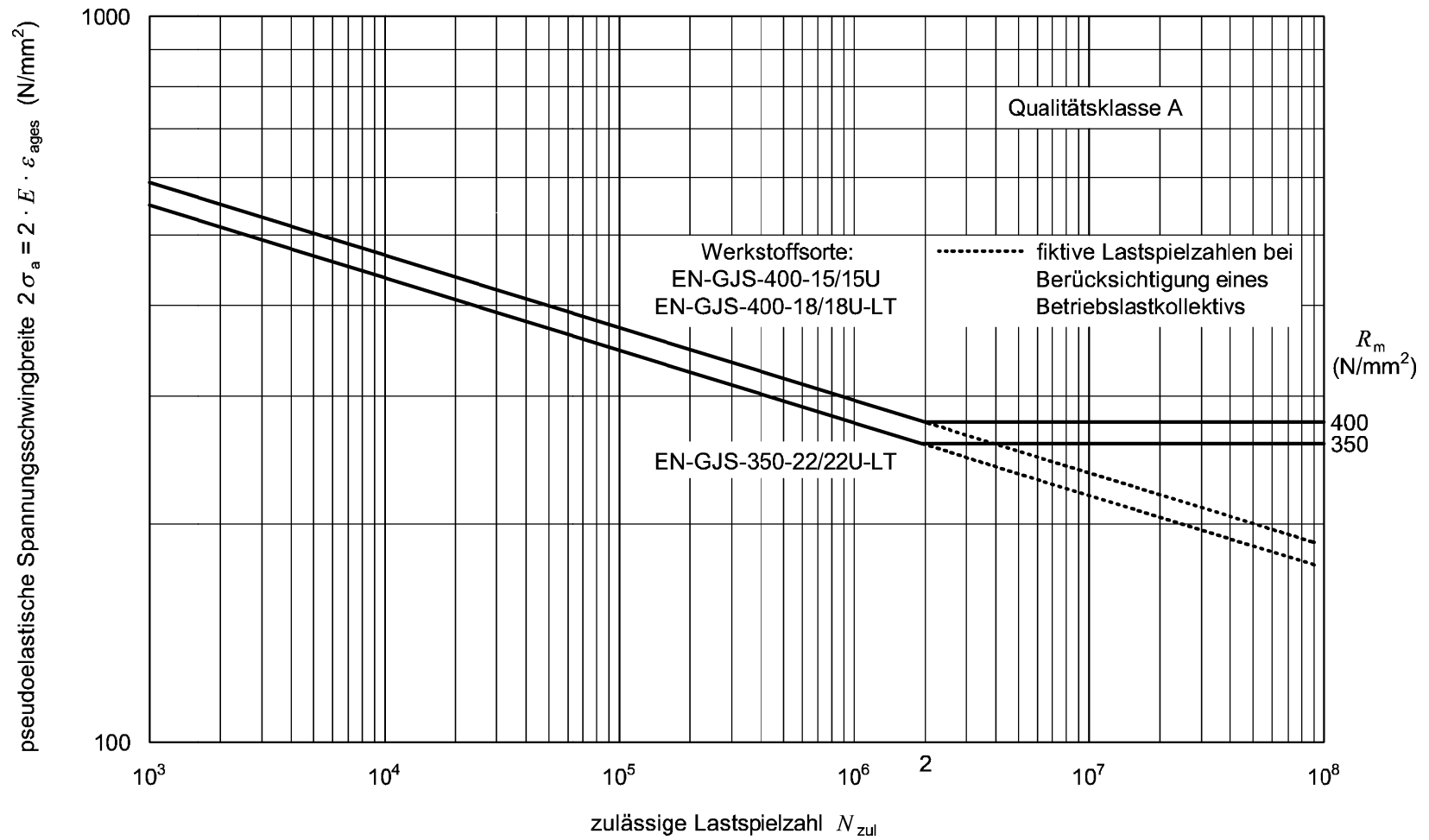


Bild A.14 — Zulässige Lastspielzahlen in Abhängigkeit von der Spannungsschwingbreite für Gusseisen mit Kugelgraphit bei Raumtemperatur ($\bar{\sigma}$ -unabhängig)

Anhang 6 zum AD 2000-Merkblatt S 2

Berechnung auf Wechselbeanspruchung für Behälter aus Aluminiumlegierungen – Knetwerkstoffe

1 Geltungsbereich

Die nachstehenden Regeln einer ausführlichen Berechnung auf Wechselbeanspruchung gelten für drucktragende Teile von Druckbehältern aus Aluminiumlegierungen als Knetwerkstoffe, die nach AD 2000-Merkblatt W 6/1 hergestellt und geprüft werden, und für maßgebliche Temperaturen $T^* \leq 100 \text{ °C}$.

2 Allgemeines

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

2.2 Die Lastspielzahlkurven nach den Bildern A.15 und A.16 sind auf eine Ausfallwahrscheinlichkeit von ca. 2,3 % abgestimmt.

2.3 Die Abknickpunkt-Lastspielzahl N_D , von der ab die Lastspielzahlkurven für Einstufenbelastung horizontal verlaufen (Schwingfestigkeitswerte lastspielzahlunabhängig), ist auf $5 \cdot 10^6$ festgelegt.

2.4 Wechselnde thermische Belastungen sind von dieser Berechnung ausgeschlossen.

3 Maßgebende Vergleichsspannungsschwingbreite im überelastisch beanspruchten Bereich

Der Vergrößerungsfaktor k_e für mechanische Belastungen im überelastischen Bereich ist analog Abschnitt 6 im Hauptteil dieses AD 2000-Merkblattes zu ermitteln, wobei die Werte A 1, A 2 und A 3 aus Tafel 1 für Austenite zu entnehmen sind.

4 Zulässige Spannungsschwingbreite bei bekannter Lastspielzahl

4.1 Ungeschweißte Bauteilbereiche

Die zulässige Spannungsschwingbreite $2 \sigma_{\text{azul}}$ ist sinngemäß nach Abschnitt 7.1, Formel (13) im Hauptteil dieses AD 2000-Merkblattes zu ermitteln.

4.1.1 Die Spannungsschwingbreite $2 \sigma_a$ für ungekerbte, polierte Probestäbe bei Raumtemperatur und reiner Wechselbeanspruchung (Mittelspannung $\bar{\sigma} = 0$) ist nach Formel (A.8) im Geltungsbereich $10^3 \leq N \leq 5 \cdot 10^6$ zu berechnen oder aus Bild A.15 zu ermitteln. In den Kurven ist ein Spannungssicherheitsbeiwert von $S_\sigma = 1,5$ bzw. ein Lastspiel-sicherheitsbeiwert $S_N \geq 3,5$ gegenüber den mittleren Schädigungskurven berücksichtigt.

$$2 \sigma_a = 2,01 \cdot 10^4 / N^{0,7} + 2,18 \cdot R_m / N^{0,1} \quad (\text{A.8})$$

Die Spannungsschwingbreite $2 \sigma_a$ für $N_D \geq 5 \cdot 10^6$ kann auch aus Tafel A.4 entnommen werden.

4.1.2 Zur Berechnung der Oberflächen- und Waddicken-Korrekturfaktoren f_0 und f_d gelten ausschließlich der Bilder 6 und 7 sinngemäß die Abschnitte 7.1.2 bzw. 7.1.3 im Hauptteil dieses AD 2000-Merkblattes, wobei anstelle des Exponenten

$$(0,4343 \cdot \ln N - 2) / 4,301$$

in den Formeln (15) und (17) der Exponent

$$(0,4343 \cdot \ln N - 2) / 4,699$$

zu setzen ist.

Für $N \geq 5 \cdot 10^6$ ist $f_0 = F_0$ bzw. $f_d = F_D$.

Falls nicht anders spezifiziert, ist für die Oberfläche von gewalzten oder gepressten Teilen eine Rautiefe von $R_z = 100 \text{ µm}$ einzusetzen.

4.1.3 Zur Ermittlung des Mittelspannungs-Korrekturfaktors f_M sind Abschnitt 7.1.4 im Hauptteil dieses AD 2000-Merkblattes, ausschließlich der Formel (21), und Bild 9 heranzuziehen. Die größere Mittelspannungsempfindlichkeit von Aluminiumlegierungen gegenüber Stählen ist durch Formel (A.9) zu berücksichtigen.

$$M = 0,74 \cdot 10^{-3} \cdot R_m + 0,025 \quad (\text{A.9})$$

4.1.4 Bei Lastzyklustemperatur $T^* > 50 \text{ °C}$ ist der temperaturbedingte Abfall der Schwingfestigkeit nach

$$f_{T^*} = 1 - 0,003 (T^* - 50) \quad (\text{A.10})$$

zu bestimmen.

4.2 Geschweißte Bauteilbereiche

4.2.1 Die zulässige Spannungsschwingbreite $2 \sigma_{a\text{zul}}$ ist ausschließlich des Abschnittes 7.2.7 sinngemäß nach Abschnitt 7.2 Formel (26) im Hauptteil dieses AD 2000-Merkblattes zu berechnen. Dabei ist die Spannungsschwingbreite $2 \sigma_a$ in Abhängigkeit von der Schweißnahtgestaltung bei Raumtemperatur aus Bild A.16 zu entnehmen. Die Kurven des Bildes A.16 können durch die Formel (A.11) im Bereich $10^3 \leq N \leq 5 \cdot 10^6$ und Konstanten der Tafel A.5 beschrieben werden.

$$2 \sigma_a = (B1/N)^{1/m1} \quad (\text{A.11})$$

4.2.2 Übersteigt die zulässige Spannungsschwingbreite für den geschweißten Bauteilbereich die zulässige Spannungsschwingbreite nach Abschnitt 4.1, so ist diese auf den Wert nach Abschnitt 4.1 zu begrenzen.

5 Zulässige Lastspielzahl bei bekannter Spannungsschwingbreite

Bei der Ermittlung der zulässigen Lastspielzahl N_{zul} ist sinngemäß nach Abschnitt 8 im Hauptteil dieses AD 2000-Merkblattes vorzugehen.

5.1 Bei ungeschweißten Bauteilen ist die zulässige Lastspielzahl iterativ aus Formel (A.8) zu berechnen oder aus Bild A.15 zu entnehmen.

5.2 Bei geschweißten Bauteilen wird die zulässige Lastspielzahl nach

$$N_{\text{zul}} = B1/(2 \sigma_a^*)^{m1} \quad (\text{A.12})$$

mit den Konstanten aus Tafel A.5 oder aus Bild A.16 ermittelt.

Hierbei bleiben die Formeln (28), (28a) und (33) im Hauptteil dieses AD 2000-Merkblattes zur Berechnung der Spannungsschwingbreite $2 \sigma_a$ im Fall verringerter Schweißseignispannungen unberücksichtigt.

5.3 Übersteigt die zulässige Lastspielzahl für den geschweißten Bereich die zulässige Lastspielzahl nach Abschnitt 5.1, so ist diese auf den Wert nach Abschnitt 5.1 zu begrenzen.

6 Berücksichtigung eines Betriebslastkollektivs

Der Berechnungsgang ist sinngemäß nach Abschnitt 9 im Hauptteil dieses AD 2000-Merkblattes mit den entsprechenden Lastspielzahlkurven der Bilder A.15 und A.16 unter Ausschluss der Überlagerung von Kriechschädigung nach den Abschnitten 9.3 und 9.4 durchzuführen.

Die in den Bildern A.15 und A.16 im Bereich $5 \cdot 10^6 \leq N \leq 10^8$ gestrichelt angegebenen fiktiven Kurvenverläufe können für ungeschweißte Bauteile ebenfalls nach Formel (A.8) und für Schweißverbindungen nach Formel (A.13)

$$N_{\text{zul k}} = B2/(2 \sigma_a^*)^{m2} \quad (\text{A.13})$$

mit den in Tafel A.5 angegebenen Konstanten B2 und Exponenten m2 beschrieben werden.

7 Konstruktive, herstellungstechnische und prüftechnische Voraussetzungen

7.1 Für die konstruktiven, herstellungstechnischen und prüftechnischen Voraussetzungen gelten sinngemäß die Regelungen nach den Abschnitten 10, 11 und 12 im Hauptteil dieses AD 2000-Merkblattes.

7.2 Wegen hoher Kerbempfindlichkeit von Aluminium wirken sich Riefen besonders lebensdauerabmindernd aus und sind deshalb zu vermeiden.

7.3 Bei Schweißnähten sind die Anforderungen der Bewertungsgruppe B nach DIN EN ISO 10042 einzuhalten.

7.4 Die Prüfintervale für die Prüfungen nach Abschnitt 12.3 im Hauptteil dieses AD 2000-Merkblattes sind auf 25 % von N_{zul} festzulegen. Hierbei ist bei Bauteilen, die für eine Betriebslastspielzahl $\geq 5 \cdot 10^6$ berechnet sind, $N = 5 \cdot 10^6$ einzusetzen.

7.5 Für die Maßnahmen bei Erreichen der rechnerischen Lebensdauer gelten die Regelungen nach Anhang 4, Abschnitt 8 dieses AD 2000-Merkblattes.

8 Berücksichtigung besonderer Betriebsbedingungen

Für den Schwingfestigkeitsabfall bei ausgeprägtem Korrosionsangriff gelten die allgemeinen Hinweise nach Abschnitt 13.1 im Hauptteil dieses AD 2000-Merkblattes.

Bei allen Arten des Zusammenwirkens von Wechselbeanspruchung und Korrosion ist die Lebensdauer nicht nur von der Lastspielzahl, sondern auch von der Zeit der Korrosionseinwirkung abhängig.

Bei Behältern mit feuchten Schüttgütern (z. B. Zement) und zyklischer Innendruck-Beanspruchung beim Füllen und Entleeren kommt auf Grund von Erkenntnissen aus Schadensfällen konstruktiven und fertigungstechnisch spannungsvermindernden Maßnahmen besondere Bedeutung zu.

9 Schrifttum

- [1] *Hobbacher, A.*: Empfehlungen zur Schwingfestigkeit geschweißter Verbindungen und Bauteile. IIW-Dokument XIII-1359-96/XV-845-96, DVS-Verlag, Düsseldorf 1997.
- [2] European Recommendations for Aluminium Alloy Structures Fatigue Design. ECCS-TC2-TG4/ERAAS 1992.
- [3] British Standard 8118: Part 1: 1991, Section 7.
- [4] *Bäumel, A.; Seeger, T.*: Materials Data for Cyclic Loading. Supplement 1. Elsevier Science Publishers, Amsterdam, 1990.
- [5] *Hobbacher, A.; Neumann, A.*: Schweißtechnisches Handbuch für Konstrukteure; Teil 4 – Geschweißte Aluminiumkonstruktionen. DVS-Verlag GmbH, Düsseldorf 1993.
- [6] *Haibach, E.*: Betriebsfestigkeit – Verfahren und Daten zur Bauteilberechnung. VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf 1989.
- [7] FKM-Richtlinie: Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile aus Stahl, Eisenguss- und Aluminiumwerkstoffen. VDMA-Verlag GmbH, Frankfurt/Main, 4., erweiterte Ausgabe 2002.

10 Erläuterungen

Zu Abschnitt 1

Für Druckbehälter kommen üblicherweise Aluminiumlegierungen als Knetwerkstoffe zur Anwendung. Reinaluminium mit relativ niedrigen Festigkeiten hat kaum Bedeutung. Der Anhang wird deshalb auf o. a. Werkstoffe beschränkt. Der Anwendungsbereich wird vorerst auf 100 °C beschränkt, da bei Aluminiumwerkstoffen im Allgemeinen temperaturbedingte Kriecherscheinungen bereits wenig oberhalb der Raumtemperatur auftreten.

Zu Abschnitt 2.3

Eine klassische Dauerfestigkeit ist bei Aluminiumwerkstoffen nicht gegeben. Zum ingenieurmäßigen Ermüdungsfestigkeitsnachweis wird in Anlehnung an [1; 2] die Abknickpunkt-Lastspielzahl bei Einstufenbelastung sowohl für ungeschweißte als auch geschweißte Bauteile einheitlich auf $5 \cdot 10^6$ festgelegt.

Zu Abschnitt 3 und Bildern A.15, A.16

Abgestimmt auf die Anforderungen im Maschinenbau und Stahlbau beginnen die Wöhlerkurven in [1; 2; 7] erst bei 10000 Lastspielen. Hierbei sind plastische Ermüdungs-Verformungen praktisch ausgeschlossen.

Im Hinblick auf die Belange einiger Druckbehälterarten wie z. B. Fahrzeugbehälter ist eine Ermüdungsfestigkeitsbeurteilung aber auch für nur wenige Tausend Lastzyklen erforderlich. Die untere Lastspielzahl in den Bildern A.15 und A.16 wurde deshalb auf 1000 Lastspiele (wie auch in [3]) festgelegt. Hierbei sind wie bei Stählen Korrekturfaktoren für überelastische Beanspruchungen in Rechnung zu setzen.

Stichprobenartige Nachrechnungen mit zyklischen Werkstoffkennwerten für einige Aluminiumlegierungen führten zu dem Ergebnis, dass man in erster Näherung wie bei austenitischen Werkstoffen vorgehen kann.

Zu Formel (A.8)

Die Ermüdungsfestigkeit von Aluminiumlegierungen hängt neben verschiedenen Einflussfaktoren wie z. B. Legierungszusammensetzung, Zustand und Herstellungsart ähnlich wie bei Stahl primär von der Zugfestigkeit ab. In Abweichung von [1] und [2], in denen für ungeschweißte Bauteile aus Legierungen der Registriernummern der Reihe 6000 zusammenfassend nur eine Wöhlerkurve enthalten ist, werden hier zugfestigkeitsabhängige Auslegungskurven angegeben, wie sinngemäß auch in [7] vorgegangen wird. Die Auslegungskurven beruhen auf dehnungsbasierten Werkstoff-Wöhlerlinien in der Darstellung von *Manson, Coffin, Morrow* mit Richtwerten für die das zyklische Werkstoffverhalten beschreibenden Parameter.

$$\varepsilon_a = \sigma' f' / E \cdot (2N)^b + \varepsilon' f' \cdot (2N)^c \quad \text{Dehnungsamplitude aus plastischer und elastischer Wechseldehnung}$$

Der Formel (A.8) liegen folgende Kennwerte (Richtwerte) zugrunde:

$\sigma' f' = 1,75 \cdot R_m$ [N/mm ²]	Schwingfestigkeitskoeffizient
$b = -0,1$	Schwingfestigkeitsexponent
$\varepsilon' f' = 0,35$	Duktilitätskoeffizient
$c = -0,7$	Duktilitätsexponent

Hiermit ergibt sich mit $E = 7 \cdot 10^5$ N/mm² eine zugfestigkeitsbezogene Schädigungs-Spannungsamplitude bei einer Bezugslastspielzahl $N = 1 \cdot 10^6$ von $\sigma_a / R_m \approx 0,42$, die mit dem in [4] angegebenen Richtwert übereinstimmt. Bei Berücksichtigung einer Spannungssicherheit $S_\sigma = 1,5$ und einer Lastspielzahlsicherheit von mindestens $S_N = 3,5$ analog AD 2000-Merkblatt S 2, Anhang 4 wird wegen des bei Aluminiumwerkstoffen typischen flachen Wöhlerlinien-Verlaufs die Spannungssicherheit über dem gesamten Lastspielzahlbereich ($N \geq 10^3$) maßgebend, die schließlich zu Formel (A.8) führt.

Zu Abschnitt 4.1.2

Zur sinngemäßen Berechnung der Oberflächen- und Waddicken-Korrekturfaktoren nach Abschnitt 7.1.2 bzw. 7.1.3 im Hauptteil dieses AD 2000-Merkblattes wurden die Exponenten auf die Abknickpunkt-Lastspielzahl $N_D = 5 \cdot 10^6$ abgestimmt.

Zu Formel (A.9)

Formel (A.9) wurde aus Versuchsdaten zur Mittelspannungsempfindlichkeit M von Aluminiumwerkstoffen nach *Haibach/Schütz* ([6], Bild 2.1–9) abgeleitet.

Zu Formel (A.10)

Der temperaturbedingte Abfall der Ermüdungsfestigkeit wurde als unterer Grenzwert des Temperaturverhaltens einiger Aluminiumlegierungen bei Wechselbeanspruchung festgelegt.

Zu Abschnitt 4.2

Die Wöhlerkurven für geschweißte Bauteilbereiche sind wie bei Stahl nahezu mittelspannungs- und zugfestigkeitsunabhängig. Die Klassifizierung der verschiedenen Schweißnahtausführungen erfolgt wie für Stahl-Schweißverbindungen nach Tafel 5 dieses AD 2000-Merkblattes, wobei die zulässigen Spannungsschwingbreiten bei $2 \cdot 10^6$ Lastspielen sinngemäß den in [1; 2; 3] enthaltenen FAT- bzw. Class-Festigkeitswerten zugeordnet sind. Die Neigung der Wöhlerlinien für die verschiedenen Nahtklassen wurde in Anlehnung an [3] festgelegt. Für kerbspannungsarme Verbindungen verlaufen die Wöhlerlinien flacher als bei kerbintensiveren. Der Neigungsexponent m_1 reicht von 4 bis 3. Es wird unterstellt, dass Schweißeigenstressungen entsprechend einem Spannungsverhältnis $R = 0,5$ vorliegen.

Bei niedrigsten Legierungen können sich nach Abschnitt 4.1 (ungeschweißte Bereiche) niedrigere zulässige Spannungsschwingbreiten ergeben als für kerbspannungsarme Schweißverbindungen. In diesen Fällen ist der kleinere Spannungswert maßgebend.

Zu Abschnitt 6

Zur Berücksichtigung eines Betriebslastkollektivs werden die Wöhlerkurven für Schweißverbindungen ab der Abknickpunkt-Lastspielzahl $N_D = 5 \cdot 10^6$ bei Einstufenbelastung mit der üblichen flacheren Steigung $m_2 = m_1 + 2$ fortgesetzt. Die Wöhlerkurven für ungeschweißte Teile werden wegen des flachen Verlaufs im Bereich hoher Lastspielzahlen nach Formel (A.8) weitergeführt.

Tafel A.4 — Spannungsschwingbreite $2 \sigma_a$ bei Abknickpunkt-Lastspielzahlen für ungekerbte Probestäbe aus Aluminium-Knetlegierungen bei Raumtemperatur und Mittelspannung $\bar{\sigma} = 0$

Zugfestigkeit R_m [N/mm ²]	2 σ_a = konst. [N/mm ²]	
	$N \geq 5 \cdot 10^6$	$N \geq 10^8$ Lastkollektiv
300	140	104
250	117	86
200	94	69
150	70	52

Tafel A.5 — Konstanten B1, B2, m_1 , m_2 und Spannungsschwingbreiten 2 σ_a bei Abknickpunkt-Lastspielzahlen für Schweißverbindungen aus Aluminium-Knetlegierungen bei Raumtemperatur

Klasse	Konstanten				Spannungsschwingbreite 2 σ_a = konst. [N/mm ²]	
	$10^3 \leq N \leq 5 \cdot 10^6$		$5 \cdot 10^6 \leq N \leq 10^8$		$N \geq 5 \cdot 10^6$	$N \geq 10^8$ Lastkollektiv
	m_1	B1	m_2	B2		
K 0	4,0	$1,25 \cdot 10^{13}$	6,0	$1,98 \cdot 10^{16}$	40	24
K 1	3,5	$5,07 \cdot 10^{11}$	5,5	$3,68 \cdot 10^{14}$	27	16
K 2	3,25	$1,01 \cdot 10^{11}$	5,25	$4,50 \cdot 10^{13}$	21	12
K 3	3,0	$2,13 \cdot 10^{10}$	5,0	$5,60 \cdot 10^{12}$	16	9

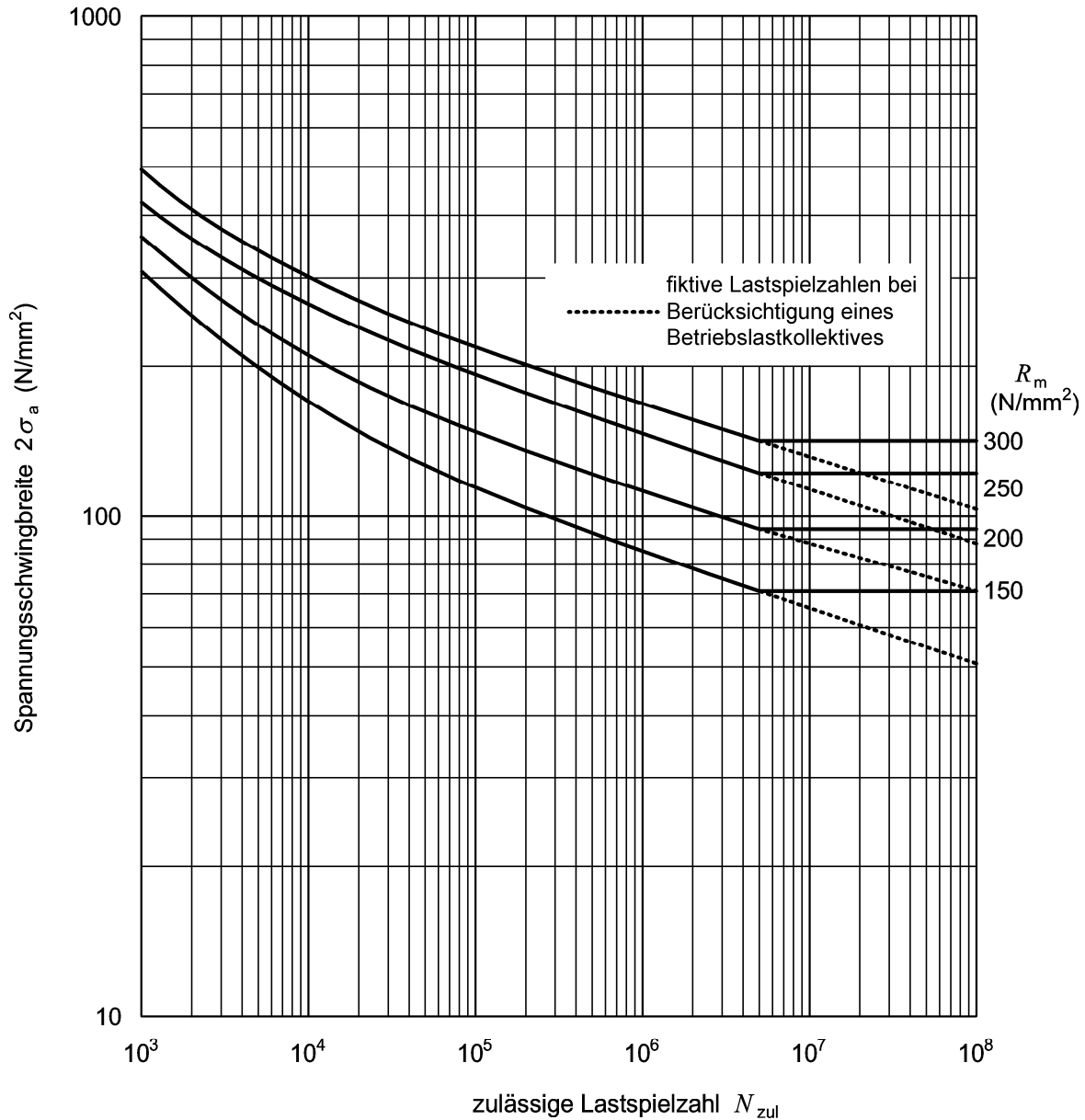


Bild A.15 — Zulässige Lastspielzahlen in Abhängigkeit von der Spannungsschwingbreite für ungekerbte Probestäbe aus Aluminium-Knetlegierungen bei Raumtemperatur ($\bar{\sigma} = 0$)

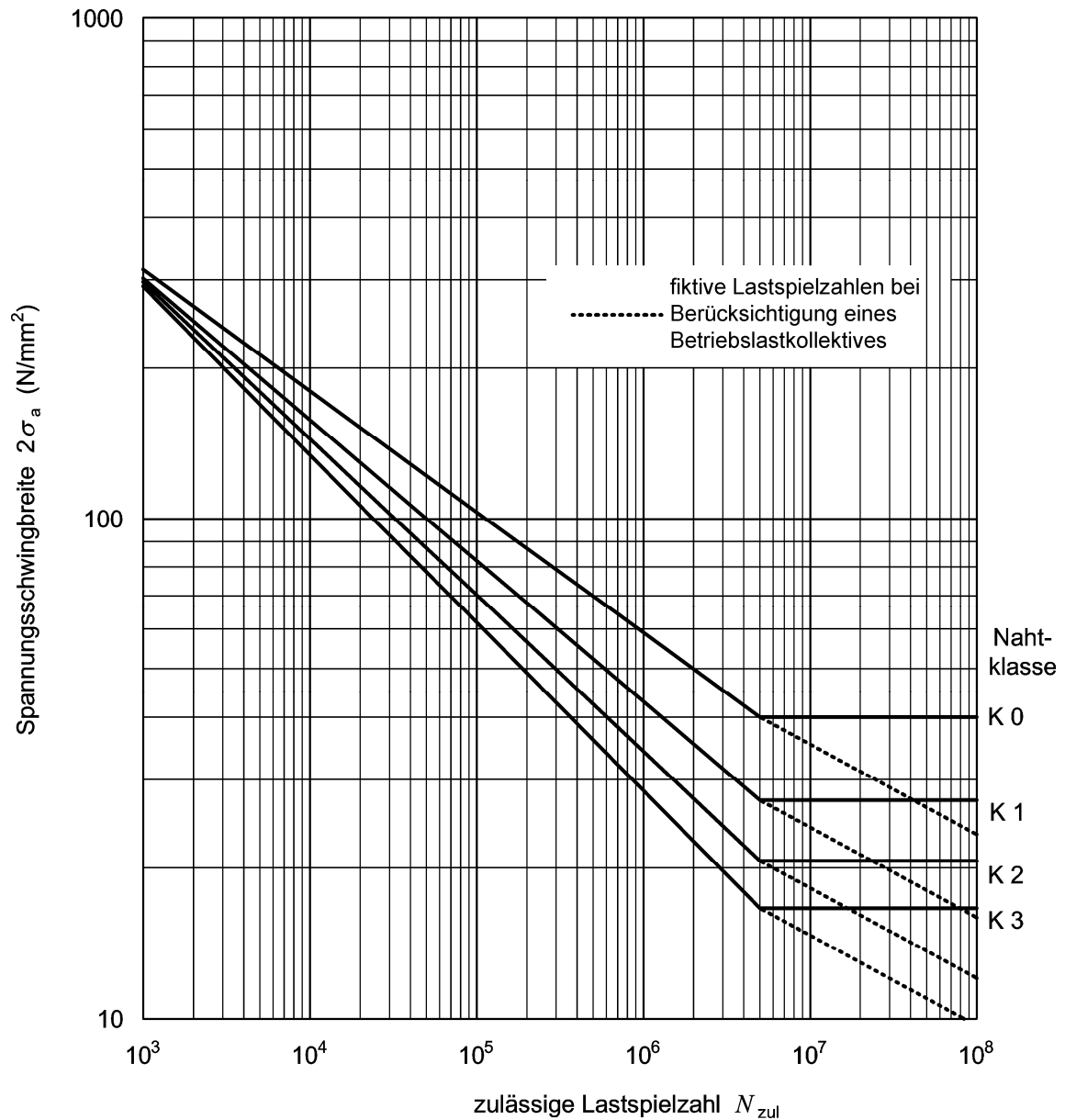


Bild A.16 — Zulässige Lastspielzahlen in Abhängigkeit von der Spannungsschwingbreite für Schweißverbindungen aus Aluminium-Knetlegierungen bei Raumtemperatur (σ -unabhängig)

Herausgeber:



Verband der TÜV e.V.

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