

DIN EN 13445-3/A3

ICS 23.020.30

Entwurf

Einsprüche bis 2017-04-17
Vorgesehen als Änderung von
DIN EN 13445-3:2016-12

**Unbefeuerte Druckbehälter –
Teil 3: Konstruktion;
Deutsche und Englische Fassung EN 13445-3:2014/prA3:2017**

Unfired pressure vessels –
Part 3: Design;
German and English version EN 13445-3:2014/prA3:2017
Récipients sous pression non soumis à la flamme –
Partie 3: Conception;
Version allemande et anglaise EN 13445-3:2014/prA3:2017

Anwendungswarnvermerk

Dieser Norm-Entwurf mit Erscheinungsdatum 2017-02-17 wird der Öffentlichkeit zur Prüfung und Stellungnahme vorgelegt.

Weil die beabsichtigte Norm von der vorliegenden Fassung abweichen kann, ist die Anwendung dieses Entwurfs besonders zu vereinbaren.

Stellungnahmen werden erbeten

- vorzugsweise online im Norm-Entwurfs-Portal von DIN unter www.din.de/go/entwuerfe bzw. für Norm-Entwürfe der DKE auch im Norm-Entwurfs-Portal der DKE unter www.entwuerfe.normenbibliothek.de, sofern dort wiedergegeben;
- oder als Datei per E-Mail an fnca@din.de möglichst in Form einer Tabelle. Die Vorlage dieser Tabelle kann im Internet unter www.din.de/go/stellungnahmen-norm-entwuerfe oder für Stellungnahmen zu Norm-Entwürfen der DKE unter www.dke.de/stellungnahme abgerufen werden;
- oder in Papierform an den DIN-Normenausschuss Chemischer Apparatebau (FNCA), 10772 Berlin, Burggrafenstr. 6, 10787 Berlin.

Die Empfänger dieses Norm-Entwurfs werden gebeten, mit ihren Kommentaren jegliche relevanten Patentrechte, die sie kennen, mitzuteilen und unterstützende Dokumentationen zur Verfügung zu stellen.

Gesamtumfang 217 Seiten

DIN-Normenausschuss Chemischer Apparatebau (FNCA)

Nationales Vorwort

Dieses Dokument (EN 13445-3:2014/prA3:2017) wurde vom Technischen Komitee CEN/TC 54 „Unbefeuerte Druckbehälter“ erarbeitet, dessen Sekretariat vom BSI (Vereinigtes Königreich) gehalten wird. Das zuständige deutsche Normungsgremium ist der Arbeitsausschuss NA 012-00-05 AA „Unbefeuerte Druckbehälter“ im DIN-Normenausschuss Chemischer Apparatebau (FNCA).

Dieses Dokument enthält Korrekturen zu DIN EN 13445-3:2016-12.

Es ist vorgesehen, den Inhalt dieses Dokumentes bei einer Neuauflage von DIN EN 13445-3 einzuarbeiten.

Um Zweifelsfälle in der Übersetzung auszuschließen, ist die englische Originalfassung der EN 13445-3/prA3 beigelegt. Die Nutzungsbedingungen für den deutschen Text des Norm-Entwurfes gelten gleichermaßen auch für den englischen Text.

Unbefeuerte Druckbehälter — Teil 3: Konstruktion

Réipients sous pression non soumis à la flamme — Partie 3 : Conception

Unfired pressure vessels — Part 3: Design

ICS:

Deskriptoren

Dokument-Typ: Europäische Norm
Dokument-Untertyp: Änderung
Dokument-Stage: CEN-Umfrage
Dokument-Sprache: D

Inhalt

	Seite
1 Änderung des Unterabschnitts 5.4.2	4
2 Änderung des Abschnitts 6	4
3 Änderung des Abschnitts 17.1	5
4 Änderung des Abschnitts 17.2	5
5 Änderung des Abschnitts 17.4	8
6 Änderung des Abschnitts 17.5	9
7 Änderung des Abschnitts 17.6	16
8 Änderung des Abschnitts 17.9	22
9 Änderung des Abschnitts 18	22
10 Änderung des Anhangs N „Literaturhinweise zu Abschnitt 18“	70
11 Neuer Anhang NA „Anweisungen zur Bestimmung von Strukturspannungen an Schwachstellen mittels Finite-Elemente-Analyse mit Schalen- und Ziegelementen“	71
12 Neuer Anhang NB „Zyklenzählung und Bestimmung der Vergleichsspannungsschwingbreite“	79
13 Neuer Anhang NC „Spannungen in doppelseitigen Kehlnähten“	98
14 Neuer Anhang ND „Tabelle der Spannungskonzentrationsfaktoren/Formzahlen K_f “	101
15 Neuer Anhang U „Leitlinien zur Vernachlässigbarkeit zusätzlicher Wärmezyklen bei der Ermüdungsfestigkeitsbewertung und der Bewertung von Thermo-Sperren“	102

Europäisches Vorwort

Dieses Dokument (EN 13445-3:2014/prA3:2017) wurde vom Technischen Komitee CEN/TC 54 „Unbefeuerte Druckbehälter“ erarbeitet, dessen Sekretariat vom BSI gehalten wird.

Dieses Dokument ist derzeit zur CEN-Umfrage vorgelegt.

Dieses Dokument wurde unter einem Mandat erarbeitet, das die Europäische Kommission und die Europäische Freihandelszone dem CEN erteilt haben, und unterstützt grundlegende Anforderungen der EU-Richtlinien.

Zum Zusammenhang mit EU-Richtlinien siehe informativen Anhang ZA, der Bestandteil dieses Dokuments ist.

1 Änderung des Unterabschnitts 5.4.2

Ersetzen des gesamten Unterabschnitts 5.4.2 mit dem Folgenden:

„5.4.2 Behälter sämtlicher Prüfgruppen, Druckbelastung vorwiegend nicht-zyklischer Art

Die in den Abschnitten 7 bis 16, den Anhängen G und J und in Abschnitt 19 (nur für die Prüfung der Untergruppen 1 c und 3 c) sowie die Anforderungen von Anhang B und C ergeben eine zufriedenstellende Auslegung für Behälter unter ruhenden Druckbelastungen, d. h. bei denen die Anzahl der Druckzyklen über die volle Schwingbreite bzw. die Anzahl der äquivalenten Druckzyklen über die volle Schwingbreite unter bzw. bei 500 liegt.

$$n_{eq} \leq 500 \quad (5.4-1)$$

Dann ist keine Analyse der Ermüdung erforderlich, und es kommen die Standardanforderungen der zerstörungsfreien Prüfungen nach EN 13445-5:2014 zur Anwendung. Zyklische Wärmespannungen können vernachlässigt werden, wenn:

- die Anzahl der Anfahr- und Abfahrzyklen 2 000 nicht übersteigt und die Temperaturveränderungsrate an der Oberfläche weniger als 60 °C pro Stunde bei ferritischen Stahlabschnitten unbeschränkter Dicke beträgt. Bei Abschnitten moderater Dicke kann der Konstrukteur eine höhere Temperaturveränderungsrate an der Oberfläche, basierend auf entsprechender Industrieerfahrung und Praxis, gestatten.
- die Anforderungen des Anhangs U für die Betriebsbedingungen erfüllt werden.

Wenn diese Bedingung nicht erfüllt werden kann und/oder zyklische Belastungen vorliegen, die keine Druckbelastungen darstellen (z. B. Wärmebelastungen, verbundene Verrohrung) und welche nicht vernachlässigt werden können, dann ist eine Ermüdungsfestigkeitsbewertung entweder nach Abschnitt 17 oder Abschnitt 18 notwendig.

Die äquivalente Anzahl voller Druckzyklen n_{eq} wird bestimmt durch:

$$n_{eq} = \sum n_i \times \left(\frac{\Delta P_i}{P_{max}} \right)^3 \quad (5.4-2)$$

In der oben angegebenen Gleichung steht P_{max} für den maximal zulässigen Druck, P_{max} , der für den gesamten Behälter (siehe 3.16) für den Lastfall bei Normalbetrieb berechnet wurde (siehe 5.3.2.1).

Zur Vereinfachung darf P_{max} durch den Berechnungsdruck P ersetzt werden.

ANMERKUNG Der Wert von 500 äquivalenten Druckzyklen über die volle Schwingbreite ist nur eine ungefähre Angabe. Es kann davon ausgegangen werden, dass für Bauteile mit Unregelmäßigkeiten im Profil, einer stark variierenden örtlichen Beanspruchung, auf die zusätzliche Beanspruchungen - nicht in Form von Druck - einwirken, eine Ermüdungsschädigung vor 500 Zyklen eintreten kann.“

2 Änderung des Abschnitts 6

Folgendes im Abschnitt 6.1.3 löschen:

„Für die Prüfgruppe 4 ist der maximale Wert der Berechnungsnennspannung für normale Auslegungsbedingungen mit dem Faktor 0,9 zu multiplizieren.“

In der Tabelle 6-1 die folgende ANMERKUNG a) entfernen und die ANMERKUNGEN b, c und d entsprechend neu benennen

„a) Für Prüfgruppe 4 ist der Wert der Berechnungsnennspannung mit 0,9 zu multiplizieren.“

3 Änderung des Abschnitts 17.1

Ersetzen des gesamten Unterabschnitts 17.1.1 mit dem Folgenden:

„**17.1.1** Dieser Abschnitt legt Folgendes fest:

- eine Alternative zu der 500-Zyklen-Regel aus 5.4.2 für Behälter, die hauptsächlich Druckschwankungen ausgesetzt sind;
- einen Ersatz für die 500-Zyklen-Regel in 5.4.2 für Behälter, die zusätzlich auch Schwankungen des Temperaturgradienten unterliegen sowie
- Regeln für eine vereinfachte Bewertung von Ermüdungsschädigung aufgrund von sowohl Schwankungen im Druck als auch des Temperaturgradienten.

ANMERKUNG Die Regeln in diesem Abschnitt beruhen auf vereinfachten Annahmen einer angemessen konservativen Herangehensweise. Genauere, weniger konservative Ergebnisse werden gewöhnlich bei Anwendung der Regeln in Abschnitt 18 erzielt.“

Den ersten Satz und die ANMERKUNG in 17.1.2 mit dem Folgenden ersetzen:

„**17.1.2** Andere Wechselbeanspruchungen, z. B. durch Schwankungen äußerer Lasten, sind normalerweise gemäß Abschnitt 18 zu berechnen. Es ist jedoch zulässig, in diesem Abschnitt zyklische Belastungen, welche keine Druckbelastungen darstellen, zu berücksichtigen, und zwar:“

ANMERKUNG Dieser Abschnitt enthält Informationen zur Bewertung der Spannungsschwingbreite, ausschließlich aufgrund des Druckes und der Wärmespannungen. Wenn andere Belastungen berücksichtigt werden, ist für die Bestimmung der entsprechenden Spannungsschwingbreiten der Hersteller verantwortlich.“

4 Änderung des Abschnitts 17.2

Definition in 17.2.7 mit dem Folgenden ersetzen:

„**17.2.7**

äquivalente Anzahl voller Druckzyklen

Anzahl n_{eq} der vollen Druckzyklen, die denselben Schaden verursachen wie alle Zyklen der verschiedenen Quellen und Schwingbreiten.

Anmerkung 1 zum Begriff: Nur für Druckbelastungen wird n_{eq} durch Gleichung (17.5-1) bestimmt.

Anmerkung 2 zum Begriff: Nur für Druck- und Wärmespannungen wird n_{eq} durch Gleichung (17.5-4) bestimmt.“

Definition in 17.2.9 mit dem Folgenden ersetzen:

„**17.2.9**

Schwingbreite

Wertebereich vom Maximum bis zum Minimum (Spannung oder Belastung) eines Zyklus (das Doppelte der Spannungsamplitude)“

Definition in 17.2.10 mit dem Folgenden ersetzen:

„**17.2.10**

pseudoelastische Spannung

unter der Annahme rein linearelastischen Werkstoffverhaltens berechnete Spannungsschwingung“

Definition in 17.2.13 mit dem Folgenden ersetzen:

„17.2.13

Druckspannungsfaktor

Faktor zur Bestimmung der maximalen Strukturspannung, die in einem Einzelteil eines Behälters aufgrund der geometrischen Konfiguration eines Bauteils (von Bauteilen) auftreten kann“

Die folgenden neuen Definitionen nach der Definition 17.2.13 hinzufügen:

„17.2.14

Wärmespannungsfaktor

Faktor zur Bestimmung der maximalen Strukturspannung, die in einem Einzelteil eines Behälters aufgrund der geometrischen Konfiguration eines Bauteils (von Bauteilen) und der Einwirkung eines Temperaturgradienten auftreten kann“

17.2.15

angrenzende Punkte

zur Bestimmung der Metalltemperaturdifferenz zu berücksichtigende Punkte, an welchen die Wärmebelastungen geschätzt werden

Anmerkung 1 zum Begriff: Diese sind als zwei beliebige Punkte:

- an den Innen- und Außenflächen für einen Gradienten über die Dicke;
- entlang der Oberfläche innerhalb eines Abstands von $1,75\sqrt{D \times e}$ für einen Gradienten entlang der Längs- bzw. Umfangsrichtung einer Schale;
- entlang der Oberfläche innerhalb eines Abstands von $3,5 R$ für einen Gradienten entlang der Längs- bzw. Umfangsrichtung eines ebenen Bodens, wobei R der Radius am Punkt der höchsten Temperatur am ebenen Boden darstellt, definiert.

17.2.16

Metalltemperaturdifferenz zwischen angrenzenden Punkten

Temperaturdifferenz zwischen den angrenzenden Punkten, bestimmt durch den Bezug auf die Metalltemperatur an diesen Punkten (nicht der Fluidtemperatur an diesen Punkten)

17.2.17

theoretischer Kerbfaktor

Verhältnis der auf Grundlage rein elastischen Verhaltens berechneten Kerbspannung zur Strukturspannung in diesem Punkt

Nummerierung der Definitionen 17.2.14 bis 17.2.17 entsprechend ändern.

Definition 17.2.16 durch folgende ersetzen.

„17.2.19

kritischer Bereich

ein Bereich, in dem die kumulierte Gesamtermüdungsschädigungskennzahl (Auslastungsfaktor) den maximalen Wert $D_{\max} = 0,8$ übersteigt“

5 Änderung des Abschnitts 17.3

Im Abschnitt 17.3 die Tabelle mit Folgendem ersetzen:

Bild- zeichen	Bezeichnung	Maß- einheit
C	Ermüdungsklasse C (siehe Tabelle 17-4)	MPa
$C_{\min}$	niedrigste Ermüdungsklasse C (siehe 17.5.4.1)	MPa
N_{eq}	zulässige Anzahl voller Druckzyklen	
D	Gesamtermüdungsschädigungskennzahl, siehe Gleichung (17.7-1)	
$D_{\max}$	maximal zulässiger Wert der Gesamtermüdungsschädigungskennzahl in nicht kritischen Bereichen	
C_e	Korrekturfaktor zur Berücksichtigung des Einflusses der Wanddicke auf die Ermüdungsfestigkeit	
C_T	Korrekturfaktor zur Berücksichtigung des Einflusses der Temperatur auf die Ermüdungsfestigkeit	
E	Elastizitätsmodul des Werkstoffs	MPa
K_f	effektive Formzahl	
K_t	theoretischer Kerbfaktor	
k	Anzahl der Druckschwankungsbreiten, die zusammen die Belastungsspezifikation bilden	
N	zulässige Lastzyklenanzahl aus der zugehörigen Berechnungsermüdungskurve (Kennzahl i bezeichnet die Anzahl für die i -te Spannungsschwingbreite, $i = l, \dots k$)	
n	Anzahl der aufgebrachten Lastzyklen (Kennzahl i bezeichnet die Anzahl für die i -te Spannungsschwingbreite, $i = l, \dots q$)	
n_{eq}	entsprechende Anzahl voller Druckzyklen	
n_p	Anzahl der aufgebrachten Druckzyklen (Kennzahl i bezeichnet die Anzahl für die i -te Spannungsschwingbreite, $i = l, \dots q_i$)	
n_T	Anzahl der aufgebrachten Temperaturdifferenzzyklen (Kennzahl j bezeichnet die Anzahl für die j -te Schwingbreite der Temperaturdifferenz, $k = l, \dots q_k$)	
n_{PT}	Anzahl der aufgebrachten Zyklen der Druck- + Temperaturdifferenz (Kennzahl j bezeichnet die Anzahl für die j -te Schwingbreite der Druck- + Temperaturdifferenz, $k = l, \dots q_k$)	
R	Radius am Punkt der höchsten Temperatur am ebenen Boden	mm
r	Übergangsradius an der Verbindung zweier Wände	mm
T_{diff}	Metalltemperaturdifferenz zwischen angrenzenden Punkten (siehe 17.2.15)	°C
$T_{\min}$	Mindestbetriebstemperatur während eines Zyklus	°C
$T_{\max}$	maximale Betriebstemperatur während eines Zyklus	°C
T^*	angenommene mittlere Temperatur während eines Zyklus	°C

Bild- zeichen	Bezeichnung	Maß- einheit
u	Unrundheit (Abweichung vom kreisrunden Querschnitt eines Behälters)	
α	Wärmeausdehnungsbeiwert des Werkstoffs	(°C)- 1
δ	Parameter für Größe des Versatzes, der Aufdachung oder Abflachung	mm
ΔP	Druckschwankungsbreite, berechnet als algebraische Differenz zwischen Höchst- und Mindestdruck innerhalb des betrachteten Lastzyklus. Vakuum und andere externe Drücke sind als negativ zu berücksichtigen. ANMERKUNG Dies kann dazu führen, dass in einigen Lastzyklen ΔP größer ist als der maximale Berechnungsdruck $P_{\max}$ des Behälters oder Teils desselben.	MPa
ΔP	Schwingbreite der Metalltemperaturdifferenz zwischen angrenzenden Punkten (angrenzende Punkte sind in 17.2.15 definiert)	°C
$\Delta\sigma$	pseudoelastische Spannungsschwingbreite	N/mm ²
$\Delta\sigma^*$	fiktive Spannungsschwingbreite zum Einsetzen in die Berechnungsermüdungskurven	N/mm ²
$\Delta\sigma_R$	Bezugsspannungsschwingbreite in den Berechnungsermüdungskurven	N/mm ²
$\Delta\sigma_D$	Dauerwechselfestigkeit bei konstanter Spannungsschwingbreite	N/mm ²
$\Delta\sigma_{\text{Cut}}$	unterer Grenzwert der Spannungsschwingbreite	N/mm ²
κ	Wärmespannungsfaktor für ein Behälterteil aus Tabelle 17-2	
η	Druckspannungsfaktor für ein Behälterteil aus Tabelle 17-1	
$\eta_{\max}$	maximaler Druckspannungsfaktor im gesamten Behälter	
ANMERKUNG Der Druck $P_{\max}$ aus Abschnitt 17 wird in 3.16, Anmerkung 3, definiert.		

6 Änderung des Abschnitts 17.4

Ersetzen des Unterabschnitts 17.4.1 mit dem Folgenden:

„17.4.1 Dieser Abschnitt gilt für drucktragende Teile und Verbindungen von Druckbehältern, die gemäß den Abschnitten 7 bis 16, Abschnitten 20 und 21 sowie Anhang G ausgelegt wurden (d. h. diejenigen Abschnitte und Anhänge, deren Auslegung nach Bemessungsformeln erfolgt), mit Ausnahme von:

- Kompensatoren;
- Wärmeaustauscher-Rohrböden.

ANMERKUNG 1 Die Ermüdungsfestigkeitsbewertung der Wärmeaustauscher-Rohrböden darf mittels Anhang J dieser Norm erfolgen.

Die Anwendung dieses Abschnitts auf Behälter mit Außenmantel ist gestattet, wenn diese ausschließlich Druckzyklen ausgesetzt werden. Wenn Behälter mit Außenmantel sowohl Druck- als auch Wärmezyklen ausgesetzt sind, dann ist die Anwendung auf die Teile ohne Außenmantel beschränkt.

ANMERKUNG 2 Die Prüfung von Flanschen und deren Schrauben ist nicht notwendig, wenn die angrenzenden Schalen nach diesem Abschnitt ausgelegt wurden.

Es wird angenommen, dass die Behälter in Übereinstimmung mit allen anderen Anforderungen dieser Norm ausgelegt, hergestellt und geprüft wurden.

Für die Ermüdungsfestigkeitsbewertung von Teilen, die nach Anhang B oder C berechnet wurden, ist die Anwendung des vorliegenden Abschnitts unter der Bedingung zulässig, dass die berücksichtigten Spannungsschwingbreiten nicht nach Gleichung (17.6-1) bestimmt wurden, sondern im Ergebnis einer detaillierten Spannungsanalyse erhalten wurden.“

Ersetzen des Abschnitts 17.4.8 mit dem Folgenden:

„**17.4.8** Behälter, welche die Anforderungen nach 17.5.3 oder 17.5.4 oder 17.5.5 erfüllen, sind nicht-zyklischer Natur und es kommen die Standardanforderungen der zerstörungsfreien Prüfungen nach EN 13445-5 zur Anwendung.

Hinzufügen des folgenden neuen Unterabschnitts:

„**17.4.9** Zur Anwendung des Abschnitts 17.6 müssen in den Betriebsanleitungen Anweisungen für eine geeignete Wartung enthalten sein.

ANMERKUNG Empfehlungen für eine geeignete Wartung sind in Anhang M enthalten.

17.4.10 Leitlinien für die Schätzung von Metalltemperaturen

In Fällen, bei denen eine erhebliche Wärmebelastung vorkommt, ist die Wichtigkeit der möglichst genauen Abschätzung der Temperaturverteilungen hervorzuheben, welche an den Wänden des Behälters im Betrieb vorkommen, um eine konservative Natur der Schätzung der Wärmespannung und der daraus folgenden Ermüdungsfestigkeitsbewertung so gut wie möglich reduzieren zu können.

In dieser Hinsicht ist die Betrachtung der Fluidtemperaturschwankungen als repräsentativ für die Temperaturschwankungen an den Wandoberflächen des Behälters anzusehen, was eine weit verbreitete Herangehensweise darstellt, nicht zu empfehlen, da diese im Allgemeinen oft zu einer starken Überschätzung der in der Realität vorherrschenden Temperaturgradienten führt. Soweit dies möglich ist, sollten diese Gradienten durch thermische Berechnungen (selbst einfache Berechnungen, basierend auf analytischen Modellen), bestimmt werden, wobei der Wärmeaustausch an der Schnittstelle zwischen Fluid und Metall zu berücksichtigen ist. Um solche Berechnungen zu ermöglichen, sollten ausreichend Informationen zu den thermodynamischen Bedingungen des Prozesses vom Käufer eingeholt werden (z. B. Fluiderhitzungs- oder Abkühlrate, Beiwert des Wärmeaustausches an der Schnittstelle zwischen Fluid und Metall usw.).“

7 Änderung des Abschnitts 17.5

Ersetzen des gesamten Abschnitts 17.5 mit dem Folgenden:

17.5 Allgemeines

17.5.1 Druck- und Temperaturschwingbreiten, die für die Ermüdungsfestigkeitsbewertung zu berücksichtigen sind

Die verschiedenen Schwingbreiten $(\Delta P)_i$, die für die Ermüdungsfestigkeitsbewertung zu berücksichtigen sind, müssen durch Anwendung des Rainflow-Verfahrens zur Zykluszählung, das in Anhang NB beschrieben ist, und unter Berücksichtigung der Schwankungen des Druckes P , statt der Spannungsschwankungen, erhalten werden.

Die verschiedenen $(\Delta T_{\text{diff}})_i$, die für die Ermüdungsfestigkeitsbewertung zu berücksichtigen sind, müssen durch Anwendung derselben Verfahren der Zykluszählung erhalten werden, aber unter Berücksichtigung der Schwankungen der Metalltemperaturdifferenz T_{diff} anstelle der Spannungsschwankungen.

Um zu unterscheiden, ob die Druck- und Wärmezyklen gleichzeitig oder nicht gleichzeitig wirken, muss die Lashistorie (Schwankungen im Verlaufe der Zeit) beider Lasten berücksichtigt werden. Wenn die Zeitdauer eines Zyklus (Zeit vom Mindestwert über den Höchstwert zum Mindestwert) einer Lastart (z. B. dem Druck) durch die Zeitdauer einer anderen Lastart überlappt wird (z. B. der Temperaturunterschiede), dann treten diese Zyklen gleichzeitig auf. Im Gegenteil, wenn während der gesamten Zykluszeit einer Lastart die andere Lastart keine Veränderung erfährt, dann treten diese Zyklen nicht gleichzeitig auf.

Die ΔP -Schwingbreiten gelten in der Regel für die Bewertung aller Teile eines Behälters, die denselben Druckschwankungen ausgesetzt sind. In Fällen, in denen die Druckschwankungen (zumindest teilweise) aus dem hydrostatischen Druck oder den Druckunterschieden zwischen angrenzenden Kammern des Behälters folgen, können die Druckschwingbreiten von Teil zu Teil abweichen.

Die ΔT_{diff} -Schwingbreiten gelten nur für die Bewertung eines Behälterteils, an welchem die jeweiligen Schwankungen der Metalltemperaturdifferenz stattfinden. Wenn das für eine Ermüdung unter kombinierter Druck- + Wärmespannung kritischste Bauteil zu Beginn nicht bekannt ist, müssen alle in Frage kommenden Bauteile untersucht und die entsprechenden Gruppen von ΔT_{diff} bestimmt werden.

17.5.2 Die Berechnungen gemäß 17.6 müssen für jedes Bauteil des Druckbehälters durchgeführt werden. Die dabei ermittelte niedrigste Lebensdauer ist die Ermüdungslebensdauer des Behälters.

17.5.3 Druck- und Temperaturschwingbreiten, die bei der Ermüdungsfestigkeitsbewertung vernachlässigt werden können

Wenn die Konstruktion die folgenden Forderungen erfüllt:

$$\eta \leq 3,$$

$$f \leq 160 C_e \times C_T \text{ MPa mit } f \text{ von der Berechnungstemperatur } T,$$

Druckschwankungen der Schwingbreite ΔP , welche geringer sind als die folgenden Prozentsätze von P_{max} , können ungeachtet der Anzahl vernachlässigt werden:

- wenn die Anzahl der Anfahr- und Abfahrzyklen bei Betriebsdruck kleiner ist als 500 und kein Zyklus der mittleren Schwingbreite zwischen dem Betriebsdruck und den vernachlässigten Schwankungen auftritt:

6 % von P_{max}	bei	$C = 40$
8,5 % von P_{max}	bei	$C = 56$
9,5 % von P_{max}	bei	$C = 63$
11 % von P_{max}	bei	$C = 71$
12,5 % von P_{max}	bei	$C = 80$
14 % von P_{max}	bei	$C = 90$ und Klasse UW

- andernfalls:

3,5 % von P_{max}	bei	$C = 40$
4,5 % von P_{max}	bei	$C = 56$
5,5 % von P_{max}	bei	$C = 63$
6 % von P_{max}	bei	$C = 71$
7 % von P_{max}	bei	$C = 80$
7,5 % von P_{max}	bei	$C = 90$ und Klasse UW

Bei anderen Werten von η und f müssen die obigen Prozentsätze mit dem Verhältnis $\frac{480}{\eta \times f}$ multipliziert werden.

Diese Regel zur Vernachlässigung von Druckschwingbreiten ist anwendbar:

- auf gesamte Behälter, wenn derselbe Wert ΔP auf alle Teile des Behälters wirkt;
- je nach Bauteil, wenn unterschiedliche Werte für ΔP auf die einzelnen Teile wirken (siehe 17.5.1, dritter Absatz).

Zur Vereinfachung darf $P_{\max}$ durch den Berechnungsdruck P ersetzt werden.

Für Leitlinien zu Wärmezyklen $(\Delta T_{\text{diff}})_i$, die vernachlässigbar sind, siehe Anhang U.

17.5.4 Alternative zur 500-Zyklen-Regel nach 5.4.2

Sofern die Bedingungen in 17.5.4.2 erfüllt sind, kann die in 5.4.2 angeführte Bedingung, Gleichung (5.4-1) zur Prüfung der Anzahl der vollen Druckzyklen (oder der äquivalenten Anzahl der vollen Druckzyklen) gegenüber der Begrenzung auf 500 gleichartige Zyklen bei jedem Behälter, der nach EN 13445-3 ausgelegt ist, vernachlässigt und durch die Bedingung (17.5-1) ersetzt werden:

$$n_{\text{eq}} = \sum n_{p,i} \times \left(\frac{\Delta P_i}{P_{\max}} \right)^3 \leq N_{\text{eq}} \quad (17.5-1)$$

Dabei ist

- n_{eq} die äquivalente Anzahl voller Druckzyklen;
- $n_{p,i}$ die Anzahl der Druckzyklen in den Druckschwingbreiten ΔP_i unter oder gleich dem vollen Druck P ;
- $P_{\max}$ der maximal zulässige Druck, der im normalen Lastfall berechnet wurde (siehe 5.3.2.1).

ANMERKUNG 1 In der Gleichung (17.5-1) wird n_{eq} wie in Gleichung (5.4-2) definiert.

N_{eq} die erlaubte Anzahl voller Druckzyklen nach Definition in 17.5.4.1.

Die Bedingung (17.5-1) kann geprüft werden:

- für einen Behälter im Ganzen, wobei n_{eq} mit dem Punkt für ΔP_i , an dem die Druckschwankungen maximal sind, und dem maximal zulässigen Druck des Behälters (siehe 3.16) für $P_{\max}$ berechnet wird;
- Bauteil für Bauteil, wobei n_{eq} mit den Druckschwankungen, die auf das Bauteil wirken, für ΔP_i und dem maximal zulässigen Druck auf dasselbe Bauteil, für $P_{\max}$, berechnet wird.

ANMERKUNG 2 Die Prüfung Bauteil für Bauteil ist nur dann von Belang, wenn sich die Schwingbreite der Druckschwankungen an verschiedenen Bereichen des Behälters aufgrund zusätzlichen hydrostatischen Druckes ändert oder falls der Behälter über Teile mit unterschiedlichen Druckkammern verfügt.

Zur Vereinfachung darf $P_{\max}$ durch den Berechnungsdruck P ersetzt werden.

Die Verwendung der Gleichung (17.5-1) zur Berechnung von n_{eq} ist unter der Bedingung gestattet, dass der Beitrag von Lasten, die keine Druckbelastungen darstellen, zur zyklischen Belastung vernachlässigt werden kann.

Wenn diese Bedingung nicht erfüllt wird, dann ist eine Ermüdungsfestigkeitsprüfung notwendig und muss mittels der Regel in 17.5.5 (falls anwendbar), einer vereinfachten Ermüdungsanalyse nach dem Rest des Abschnitts 17 (Unterabschnitte 17.6 bis 17.7) oder einer detaillierten Ermüdungsanalyse nach Abschnitt 18 durchgeführt werden.

ANMERKUNG 3 Die Regel in 17.5.5 erlaubt ausschließlich die Berücksichtigung zusätzlicher Zyklen thermischen Ursprungs. Der Rest des Abschnitts 17 ist hauptsächlich den Druck- und Wärmezyklen gewidmet, berücksichtigt aber auch die Belastungszyklen anderer Ursprünge (siehe 17.1.2). Abschnitt 18 ermöglicht eine Berücksichtigung aller Arten von Belastungszyklen.

17.5.4.1 Zulässige Anzahl voller Druckzyklen, beruhend auf Berechnungs-nennspannung, Arten von Schweißnähten und dem Höchstspannungsfaktor

Die zulässige Anzahl voller Druckzyklen wird bestimmt durch:

$$N_{eq} = 2 \times 10^6 \times \left[\frac{C_{min} \times C_e \times C_T}{\eta_{max} \times f} \right]^3 \quad (17.5-2)$$

Dabei ist

C_{min} die niedrigste Ermüdungsklasse C unter allen Schweißnähten des Behälters oder der Klasse des Bauteils, wenn eine Prüfung von Bauteil zu Bauteil durchgeführt wird, oder alternativ $C_{min} = 40$ MPa als konservative Annahme;

der Wert $C_{min} = 40$ MPa muss verwendet werden, wenn der Behälter geschweißte Bauteile umfasst, welche nicht (direkt oder durch Angleichung) in Tabelle 17-4 aufgeführt werden und mit großer Wahrscheinlichkeit eine geringe Ermüdungsfestigkeit aufweisen;

bei Behältern, die keine geschweißten Bereiche umfassen, ist $C_{min} = 90$ zu verwenden;

C_e die Wanddickenkorrektur für $e > 25$ mm, wie in 17.6.2.1 definiert;

C_T die Temperaturkorrektur für $T^* > 100^\circ\text{C}$, wie in 17.6.2.2 definiert;

η_{max} der maximale Druckspannungsfaktor im gesamten Behälter;

ANMERKUNG Bei der Suche nach dem maximalen Druckspannungsfaktor η_{max} sollten Abweichungen der Form (hauptsächlich Spitzen) an den längslaufenden Schweißnähten stets berücksichtigt werden, da diese oftmals Quellen hoher Werte von η sein können.

f die Berechnungs-nennspannung bei Berechnungstemperatur des Lastfalls, für den P_{max} berechnet wird.

Wird zur Vereinfachung n_{eq} unter Verwendung des Berechnungsdruckes P statt P_{max} berechnet, wie nach 5.4.2 zulässig, ist f die Berechnungs-nennspannung bei der entsprechenden Berechnungstemperatur.

Bei Anwendung dieser Gleichung:

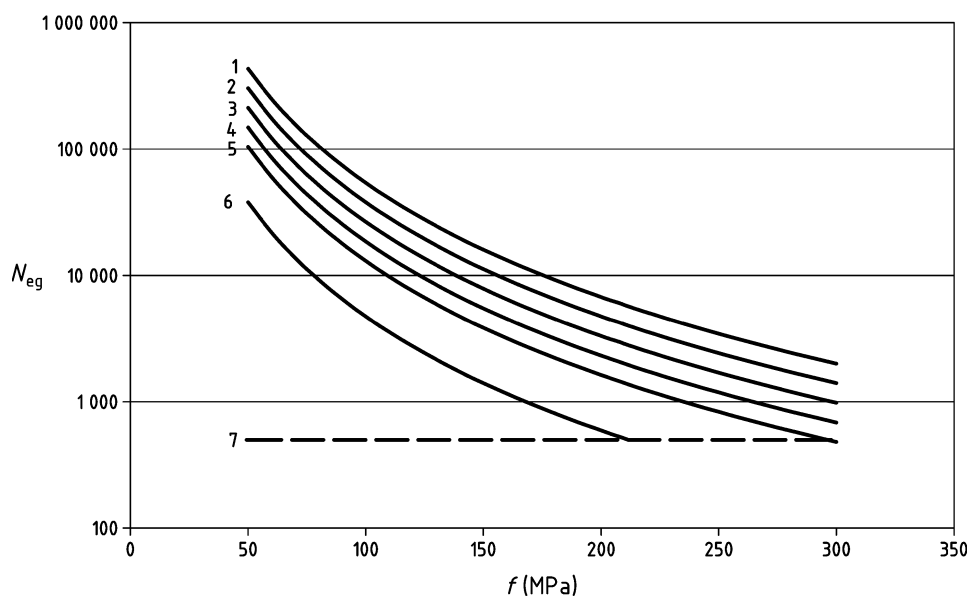
— η_{max} muss nach Tabelle 17-1 ausgewählt werden.

In Fällen, bei denen der Behälter Bauteile umfasst, für welche kein η -Wert in Tabelle 17-1 angegeben ist und kein konservativer Wert für η sicher abgeschätzt werden kann, ist die Gleichung (17.5-2) nicht anwendbar und die Bedingung (17.5-1) darf nicht verwendet werden.

- Die für die Berechnung von C_e zu berücksichtigende Wanddicke muss dem Höchstwert aller Bauteile mit Schweißnähten der Ermüdungsklasse $C_{\min}$ entsprechen.
- Die für die Berechnung von C_T zu berücksichtigende Temperatur T^* muss berechnet werden, wobei $T_{\max}$ und $T_{\min}$ jeweils die Höchst- und Mindesttemperaturen, die während der gesamten Zyklusperiode auftreten, darstellen.
- Die zu berücksichtigende Berechnungsnennspannung f muss dem Höchstwert aller Werkstoffe mit Schweißnähten der Ermüdungsklasse $C_{\min}$ entsprechen. Im Zweifelsfall ist der Höchstwert aller Behälterbauteile zu verwenden.

Beträgt die zulässige Anzahl voller Druckzyklen N_{eq} nach Gleichung (17.5-2) weniger als 500, sollte die Auslegung geändert werden, bis diese Anzahl erreicht wird.

Die Kurven, die eine Anzahl der Zyklen N_{eq} darstellen, die nach Gleichung (17.5-2) mehr als oder gleich 500 sind, sind in Bild 17.5-1 für den Fall $\eta_{\max} = 3$ dargestellt und falls keine Korrektur erforderlich ist (d. h. bei $C_e = 1$ und $C_t = 1$).



Legende

- | | |
|---------------|----------------|
| 1 = Klasse 90 | 5 = Klasse 56 |
| 2 = Klasse 80 | 6 = Klasse 40 |
| 3 = Klasse 71 | 7 = 500 Zyklen |
| 4 = Klasse 63 | |

Bild 17.5-1 — Zulässige Anzahl äquivalenter voller Druckzyklen (unter Annahme von $\eta_{\max} = 3$ und $C_e = C_T = 1$)

17.5.4.2 Anwendungsbedingungen für Gleichung (17.5-2)

- Keine Druckzyklenschwingbreite ΔP_i darf $\frac{3 \times P_{\max}}{\eta_{\max}}$ übersteigen.
- Kein verschweißter ebener Boden darf unter Verwendung der alternativen Regel nach 10.4.4.4 ausgelegt werden.
- Kein ebener Boden darf paarweise angeordnete Ausschnitte aufweisen, die unter Verwendung des am Ende von 10.6.2.1 angegebenen alternativen Berechnungsverfahrens als fiktiver Einzelausschnitt ausgelegt sind.

17.5.5 Ersatz für die 500-Zyklen-Regel aus 5.4.2 oder die alternative Regel in 17.5.4 für Fälle, in denen Wärmezyklen nicht vernachlässigt werden können

17.5.5.1 Gesamtbewertung

Wenn die in 5.4.2 angeführte 500-Zyklen-Regel oder die alternative Regel aus 17.5.4 nicht anwendbar sind, weil zusätzliche Wärmezyklen nicht vernachlässigt werden können, darf die folgende Bedingung angewendet werden:

$$n_{eq} = \sum n_{p,i} \times \left(\frac{\Delta P_i}{P_{\max}} \right)^3 + \sum_j n_{T,j} \left(\frac{E \times \alpha \times \kappa_j \Delta T_{diff,j}}{\eta_{\max} \times f} \right)^3 + \sum_k n_{PT,k} \left(\frac{\Delta P_k}{P_{\max}} + \frac{E \times \alpha \times \kappa_k \Delta T_{diff,k}}{\eta_{\max} \times f} \right)^3 \leq N_{eq} \quad (17.5-3)$$

Dabei ist

n_{eq}	die äquivalente Anzahl voller Druckzyklen;
N_{eq}	die erlaubte Anzahl voller Druckzyklen nach Definition in 17.5.4.2 und Berechnung nach Gleichung (17.5-2);
$P_{\max}$	der maximal zulässige Druck für den gesamten Behälter (zur Vereinfachung darf $P_{\max}$ durch den Berechnungsdruck P des Behälters ersetzt werden);
$\eta_{\max}$	der höchste Druckspannungsfaktor im gesamten Behälter;
$\kappa \times \Delta T_{diff}$	das größte Produkt des gleichzeitigen Wärmespannungsfaktors und der Schwingbreite der Temperaturdifferenz im gesamten Behälter.

Bei dieser Bedingung

- a) beziehen sich die Anzahl der Zyklen und der Schwingbreiten mit der Kennzahl „i“ auf die Druckzyklen, welche unabhängig auf die Wärmezyklen wirken,
- b) beziehen sich die Anzahl der Zyklen, die Schwingbreiten und die Wärmespannungsfaktoren mit der Kennzahl „j“ auf die Zyklen der Temperaturdifferenz, welche unabhängig auf die Druckzyklen wirken,
- c) beziehen sich die Anzahl der Zyklen, die Schwingbreiten und die Wärmespannungsfaktoren mit der Kennzahl „k“ auf die Druckzyklen und die Temperaturdifferenz, welche in Kombination miteinander wirken,
- d) muss jeder Druckzyklus ΔP (bzw. normaler Wärmezyklus ΔT_{diff}) je nachdem **entweder** als n_p (bzw. n_T) **oder** als n_{PT} gezählt werden, um das doppelte Zählen der Zyklen zu vermeiden,
- e) muss die Berechnungsnennspannung f in MPa ausgedrückt werden,
- f) muss der Wert des Wärmespannungsfaktors f in der Tabelle 17-2 angegeben werden,

g) dürfen die Werte E und α als Umgebungstemperatur verwendet werden,

Zur Vereinfachung dürfen die folgenden Werte verwendet werden:

$E \cdot \alpha = 2,4 \text{ MPa/}^\circ\text{C}$ für Kohlenstoffstähle (Stahlgruppen 1 bis 4, 5.1 und 5.2)

$E \cdot \alpha = 2,2 \text{ MPa/}^\circ\text{C}$ für niedriglegierte Stähle (Stahlgruppen 5.3, 5.4, 6 und 7)

$E \cdot \alpha = 3,1 \text{ MPa/}^\circ\text{C}$ für austenitische Stähle (Stahlgruppen 8.1 und 8.2)

h) müssen die Bedingungen in 17.5.4.2 zur Anwendung der Gleichung (17.5-2) erfüllt sein.

Tabelle 17-2 — Wert des Wärmespannungsfaktors κ für verschiedene Arten von Temperaturgradienten

Art des Temperaturgradienten	κ
Linearer Gradient über die Dicke oder linearer Gradient entlang der Oberflächenrichtung der Schale	0,75
Linearer Gradient entlang der Oberflächenrichtung im ebenen Boden	1
Thermischer Schock	1,5

17.5.5.2 Lokale Bewertung

Die Berechnung der Ermüdungslebensdauer eines Behälters im Ganzen mittels der Bedingung (17.5-3) darf durch eine Berechnung der Ermüdungslebensdauer Bauteil für Bauteil mittels der Bedingung 17.5-4 ersetzt werden:

$$n_{eq} = \sum n_{P,i} \times \left(\frac{\Delta P_i}{P_{max}} \right)^3 + \sum_j n_{T,j} \left(\frac{E \times \alpha \times \kappa_j \Delta T_{diff,j}}{\eta \times f} \right)^3 + \sum_k n_{PT,k} \left(\frac{\Delta P_k}{P_{max}} + \frac{E \times \alpha \times \kappa_k \times \Delta T_{diff,k}}{\eta \times f} \right)^3 \quad (17.5-4)$$

$\leq N_{eq}$

Dabei ist

- n_{eq} die äquivalente Anzahl voller Druckzyklen;
- N_{eq} die erlaubte Anzahl voller Druckzyklen nach Definition in 17.5.4.2 und Berechnung nach Gleichung (17.5-2), wobei allerdings η_{max} durch den Druckspannungsfaktor η des Bauteils ersetzt wird;
- P_{max} der maximal zulässige Druck für das Bauteil (zur Vereinfachung darf P_{max} durch den Berechnungsdruck P des Bauteils ersetzt werden);
- η der Druckspannungsfaktor des Bauteils;
- $\kappa \times \Delta T_{diff}$ das Produkt des gleichzeitigen Wärmespannungsfaktors und der Schwingbreite der Temperaturdifferenz, die für das jeweilige Behälterbauteil relevant sind.

Bei Durchführung einer lokalen Bewertung:

- müssen alle Bauteile, die wahrscheinlich für die Ermüdungslebensdauer des Behälters von kritischer Wichtigkeit sind, berücksichtigt werden, um das kritischste Bauteil zu bestimmen, auf welchem die Bewertung basieren muss.

— sind die Bestimmungen a) bis h) aus 17.5.5.1 anzuwenden.“

8 Änderung des Abschnitts 17.6

Änderung des Titels von 17.6 wie folgt:

„17.6 Ermittlung der zulässigen Anzahl von Druck- und Wärmezyklen“

Ersetzen von 17.6.1.1 und 17.6.1.2 durch Folgendes:

„17.6.1.1 Pseudoelastische Spannungsschwingbreite für Druckzyklen, die unabhängig von Wärmezyklen wirken

17.6.1.1.1 $\Delta\sigma$ muss wie folgt aus ΔP berechnet werden:

$$\Delta\sigma = \frac{\Delta P}{P_{\max}} \times \eta \times f \quad (17.6-1a)$$

In dieser Gleichung ist:

- $P_{\max}$ der maximale zulässige Druck des betrachteten Bauteils oder Druckbehälterteils, wie in Abschnitt 4 definiert, außer bei nach innen gewölbten Böden, bei denen eine spezielle Definition von $P_{\max}$ zur Anwendung kommt (siehe ANMERKUNG 2 von Tabelle 17-1);
- f ist die Auslegungsnennspannung des betrachteten Bauteils oder Druckbehälterteils bei Berechnungstemperatur.

Bei Druckbehälterteilen, die einen maximalen zulässigen Druck aufweisen, der von mehr als einem Wert von f abhängt (z. B. an Öffnungen mit unterschiedlichen Werkstoffen in Stutzen und Schale), ist es zulässig, einen fiktiven Wert von $P_{\max}$ abzuleiten, der berechnet wird, indem ein einziger und willkürlich festgelegter Wert von f für das gesamte Teil angenommen wird und dieser dann verwendet wird, um $\Delta\sigma$ gemäß Gleichung (17.6-1) zu bestimmen, sofern derselbe Wert von f auch in dieser Gleichung verwendet wird. Wird der wahre Wert von $P_{\max}$ verwendet, so muss der in Gleichung (17.6-1) zu verwendende Wert von f die höchste der Auslegungsnennspannungen der verschiedenen Werkstoffe sein, welche in dem betrachteten Teil einen Einfluss auf $P_{\max}$ haben.

Zur Vereinfachung kann entweder der höchstzulässige Druck des gesamten Behälters anstelle des höchstzulässigen Druckes des Bauteils oder Druckbehälterteils verwendet werden ($P_{\max}$), oder es kann der Berechnungsdruck P verwendet werden, zusammen mit den höchsten Auslegungsnennspannungen, die bei allen Druckbehälterteilen auftreten.

ANMERKUNG 1 Diese Vereinfachungen führen zu konservativeren Ergebnissen.

ANMERKUNG 2 Da der Wert für f in Gleichung (17.6-1) für die Berechnungstemperatur gilt, ist das Verhältnis $P_{\max}/f$ temperaturunabhängig.

17.6.1.1.2 Der Wert des Druckspannungsfaktors wird Tabelle 17-1 für jedes einzelne Druckbehälterteil entnommen. Er ist ein oberer Grenzwert für das folgende Verhältnis:

Maximale Strukturspannung unter Druck $P_{\max}$
Berechnungsnennspannung bei Berechnungstemperatur

Zur Berechnung der Ermüdungslebensdauer eines nicht in Tabelle 17-1 enthaltenen Teils muss der Wert von η durch eine Schätzung der maximalen Strukturspannung in dem betreffenden Bauteil unter dem Druck $P_{\max}$ ermittelt werden.

Zur Vereinfachung kann für ein beliebiges Teil der maximale Wert von η für den gesamten Druckbehälter verwendet werden.

ANMERKUNG In bestimmten Fällen kann eine detaillierte Berechnung nach Abschnitt 18 genauer sein, als das Schätzen eines Wertes von η . Dies gilt insbesondere für Knaggenverschlüsse, selbstdichtende Verschlüsse, Gewindeverschlüsse und Klammerverbindungen.“

Ersetzen der ersten und letzten Seite der Tabelle 17-1 mit dem Folgenden

Detailbeschreibung			Lfd. Nr.	Höchstzulässiger Druck $P_{\max}$	Bedingungen/individuelle Spannungsfaktoren	η	Zugeordnete Nr. in Tabelle 17-4
Zylinder- oder Kegelschalen	Längsstumpfnäht	ohne Formabweichungen	S1.1	Zylinderschale: Gleichung (7.4-3) 4)		$1,0z^{1)}$	1.1 bis 1.3, 1.5
		mit Versatz $\delta^{2)}$, wenn es keinen Versatz gibt $\eta_1 = 0$	S1.2		$\eta_1 = 3 \delta / e$		
		mit Unrundheit $u^{3)}$, wenn es keine Unrundheit gibt $\eta_2 = 0$	S1.3		$\eta_2 = 0,5$		
		mit Aufdachung oder Abflachung $\delta^{2)}$, wenn es keine Aufdachung oder Abflachung gibt $\eta_4 = 0$	S1.4		$\eta_4 = 6 \delta / e$		
		allgemeiner Fall (Kombination von entweder Versatz und Unrundheit oder Versatz und Aufdachung oder Abflachung)	S1.5			$(1 + \max\{\eta_1 + \eta_2; \eta_1 + \eta_4\})z^{1)}$	
	Rundstumpfnäht	mit gleichen Wanddicken, ohne Versatz	S2.1	Kegelschale: Gleichung (7.6-4) 4)	$D_1 = D_2$ und $e_1 = e_2$	$1,0z^{1)}$	1.1 und 1.2, 1.5 und 1.6
		mit ungleichen Wanddicken, ohne Versatz	S2.2		$D_1 = D_2, \eta_0 = 0,1$	$(1 + \eta_0)z^{1)}$	1.2
		mit Versatz $\delta^{2)}$ und mit gleichen Wanddicken	S2.3		$e_1 = e_2 (= e), \eta_1 = \delta / 2e$	$(1 + \eta_1)z^{1)}$	1.3, 1.5 und 1.6
		allgemeiner Fall (Kombination von Versatz und ungleichen Wanddicken)	S2.4		$e_1 \leq e_2, \eta_1 = \delta / 2e_2$	$(1 + \eta_0 + \eta_1)z^{1)}$	1.1 bis 1.3, 1.5 und 1.6
	Rundsickennäht		S3		$e_1 = e_2$	$1,8z$	1.7
	Versteifungsring (mit Abstand b zwischen den Versteifungen)		S4		$b \leq \sqrt{D \times e}$	$1,0z$	5.3
					$b > \sqrt{D \times e}$	$1,8z$	

Tabelle 17-1 — Spannungsfaktoren η und zugehörige höchstzulässige Drücke (Fortsetzung)

- 1) Der zur Bestimmung von η zu verwendende Schweißnahtfaktor z ist der Wert, der für die Berechnung der Wanddicke der betrachteten Schale verwendet wird.
- 2) In Bild 17-1 ist dargestellt, wie δ zu messen ist.
- 3) $u = 2(D_{\max} - D_{\min}) / (D_{\max} + D_{\min})$
- 4) Wenn $e_1 \neq e_2$ ist, ist $P_{\max}$ mit der kleinen Wanddicke zu berechnen.
- 5) Gelöscht.
- 6) θ ist der Winkel zwischen den Tangenten an die aneinanderstoßenden Platten in Grad.
- 7) Für diesen Abschnitt ist $P_{\max}$ gleich P_y aus Gleichung (7.5-7) zu verwenden. Die anderen möglichen Bestimmungen von P_s und P_b (aus den Gleichungen (7.5-6) bzw. (7.5-8)) sind an dieser Stelle nicht von Bedeutung.
- 8) Für ein solches Teil muss eine zweifache Berechnung durchgeführt werden:
 - eine Berechnung mit der in Tabelle 17-4 für das betreffende Teil angegebenen Klasse,
 - eine Berechnung mit Klasse 32,wobei für jede Berechnung der jeweils zutreffende Wert von $P_{\max}$ zu verwenden ist, der in der zugehörigen Zeile von Tabelle 17-1 angegeben ist, zusammen mit dem entsprechenden Wert von f .

ANMERKUNG Die erste Berechnung soll dazu dienen, die Gefahr einer Rissbildung vom Schweißnahtübergang her abzudecken, während die zweite die Gefahr einer Rissbildung von der Nahtwurzel her abdecken soll.
- 9) Der höchstzulässige Berechnungsdruck ist der für den ebenen Boden (nicht der für die angrenzende Zylinderschale). In Gleichung (17.6-1) ist der einzuführende Wert f der niedrigste der Druckwerte von Boden und Schale. Da in Abschnitt 10 keine explizite Gleichung für $P_{\max}$ angegeben ist, ist $P_{\max}$ als derjenige Druck zu berechnen, welcher eine erforderliche Enddicke ergibt, die gleich der Berechnungsdicke ist. Als konservative Vereinfachung kann $P_{\max} = P_{\text{Auslegung}}$ verwendet werden.
- 10) Der höchstzulässige Berechnungsdruck ist in Abschnitt 11 nicht explizit angegeben. Er ist als derjenige Druck zu berechnen, bei dem die Spannungen ihre zulässigen Grenzwerte erreichen, oder in Anhang G ein Lastverhältnis von 1,0. Als konservative Vereinfachung kann $P_{\max} = P_{\text{Auslegung}}$ verwendet werden.
- 11) Nach derzeitigem Wissensstand gibt es keinen Wert von η für Ringverbindungen in diesem Fall. Es sollte eine ausführliche Berechnung der Ermüdungslebensdauer nach Abschnitt 18 durchgeführt werden.
- 12) Der zur Bestimmung von η zu verwendende Schweißnahtfaktor ist der Wert, der für die Berechnung der Wanddicke der Schale verwendet wird, an welche das betrachtete Teil angeschweißt ist.

Hinzufügen der folgenden Abschnitte nach Bild 17-1:

„17.6.1.2 Pseudoelastische Spannungsschwingbreite für Wärmezyklen, die unabhängig von Druckzyklen wirken

17.6.1.2.1 ΔT_{diff} muss wie folgt aus ΔT_{diff} berechnet werden:

$$\Delta\sigma = \kappa \times E \times \alpha \times \Delta T_{\text{diff}} \quad (17.6-1b)$$

In dieser Gleichung müssen E und α bei der angenommenen mittleren Zyklustemperatur T^* bestimmt werden.

Bei Behälterteilen, wo Werkstoffe mit anderen Werten für E und α verbunden sind, muss die Berechnung von $\Delta\sigma$ mithilfe von Durchschnittswerten dieser Merkmale erfolgen. Zur Vereinfachung dürfen die höchsten dieser Merkmale ebenfalls als konservative Lösung verwendet werden.

17.6.1.2.2 Der Wert des Wärmespannungsfaktors κ wird durch Tabelle 17-2 (siehe 17.5.5) als Funktion der Art des Wärmegradienten am betroffenen Behälterbauteil bestimmt.

17.6.1.3 Pseudoelastische Spannungsschwingbreite für Wärmezyklen, die gleichzeitig neben Druckzyklen wirken

$\Delta\sigma$ müssen wie folgt aus ΔP und ΔT_{diff} berechnet werden:

$$\Delta\sigma = \left(\frac{\Delta P}{P_{\text{max}}} \times \eta \times f \right) + (\kappa \times E \times \alpha \times \Delta T_{\text{diff}}) \quad (17.6-1c)$$

Zur Berechnung der Terme, welche den Druck und die Temperatur auf der rechten Seite dieser Gleichung berücksichtigen, gelten dieselben Regeln, wie in 17.6.1.1 bzw. 17.6.1.2 bestimmt.

17.6.1.4 Elastisch-plastische Zyklen

Ist $\Delta\sigma > 3f$, muss $\Delta\sigma$ gemäß der Regel in 18.8 erhöht werden, um die elastisch-plastischen Zyklusbedingungen zu berücksichtigen.“

Ersetzen der Gleichung (17.6-11) durch Folgendes:

$$„\Delta\sigma_R = C \times \left(\frac{2 \times 10^6}{N} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (17.6-11)“$$

In 17.6.4.3 den ersten Satz vor der Gleichung (17.6-15) mit Folgendem ersetzen:

„- zur Bewertung der Last mit variabler Amplitude (d. h. Zyklen verschiedener Schwingbreiten, wobei mindestens einer $\Delta\sigma_D$ übersteigt):“

In 17.6.4.3 den ersten Satz vor der Gleichung (17.6-16) mit Folgendem ersetzen:

„- zur Bewertung der Last mit konstanter Amplitude (d. h. Zyklen nur einer Schwingbreite):“

Ersetzen der Gleichung (17.6-17) durch Folgendes:

$$„N = 2 \times 10^6 \times \left(\frac{C}{\Delta\sigma^*} \right)^3 \quad (17.6-17)“$$

In 17.6.6.2 den Satz „In allen anderen Fällen“ vor der Gleichung (17.6-19) mit Folgendem ersetzen:

„In allen anderen Fällen (d. h. wenn mindestens eine Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma_D$ übersteigt):“

Änderung der Tabelle 17-4 a) Schweißnähte, wie folgt:

Lfd. Nr.	Art der Verbindung	Darstellung	Klasse		Bemerkungen	Zugeordnete Nr. in Tabelle 17-1
			Prüfgruppe 1 oder 2	Prüfgruppe 3		
1.5	Durchgeschweißte Stumpfnah, einseitig geschweißt, ohne Unterlage		63 40	40	Naht erwies sich bei zerstörungsfreier Prüfung als frei von größeren Fehlern (siehe 17.4.5) Wenn Durchschweißung sichergestellt werden kann Wenn Innenseite für Sichtprüfung nicht zugänglich ist In allen Fällen	S1.1 bis S2.4, S5.1 bis S5.4, DE1, CE1.2, FE3
1.6	Durchgeschweißte Stumpfnah, einseitig geschweißt, mit bleibender Unterlage		56 40	32	Nur Rundnähte (siehe 5.7) Mindestnahtdicke = Schalenwanddicke Mehrlagenschweißnaht, Nahtwurzel auf vollständige Verschmelzung mit Unterlage geprüft Einlagenschweißnaht In allen Fällen	S2.1 bis S2.4
1.7	Sickennaht		56 40	32	Nur Rundnähte (siehe 5.7) Mindestnahtdicke = Schalenwanddicke Mehrlagenschweißnaht, Nahtwurzel auf vollständige Verschmelzung mit Unterlage geprüft Einlagenschweißnaht In allen Fällen	S3

9 Änderung des Abschnitts 17.9

Ersetzen des Abschnitts 17.9.3 mit dem Folgenden:

„17.9.3 Prüfung während des Betriebs

ANMERKUNG 1 Empfehlungen betreffs der Prüfung während des Betriebs und zu Maßnahmen, die während des Betriebs ergriffen werden sollten, werden in Anhang M gegeben.

Der Konstrukteur/Hersteller muss den Anwendern im Rahmen der Betriebsanleitung die Anzahl der Zyklen melden, für welche der Behälter über die Gebrauchsdauer ausgelegt ist.

In Fällen, in denen angenommen wird, dass der Behälter über die festgelegte Gebrauchsdauer hinweg verwendet wird (siehe Anhang M.3), darf zwischen Käufer/Anwender und Hersteller vereinbart werden, dass alle Punkte am Behälter mit einer Gesamtermüdungsschädigungskennzahl D gleich oder größer als 0,25 für die Anzahl der Zyklen am Ende der festgelegten Gebrauchsdauer in der Betriebsanleitung aufgeführt werden. Dies erfordert, dass der Abschnitt 17.6 verwendet wird und der Behälter nicht für eine Dauerfestigkeit ausgelegt ist.“

10 Änderung des Abschnitts 18

Ersetzen des gesamten Abschnitts 18 mit Folgendem:

„18 Ausführliche Berechnung der Ermüdungslebensdauer

18.1 Zweck

18.1.1 Dieser Abschnitt enthält Regeln für die ausführliche Berechnung der Ermüdungslebensdauer von geschweißten und ungeschweißten Bauteilen sowie Bereichen an Druckbehältern, welche wiederholten Schwankungen mechanischer Lasten und Wärmelasten ausgesetzt sind.

ANMERKUNG 1 Hinsichtlich der Ermüdung verhalten sich Schweißnähte und geschweißte Werkstoffe anders als einfache (ungeschweißte) Grundwerkstoffe. Daher sind die Berechnungs- bzw. Bewertungsverfahren für geschweißte Werkstoffe und Grundwerkstoffe anders.

ANMERKUNG 2 Die Berechnung der Ermüdungslebensdauer von geschweißten Bauteilen und Bereichen basiert auf Ermüdungskurven (SN-Kurven) von geschweißten Prüfstücken, die unter Laststeuerung geprüft werden, außer bei aufgetragenen Spannungen, welche die Dehngrenze übersteigen (Ermüdung im Niedrig-Lastwechselbereich). In letzteren Fällen werden die Prüfungsdaten unter Dehnungssteuerung erworben.

ANMERKUNG 3 Die Berechnung der Ermüdungslebensdauer von ungeschweißten Bauteilen und Bereichen sowie Schrauben basiert auf SN-Kurven von Grundwerkstoffen unter dehnungsgesteuerter Prüfung.

18.1.2 Die Anforderungen in diesem Abschnitt gelten ausschließlich für die in EN 13445-2 spezifizierten Stähle. In diesem Abschnitt wird davon ausgegangen, dass der Behälter gemäß den Anforderungen dieser Norm hergestellt ist.

18.1.3 Diese Anforderungen können auch für Stahlguß angewendet werden. Im Fall von Fertigungsschweißungen oder Reparaturschweißungen an Stahlgußteilen sind jedoch die Bedingungen für geschweißte Bereiche anzuwenden.

18.1.4 Dieser Abschnitt umfasst auch die Auswirkungen auf die Ermüdung durch die Verbesserung von Nahträndern an Stellen, wo dies durchgeführt wird.

ANMERKUNG Bei Schweißungen mit Kehlnaht oder versenkter Kehlnaht, wo ein Versagen von der Schweißnahtwurzel ausgehen kann, kann sich auf die Verbesserung der Nahtränder zur Erhöhung der Ermüdungsfestigkeit der Verbindung nicht verlassen werden.

18.1.5 Ungeschweißte Grundwerkstoffe können Reparaturen mit beschliffenen Schweißnähten aufweisen, deren Vorhandensein zu einer Reduzierung der Dauerfestigkeit des Werkstoffs führen kann. Als ungeschweißt sind daher nur solche Bauteile anzusehen, die definitiv schweißnahtfrei sind.

18.1.6 Die Regeln gelten nicht für Druckbehälter der Prüfgruppe 4. Für geschweißte Verbindungen der Prüfgruppe 3 gelten die besonderen Bestimmungen in 18.10.2.1.

18.1.7 Das hier beschriebene Verfahren der Berechnung der Ermüdungslebensdauer dient nicht für die Konstruktion im elastoplastisch beanspruchten Bereich (siehe Definition unten und Verweisung [1] in Anhang N).

18.1.8 Eine Berechnung der Ermüdungslebensdauer ist an allen Stellen durchzuführen, an denen die Gefahr von Ermüdungsrisssbildung besteht.

Eine Berechnung der Ermüdungslebensdauer muss an den Punkten der höchsten Spannung und Spannungskonzentration sowie an Punkten, die hohen Anzahlen von Spannungszyklen ausgesetzt sind, durchgeführt werden.

18.1.9 Die Berechnung der Ermüdungslebensdauer mittels dieses Abschnitts darf entweder mittels einer bekannten Historie der Betriebslasten oder der spezifizierten Bemessungslasten erfolgen. Empfohlene Verfahren sind im Anhang NB aufgeführt.

18.1.10 In diesem Abschnitt wird der Vergleichsspannungsbereich für die Berechnung der Ermüdungslebensdauer aller geschweißten und ungeschweißten Bereiche verwendet. Die Bestimmung der Zyklen und der Vergleichsspannungsschwingbreite ist im Anhang NB erläutert.

ANMERKUNG Die maximale Hauptschwingbreite wird zur Ermüdungsbemessung in dieser Norm nicht weiter verwendet.

18.1.11 In diesem Abschnitt wird die Spannungsschwingbreite über die Schweißnaht zur Berechnung der Ermüdungslebensdauer von Anbauten mit doppelseitiger Kehlnaht und externer Belastung verwendet.

18.1.12 Dieser Abschnitt gilt vornehmlich für Bauteile, die unterhalb der Kriechtemperaturschwingbreite betrieben werden. Er kann allerdings auch auf Bauteile innerhalb der Kriechtemperaturschwingbreite verwendet werden, wenn ein ausreichender Zuschlag für die Auswirkungen des Kriechens und der hohen Temperaturen vorgesehen wird.

18.1.13 In Tabelle 18-1 ist der typische Ablauf bei der Auslegung eines Behälters auf Ermüdungsfestigkeit zusammengefasst.

Tabelle 18-1 — Zusammenfassung des Verfahrens zur Berechnung der Ermüdungslebensdauer

Aufgabe		Bemerkung	Bezug
1.	Auslegung des Behälters auf ruhende Beanspruchung	Konstruktion, Schweißnähte und Maße	Teil 3
2.	Festlegen der Wechselbeanspruchung	auf Grundlage von Betriebsmerkmalen und vom Hersteller ermittelten Zusatzbeanspruchungen etc.	18.9.1
3.	Auswahl der zu berechnenden Stellen des Behälters	Störstellen, Ausschnitte, Verbindungen (geschweißt, geschraubt), Ecken, Reparaturen usw.	
4.	Ermitteln der Spannungsschwingbreite an jeder gewählten Stelle	a) Berechnung der Strukturspannungen der Bauteile b) Ableitung der Vergleichsspannungsschwingbreiten nach Tresca- oder von-Mises-Bedingung	geschweißte Bauteile: 18.6, 18.8 und 18.10.4; ungeschweißt: 18.7 und 18.8 Schrauben: 18.7.2
5.	Ermitteln der Vergleichsspannungsschwingbreite an jeder gewählten Stelle	a) Lastzyklenzählverfahren b) Anwendung des Gesamtkorrekturfaktors c) ungeschweißtes Material: Schwingbreiten der effektiven Kerbspannung ermitteln	18.9 18.8 18.7
6.	Angabe besonderer Anforderungen und Benachrichtigung von betroffenem Fertigungs- und Prüfpersonal	a) Anforderungen an Schweißnähte b) Kontrolle von Fluchtfehlern oder entsprechende Annahmen c) Abnahmeniveaus von Nahtfehlern	18.10.1, Tabellen 18-4 18.10.4 18.10.5
7.	Ermitteln der Wechselfestigkeit	a) geschweißte Werkstoffe b) ungeschweißte Werkstoffe c) verschraubte Werkstoffe d) Abnahmeniveaus von Nahtfehlern	18.10, Tabellen 18-4 18.11 18.12 18.10.5
8.	Ermittlung der Dauerfestigkeit auf Grundlage der Auslegung auf Ermüdung und Prüfung	a) geschweißte Werkstoffe b) ungeschweißte Werkstoffe c) Schrauben d) Berechnungs- bzw. Bewertungsverfahren	18.10, Tabelle 18-7 18.11, Tabelle 18-10 18.12 18.5.5, 18.5.6

Aufgabe		Bemerkung	Bezug
9.	weitere Maßnahmen falls Verortung fehlschlägt Bewertung/Berechnung	a) erneute Bewertung/Berechnung mittels differenzierterer Spannungsanalyse b) Reduzierung der Spannungen durch Erhöhung der Dicke* c) Änderung des Bauteils d) Nachbearbeitung der Nahtübergänge durchführen (falls angemessen)	18.6 (geschweißte Bauteile), 18.7 (ungeschweißte Bauteile) Tabelle 18-4 18.10.2.2
* - für mechanische Einwirkungen kann dies zumeist durch eine Erhöhung der Wanddicke erreicht werden, aber in manchen Fällen kann eine Spannungsverringering auch durch günstigere Wanddickenverhältnisse erreicht werden. - für thermische Einwirkungen sind besser angepasste Maßnahmen erforderlich, z. B. Steifigkeitsreduktionen an geeigneten Stellen des Bauteils bzw. Erhöhung der Ermüdungsfestigkeit schwacher Bereiche.			

18.2 Zusätzliche Definitionen

Die folgenden Begriffe gelten in diesem Abschnitt.

18.2.1

kritischer Bereich

ein Bereich, in dem die kumulierte Gesamtermüdungsschädigungskennzahl (Auslastungsfaktor) den maximalen Wert $D_{crit} = 0,8$ übersteigt

18.2.2

unterer Grenzwert der Spannungsschwingbreite

Spannungsschwingbreite, unterhalb derer Ermüdungsschäden vernachlässigt werden

18.2.3

Störstelle

Änderung der Form, der Dicke oder des Werkstoffes, welche(r) die Spannungsverteilung beeinflusst

18.2.4

effektive Kerbspannung

die Spannung, die das Ermüdungsverhalten an einer Kerbe bestimmt (reduzierte Gesamtkerbspannung an ungeschweißten Punkten)

18.2.5

effektive Formzahl

Verhältnis der effektiven Kerbspannung zur Strukturspannung in demselben Punkt

18.2.6

elastischer Nachlauf

Phänomen der Anhäufung starker, unelastischer (plastischer) Spannungen in einem schwächeren Bereich des Bauteils, aufgrund der Neuverteilung der elastischen Dehnung/Spannung in anderen Bereichen des Bauteils

18.2.7

Dauerwechselfestigkeit

Spannungsschwingbreite, unterhalb derer bei Belastung mit konstanter Amplitude keine Ermüdungsschädigung eintritt

18.2.8

Vergleichsspannung

einachsige Spannung, die die gleiche Ermüdungsschädigung verursacht wie die tatsächlichen mehrachsigen Spannungen

Anmerkung 1 zum Begriff: Die Anwendung der Tresca- und von-Mises-Bedingungen sind in diesem Abschnitt gestattet.

Anmerkung 2 zum Begriff: Die Gleichungen zur Berechnung der Vergleichsspannungsschwingbreiten, basierend auf den Tresca- und von-Mises-Bedingungen, sind im Anhang NB aufgeführt. Diese Gleichungen hängen davon ab, ob die grundlegenden Spannungsrichtungen während eines Zyklus konstant bleiben oder nicht.

18.2.9

Ermüdung

progressive und lokalisierte Strukturbeschädigung des Werkstoffs eines Bauteils aufgrund von Spannungsschwankungen

18.2.10

Ermüdungskurven

in diesem Abschnitt enthaltene Kurven der Funktionen $\Delta\sigma_R$ gegen N für geschweißte und ungeschweißte Werkstoffe sowie der Funktionen $\Delta\sigma_R/R_m$ gegen N für Schrauben

18.2.11

globale Störstelle

Unstetigkeit in Form oder Werkstoff, die die Spannungs- oder Dehnungsverteilung über die gesamte Wanddicke beeinflusst

18.2.12

Schwachpunkt

Punkt einer Struktur, an dem ein Ermüdungsriß aufgrund der kombinierten Einwirkungen von strukturellen Spannungsschwingungen und dem Vorhandensein einer Schweißnaht, einer Kerbe oder einem anderen Merkmal, welches die Spannung konzentriert, auftreten kann

18.2.13

Lastzyklus

Lastwechsel, der zu einer Änderung der Spannung führt, wobei die Last mit der Zeit zum Anfangswert und zur Anfangsrichtung (d. h. steigend oder sinkend) zurückkehrt und jedes Niveau in steigender oder sinkender Richtung einmal passiert.

ANMERKUNG 1 zum Begriff: Wenn eine Lastfolge besteht, die unterschiedliche Spannungsamplituden herbeiführt, kann ein Lastzyklus aus verschiedenen Teilen des Spannungsspektrums bestehen. Zur Identifizierung der Zyklen und Verfahren zur Zykluszahlung, siehe Anhang NB.

18.2.14

lokale Störstelle

Unstetigkeit in Form oder Werkstoff, die die Spannungs- oder Dehnungsverteilung örtlich begrenzt, über einen Teil der Wanddicke beeinflusst

18.2.15

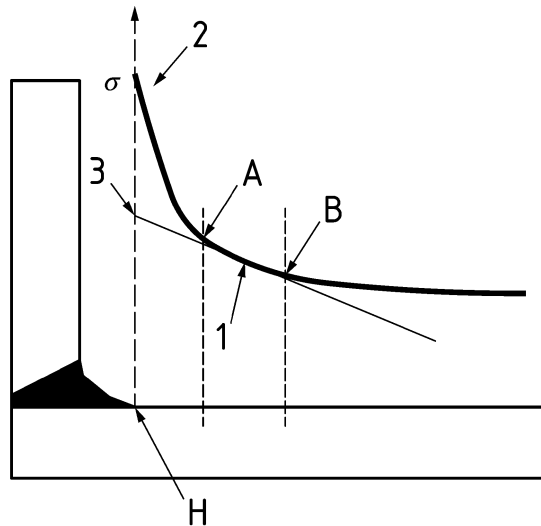
Nennspannung

Spannung in Abwesenheit von strukturellen Störstellen

Anmerkung 1 zum Begriff: Die Nennspannung ist eine Bezugsspannung (Membran- + Biegespannung), welche mittels der Theorie dünner Schalen berechnet wird. Sie schließt hierbei die Einwirkungen durch strukturelle Störstellen (z. B. Schweißnähte, Öffnungen, Abzweigverbindungen, Stutzen, erhebliche Anbauteile und Änderungen der Dicken) aus. Siehe Bild 18-1.

Anmerkung 2 zum Begriff: Die Verwendung der Nennspannung ist für einige bestimmte Schweißnähte zulässig, bei denen die Ermittlung der Strukturspannung unnötig kompliziert wäre. Sie wird auch auf Schrauben angewandt.

Anmerkung 3 zum Begriff: Die Nennspannung wird gewöhnlich verwendet, um die Ergebnisse von Ermüdungsversuchen an Laborproben unter einfacher einachsiger Axial- oder Biegebeanspruchung auszudrücken. Die aus diesen Ergebnissen abgeleiteten Ermüdungskurven berücksichtigen somit auch die Einflüsse von ggf. in den Proben vorhandenen Kerben und Störstellen (z. B. Schweißnähten).



Legende

A, B Bezugspunkte

H Schwachpunkt

1 Strukturspannung

2 Kerbspannung

3 extrapolierte Strukturspannungen des Schwachpunkts an der Oberfläche.

ANMERKUNG Zur Berechnung der Strukturspannung, siehe Anhang NA.

Bild 18-1 — Veranschaulichung der Art und Weise, wie eine Spannung an einer strukturellen Störstelle und Kerbe an einem Schweißnahtübergang variiert

18.2.15

Kerbe

unterbrochene Änderung im Oberflächenprofil, die zu einer Spannungskonzentration führt und eine potenzielle Anfangsstelle für einen Ermüdungsriss darstellt (z. B. Schweißnahtübergang, Ritze)

18.2.16

Kerbspannung

Gesamtspannung am Kerbgrund, einschließlich des nichtlinearen Teils der Spannungsverteilung.

Anmerkung 1 zum Begriff: In Bild 18-1 ist die Kerbspannung am Beispiel eines geschweißten Bauteils dargestellt; Kerbspannungen treten aber ebenso an lokalen Störstellen in ungeschweißten Bauteilen auf.

Anmerkung 2 zum Begriff: Kerbspannungen werden gewöhnlich mit einer numerischen Analyse berechnet. Alternativ kann die Nenn- oder Strukturspannung in Verbindung mit der effektiven Formzahl K_f verwendet werden.

18.2.17

Schweißnaht

längslaufende oder umlaufende Schweißnaht einer Durchbruchschweißung

18.2.18

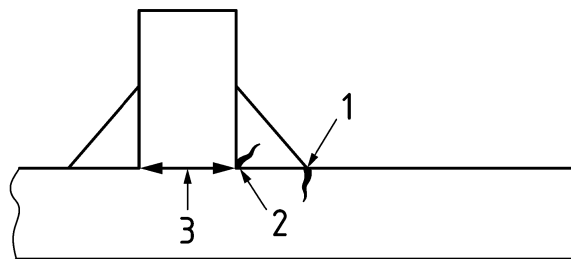
Schweißnahtspannung

durchschnittliche Spannung entlang der Schweißnahtdicke bei doppelseitiger Kehlnaht

Anmerkung 1 zum Begriff: Im allgemeinen Fall einer nicht gleichmäßig belasteten Schweißnaht wird die Schweißnahtspannung als Quotient der Höchstbelastung je Längeneinheit der Schweißnaht und der Schweißnahtdicke berechnet; dabei wird angenommen, dass keine Lastkomponente durch Stützwirkungen zwischen den verbundenen Teilen aufgenommen wird.

Anmerkung 2 zum Begriff: Bei starker Verkrümmung an der Schweißnaht sollte der maximale Wert der Linearspannung angewendet werden.

Anmerkung 3 zum Begriff: Die Schweißnahtspannung wird ausschließlich für die Berechnung des Ermüdungsversagens durch Rissbildung im Schweißgut von Kehlnähten oder versenkten Kehlnähten verwendet (siehe Bild 18.2).



Legende

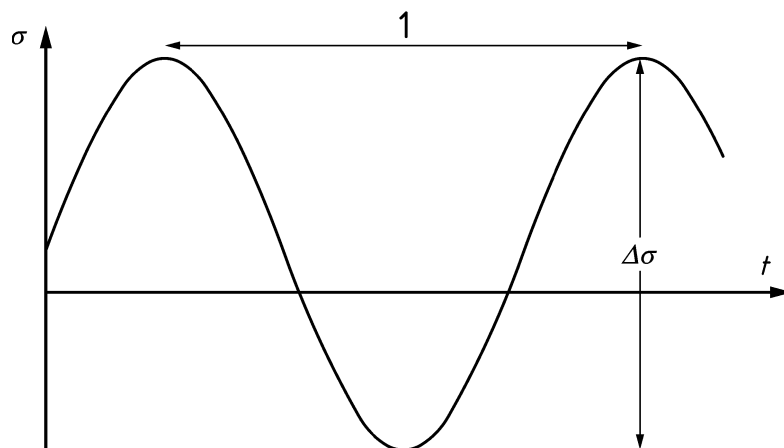
- 1 Riss am Nahtübergang
- 2 Riss an der Schweißnaht
- 3 nicht verbundener Bereich

Bild 18-2 — Zwei dominante Ermüdungsrisspunkte an einer doppelseitigen Kehlnaht

18.2.19

Spannungsschwingbreite ($\Delta\sigma$)

Wert vom Minimum zum Maximum eines Zyklus (siehe Bild 18-3) einer Nennspannung, einer Hauptspannung, einer Strukturspannung oder einer Spannungsponente, je nach angewandeter Methode



Legende

1 ein Lastzyklus; $\Delta\sigma$ Spannungsschwingbreite

Bild 18-3 — Spannungsschwingbreite

18.2.20

Strukturspannung

linear über die Dicke verteilte Spannung, die aus den Komponenten der Membran- und Biegespannung besteht, welche aus den aufgetragenen Lasten folgen (Kräfte, Momente, Drücke usw.)

Anmerkung 1 zum Begriff: Die Strukturspannung beinhaltet die Auswirkungen von globalen Störstellen (beispielsweise Anschlüsse, Kegel-Zylinder-Verbindungen, Gefäßendverbindungen, Änderungen der Dicke, Abweichungen von der Auslegungsform, Vorhandensein eines Anbauteils). Jedoch beinhaltet diese Spannung nicht die Kerbauswirkungen lokaler Störstellen (z. B. Schweißnahtübergänge), lokale Belastungen und Temperaturgradienten, welche zu einer nicht-linearen Spannungsverteilung entlang der Wanddicke führen, welche nicht von der Strukturspannung abgebildet werden. Siehe Bild 18-1.

Anmerkung 2 zum Begriff: Bei der Berechnung der Ermüdungslebensdauer ist die Strukturspannung am möglichen Risseinleitungspunkt zu ermitteln.

Anmerkung 3 zum Begriff: Strukturspannungen können nach einem der folgenden Verfahren bestimmt werden: numerische Analyse (z. B. Finite-Elemente-Verfahren), Einsatz der Theorie dünner Schalen oder Anwendung von Formzahlen auf die analytisch ermittelten Nennspannungen. Anhang NA enthält Hinweise zur Anwendung der numerischen Analyse.

18.2.21

Strukturspannung am Schwachpunkt

Strukturspannung extrapoliert an den Punkt der Schwachstelle eines Schweißnahtübergangs oder einer Schweißnaht nach 18.6.1

18.2.22

theoretische Formzahl (theoretischer Kerbfaktor)

Verhältnis der auf Grundlage rein elastischen Verhaltens berechneten Kerbspannung zur (Nenn-) Strukturspannung in diesem Punkt

18.2.23

Auslastungsfaktor (Ermüdungsschädigungskennzahl)

der Teilauslastungsfaktor entspricht der Ermüdungsschädigung, die aus Zyklen einer bestimmten Amplitude folgt. Der kumulative Auslastungsfaktor ist die Gesamtsumme der Teilauslastungsfaktoren für Zyklen verschiedener Amplituden. Die Berechnung des Auslastungsfaktors erfolgt nach 18.13

18.2.24

Schweißnahtdicke

Minstdicke im Nahtquerschnitt

18.3 Zusätzliche Symbole und Abkürzungen

Die folgenden Symbole und Abkürzungen gelten zusätzlich zu denen in Abschnitt 4.

C, C_1 und C_2	sind Konstanten in der Gleichung für Ermüdungskurven geschweißter Bauteile;
D_f	ist die kumulative Ermüdungsschädigungskennzahl;
E	ist das Elastizitätsmodul bei zulässiger Betriebstemperatur;
F_e, F_s	sind Beiwerte;
f_b	ist der Gesamtkorrekturfaktor für Schrauben;
f_c	ist der Korrekturfaktor zur Berücksichtigung der Spannungen durch Druck;
f_e	ist der Korrekturfaktor zur Berücksichtigung des Wanddickeneinflusses bei ungeschweißten Bauteilen;
f_{ew}	ist der Korrekturfaktor zur Berücksichtigung des Wanddickeneinflusses bei geschweißten Bauteilen und Schrauben;
f_m	ist der Korrekturfaktor zur Berücksichtigung der mittleren Spannung bei ungeschweißten Werkstoffen;
f_m^*	ist der Korrekturfaktor zur Berücksichtigung der mittleren Spannung bei vollständig spannungsfreien und geschweißten Werkstoffen;
f_s	ist der Korrekturfaktor zur Berücksichtigung der Oberflächenrauheit;
f_{T^*}	ist der Temperatureinflussfaktor;
f_u	ist der Gesamtkorrekturfaktor für ungeschweißte Bauteile;
f_w	ist der Gesamtkorrekturfaktor für geschweißte Bauteile;
g	ist die Tiefe der durch Schleifen des Schweißnahtübergangs verursachten Nut;
K_f	ist die effektive Formzahl nach Gleichung (18.7-3);
K_m	ist der Vergrößerungsfaktor für Spannungen aufgrund von Formabweichungen;
K_t	ist die theoretische Formzahl;
k_e	ist der Vergrößerungsfaktor für mechanische Spannungen im überelastisch beanspruchten Bereich;
k_v	ist der Vergrößerungsfaktor für Wärmespannungen im überelastisch beanspruchten Bereich;
M	ist der mittlere Spannungsempfindlichkeitsfaktor;
m, m_1 und m_2	sind die Exponenten in den Gleichungen der Berechnungsermüdungskurven für geschweißte Bauteile;
N_i	ist die zulässige Lastzyklenanzahl aus den Ermüdungskurven (Kennzahl i bezeichnet die zulässige Lastzyklenanzahl für die i -te Spannungsschwingbreite);
n_i	ist die tatsächliche Lastzyklenanzahl (Kennzahl i bezeichnet die Lastzyklenanzahl für die i -te Spannungsschwingbreite);

R	ist der mittlere Radius des Behälters im betrachteten Punkt;
$R_{\min}$	ist der kleinste Innenradius eines zylindrischen Behälters, einschließlich Korrosionszuschlag;
$R_{\max}$	ist der größte Innenradius eines zylindrischen Behälters, einschließlich Korrosionszuschlag;
R_z	ist die Rautiefe;
r	ist der Radius der durch Schleifen des Schweißnahtübergangs verursachten Nut;
S_{ij}	ist die Differenz zwischen den Hauptspannungen (σ_i und σ_j) bzw. den Strukturspannungen ($\sigma_{\text{struc},i}$ und $\sigma_{\text{struc},j}$);
$T_{\max}$	ist die Höchstbetriebstemperatur;
$T_{\min}$	ist die Mindestbetriebstemperatur;
T^*	ist die angenommene mittlere Temperatur während eines Lastzyklus;
$\Delta \varepsilon_T$	ist die Gesamtdehnungsschwingbreite;
$\Delta \sigma$	ist die Spannungsschwingbreite (Kennzahl i bezeichnet die i -te Spannungsschwingbreite; Kennzahl w bezieht sich auf Schweißung);
$\Delta \sigma_{\text{eq}}$	ist die Vergleichsspannungsschwingbreite (Kennzahl i bezeichnet die i -te Spannungsschwingbreite);
$\Delta \sigma_R$	ist die Spannungsschwingbreite aus den Ermüdungskurven;
$\Delta \sigma_D$	ist die Dauerwechselfestigkeit;
$\Delta \sigma_{\text{Cut}}$	ist der untere Grenzwert der Spannungsschwingbreite;
$\Delta \sigma_{\text{struc}}$	ist die Strukturspannungsschwingbreite;
$\Delta \sigma_f$	ist die Spannungsschwingbreite der Gesamtvergleichsspannung;
$\Delta \sigma_{\text{eq},l}$	ist die Vergleichsspannungsschwingbreite, entsprechend der Schwankung im linearen Teil der Spannungsverteilung;
$\Delta \sigma_{\text{eq},t}$	ist die Kerbvergleichsspannungsschwingbreite (oder Gesamtvergleichsspannungsschwingbreite);
$\Delta \sigma_{\text{eq},nl}$	ist die Spannungsschwingbreite, entsprechend der Schwankung im nichtlinearen Teil der Spannungsverteilung;
δ	ist die Gesamtabweichung von der mittleren Kreisform einer Schale an der Schweißnaht (Unrundheit);
δ_1	ist der Mittellinienversatz stoßgeschweißter Platten;
θ	ist der Winkel zwischen den Tangenten stoßgeschweißter Platten an einer Naht;
σ	ist die direkte Spannung (Kennzahl w bezeichnet Schweißnähte);
$\bar{\sigma}_{\text{eq}}$	ist die Vergleichsmittelspannung;
$\bar{\sigma}_{\text{eq},r}$	ist die reduzierte Vergleichsmittelspannung für elastisch-plastische Bedingungen;
$\sigma_{\text{struc},1}$	ist die Strukturhauptspannung (Indizes 1, 2 und 3 bezeichnen die Hauptachsen) zu einem gegebenen Zeitpunkt;
σ_t	ist die Gesamtspannung;
σ_1	ist die Hauptspannung (Indizes 1, 2 und 3 bezeichnen die Hauptachsen) zu einem gegebenen Zeitpunkt;

- σ_{V1}, σ_{V2} sind Spannungsschwingbreiten im Beispiel für das „Reservoir“-Lastzyklenzählverfahren in 18.9.3;
- τ ist die Schubspannung bzw. Schubspannungsschwingbreite (Kennzahl w bezeichnet Schweißnähte).

18.4 Geltungsbereich

18.4.1 Bei auf Ermüdung ausgelegten Behältern sind die Fertigungsverfahren aller Bauteile, einschließlich vorübergehend angebrachter Teile und Ersatzteile, vom Hersteller festzulegen.

18.4.2 Es gibt keine Einschränkungen hinsichtlich der Verwendung von Ermüdungskurven für Behälter mit Betriebstemperaturen unter 0 °C, sofern der Werkstoff, durch den sich ein Ermüdungsriß fortpflanzen könnte, nachgewiesenermaßen so zäh ist, dass ausgehend von einem Ermüdungsriß kein Bruch verursacht werden kann.

18.4.3 Die Berechnungsermüdungskurven gelten bis zur maximalen Temperatur des vernachlässigbaren Kriechens (siehe Abschnitt 19). Die Verwendung der Kurven oberhalb dieser Temperatur kann zu einer nicht-konservativen Auslegung führen. Dem Anwender wird geraten, die Anwendbarkeit der Kurven bei der relevanten Temperatur zu prüfen.

18.4.4 Voraussetzung für die Anwendung dieser Regeln ist die Zugänglichkeit aller ermüdungskritischen Bereiche (siehe 18.10.5) für Sichtprüfungen und zerstörungsfreie Prüfungen. Außerdem müssen Anweisungen für die geeignete Wartung vorgesehen und in die Betriebsweisung aufgenommen werden.

ANMERKUNG Empfehlungen für eine geeignete Betriebsinspektion und Wartung sind in Anhang M enthalten.

Bezüglich Schweißfehlern, die bei der Fertigung entstehen, müssen für die Anwendung dieser Regeln die folgenden Bedingungen erfüllt sein (wie nach EN 13445-5:2014, Anhang G gefordert), zusätzlich zu den allgemeinen Annahmekriterien für Schweißfehler, die in Teil 5 angegeben sind:

- keine Einbrandkerbe;
- keine Schweißnahtwurzel-Konkavität;
- keine nicht vollständig durchgeschweißten Stellen bei durchgeschweißten Nähten.

18.4.5 Korrosive Bedingungen beeinträchtigen die Ermüdungslebensdauer von Stahl erheblich. Durch entsprechende Umgebungsbedingungen verursachte Ermüdungsrisse können bei niedrigeren Wechselbeanspruchungen auftreten als in Luft und ihre Ausbreitungsgeschwindigkeit kann höher sein. In den angegebenen Dauerfestigkeitswerten sind keine Korrosionszuschläge berücksichtigt. Wenn mit Korrosionsermüdung zu rechnen ist und wirksamer Schutz gegen das korrosive Medium nicht gewährleistet werden kann, sollte deshalb auf der Grundlage von Erfahrungen oder Prüfungen ein Korrekturfaktor zur Berücksichtigung der Korrosionswirkung gewählt werden, um den die angegebenen Dauerfestigkeitswerte reduziert werden. Besteht aufgrund mangelnder Erfahrung keine Sicherheit, dass die gewählten Dauerfestigkeitswerte niedrig genug angesetzt sind, sollte die Prüfhäufigkeit erhöht werden, bis genügend Erfahrungswerte für eine Rechtfertigung des gewählten Faktors vorliegen.

Was Toleranzen anbelangt:

- dürfen die Fertigungstoleranzen die in EN 13445-4:2014 angegebenen Werte nicht übersteigen;
- müssen bei allen Rollennahtschweißungen (siehe 18.2.18) in der Konstruktionsphase bestimmte Toleranzen für die Ermüdungsfestigkeitsbewertung herangezogen werden. Danach müssen die angenommenen Toleranzen innerhalb des von EN 13445-4 festgelegten Toleranzbereichs nach der Fertigung geprüft und garantiert werden;

— bei der Ermüdungsanalyse ist die Verwendung von 50 % des Korrosionszuschlages gestattet.

18.4.6 Bei wasserbeaufschlagten Teilen aus nicht austenitischen Stählen, die mit Temperaturen über 200 °C betrieben werden, ist auf Erhaltung der Magnetitschutzschicht zu achten. Dies ist gewährleistet, wenn die Spannungsschwingbreite an der wasserbeaufschlagten Oberfläche stets die folgenden Gleichungen erfüllt:

$$(\sigma_{eq,T})_{\max} \leq (\sigma_{eq,T})_{op} + 200\text{MPa} \quad (18.4-1)$$

$$(\sigma_{eq,T})_{\min} \geq (\sigma_{eq,T})_{op} - 600\text{MPa} \quad (18.4-2)$$

Dabei ist

$(\sigma_{eq,T})_{op}$ die gesamte Vergleichsspannung durch Betriebsdruck (zur besonderen Verwendung in 18.4.6);

$(\sigma_{eq,T})_{\max}$ die gesamte maximale Vergleichsspannung durch Betriebsdruck und Wärmespannung (zur besonderen Verwendung in 18.4.6);

$(\sigma_{eq,T})_{\min}$ die gesamte minimale Vergleichsspannung durch Betriebsdruck und Wärmespannung (zur besonderen Verwendung in 18.4.6).

ANMERKUNG Es wird vorausgesetzt, dass unter den Betriebsbedingungen, bei denen sich die Magnetitschutzschicht bildet, die Schutzschicht spannungsfrei ist.

18.4.7 Lassen sich Schwingungen (z. B. durch Maschinen, Druckschwankungen oder Wind) durch entsprechende Versteifungen, Abstützung oder Dämpfung nicht unterdrücken, so sind sie gemäß den Verfahren dieses Abschnitts zu berechnen.

18.5 Prozess der ausführlichen Bewertung der Ermüdungsfestigkeit

18.5.1 Dieser Unterabschnitt soll den Anwender durch den Prozess zur Ausführung einer ausführlichen Ermüdungsfestigkeitsbewertung nach Abschnitt 18 leiten. Ein Ablaufdiagramm zum Prozess wird im Bild x gezeigt.

18.5.2 Abschnitt 18.6 behandelt die Bestimmung der Spannungen für die Ermüdungsfestigkeitsbewertung von geschweißten Bauteilen und Bereichen. Er legt die anzuwendenden Herangehensweisen bei fluchtenden Schweißnähten und einfachen Anbauten, doppelseitigen Kehlnähten, Durchbruchschweißungen und ähnlichen Schweißverfahren dar. Herangehensweisen basierend auf Nennspannungen, Strukturspannungen und Strukturspannungen an Schwachpunkten werden beschrieben. Anhang NA enthält Informationen zur Bestimmung der Strukturspannungen an Schwachpunkten durch eine Finite-Elemente-Analyse.

18.5.3 Abschnitt 18.7 behandelt die Bestimmung der Spannungen für die Ermüdungsfestigkeitsbewertung über die Lasthistorie von ungeschweißten Bauteilen. Abschnitt 18.8 beschreibt die elastisch-plastische Korrektur der pseudo-elastisch berechneten Strukturspannungsschwingbreiten mechanischen und thermischen Ursprungs, in Fällen, wo diese das Doppelte der Streckgrenze übersteigen.

18.5.4 Abschnitt 18.9 behandelt die Bestimmung der Spannungszyklen und der Vergleichsspannungsschwingbreiten aus der Spannungshistorie jedes Bereichs. Er verweist außerdem auf Anhang NB, welcher unterschiedliche Verfahren zur Zyklenzählung, einschließlich der Rainflow- und Reservoir-Verfahren, beschreibt. Er deckt alle Fälle von einer einfachen Schwankung des Druckes oder eines anderen einzelnen Lastparameters zu komplexen Belastungen mit schwankender Amplitude durch multizyklische Ereignisse, die aus der Lasthistorie im Betrieb oder der bemessenen Belastungsspezifikation folgen, ab. Empfohlene Verfahrensweisen werden für die Fälle einer proportionalen

(Hauptspannungsrichtungen konstant) und nicht-proportionalen (Hauptspannungsrichtungen variieren) Last-Spannungs-Historie angeführt.

18.5.5 Abschnitt 18.10 behandelt die Bestimmung der im Zusammenhang mit geschweißten Bauteilen und Bereichen nach der jeweiligen Klassifizierung zu verwendenden S-n-Kurven. Tabelle 18.4 dient der Klassifizierung der Ermüdungsfestigkeit der verschiedenen Auslegungen von geschweißten Bauteilen in eine von 7 Klassen der S-n-Kurven. Die Grundlagen dieser Klassen folgen aus den Richtlinien des International Institute of Welding, obgleich die individuelle Klassifizierung der schweißtechnischen Auslegungen spezifisch für die unbefeuerten Druckbehälter in dieser Norm ist.

18.5.6 Die Abschnitte 18.11 und 18.12 behandeln die Bestimmung der S-n-Kurven für ungeschweißte Bauteile und Schrauben. Die S-n-Kurven für ungeschweißte Bauteile und Schrauben hängen von der äußersten Zugfestigkeit des Werkstoffs ab.

18.5.7 Abschnitt 18.13 kombiniert die Spannungsschwingbreiten und Anzahlen der Zyklen sowie die anwendbaren S-n-Kurven. Er beschreibt eine Akkumulation der Ermüdungsschädigung oder der Ermüdungsauslastung nach Miner-Regel aus verschiedenen Spannungsschwingbreiten für Spannungszyklen. Der Abschnitt verweist auf EN 13445-5:2014, Anhang G hinsichtlich der Zulässigkeitsgrenzen von innenliegenden Fehlern und auf Anhang M zur Festlegung der Inspektionsanforderungen in Bereichen, welche bestimmte Grenzwerte für die Ermüdungsschädigung/Ermüdungsauslastung überschritten haben.

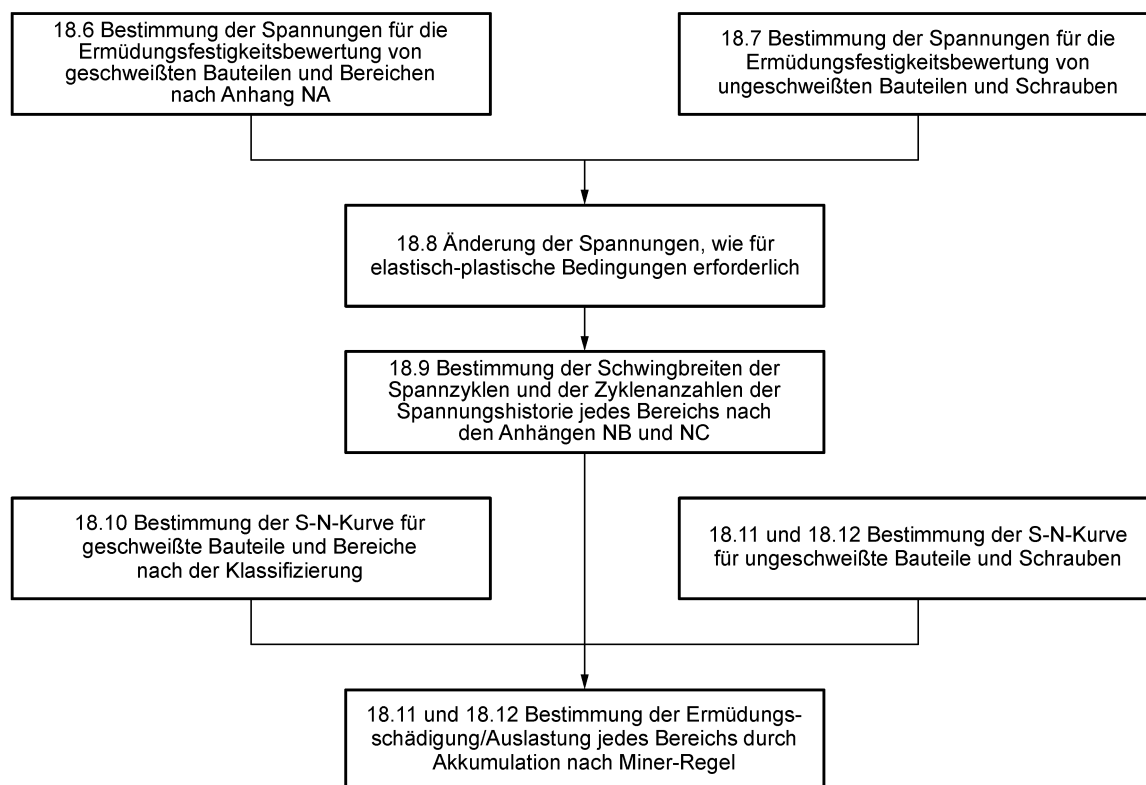


Bild 18-4 — Prozess der ausführlichen Bewertung der Ermüdungsfestigkeit

18.6 Bestimmung der Spannungen für die Ermüdungsfestigkeitsbewertung von geschweißten Bauteilen und Bereichen

Das Verfahren für die Ermüdungsfestigkeitsbewertung von geschweißten Bauteilen und Bereichen, die mechanischen und thermischen Lasten ausgesetzt sind, erfordert die Bestimmung der gesamten Spannungsschwingbreiten der Spannungsponenten in jedem Zyklus.

Die Berechnungsermüdungskurven beziehen die maximale Beanspruchung durch die mittlere Zugspannung und die Eigenspannungen mit ein.

Die im Rahmen der Ermüdungsfestigkeitsbewertung zu berücksichtigenden Spannungen hängen wie folgt von der Art der Schweißung ab.

- a) Zur Bewertung von fluchtenden Schweißnähten und als Option bei einfachen Anbauteilen (siehe ANMERKUNG 1), sofern diese sich nicht in Bereichen befinden, die von globalen Störstellen betroffen sind (siehe ANMERKUNG 2), wird die Nennspannung, die auf elastischer Grundlage bei Nichtvorhandensein einer Schweißnaht oder eines Anbauteils berechnet wurde, verwendet. Die Nennspannung kann über eine elastische Finite-Element-Analyse mittels Schalen- oder Ziegelementen berechnet werden.
- b) Zur Bewertung der doppelseitigen Kehlnähte zur Verbindung von extern belasteten Anbauteilen müssen die verwendeten Spannungen den durchschnittlichen Schweißnahtspannungen entsprechen. Ein analytisches Verfahren zur Berechnung dieser Spannung ist im Anhang NC angeführt.
- c) Zur Bewertung der Durchbruchschweißung und anderer ähnlicher Arten von Schweißungen (sofern nicht von a abgedeckt), einschließlich Schweißungen für Verstärkungsscheiben von Stützen und Abzweigen, müssen die Strukturspannungen am möglichen Anfangspunkt eines Risses (Schwachpunkt) verwendet werden. Diese Spannungen können mithilfe der Elastizitätstheorie über eine elastische Finite-Elemente-Analyse des gesamten Bereichs unter Berücksichtigung der globalen Störstellen berechnet werden (siehe ANMERKUNG 2).

ANMERKUNG 1 Ein einfaches Anbauteil ist ein Anbauteil, welches an die Schale angeschweißt ist und keine zyklischen Lasten auf die Schale überträgt. (Beispielsweise eine Tragöse oder eine Innenbefestigung an Strukturen, welche keine zyklische Belastung der Schale beaufschlagen).

ANMERKUNG 2 Strukturelle Störstellen und Spannungsquellen können aus globalen Formabweichungen, wie Verbindungen zwischen Schale und Boden, Abzweigen, Wanddickenänderungen und aufgeschweißte Ringe, sowie Abweichungen von der Nennform, wie Unrundheit, Aufdachungen und Schweißnahtversatz, folgen. Die in diesem Abschnitt und den angegebenen Verweisungen [3] bis [7] in Anhang NA beschriebenen Verfahren liefern entweder Schätzwerte dieser Spannungen für viele Behältergeometrien oder ermöglichen zumindest eine konservative Schätzung.

ANMERKUNG 3 Es ist anzumerken, dass im Falle der Modellierung, basierend auf Schalenelementen, die Anwendbarkeit der Theorie dünner Schalen sichergestellt werden muss. Wenn dickwandige Abschnitte berücksichtigt werden sollen, gilt der Punkt d).

ANMERKUNG 4 Alternativ können die Strukturspannungen aus der Nennspannung mittels der Faktoren aus 18.10.4 berechnet werden.

- d) Wenn die Schweißnaht in ein Volumenmodell mit finiten Elementen integriert wird, kann eine Strukturspannung am Schwachpunkt bestimmt werden, was die Verwendung der Ermüdungskurve der Klasse 90 für alle Durchbruchschweißungen an beiden Seiten der Prüfgruppe 1 und 2, außer den Bauteilen Nr. 1.1, 1.2, 1.3, 1.5, 1.6, 1.7, 4.1 und 6.4 der Tabelle 18-4 ermöglicht. In Fällen, in denen die Schweißnaht einen starken Einfluss auf die lokale Steifigkeit der geschweißten Verbindung hat, muss das Schweißvolumen in das Volumenmodell integriert werden. Die Strukturspannungen am Schwachpunkt können mit einem der folgenden Verfahren bestimmt werden. Leitlinien zu diesen Verfahren sind im Anhang NA gegeben.

1) *Lineare Oberflächenextrapolation (Spannung am Schwachpunkt)*

Lineare Extrapolation der Spannung an der Oberfläche an den festgelegten Punkten der Schwachstelle nach Anhang NA, wobei die Spannungsverteilung im Abschnitt ungefähr linear ist (Membran- und Biegespannung im Falle dünner Schalen) oder

- 2) *Quadratische Oberflächenextrapolation (Spannung am Schwachpunkt)*
Quadratische Extrapolation der Spannung an der Oberfläche an den festgelegten Punkten der Schwachstelle nach Anhang NA, wobei die Spannungsverteilung im Abschnitt nicht linear ist (z. B. aufgrund von dicken Abschnitten, lokalen Kräften).
 - 3) *Linearisierung durch die Wand*
Linearisierung der Spannungen durch die Abschnittsdicke zum Schwachpunkt nach Anhang NA mittels Integration durch die Wand, wie in Anhang C erläutert.
 - 4) *CAB-Konzept*
Geometrische Entfernung der Spannungssingularität durch Abrunden der Schweißnaht mit einem entsprechenden Radius (CAB-Verfahren) in einem Ziegelmodell mit finiten Elementen (siehe Anhang NA).
 - 5) *Haibach-Konzept*
Verwendung der Spannung 2,5 mm vor dem Schweißnahtübergang nach Haibach (siehe Anhang NA).
- e) In Fällen, in denen Wärmespannungen stark nichtlineare Spannungen durch die Wände verursachen, welche mit mechanischen Lasten kombiniert werden könnten, sollten die für die Ermüdungsanalyse eingesetzten Spannungen durch ein Volumenmodell mit finiten Elementen im Zusammenhang mit den oben angeführten CAB- oder Haibach-Verfahren (siehe 4) und 5)) bestimmt werden. In diesem Fall kann die Klasse 90 verwendet werden, wie in d) definiert.

ANMERKUNG Der Einsatz der Klasse 90 basiert auf der Klasse 100 des IIW-Dokuments, Verweisung [2] des Anhangs N, und dient der weiteren konservativen Auslegung, um sicherzustellen, dass Lecks durch einen Wandriss vermieden werden.

18.7 Spannungen bei der Ermüdungsfestigkeitsbewertung von ungeschweißten Bauteilen und Schrauben

18.7.1 Ungeschweißte Bauteile

Die Bewertung von ungeschweißten Bauteilen muss auf der effektiven Vergleichsspannungsschwingbreite jedes Zyklus basieren, die aus den Komponenten der Gesamtspannung an den betroffenen Punkten berechnet wurde. Die Gesamtspannungen sollten die vollen Beanspruchungen der globalen und lokalen Störstellen (d. h. Kerben und Merkmale, welche die Spannung konzentrieren) von allen Lastarten, einschließlich Betriebsdrücken, anderen mechanischen Lasten und thermischen Transientenbelastungen, umfassen.

Die Gesamtspannungen können direkt durch eine lineare und elastische Spannungsanalyse mit finiten Elementen mithilfe eines Ziegelmodells bestimmt werden, welches die globalen und lokalen Störstellen miteinbezieht. Die Gesamtspannungen können ebenfalls aus einer Analyse der Strukturspannungen, verstärkt um den Spannungskonzentrationsfaktor für die Beanspruchung durch die lokale Störstelle, bestimmt werden. Alternativ können Strukturspannungen ohne einen Spannungskonzentrationsfaktor im Zusammenhang mit der Ermüdungskurve der Klasse 100 für geschweißte Bauteile verwendet werden.

Die Vergleichsspannungsschwingbreite $\Delta\sigma_{eq,l}$ und die mittlere Vergleichsspannung $\bar{\sigma}_{eq}$ müssen aus den Komponenten der Gesamtspannung oder Strukturspannung eines jeden Zyklus nach den in Anhang NB angeführten Verfahren bestimmt werden, abhängig davon, ob bei der Einwirkung mehrerer Lasten die Richtung der Hauptstrukturspannungen im Zyklus konstant bleibt oder nicht.

Wenn die Gesamtspannung direkt aus der Analyse eines Ziegelmodells mit finiten Elementen berechnet wird, lässt sich die effektive Vergleichsspannung bestimmen mit:

$$\Delta\sigma_f = \Delta\sigma_{eq,total} \quad (18.7-1)$$

In der Finite-Elemente-Analyse sollte die Elementengröße in Radialrichtung zur Kerboberfläche im Kerbgrund sehr klein sein. Eine Empfindlichkeitsanalyse mit verfeinertem Finite-Elemente-Gitter sollte zur Bestätigung der Ergebnisse ausgeführt werden.

Sofern sie von Strukturspannungen ausgehend berechnet wird, ist die effektive Vergleichsspannungsschwingbreite gegeben durch:

$$\Delta\sigma_f = K_f \times \Delta\sigma_{eq,struct} \quad (18.7-2)$$

Die in dieser Berechnung verwendete Strukturspannung ist mittels eines Schalenmodells mit finiten Elementen zu bestimmen, welches die volle Beanspruchung durch globale Störstellen erfasst, nicht jedoch die Beanspruchung durch lokale Störstellen (d. h. Kerben).

Die effektive Formzahl K_f ist gegeben durch:

$$K_f = 1 + \frac{1,5 \times (K_t - 1)}{1 + 0,5 \max \left\{ 1; K_t \times \frac{\Delta\sigma_{struct,eq}}{\Delta\sigma_D} \right\}} \quad (18.7-3)$$

Dabei ist

$\Delta\sigma_D = \Delta\sigma_R$ für $N \geq 2 \times 10^6$ Zyklen an ungeschweißten Werkstoffen;

$\Delta\sigma_{struct,eq}$ die Schwingbreite der Strukturvergleichsspannung, korrigiert zur Berücksichtigung von plastischer Beanspruchung (falls relevant, siehe 18.8). Das Maximum von $\Delta\sigma_{struct,eq}$ ist der Wert bei 10 000 Zyklen.

Die theoretische Formzahl K_t muss aus den Werten im Anhang NC für gemeinsame Merkmale, welche die Spannung konzentrieren oder aus den analytischen Gleichungen der Verweisungen dieser Norm bestimmt werden.

18.7.2 Schrauben

Bei Schrauben ist $\Delta\sigma$ die maximale Nennspannungsschwingbreite aus direkten Zug- und Biegebeanspruchungen am Querschnitt des Schraubenkerns, der aus dem kleineren Durchmesser ermittelt wird. Bei vorgespannten Schrauben kann die Vorspannung mitberücksichtigt werden, wobei für $\Delta\sigma$ die Gesamtschraubenkraft und nicht der veränderliche Anteil dieser Kraft zugrunde gelegt wird.

ANMERKUNG In den Ermüdungskurven für Schrauben werden für alle beliebigen Gewindeformen die Spannungskonzentrationen am Gewindekern berücksichtigt.

18.8 Elastisch-plastische Bedingungen

18.8.1 Allgemeines

Übersteigt bei einem Bauteil die berechnete Schwingbreite der pseudoelastischen Strukturspannung für geschweißte und ungeschweißte Bauteile das Doppelte der Dehngrenze des betrachteten Werkstoffs, d. h. wenn $\Delta\sigma_{eq,J} > 2R_{p0,2/T^*}$ ist (siehe Anmerkung), muss sie mit einem entsprechenden Korrekturfaktor multipliziert werden. Der anzuwendende Korrekturfaktor für die Schwingbreite der Spannung ist für Anteile mechanischer Einwirkungen k_e , für Anteile thermischer Einwirkungen k_v .

ANMERKUNG Dies gilt für ferritische Stähle; für austenitische Stähle ist $R_{p1,0/T^*}$ zu verwenden.

18.8.2 Mechanische Beanspruchung

Bei mechanischer Beanspruchung ist die korrigierte Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma_{\text{struc,eq}} = k_e \Delta\sigma_{\text{eq,l}}$. Dabei ist:

$$k_e = 1 + A_0 \left(\frac{\Delta\sigma_{\text{eq,l}}}{2R_{p0,2/T}} - 1 \right) \quad (18.8-1)$$

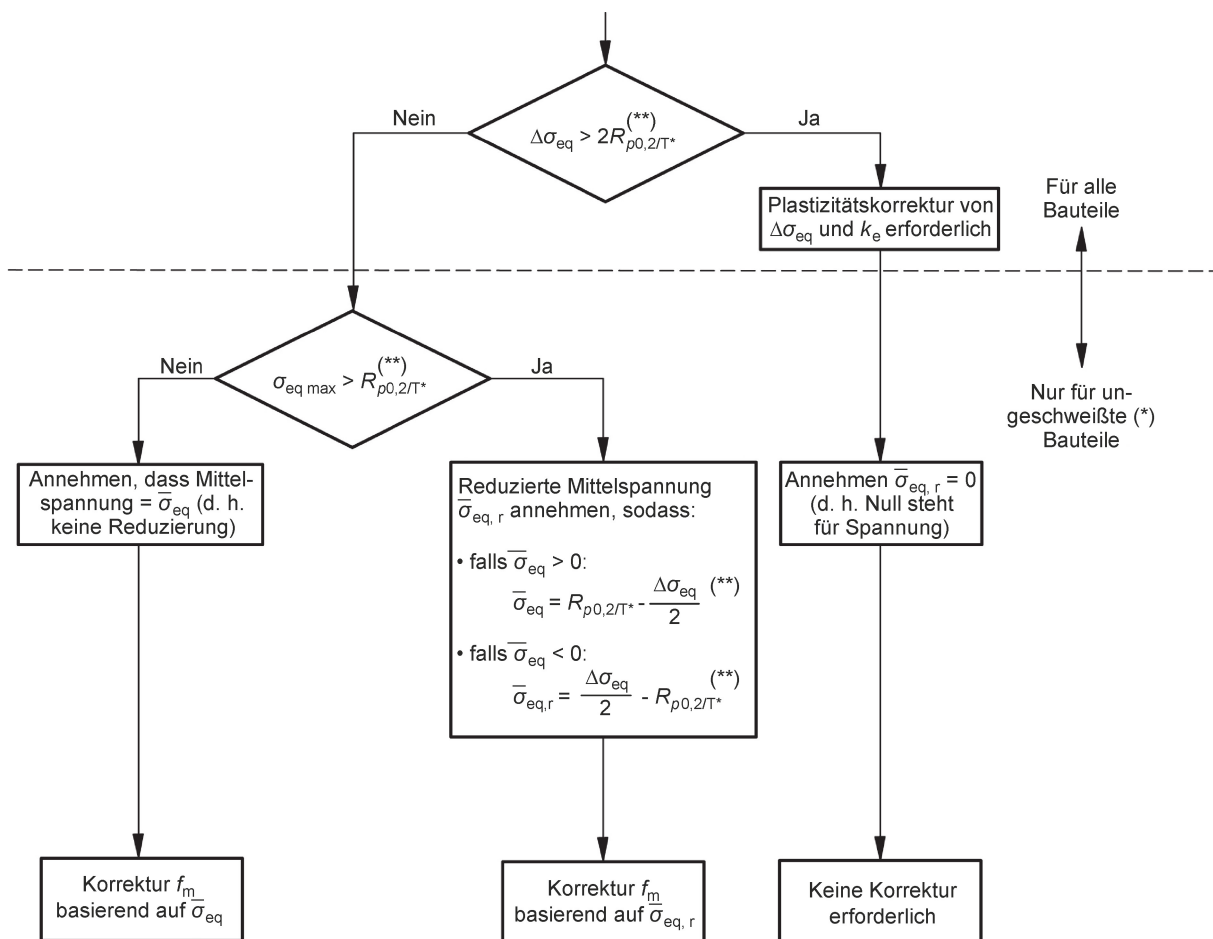
mit:

$A_0 = 0,5$ für ferritische Stähle mit $800 \leq R_m \leq 1\,000$ (MPa);

= 0,4 für ferritische Stähle mit $R_m \leq 500$ (MPa) und für alle austenitischen Stähle (siehe Anmerkung in 18.8.1);

= $0,4 + \frac{(R_m - 500)}{3000}$ für ferritische Stähle mit $500 \leq R_m \leq 800$ (MPa).

Das Verfahren zur Ermittlung der Vergleichsmittelspannung zur Berücksichtigung elastisch-plastischer Bedingungen ist in Bild 18-5 dargestellt und wird in 18.11 angewandt.



(*) Bei ungeschweißten Bauteilen sind σ und $\Delta\sigma$ Kerbspannungen bzw. Kerbspannungsschwingbreiten.

(**) Dies gilt für ferritische Stähle; für austenitische Stähle ist $R_{p1,0/T^*}$ zu verwenden.

Bild 18-5 — Korrektur der Vergleichsmittelspannung zur Berücksichtigung mechanischer Spannungen im überelastischen Bereich

18.8.3 Beanspruchung durch Wärmespannungen

Ist die Wärmespannungsverteilung über die Werkstoffdicke nicht linear, müssen sowohl die nichtlinearen als auch die äquivalenten linearen Spannungsverteilungen für jede Spannungskomponente ermittelt werden. Der Korrekturfaktor wird durch Einsetzen der linearisierten Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma_{eq,l}$, k_v in die nachstehende Gleichung berechnet:

$$k_v = \max\left(\frac{0,7}{0,5 + \frac{0,4}{\Delta\sigma_{eq,l}/R_{p0,2}/T^*}}; 1,0\right) \quad (18.8-2)$$

Die korrigierte Spannungsschwingbreite muss entweder $\Delta\sigma_{eq} = k_v \cdot \Delta\sigma_{eq,l}$ bei geschweißten Verbindungen oder $\Delta\sigma_f = k_v \cdot \Delta\sigma_{eq,t}$ bei ungeschweißten Bereichen entsprechen.

18.8.4 Analyse des elastisch-plastischen Bereichs

Ist die Gesamtdehnungsschwingbreite $\Delta\varepsilon_T$ (elastisch und plastisch) infolge jeder Art von Beanspruchung aus rechnerischen oder experimentellen Spannungsanalysen bekannt, ist eine Korrektur für Spannungen im überelastischen Bereich nicht erforderlich und

$$\Delta\sigma = E \times \Delta\varepsilon_T$$

18.9 Zyklen der Vergleichsspannungsschwingbreite $\Delta\sigma_{eq}$

Die Spannungszyklen aus einer vorherrschenden betrieblichen Lasthistorie oder den spezifizierten Bemessungslasten müssen mit einem der Verfahren aus Anhang NB bestimmt werden. Dieser Anhang beschreibt die Berechnung der Vergleichsspannungsschwingbreite aus den Komponentenspannungen der Nennspannung, Strukturspannung bzw. der Strukturspannung an Schwachpunkten für jeden Zyklus nach 18.6 für geschweißte Bauteile und 18.7 für ungeschweißte Bauteile und Schrauben.

18.10 Ermüdungsfestigkeit geschweißter Bauteile

18.10.1 Klassifizierung von Schweißnähten

18.10.1.1 Allgemeine Herangehensweise

Tabelle 18-4 enthält Schweißnähte und die zugehörigen Klassen zur Verwendung bei der Ermüdungsfestigkeitsbewertung. Die Spannungen (Nenn- oder Strukturspannungen) zur Verwendung mit den Kurven müssen nach 18.6.1(a) und 18.6.1(c) bestimmt werden.

Die Klassifizierung bezieht sich entweder auf Ermüdungsriss im Grundwerkstoff, ausgehend vom Nahtübergang oder Anschweißende, für die $\Delta\sigma_{eq}$ in dem der Risseinleitung benachbarten Grundwerkstoff maßgeblich ist, oder auf Ermüdungsriss in der Naht selbst, ausgehend von der Nahtwurzel oder -oberfläche, für die $\Delta\sigma_{eq}$ in der Naht maßgeblich ist mit $\Delta\sigma_{eq}$ wie in Anhang NB definiert.

Da $\Delta\sigma_{eq}$ keine Richtung aufweist, ist bei der angegebenen Klasse die ungünstigste Spannungsrichtung für die jeweilige Schweißnaht mit der dargestellten Rissbildungsart zugrunde gelegt.

Bei der Ermittlung der Spannungen sind sämtliche Abweichungen von der Idealform (Fluchtfehler, Aufdachung, Unrundheit usw.) zu berücksichtigen.

ANMERKUNG 1 Im Allgemeinen hängt die Dauerfestigkeit von folgenden Faktoren ab: Richtung der Wechsellast bezogen auf die Naht; Lage der möglichen Risseinleitung in der Naht; geometrische Anordnung und

Proportionen der Naht; Fertigungs- und Prüfverfahren. Eine Schweißnahtart kann daher in den Tabellen mehrfach erscheinen, da sie bei verschiedenen Verbindungen zutreffend sein kann.

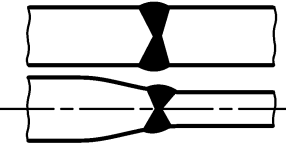
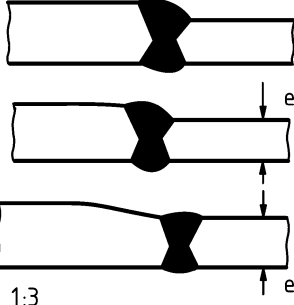
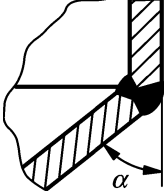
ANMERKUNG 2 Ein bestimmtes Detail einer Schweißnaht muss ggf. von verschiedenen Punkten und unter Anwendung verschiedener Klassifikationen und entsprechender Berechnungskurven auf Ermüdungsbruch geprüft werden.

ANMERKUNG 3 Die Ermüdungslebensdauer eines Behälters oder eines Bauteils kann von einer einzigen Schweißnaht bestimmt werden. Daher müssen alle anderen Nähte, die den gleichen Wechselbeanspruchungen ausgesetzt sind, nicht höher eingestuft sein. So ist z. B. die durch fluchtfehlerfreie Ausrichtung von Nähten erreichbare hohe Nahtklasse nicht erforderlich, wenn die Ermüdungslebensdauer insgesamt durch die Festigkeit von Kehlnähten bestimmt wird.

18.10.1.2 Klassifizierung von Schweißnähten, die mittels der Strukturspannung an Schwachpunkten analysiert werden

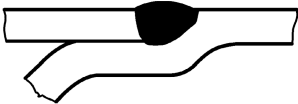
Für jede Schweißnaht, für welche die Strukturspannung an einem Schwachpunkt oder eine Wärmespannung in Übereinstimmung mit 18.6.1(d) und 18.6.1(e) berechnet wird, kann die Klasse-90-Kurve für alle Schweißnähte verwendet werden, welche in Übereinstimmung mit den Prüfgruppen 1 und 2 gefertigt sind, mit Ausnahme der Schweißnähte Nr. 1.6, 1.7, 4.1 und 6.4 in Tabelle 18-4.

Tabelle 18.4 — Klassifizierung von Schweißnähten auf Grundlage der Vergleichsspannungsschwingbreite
a) Nahtschweißungen

Lfd. Nr.	Art der Verbindung	Darstellung	Bemerkungen	Klasse	
				Prüfgruppe 1 und 2	Prüfgruppe 3
1.1	Durchgeschweißte Stumpfnah, bündig geschliffen, einschließlich Reparatur-schweißung	 Ermüdungsanriss, gewöhnlich an Nahtfehlern	Naht erwies sich bei zerstörungsfreier Prüfung als frei von Oberflächenfehlern und größeren oberflächen-nahen Fehlern (siehe EN 13445-5:2014). An Stelle von f_{ew} ist f_e zu verwenden.	90	71
1.2	Durchgeschweißte Stumpfnah, beidseitig geschweißt oder einseitig bis zur abschmelzenden Einlage oder zur temporären nichtschmelzenden Unterlage geschweißt	 1:3	Naht zerstörungsfrei geprüft und nachweislich frei von größeren Fehlern (siehe EN 13445-5:2014); bei einseitig geschweißten Nähten Durchschweißung*. Dickenverhältnis nicht kleiner als 1/3	80	63
1.3		 1:3	Einfluss von Mittellinienversatz, einschließlich Nahtversatz, bei der Spannungsberechnung berücksichtigt* Naht zerstörungsfrei geprüft und nachweislich frei von größeren Fehlern (siehe EN 13445-5:2014).	80	63
1.4		 α	Naht erwies sich bei zerstörungsfreier Prüfung als frei von größeren Fehlern (siehe EN 13445-5:2009)		
			$\alpha \leq 30^\circ$	80	63
			$\alpha > 30^\circ$	71	56

*Bei Nahtversatz, siehe 18.10.4.

Tabelle 18-4 — Klassifizierung von Schweißnähten auf Grundlage der Vergleichsspannungsschwingbreite (fortgesetzt)
a) Nahtschweißungen

Lfd. Nr.	Art der Verbindung	Darstellung	Bemerkungen	Klasse	
				Prüf- gruppe 1 und 2	Prüf- gruppe 3
1.5	Durchgeschweißte Stumpfnah, einseitig geschweißt, ohne Unterlage		Wenn vollständige Durchschweißung und Abwesenheit von Wurzelfehlern sichergestellt*.	71	40
			Wenn vollständige Durchschweißung und Abwesenheit von Wurzelfehlern nicht sichergestellt*.	40	40
1.6	Durchgeschweißte Stumpfnah, einseitig geschweißt, mit bleibender Unterlage		Nur Rundnähte (siehe 5.7) Mindestnahtdicke = Wanddicke		
			Wurzellage auf vollständige Verschmelzung geprüft	56	40
			Einlagenschweißnaht	40	32
1.7	Sickennaht		Nur Rundnähte (siehe 5.7) Mindestnahtdicke = Wanddicke.		
			Wurzellage auf vollständige Verschmelzung geprüft	56	40
			Einlagenschweißnaht	40	32

* Die zerstörungsfreien Prüfungsverfahren müssen in der Lage sein, eine vollständige Durchschweißung und die Abwesenheit von Wurzelfehlern sicherzustellen. Falls dies nicht möglich ist, dann ist die Klasse 63 einzusetzen, sofern die Innenoberfläche für eine Sichtprüfung zugänglich ist. Bei Nahtversatz, siehe 18.10.4.

Tabelle 18-4 — Klassifizierung von Schweißverbindungen auf Grundlage der Vergleichsspannungsschwingbreite (fortgesetzt)
b) Schale zu Boden oder Rohrboden

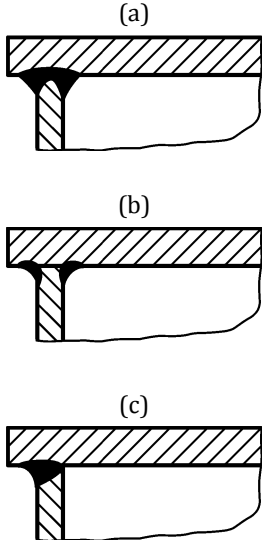
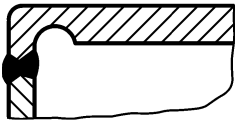
Lfd. Nr.	Art der Verbindung	Darstellung	Bemerkungen	Klasse	
				Prüfgruppe 1 und 2	Prüfgruppe 3
2.1	Aufgeschweißter Boden		Boden muss ausreichende Festigkeitseigenschaften über die Dicke aufweisen, um Lamellenrissbildung zu vermeiden		
			Beidseitig durchgeschweißt (Bild a): - wie geschweißt - Übergang nachbearbeitet (siehe 18.10.2.2).	71 80	63 63
			Beidseitig mit versenkter Kehlnaht geschweißt (Bild b): - Ermüdungsrisse in der Schweißnaht* - Ermüdungsrisse in der Schale vom Nahtübergang	32 63	32 63
			Einseitig durchgeschweißt, ohne Gegennaht (Bild c): - wenn Innenseite sichtgeprüft und frei von Schweißgutüberlauf oder Wurzelrückfall - wenn Innenseite für Sichtprüfung nicht zugänglich und vollständige Durchschweißung nicht sichergestellt	63 40	40 40
2.2	Aufgeschweißter Boden mit Entlastungsnut		Naht zerstörungsfrei geprüft und nachweislich frei von größeren Fehlern (siehe EN 13445-5).		
			Beidseitig oder einseitig geschweißt und erste Lage bündig geschliffen	80	63
			Einseitig geschweißt: - wenn Innenseite sichtgeprüft und frei von Schweißgutüberlauf oder Wurzelrückfall - wenn Innenseite für Sichtprüfung nicht zugänglich	63 40	40 40
* für Nahtdicke < 0,8 x Schalenwanddicke					

Tabelle 18-4 — Klassifizierung von Schweißverbindungen auf Grundlage der Vergleichsspannungsschwingbreite (*fortgesetzt*)
b) Schale zu Boden oder Rohrboden

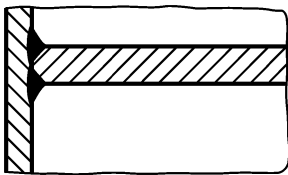
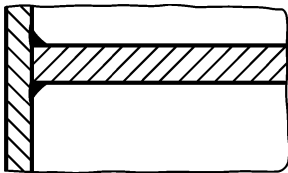
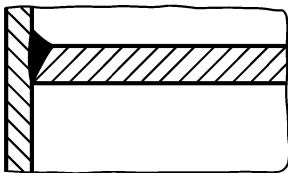
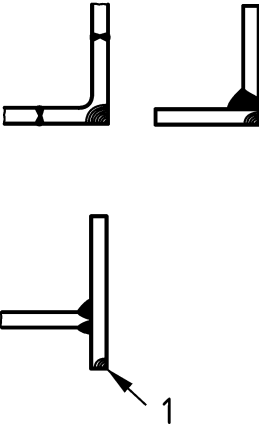
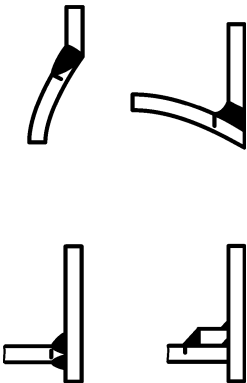
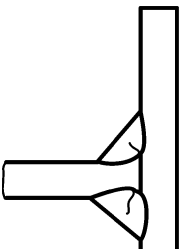
Lfd. Nr.	Art der Verbindung	Darstellung	Bemerkungen	Klasse	
				Prüfgruppe 1 und 2	Prüfgruppe 3
2.3	Eingeschweißter Boden	 (a)  (b)  (c)	Beidseitig durchgeschweißt (Bild a): (bezieht sich auf Ermüdungsrissbildung vom Nahtübergang aus in die Schale): - wie geschweißt; - Übergang nachbearbeitet (siehe 18.10.2.2).	71 80	63 63
			Beidseitig mit versenkter Kehlnaht geschweißt (Bild b): - bezogen auf Ermüdungsrisse in der Naht, auf Grundlage der Spannungsschwingbreite an der Nahtdicke - Schweißnahtdicke $\geq 0,8 \times$ Bodendicke	32 63	32 63
			Einseitig durchgeschweißt, ohne Gegennaht (Bild c): - wenn Innenseite sichtgeprüft und frei von Schweißgutüberlauf oder Wurzelrückfall - wenn Innenseite für Sichtprüfung nicht zugänglich	63	40
				40	40

Tabelle 18-4 — Klassifizierung von Schweißnähten auf Grundlage der Vergleichsspannungsschwingbreite (fortgesetzt)
a) Abzweigverbindungen

Lfd. Nr.	Art der Verbindung	Darstellung	Bemerkungen	Klasse	
				Prüfgruppe 1 und 2	Prüfgruppe 3
3.1	Lochrand (an Ausschnittinnenseite)	 1 Rissverlauf von der Ecke ausgehend in das Bauteil; Rissebene dargestellt	Schweißungen an Lochrändern werden nach 3.2, 3.3 und 3.4 unten eingestuft. Keine Korrektur der Dicken angewandt (f_e statt f_{ew} verwenden) Bei Lochrändern ist die Bewertung der ungeschweißten Teile die normale Herangehensweise.	100	100
3.2	Nahtübergang in Schalenwand		Durchgeschweißt - wie geschweißt - Übergang nachbearbeitet (siehe 18.10.2.2)	71 80	63 63
			Mit versenkter Kehlnaht geschweißt: - Schweißnahtdicke $\geq 0,8 \times$ kleinere Dicke der verbundenen Wände, wie geschweißt - Schweißnahtdicke $< 0,8 \times$ kleinere Dicke der verbundenen Wände - Übergang nachbearbeitet (siehe 18.10.2.2)	63 32 71	63 32 63
3.3	Schweißgut unter Spannung		Schweißnahtspannung in Übereinstimmung mit 18.6.3 zu bestimmen. Mit Kehlnaht oder versenkter Kehlnaht geschweißt	32	32

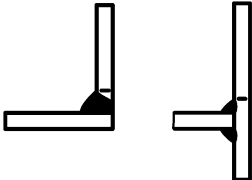
Lfd. Nr.	Art der Verbindung	Darstellung	Bemerkungen	Klasse	
				Prüfgruppe 1 und 2	Prüfgruppe 3
3.4	Übergang in Abzweig		- Wie geschweißt - Übergang nachbearbeitet (siehe 18.10.2.2). e_n = Dicke des Abzweigs in Gleichung (18.10-6).	71 80	63 63

Tabelle 18-4 — Klassifizierung von Schweißnähten auf Grundlage der Vergleichsspannungsschwingbreite (fortgesetzt)
d) Außenmäntel

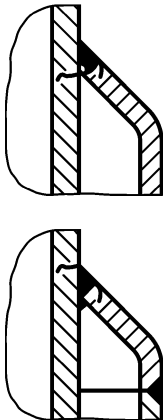
Lfd. Nr.	Art der Verbindung	Darstellung	Bemerkungen	Klasse	
				Prüfgruppe 1 und 2	Prüfgruppe 3
4.1	Verbindungsnaht mit Formdichtung		Durchgeschweißt; mit zerstörungsfreier Prüfung nachzuweisen, dass Naht frei von größeren Fehlern (siehe EN 13445-5:2014)		
			Einseitig geschweißt: - Mehrlagenschweißnaht; Wurzellage auf vollständige Verschmelzung geprüft. - Einlagenschweißnaht	63 40	40 40
			Beidseitig geschweißt oder einseitig geschweißt mit Gegennaht.	71	56

**Tabelle 18-4 — Klassifizierung von Schweißnähten auf Grundlage der
Vergleichsspannungsschwingbreite (fortgesetzt)
e) Anbauteile**

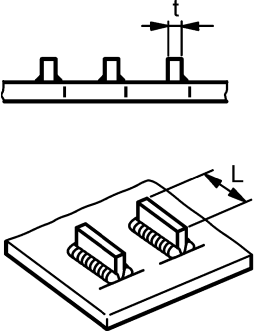
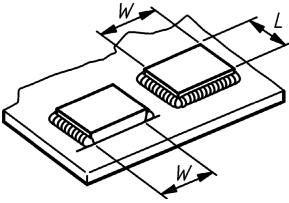
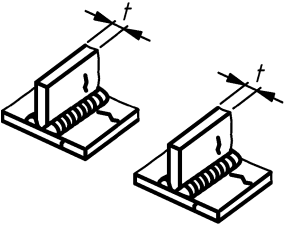
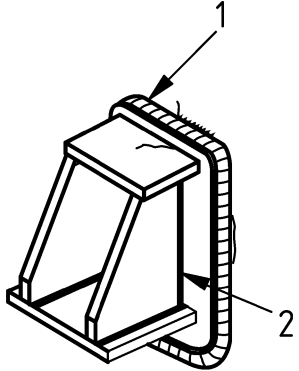
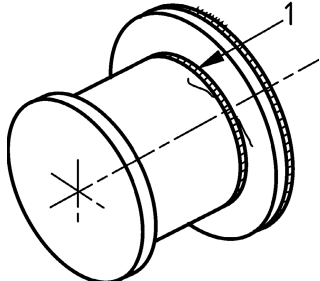
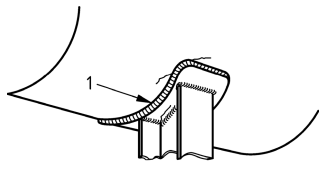
Lfd. Nr.	Art der Verbindung	Darstellung	Bemerkungen	Klasse	
				Struktur- vergleichs- spannung	Nennver- gleichs- spannung ohne Beauf- schlagung zyklischer Lasten
				Prüf- gruppe 1, 2, 3	Prüf- gruppe 1, 2, 3
5.1	Anbauteil beliebiger Form mit Randkehle oder Randabschrägung, mit der Oberfläche eines spannungsbeanspruchten Bauteils stumpfverschweißt, Nähte ggf. um die Enden herumgeführt		Bei um die Enden herumgeführten Nähten eine Klasse höher, wenn Nahtübergang nachbearbeitet (siehe 18.10.2.2) $L \leq 160 \text{ mm}, t \leq 55 \text{ mm}$ $L > 160 \text{ mm}$	71 71	56 50
5.2	Anbauteil beliebiger Form, Oberfläche am spannungsbeanspruchten Bauteil anliegend, Nähte ggf. um die Enden herumgeführt		Bei um die Enden herumgeführten Nähten eine Klasse höher, wenn Nahtübergang nachbearbeitet (siehe 18.10.2.2) $L \leq 160 \text{ mm}, W \leq 55 \text{ mm}$ $L > 160 \text{ mm}, W \leq 55 \text{ mm}$ $L > 160 \text{ mm}, W \leq 55 \text{ mm}$	71 71 71	56 50 45
5.3	Durchgehende Versteifung		Bei durchgeschweißten Nähten eine Klasse höher, wenn Nahtübergang nachbearbeitet (siehe 18.10.2.2). $t \leq 55 \text{ mm}$ $t > 55 \text{ mm}$	71 71	56 50

Tabelle 18-4 — Klassifizierung von Schweißverbindungen auf Grundlage der Vergleichsspannungsschwingbreite (Fortsetzung)
f) Stützen/Traglelemente

Lfd. Nr.	Art der Verbindung	Darstellung	Bemerkungen	Klasse zur Verwendung mit	
				Strukturvergleichsspannung	Nennvergleichsspannung ohne Beaufschlagung zyklischer Lasten
				Prüfgruppe 1, 2, 3	Prüfgruppe 1, 2, 3
6.1	Stützung entweder auf horizontalem oder vertikalem Behälter	 1 Kehlnaht um gesamten Behälter herum geschweißt 2 Unterlage	Kehlnaht 1 - Wie geschweißt - Nahtübergang an der Schale nachbearbeitet (siehe 18.10.2.2) Kehlnaht 2 - Wie geschweißt - Nahtübergang nachbearbeitet	71 80 63 71	63 71 63 71
6.2	Zapfenlagerung	 1 Kehlnaht an Behälter geschweißt 2 Unterlage	- Wie geschweißt - Nahtübergang an der Schale nachbearbeitet (siehe 18.10.2.2) Kehlnaht 2 - Wie geschweißt - Nahtübergang nachbearbeitet	71 80 71 80	63 71 71 80
6.3	Sattelaufleger	 1 Kehlnaht um gesamten Behälter herum geschweißt	- Wie geschweißt - Nahtübergang an der Schale nachbearbeitet (siehe 18.10.2.2)	71 80	63 71