

DIN EN 13445-3/A20

ICS 23.020.30

Entwurf

Einsprüche bis 2019-07-17
Vorgesehen als Änderung von
DIN EN 13445-3:2018-12

**Unbefeuerte Druckbehälter –
Teil 3: Konstruktion;
Deutsche und Englische Fassung EN 13445-3:2014/prA20:2019**

Unfired pressure vessels –
Part 3: Design;
German and English version EN 13445-3:2014/prA20:2019
Récipients sous pression non soumis à la flamme –
Partie 3: Conception;
Version allemande et anglaise EN 13445-3:2014/prA20:2019

Anwendungswarnvermerk

Dieser Norm-Entwurf mit Erscheinungsdatum 2019-05-17 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, Saatwinkler Damm 42/43, 13627 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 227 Seiten

DIN-Normenausschuss Chemischer Apparatebau (FNCA)

Nationales Vorwort

Dieses Dokument (EN 13445-3:2014/prA20:2019) wurde vom Technischen Komitee CEN/TC 54 „Unbefeuerte Druckbehälter“ erarbeitet, dessen Sekretariat von BSI (Vereinigtes Königreich) gehalten wird.

Das zuständige deutsche Normungsgremium ist der Arbeitsausschuss NA 012-00-05-03 UA „Konstruktion und Auslegung“ im DIN-Normenausschuss Chemischer Apparatebau (FNCA).

Um Zweifelsfälle in der Übersetzung auszuschließen, ist die englische Originalfassung 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

STD Version 2.9p

Inhalt

	Seite
Europäisches Vorwort.....	5
1 Änderung an Abschnitt 18.....	6
18 Ausführliche Berechnung der Ermüdungslebensdauer	6
18.1 Zweck.....	6
18.2 Besondere Definitionen	8
18.2.1 Kritischer Bereich.....	8
18.2.2 Unterer Grenzwert der Spannungsschwingbreite.....	8
18.2.3 Störstelle.....	8
18.2.4 Effektive Kerbspannung.....	8
18.2.5 Effektiver Spannungskonzentrationsfaktor.....	9
18.2.6 Elastische Beanspruchung.....	9
18.2.7 Dauerwechselfestigkeit.....	9
18.2.8 Vergleichsspannungsschwingbreite.....	9
18.2.9 Ermüdung.....	9
18.2.10 Ermüdungskurven	9
18.2.11 Grobe Störstelle	9
18.2.12 Hotspot.....	9
18.2.13 Lastzyklus.....	9
18.2.14 Lokale strukturelle Störstelle.....	10
18.2.15 Nennspannung.....	10
18.2.16 Kerbe.....	10
18.2.17 Kerbspannung.....	11
18.2.18 Nahtschweißverbindung.....	11
18.2.19 Schweißnahtspannung.....	11
18.2.20 Spannungsschwingbreite ($\Delta\sigma$).....	11
18.2.21 Strukturspannung.....	12
18.2.22 Strukturelle Hotspot-Spannung.....	12
18.2.23 Theoretischer elastischer Spannungskonzentrationsfaktor	12
18.2.24 Teilnutzungsfaktor	13
18.2.25 Kumulativer Nutzungsfaktor (kumulative Schädigungskennzahl).....	13
18.2.26 Schweißnahtdicke.....	13
18.3 Zusätzliche Symbole und Abkürzungen	13
18.4 Geltungsbereich.....	15
18.5 Ausführliches Verfahren der Berechnung der Ermüdungslebensdauer.....	16
18.6 Bestimmung der Spannungen für die Berechnung der Ermüdungslebensdauer geschweißter Bauteile und Bereiche.....	18
18.7 Spannungen für die Berechnung der Ermüdungslebensdauer geschweißter Bauteile und Schrauben.....	20
18.7.1 Ungeschweißte Bauteile.....	20
18.7.2 Schrauben.....	22
18.8 Elastisch-plastische Bedingungen.....	22
18.8.1 Allgemeines.....	22
18.8.2 Mechanische Beanspruchung.....	22
18.8.3 Beanspruchung durch Wärmespannungen.....	23
18.8.4 Kombinierte Beanspruchung durch mechanische und Wärmespannungen.....	24
18.8.5 Analyse des elastisch-plastischen Bereichs.....	24
18.9 Zyklen der Vergleichsspannungsschwingbreite $\Delta\sigma_{eq}$	24

18.10	Ermüdungsfestigkeit geschweißter Bauteile	24
18.10.1	Klassifizierung von Schweißnahtdetails	24
18.10.2	Änderung der Klassifizierung	35
18.10.3	Nicht klassifizierte Schweißnähte	37
18.10.4	Abweichungen von der Konstruktionsform	38
18.10.5	Korrekturfaktoren	42
18.10.6	Ermüdungskurven	44
18.11	Ermüdungsfestigkeit ungeschweißter Bauteile	50
18.11.1	Korrekturfaktoren	50
18.11.2	Gesamtkorrekturfaktor für ungeschweißte Bauteile	52
18.11.3	Auslegungswerte	53
18.12	Ermüdungsfestigkeit von Stahlschrauben	55
18.12.1	Allgemeines	55
18.12.2	Korrekturfaktoren	55
18.12.3	Auslegungsdaten	55
18.13	Kumulative Schädigungskennzahl	57
18.13.1	Beanspruchung mit konstanter Amplitude	57
18.13.2	Beanspruchung mit variabler Amplitude	57
18.13.3	Ermüdungsauslegungskriterien	57
18.13.4	Angabe der anfänglichen Betriebsgrenzwerte und Ermüdungsschadenstellen	57
18.13.5	Schweißfehler	58
18.13.6	Überwachung bei laufendem Betrieb von Behältern, die im Ermüdungsbereich betrieben werden	58
2	Änderung in Anhang N „Literaturhinweise zu Abschnitt 18“	58
3	Neuer Anhang NA „Beispiele für die Bestimmung der Hotspot-Strukturspannung durch Finite-Element-Analyse unter Verwendung von Schalen- und soliden Elementen“	59
Anhang NA (informativ) Beispiele für die Bestimmung der Hotspot-Strukturspannung durch Finite-Element-Analyse unter Verwendung von Schalen- und soliden Elementen		59
NA.1	Zweck	59
NA.2	Besondere Definitionen	59
NA.3	Zusätzliche Symbole und Abkürzungen	59
NA.4	Bestimmung der Hotspot-Strukturspannungen mittels Schalenelementen	60
NA.4.1	Direkter Zugang	60
NA.4.2	Lineare Oberflächen-Extrapolation (Hotspot-Strukturspannung)	61
NA.4.3	Quadratische Oberflächen-Extrapolation (Hotspot-Strukturspannung)	62
NA.5	Bestimmung der Hotspot-Strukturspannungen mittels solider Elemente	63
NA.6	Allgemeine Empfehlungen [8]	67
NA.7	Literaturhinweise	68
4	Neuer Anhang NB „Zykluszahlung und Bestimmung der Vergleichsspannungsschwingbreite“	69
Anhang NB (informativ) Zykluszahlung und Bestimmung der Vergleichsspannungsschwingbreite		69
NB.1	Allgemeine Herangehensweise	69
NB.1.1	Einleitung	69
NB.1.2	Zweck und grundlegende Anwendungsfälle	69
NB.1.3	Zykluszahlparameter für proportionale Last-Spannungshistorien	70
NB.1.4	Zykluszahlung für proportionale Last-Spannungshistorien:	71
NB.2	Zykluszahlung	72
NB.2.1	Empfohlene Verfahren	72
NB.2.2	Vereinfachtes Lastzyklenzahlverfahren	72
NB.2.3	Reservoir-Zählverfahren	73
NB.2.4	Rainflow-Zählverfahren	74
NB.2.5	Bemessungsdatenbewertung	81

NB.3	Bestimmung der Vergleichsspannungsschwingbreiten und der mittleren Spannung.....	96
NB.3.1	Konstante Hauptspannungsrichtungen (proportionale Last-Spannungshistorie)	96
NB.3.2	Veränderliche Hauptspannungsrichtungen (nicht-proportionale Historie)	98
NB.4	Bestimmung der Vergleichsspannungsschwingbreite basierend auf dem Tresca-Kriterium für nicht-proportionale Last-Spannungs-Historien.....	101
NB.5	Literaturhinweise	102
5	Neuer Anhang NC „Berechnung der Ermüdungslebensdauer für teilweise durchgeschweißte Schweißnähte“	103
Anhang NC (informativ) Berechnung der Ermüdungslebensdauer für teilweise durchgeschweißte Schweißnähte		103
NC.1	Allgemein.....	103
NC.2	Nennspannungsschwingbreite an der Schweißnaht	104
NC.3	Allgemeines Verfahren	106
NC.4	Spezifisches Verfahren für doppelseitige Kehlnähte.....	108
6	Neuer Anhang ND „Tabelle der Spannungskonzentrationsfaktoren K_t “	111
Anhang ND (informativ) Tabelle der Spannungskonzentrationsfaktoren K_t		111

Europäisches Vorwort

Dieses Dokument (EN 13445-3:2014/prA20:2019) wurde vom Technischen Komitee CEN/TC 54 „Unbefeuerte Druckbehälter“ erarbeitet, dessen Sekretariat von BSI gehalten wird.

Dieses Dokument ist derzeit zur CEN-Umfrage vorgelegt.

Dieses Dokument wurde im Rahmen eines Normungsauftrages erarbeitet, den die Europäische Kommission und die Europäische Freihandelszone 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 an Abschnitt 18

Der gesamte Text in Abschnitt 18 wird durch folgenden Text ersetzt:

18 Ausführliche Berechnung der Ermüdungslebensdauer

18.1 Zweck

18.1.1 Dieser Abschnitt enthält Anforderungen für die ausführliche Berechnung der Ermüdungslebensdauer geschweißter und ungeschweißter Bauteile und Zonen von Druckbehältern unter mechanischen und thermischen Wechselbeanspruchungen.

ANMERKUNG 1 Schweißnähte und geschweißte Werkstoffe weisen unter Ermüdung ein anderes Verhalten auf als der reine (ungeschweißte) Grundwerkstoff. Aus diesem Grund unterscheiden sich die Berechnungsverfahren für geschweißte und Grundwerkstoffe.

ANMERKUNG 2 Die Berechnung der Ermüdungslebensdauer geschweißter Bauteile und Regionen basiert auf Ermüdungskurven (SN-Kurven), die für in lastgesteuerten Schwingversuchen geprüften geschweißten Proben mit Ausnahme von Dehnungen über die Fließgrenze hinaus (Ermüdung im Niedrig-Lastwechselbereich), für die die Prüfdaten aus dehnungsgesteuerten Schwingversuchen abgeleitet sind, ermittelt wurden.

ANMERKUNG 3 Die Berechnung der Ermüdungslebensdauer ungeschweißter Bauteile und Regionen sowie von Schrauben basiert auf SN-Kurven, die aus Prüfdaten für ungeschweißte Materialien in dehnungsgesteuerten Schwingversuchen ermittelt wurden.

18.1.2 Die Anforderungen in diesem Abschnitt gelten nur für in EN 13445-2 festgelegte Stähle. In diesem Abschnitt wird davon ausgegangen, dass der Behälter in Übereinstimmung mit allen anderen Anforderungen dieser Norm hergestellt ist.

18.1.3 Diese Anforderungen dürfen auch für Stahlguss angewendet werden. Im Fall von Schweißarbeiten oder Schweißreparaturen an Stahlgussteilen sind jedoch die Anforderungen an geschweißte Bereiche anzuwenden.

18.1.4 Dieser Abschnitt enthält den Einfluss der Verbesserung des Nahtübergangs auf die Ermüdungslebensdauer, sofern diese vorgenommen wird.

ANMERKUNG Im Fall von Kehlnähten und nicht voll durchgeschweißten Nähten, bei denen ein Versagen von der Wurzellage ausgehen kann, kann nicht davon ausgegangen werden, dass eine Verbesserung des Nahtübergangs die Ermüdungsfestigkeit der Verbindung erhöht.

18.1.5 Ungeschweißte Teile können Reparaturen mit bündig beschliffenen Schweißnähten aufweisen, die die Ermüdungslebensdauer des Werkstoffs reduzieren können. Als ungeschweißt sind daher nur solche Bauteile anzusehen, die definitiv schweißnahtfrei sind.

18.1.6 Diese Anforderungen gelten nicht für Druckbehälter der Prüfgruppe 4. Für Schweißnähte für Druckbehälter der Prüfgruppe 3 gelten die besonderen Bestimmungen in 18.10.2.1.

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

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

Die Berechnung der Ermüdungslebensdauer muss an den Punkten mit der größten Spannung und Spannungskonzentration sowie an Stellen, die einer hohen Zahl an Spannungswechseln unterliegen, vorgenommen werden.

18.1.9 Die Berechnung der Ermüdungslebensdauer nach diesem Abschnitt darf entweder unter Anwendung gegebener historischer Lasten oder festgelegter Bemessungslasten durchgeführt werden. Empfohlene Verfahren sind in Anhang NB angegeben.

18.1.10 In diesem Abschnitt wird der Vergleichsspannungsbereich für die Berechnung der Ermüdungslebensdauer aller geschweißten und ungeschweißten Regionen verwendet. Die Bestimmung der Zyklen und des Vergleichsspannung ist in Anhang NB beschrieben.

ANMERKUNG Der maximale Hauptspannungsbereich wird nicht länger für die Ermüdungsbemessung in diesem Abschnitt verwendet.

18.1.11 Dieser Abschnitt gilt hauptsächlich für Bauteile, die unterhalb des Kriechtemperaturbereichs betrieben werden. Er ist jedoch auch für Bauteile anwendbar, die im Kriechtemperaturbereich betrieben werden, sofern eine ausreichende Toleranz für die Einwirkungen von Kriech- und hohen Temperaturen vorgesehen wird.

18.1.12 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	Anmerkung	Relevante Abschnitte
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 usw.	
3. Auswahl der zu berechnenden Stellen des Behälters	Störstellen, Ausschnitte, Verbindungen (geschweißt, geschraubt), Ecken, Reparaturen usw.	
4. Ermitteln der Spannungsschwingbreite an jeder gewählten Stelle	Berechnen der zu verwendenden Spannungskomponenten (Nenn-, strukturelle, strukturelle Hotspot-, Kerb- oder Schweißnahtspannung) an der betrachteten Stelle	Geschweißte Bauteile: 18.6, 18.8 und 18.10.4; Ungeschweißte Bauteile: 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 oder Annahmen bezüglich Nahtversatz c) Abnahmegrenzen für Schweißfehler	18.10.1, Tabellen 18–4 18.10.4 18.10.5

Aufgabe	Anmerkung	Relevante Abschnitte
7. Ermitteln der Ermüdungsfestigkeitsdaten einschließlich Toleranz für den Gesamtkorrekturfaktor	a) Geschweißte Bauteile	18.10, Tabellen 18–4
	b) Ungeschweißte Bauteile	18.11
	c) Geschraubte Bauteile	18.12
	d) Abnahmegrenzen für Schweißfehler	18.13.5
8. Ermittlung der Dauerfestigkeit auf Grundlage der Auslegung auf Ermüdung und Prüfung	a) Geschweißte Bauteile	18.10, Tabelle 18–7
	b) Ungeschweißte Bauteile	18.11, Tabelle 18-10
	c) Schrauben	18.12
	d) Bewertungsverfahren	18.5.5, 18.5.6
9. Weitere Maßnahmen bei Versagen einer Stelle nach Prüfung	a) Neuberechnung anhand der genaueren Spannungsanalyse	18.6 (geschweißte Bauteile), 18.7 (ungeschweißte Bauteile)
	b) Reduzieren von Spannungen durch Erhöhen der Dicke ^a	
	c) Einzelheiten ändern	Tabelle 18-4
	d) Abrichten des Nahtübergangs, falls zutreffend	18.10.2.2
^a – für mechanische Einwirkungen wird dies zumeist durch eine Erhöhung der Wanddicke erreicht, aber in manchen Fällen (Verbindung von Teilen mit unterschiedlichen Wanddicken) 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 Besondere Definitionen

Die folgenden Begriffe gelten in diesem Abschnitt.

18.2.1 Kritischer Bereich

Bereich, in dem der gesamte kumulative Ermüdungsschaden (Nutzungsfaktor) den Wert $D_{\max} = 0,5$ überschreitet

18.2.2 Unterer Grenzwert der Spannungsschwingbreite

Spannungsschwingbreite, unterhalb derer Ermüdungsschäden vernachlässigt werden

18.2.3 Störstelle

Änderung der Form, der Dicke oder des Werkstoffs, die/der die Spannungsverteilung beeinflusst

18.2.4 Effektive Kerbspannung

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

18.2.5 Effektiver Spannungskonzentrationsfaktor

Verhältnis der effektiven Kerbspannung zur Strukturspannung in demselben Punkt

18.2.6 Elastische Beanspruchung

Phänomen großer unelastischer (plastischer) Dehnungsbeanspruchung in einem schwächeren Bereich des Bauteils durch die elastische Umverteilung der Dehnung/Spannung in anderen Bereichen des Bauteils

18.2.7 Dauerwechselfestigkeit

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

18.2.8 Vergleichsspannungsschwingbreite

skalare Spannungsschwingbreite, die die multiaxialen Spannungsschwingbreiten repräsentiert

ANMERKUNG 1 Das Tresca-Kriterium und das Mises-Kriterium sind in diesem Abschnitt zulässig.

ANMERKUNG 2 Die Gleichungen für die Berechnung der Vergleichsspannungsschwingbreite auf der Grundlage der Tresca- und Mises-Kriterien sind in Anhang NB angegeben. Diese Gleichung sind davon abhängig, ob die grundlegenden Spannungsrichtungen während eines Zyklus konstant bleiben oder nicht.

18.2.9 Ermüdung

progressive und lokale strukturelle Schäden am Werkstoff eines Bauteils aufgrund von Spannungsschwankungen

18.2.10 Ermüdungskurven

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

18.2.11 Grobe Störstelle

Störstelle, die die Spannungs- oder Dehnungsverteilung über die gesamte Wanddicke beeinflusst

18.2.12 Hotspot

Punkt in einer Struktur, an dem ein Ermüdungsriss durch die kombinierte Einwirkung einer Strukturspannungsschwankung und der Anwesenheit einer Schweißnaht-, Kerb- oder sonstigen Spannungskonzentration entstehen kann

18.2.13 Lastzyklus

Änderung der Last, die zu einer Veränderung der Spannung über der Zeit führt und zum Ausgangswert und der Ausgangsrichtung zurückkehrt (d. h. steigend oder abnehmend) und jeden Grad einmal in aufsteigender und absteigender Richtung passiert

ANMERKUNG Im Fall einer Lastfolge, die zu variablen Spannungsamplituden führt, kann ein Lastzyklus verschiedene Teile des Spannungsspektrums umfassen. Die Bestimmung der Zyklen und die Lastzyklenzählverfahren sind in Anhang NB beschrieben.

18.2.14 Lokale strukturelle Störstelle

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

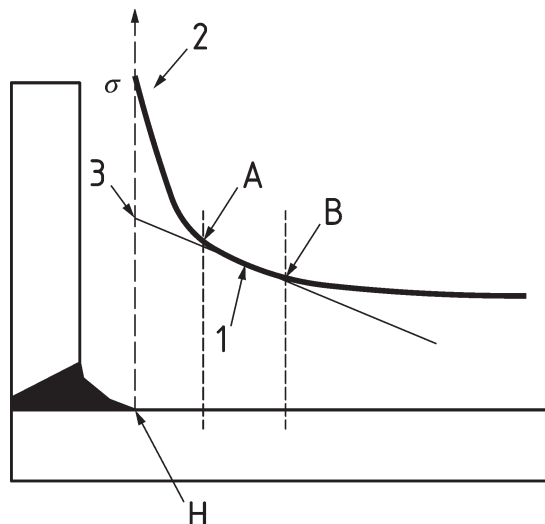
18.2.15 Nennspannung

Spannung in Abwesenheit von strukturellen Störstellen

ANMERKUNG 1 Die Nennspannung ist eine Bezugsspannung (Membran + Durchbiegung), die nach der grundlegenden Strukturtheorie berechnet wird. Hiervon ausgenommen sind die Einflüsse struktureller Störstellen (z. B. Schweißnähte, Öffnungen, Abzweigverbindungen, Düsen, wesentliche Anbauten und Dickeänderungen). Siehe Bild 18.2-1.

ANMERKUNG 2 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 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. Schweißnähte).



Legende

- A, B Bezugspunkte
- H Hotspot
- 1 Strukturspannung
- 2 Kerbspannung
- 3 oberflächenextrapolierte Hotspot-Spannung

ANMERKUNG Die Berechnung der Strukturspannung ist in Anhang NA beschrieben.

Bild 18.2-1 — Darstellung der Spannungsveränderung in Richtung einer strukturellen Störstelle und Kerbe am Nahtübergang

18.2.16 Kerbe

Unstetigkeit im Oberflächenprofil, die zu Spannungskonzentration und einer potenziellen Ermüdungsrissbildung führt (z. B. Nahtübergang, Spalt)

18.2.17 Kerbspannung

Gesamtspannung am Kerbgrund einschließlich des nichtlinearen Teils der Spannungsverteilung

ANMERKUNG In Bild 18.2-1 ist die Kerbspannung am Beispiel eines geschweißten Bauteils dargestellt; Kerbspannungen treten aber ebenso an lokalen Störstellen in ungeschweißten Bauteilen auf.

Kerbspannungen werden gewöhnlich mit einer numerischen Analyse berechnet. Da die berechneten Spannungen theoretische Spannungen sind, sollten sie in effektive Spannungen umgerechnet werden. Hierzu werden die Spannungen mit dem Faktor K_f/K_t multipliziert. Diese Multiplikation darf ausgelassen werden, um konservative Ergebnisse zu erhalten. Alternativ kann die Nenn- oder Strukturspannung in Verbindung mit der effektiven Formzahl K_f verwendet werden.

18.2.18 Nahtschweißverbindung

vollständig durchgeschweißte Längs- oder Umfangsnaht

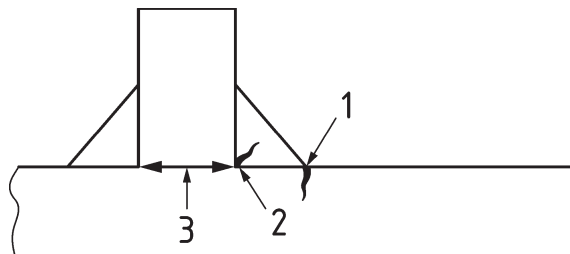
18.2.19 Schweißnahtspannung

mittlere Spannung an der Schweißnahtdicke einer doppelseitigen Kehlnaht

ANMERKUNG 1 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.

Bei starker Verkrümmung an der Schweißnaht sollte der maximale Wert der Linearspannung angewendet werden.

ANMERKUNG 2 Die Schweißnahtspannung wird ausschließlich für die Berechnung des Ermüdungsversagens durch Rissbildung im Schweißgut von Kehlnähten oder versenkten Kehlnähten verwendet (siehe Abbildung 18.2-2).



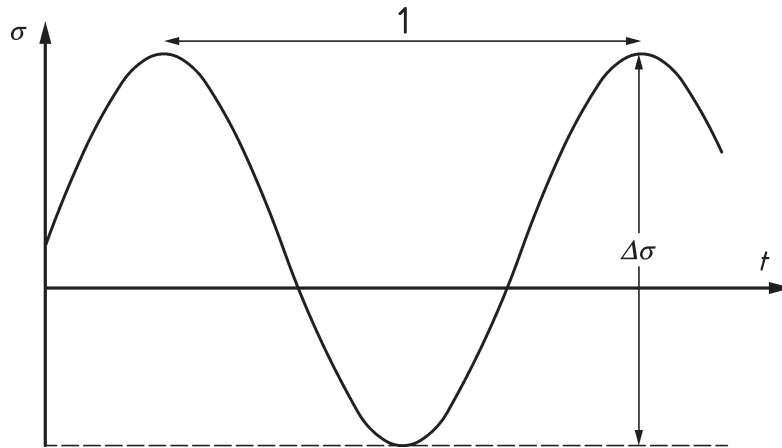
Legende

- 1 Riss am Nahtübergang
- 2 Riss an der Schweißnaht
- 3 ungeschweißte Anschlussfläche

Bild 18.2-2 — Zwei dominante Ermüdungsrisstellen an einer doppelseitigen Kehlnaht

18.2.20 Spannungsschwingbreite ($\Delta\sigma$)

Wert vom Minimum zum Maximum eines Zyklus (siehe Bild 18.2-3) einer Nennspannung, einer Hauptspannung, einer strukturellen Spannung oder einer Spannungsponente, je nach angewendeter Methode



Legende

1 ein Lastzyklus; $\Delta\sigma$ Spannungsschwingbreite

Bild 18.2-3 — Spannungsschwingbreite

18.2.21 Strukturspannung

Bestimmte Spannung an jedem Punkt unter Berücksichtigung der tatsächlichen Geometrie der Struktur mit Ausnahme der lokalen strukturellen Störstellen, die Spannungsspitzen erzeugen.

In vielen Fällen darf angenommen werden, dass die Strukturspannung der Linearspannung entspricht.

Dies ist nicht akzeptabel, wenn die folgenden Spannungen beteiligt sind:

- thermische Spannungen aufgrund eines Temperaturgradienten durch die Wanddicke, Spannungen, deren Verteilung hoch-nichtlinear, insbesondere während Transienten, sein kann,
- Spannungen aufgrund mechanischer Belastungen, in sehr dicken Wänden (z. B. Druckspannungen in einem dickwandigen Zylinder, wenn die Spannungsverteilung durch die Dicke nicht gleichmäßig ist).

ANMERKUNG 1 Die Strukturspannung schließt die Wirkungen globaler Störstellen ein (z. B. Abzweige, Kegel-Zylinder-Verbindungen, Schale-Boden-Verbindungen, Dickenänderungen, Abweichungen von der Konstruktionsform, Anbauteile). Sie schließt die Kerbwirkungen lokaler struktureller Störstellen (z. B. Nahtübergang) aus. Siehe Bild 18.2-1.

ANMERKUNG 2 Bei der Berechnung der Ermüdungslebensdauer wird die Strukturspannung am möglichen Risseinleitungspunkt ermittelt.

ANMERKUNG 3 Strukturspannungen können nach einem der folgenden Verfahren bestimmt werden: numerische Analyse (z. B. Finite-Elemente-Schalenberechnung (FEA)), Schalentheorie oder die Anwendung von Formzahlen auf analytisch ermittelte Nennspannungen. Ein Leitfaden zur Anwendung der numerischen Analyse ist in Anhang NA enthalten.

18.2.22 Strukturelle Hotspot-Spannung

Strukturspannung, extrapoliert auf die Position des Hotspots auf einem Nahtübergang und anderen Schweißnahtdetails nach 18.6

18.2.23 Theoretischer elastischer Spannungskonzentrationsfaktor

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

18.2.24 Teilnutzungsfaktor

Durch Zyklen mit einer gegebenen Amplitude erzeugter Ermüdungsschaden

18.2.25 Kumulativer Nutzungsfaktor (kumulative Schädigungskennzahl)

Gesamtsumme der Teilnutzungsfaktoren für Zyklen mit verschiedenen Amplituden nach 18.13

18.2.26 Schweißnahtdicke

Mindestdicke 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 Schädigungskennzahl;
E	ist der Elastizitätsmodul bei zulässiger Betriebstemperatur;
F_e, F_s	sind Zwischenberechnungskoeffizienten;
f_b	ist der Gesamtkorrekturfaktor für Schrauben;
f_c	ist der Druckspannungskorrekturfaktor;
f_e	ist der Dickenkorrekturfaktor für ungeschweißte Bauteile;
f_{ew}	ist der Dickenkorrekturfaktor für geschweißte Bauteile und Schrauben;
f_m	ist der mittlere Spannungskorrekturfaktor für ungeschweißte Werkstoffe;
f_m	ist der mittlere Spannungskorrekturfaktor für vollständig entspannte geschweißte Werkstoffe;
f_s	ist der Korrekturfaktor zur Berücksichtigung der Oberflächenrauheit;
f_T	ist der Temperaturkorrekturfaktor;
f_u	ist der Gesamtkorrekturfaktor für ungeschweißte Bauteile;
f_w	ist der Gesamtkorrekturfaktor für geschweißte Bauteile;
g	ist die Tiefe der durch Schleifen des Nahtrands verursachten Nut;
K_f	ist die effektive Formzahl nach Gleichung (18.7.1-3);
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 Exponenten in den Gleichungen der Ermüdungskurven für geschweißte Bauteile;

N_i	ist die zulässige Lastzyklenanzahl aus den Ermüdungskurven (Index i bezeichnet die zulässige Lastzyklenanzahl für die i -te Spannungsschwingbreite);
N_i	ist die tatsächliche Lastzyklenanzahl, (Index 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 Nahtrands verursachten Nut;
S_{ij}	ist die Differenz zwischen den Hauptspannungen (σ_i und σ_j) oder Hauptstrukturspannungen ($\sigma_{\text{struc},i}$ und $\sigma_{\text{struc},j}$), sofern zutreffend;
$T_{\max}$	ist die Höchstbetriebstemperatur;
$T_{\min}$	ist die Mindestbetriebstemperatur;
T^*	ist die angenommene mittlere Temperatur während eines Lastzyklus;
$\Delta \varepsilon_{\text{Total}}$	ist die Gesamtdehnungsschwingbreite;
$\Delta \sigma$	ist die Spannungsschwingbreite (Index i bezeichnet die i -te Spannungsschwingbreite; Index w bezieht sich auf die Schweißung);
$\Delta \sigma_{\text{eq}}$	ist die Vergleichsspannungsschwingbreite (Index 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 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 Normalspannung (Index w bezeichnet Schweißnähte);
$\bar{\sigma}_{\text{eq}}$	ist die mittlere Vergleichsspannung;
$\bar{\sigma}_{\text{eq},r}$	ist die reduzierte Vergleichsmittelspannung für elastisch-plastische Bedingungen;
$\sigma_{\text{struc}1}$	ist eine Strukturhauptspannung (Indizes 1, 2 und 3 bezeichnen die Hauptachsen) zu einem gegebenen Zeitpunkt;

σ_t	ist die Hauptgesamtspannung;
σ_1	ist eine Hauptspannung (Indizes 1, 2 und 3 bezeichnen die Achsen) zu einem gegebenen Zeitpunkt;
σ_{v1}, σ_{v2}	sind Spannungsschwingbreiten im Beispiel für das „Reservoir“-Lastzyklenzählverfahren in Anhang NB 2.3;
τ	ist die Schubspannung bzw. Schubspannungsschwingbreite (Index 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 Ermüdungsrisso fortpflanzen könnte, nachgewiesenermaßen so zäh ist, dass ausgehend von einem Ermüdungsrisso kein Bruch verursacht werden kann.

18.4.3 Die Ermüdungskurven gelten bis zu der maximalen Temperatur für vernachlässigbares Kriechen (375 °C für ferritische Stähle, 425 °C für austenitische Stähle, siehe Abschnitt 19). Ihre Anwendung oberhalb dieser Temperatur kann nicht-konservativ sein. Dem Anwender wird empfohlen, die Anwendbarkeit dieser Kurven bei der relevanten Temperatur zu prüfen.

18.4.4 Voraussetzung für die Anwendung dieser Regeln ist die Zugänglichkeit aller ermüdungskritischen Bereiche (siehe 18.13.4) für Sichtprüfungen und zerstörungsfreie Prüfungen. Außerdem müssen Anweisungen für die geeignete Wartung vorgesehen und in die Betriebsanweisungen aufgenommen werden.

ANMERKUNG Empfehlungen für eine geeignete Inspektion und Wartung im Betrieb sind in Anhang M enthalten.

In Bezug auf während der Herstellung produzierte Schweißnahtunregelmäßigkeiten müssen für die Anwendung dieses Abschnitts die Bedingungen nach EN 13445-5:2014, Anhang G zusätzlich zu den allgemeinen Abnahmekriterien für Schweißfehler nach EN 13445-5:2014 erfüllt werden.

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.

In Bezug auf Formabweichungen:

- die Fertigungstoleranzen dürfen nicht die in EN 13445-4:2014 angegebenen Werte übersteigen;
- für alle Nahtschweißverbindungen muss in der Gestaltungsphase angenommen werden, dass bestimmte Toleranzen für die Berechnung der Ermüdungslebensdauer angewendet werden (siehe 18.10.4). Danach müssen die angenommenen Toleranzen innerhalb des in EN 13445-4 festgelegten Toleranzbereichs nach der Fertigung geprüft und garantiert werden;
- Für die Berechnung der Ermüdungslebensdauer darf ein Korrosionszuschlag von 50 % angenommen werden.

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:

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

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

dabei ist

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

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

$(\sigma_{eq,T})_{min}$ die minimale Vergleichsspannung durch Betriebsdruck und Wärmebeanspruchung (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, sind sie gemäß den Verfahren dieses Abschnitts zu berechnen.

18.5 Ausführliches Verfahren der Berechnung der Ermüdungslebensdauer

18.5.1 Dieser Unterabschnitt dient dazu, den Anwender durch das Verfahren zur ausführlichen Berechnung der Ermüdungslebensdauer nach Abschnitt 18 zu führen. Ein Ablaufdiagramm des Verfahrens ist in Bild 18.5-1 dargestellt.

18.5.2 Abschnitt 18.6 behandelt die Bestimmung der Spannungen für die Berechnung der Ermüdungslebensdauer geschweißter Bauteile und Bereiche. Er legt die anzuwendenden Ansätze im Fall fluchtender Nahtschweißverbindungen und einfacher Anbauten, doppelseitiger Kehlnähte und durchgeschweißter und ähnlicher Arten von Schweißnähten fest. Es werden Ansätze auf der Grundlage von Nenn-, Struktur- und strukturellen Hotspotspannungen beschrieben. Anhang NA enthält Empfehlungen zur Bestimmung der strukturellen Hotspotspannungen durch die Finite-Element-Analyse.

18.5.3 Abschnitt 18.7 behandelt die Bestimmung der Spannungen für die Berechnung der Ermüdungslebensdauer aus historischen Beanspruchungsdaten ungeschweißter Bauteile.

18.5.4 Abschnitt 18.8 beschreibt die elastisch-plastische Korrektur der pseudoelastisch berechneten Strukturspannungsschwingbreiten mechanischen und thermischen Ursprungs, wo diese die doppelte Dehngrenze überschreiten.

18.5.5 Abschnitt 18.9 behandelt die Bestimmung von Spannungszyklen und Vergleichsspannungsschwingbreiten aus historischen Spannungsdaten jedes Bereichs. Der Abschnitt nimmt Bezug auf Anhang NB, der verschiedene Verfahren der Zyklenzählung einschließlich der Rainflow- und Reservoir-Verfahren beschreibt. Er behandelt die Fälle einfacher Veränderungen des Drucks oder anderer einzelner Beanspruchungsparameter bis hin zur komplexen Beanspruchung mit variabler Amplitude durch Ereignisse mit mehreren Zyklen aufgrund einer gegebenen Betriebsbeanspruchungshistorie oder einer festgelegten Bemessungsbeanspruchung. Es werden Verfahren für Fälle einer proportionalen Beanspruchungs-Spannungs-Historie (konstante Hauptspannungsrichtungen) und einer nicht-proportionalen Beanspruchungs-Spannungs-Historie (variierende Hauptspannungsrichtungen) empfohlen.

18.5.6 Abschnitt 18.10 behandelt die Bestimmung der S-n-Kurve für die Anwendung in Verbindung mit geschweißten Bauteilen und Bereichen je nach Klassifizierung. Tabelle 18.4 klassifiziert die Ermüdungsfestigkeit verschiedener Ausführungen geschweißter Bauteile in einer S-n-Kurven-Klasse. Diese Klassifizierungen basieren auf den Klassen des International Institute of Welding. Die individuelle Klassifizierung einzelner Schweißnahtgestaltungen ist jedoch für die in dieser Norm behandelten unbefeuerten Druckbehälter spezifisch.

18.5.7 Die Abschnitte 18.11 und 18.12 behandeln die Bestimmung der anzuwendenden S-n-Kurven für ungeschweißte Bauteile und Schrauben. Die S-n-Kurven für ungeschweißte Bauteile und Schrauben sind von der Bruchfestigkeit des Werkstoffs abhängig.

18.5.8 Abschnitt 18.13 fasst die Bereiche und Lastzyklenanzahlen sowie die anzuwendende S-n-Kurve zusammen. Er beschreibt die Summierung von Ermüdungs- oder Nutzungsschäden aus verschiedenen Spannungszyklusschwingbreiten anhand der Miner-Regel. Der Abschnitt nimmt Bezug auf EN 13445-5:2014, Anhang G hinsichtlich der Zulässigkeitsgrenzen für nichtflächige Fehler und Anhang M, der die Prüfanforderungen in Bereichen, die bestimmte Grenzwerte des Ermüdungsschadens/der Nutzung überschritten haben, festlegt.

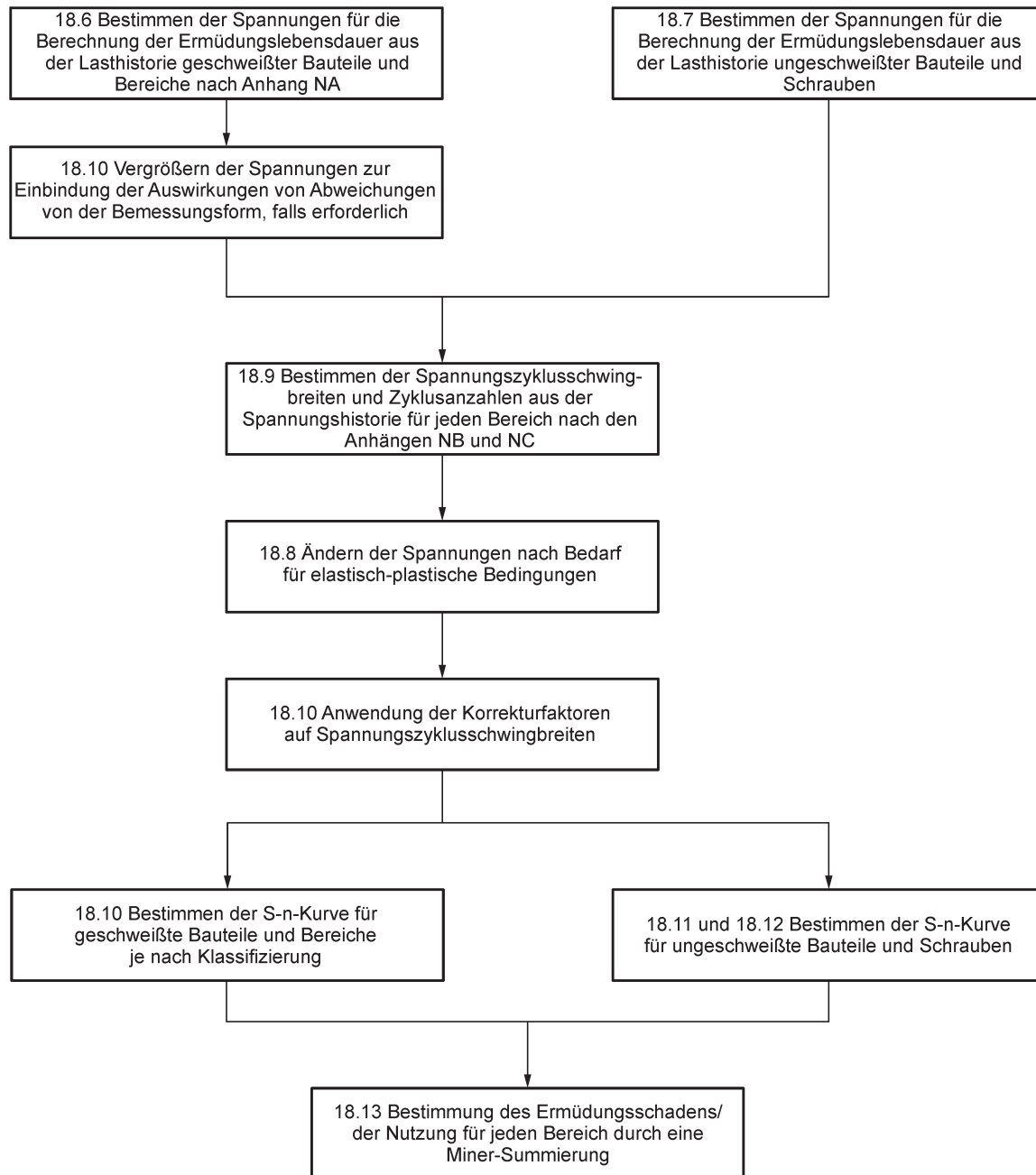


Bild 18.5-1 — Verfahren der ausführlichen Berechnung der Ermüdungslebensdauer

18.6 Bestimmung der Spannungen für die Berechnung der Ermüdungslebensdauer geschweißter Bauteile und Bereiche

Das Verfahren der Berechnung der Ermüdungslebensdauer für geschweißte Bauteile und Bereiche, die mechanischen und thermischen Lasten ausgesetzt sind, erfordert die Bestimmung der gesamten Spannungs-schwingbreiten der Bauteile über jeden Zyklus.

Die Ermüdungskurven beinhalten die maximale Wirkung der mittleren und Restzugspannungen.

Die bei der Berechnung der Ermüdungslebensdauer zu berücksichtigenden Spannungen sind wie folgt von der Art der Schweißnaht abhängig:

- a) Für die Beurteilung fluchtender Nahtschweißverbindungen und optional einfacher Anbauteile (siehe ANMERKUNG 1), sofern diese nicht in von großen strukturellen Störstellen betroffenen Bereichen liegen (siehe ANMERKUNG 2), wird die auf elastischer Basis berechnete Nennspannung in Abwesenheit der Schweißnaht oder des Anbauteils verwendet. Die Nennspannung kann durch die Gleichung oder die elastische Finite-Element-Analyse unter Verwendung von Schalen- oder soliden Elementen berechnet werden.
- b) Für die Beurteilung doppelseitiger Kehlnähte, die zur Verbindung äußerlich belasteter Anbauteile verwendet werden, oder teilweise durchgeschweißte Verbindungen mit Beurteilung nach Anhang NC müssen die zu verwendenden Spannungen die mittleren Spannungen entlang der Schweißnaht sein.
- c) Für die Beurteilung durchgeschweißter und aller anderen Arten von Schweißverbindungen (sofern nicht unter a behandelt), einschließlich Schweißverbindungen für Bewehrungsplatten von Düsen und Abzweigungen, sind die Strukturspannungen an der Stelle der potenziellen Rissbildung (Hotspots) zu verwenden. Diese Spannungen können auf elastischer Basis durch eine elastische Finite-Element-Analyse des gesamten Bereichs unter vollständige Berücksichtigung großer struktureller Störstellen (siehe ANMERKUNG 2) berechnet werden.

ANMERKUNG 1 Ein einfaches Anbauteil ist ein an die Schale geschweißtes Anbauteil, das keine Lastspiele auf die Schale überträgt. (beispielsweise eine Huböse oder ein Anbauteil innerhalb der Strukturen, das die Schale nicht zyklisch belastet).

ANMERKUNG 2 Strukturelle Störstellen und Spannungsquellen können zu allgemeinen Formunstetigkeiten wie etwa Verbindungen zwischen Zylindern und Böden, Abzweigungen, Dickeänderungen und angeschweißte Ringe sowie Abweichungen von der vorgesehenen Form wie etwa Ovalität, Überhöhung und Nahtversatz der Schweißverbindungen führen. Die in diesem Abschnitt und der veröffentlichten Literatur (siehe Literaturhinweise [3] bis [7] in Anhang N) beschriebenen Verfahren liefern Schätzwerte dieser Spannungen für viele Behältergeometrien oder ermöglichen zumindest eine konservative Schätzung.

ANMERKUNG 3 Wird das Modell auf der Grundlage von Schalenelementen entwickelt, muss die Anwendbarkeit der Schalentheorie geprüft werden. Wenn dickwandige Abschnitte zu betrachten sind, wird d) gelten.

ANMERKUNG 4 Alternativ kann die Strukturspannung aus der Nennspannung anhand der in 18.10.4 angegebenen Faktoren berechnet werden.

- d) Die Hotspot-Strukturspannung kann anhand eines der folgenden Verfahren bestimmt werden. Anleitungen zur Anwendung dieser Verfahren sind in Anhang NA enthalten.

1) *Lineare Oberflächen-Extrapolation (Hotspot-Spannung)*

Lineare Extrapolation der Spannung auf der Oberfläche an den festgelegten Stellen der Hotspot-Position nach Anhang NA, wo die Spannungsverteilung durch den Querschnitt annähernd linear ist (Membran plus Durchbiegung wie im Fall von Dünnschalen), oder

2) *Quadratische Oberflächen-Extrapolation (Hotspot-Spannung)*

Quadratische Extrapolation der Spannung auf der Oberfläche an den festgelegten Stellen der Hotspot-Position nach Anhang NA, wo die Spannungsverteilung durch den Querschnitt nicht linear ist (z. B. aus dickwandigen Abschnitten, lokalen Kräften resultieren kann).

3) *Wanddurchgangs-Linearisierung*

Linearisierung der Spannungen durch die Dicke des Abschnitts zum Hotspot nach Anhang NA unter Verwendung der Wanddurchgangsintegration nach Anhang C.

4) *CAB-Konzept*

Geometrische Entfernung der Spannungssingularität durch Rundung der Schweißnaht mit einem geeigneten Radius (CAB-Verfahren) in einem soliden Finite-Element-Modell (siehe Anhang NA).

5) *Haibach-Konzept*

Anwendung der Spannung 2,5 mm vor dem Nahtübergang nach Haibach (siehe Anhang NA).

ANMERKUNG In bestimmten Fällen, in denen die Schweißnaht die lokale Steifheit der Schweißverbindung wesentlich beeinflusst, kann das Schweißnahtvolumen in das solide Modell integriert werden.

- e) Wenn thermische Lasten bestehen, die hoch-nichtlineare Durchgangsspannungen erzeugen, welche mit mechanischen Lasten kombiniert werden können, könnte die für die Berechnung der Ermüdungslebensdauer zu verwendende Spannung durch Finite-Element-Simulation mit soliden Elementen in Verbindung mit der Oberflächen-Extrapolation oder den CAB- oder Haibach-Verfahren (siehe 1), 2), 4) und 5) oben) bestimmt werden.

18.7 Spannungen für die Berechnung der Ermüdungslebensdauer geschweißter Bauteile und Schrauben

18.7.1 Ungeschweißte Bauteile

Die Beurteilung ungeschweißter Bauteile muss auf der effektiven Vergleichsspannungsschwingbreite jedes Zyklus unter Verwendung der Elemente der Gesamtspannungen an der betrachteten Stelle basieren. Die Gesamtspannungen sollten die vollständigen Einflüsse großer und lokaler struktureller Störstellen (d. h. Kerben und spannungskonzentrierende Eigenschaften) durch alle Arten von Lasten einschließlich Betriebsdrücke, anderer mechanischer Lasten und thermischer Transienten beinhalten.

Die Gesamtspannungen können durch eine lineare elastische Finite-Element-Spannungsanalyse an einem soliden Modell mit großen und lokalen strukturellen Störstellen ermittelt werden. Die Gesamtspannungen können darüber hinaus durch eine Analyse der um einen Spannungskonzentrationsfaktor verstärkten strukturellen Spannungen für Einflüsse lokaler Störstellen ermittelt werden.

Alternativ dürfen Strukturspannungen ohne Spannungskonzentrationsfaktor in Verbindung mit der Klasse-100-Ermüdungskurve für geschweißte Bauteile mit den Korrekturfaktoren für geschweißte Bauteile verwendet werden. Dies gilt nicht für scharf gekerbte Strukturen.

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

$$\Delta\sigma_f = K_f \times \Delta\sigma_{eq, struc} \quad (18.7.1-1)$$

Die in dieser Berechnung verwendete Strukturspannung ist mittels eines Modells zu bestimmen, welches den vollen Effekt von globalen Störstellen erfasst, nicht jedoch den von lokalen.

Sofern sie von Gesamtspannungen ausgehend berechnet wird, ist die effektive Gesamtspannungsschwingbreite gegeben durch:

$$\Delta\sigma_f = \frac{K_f}{K_t} \times \Delta\sigma_{eq, total} \quad (18.7.1-2)$$

Die in dieser Berechnung verwendete Gesamtspannung ist mittels eines Modells zu bestimmen, welches den vollen Effekt aller Störstellen, einschließlich der lokalen (d. h. der Kerbeffekte) erfasst.

In diesem Fall ist es zulässig, die Berechnung der theoretischen Formzahl K_t wegzulassen, sofern ein Verhältnis K_t als konservative Vereinfachung in Gleichung (18.7.1-2) angenommen wird.

Die effektive Formzahl K_f ist gegeben durch:

$$K_f = 1 + \frac{1,5 \times (K_t - 1)}{1 + 0,5 \times \max\left(1; K_t \times \frac{\Delta\sigma_{eq, struc}}{\Delta\sigma_D}\right)} \quad (18.7.1-3)$$

dabei ist

$\Delta\sigma_D = \Delta\sigma_R$ für $N \geq 2 \times 10^6$ Zyklen für ungeschweißte Werkstoffe,

$\Delta\sigma_{eq, struc}$ die Schwingbreite der Strukturvergleichsspannung, korrigiert zur Berücksichtigung von plastischer Beanspruchung (siehe 18.8). Der Höchstwert von $\Delta\sigma_{eq, struc}$ ist der Wert von 10 000 Zyklen ohne Korrekturfaktoren.

Die theoretische Formzahl K_t muss aus den in Anhang ND angegebenen Werten für allgemeine Spannungskonzentrationseigenschaften oder aus den in Standardreferenzen angegebenen analytischen Gleichung en bestimmt werden.

ANMERKUNG 1 Dieser Faktor berücksichtigt den effektiven Einfluss einer Kerbe auf die Ermüdungslebensdauer, entsprechend Ermüdungsversuchen.

ANMERKUNG 2 Die Formzahlen K_t im Anhang ND gelten nicht für die schließenden Teile von Schnellverschlüssen.

Die theoretische Formzahl K_t ist wie folgt festzulegen und zu berechnen:

$$K_t = \frac{\sigma_{total}}{\sigma_{struc}} \quad (18.7.1-4)$$

Sofern die theoretische Formzahl durch eine in der Literatur angegebene analytische Gleichung bestimmt wird, muss sie dieser Definition entsprechen.

Sofern die Gesamtspannung direkt bestimmt wird, mittels numerischer Verfahren (z.B. FEA) oder experimentell (z. B. Spannungs-Dehnungs-Messungen), kann die Gesamtspannung in Struktur- und Spitzenspannungsanteile aufgeteilt werden (wie in Anhang C beschrieben):

$$\sigma_{total} = \sigma_{struc} + \sigma_{peak} \quad (18.7.1-5)$$

Anschließend gilt:

$$K_t = 1 + \frac{\sigma_{peak}}{\sigma_{struc}} \quad (18.7.1-6)$$

Die Gleichungen (18.7.1-4) bis (18.7.1-6) sind für den einfachen Fall eines einachsigen Spannungszustands angegeben, um das Prinzip zu verdeutlichen. Im allgemeinen Fall von mehrachsigen Spannungszuständen muss Gleichung (18.7.5-5) für die Spannungskomponenten verwendet werden (siehe C.4.4) und Gleichung (18.7.1-4) ist für die Berechnung der theoretischen Spannungskonzentration unter Verwendung der Vergleichsspannungsschwingbreiten zu verwenden. Wird die Gesamtspannung direkt durch Analyse ermittelt (z. B. mit dem Finite-Elemente-Verfahren), muss das Modell die Kerbe in ausreichend feiner Netzteilung wiedergeben. Werden sie experimentell (z. B. mit Dehnungsmessstreifen) ermittelt, müssen die Messungen direkt innerhalb der Kerbe oder so nah an der Kerbe vorgenommen werden, dass die Kerbspannung durch Extrapolation bestimmt werden kann (siehe Referenz [2] in Anhang N). Dehnungen sind unter Zugrundelegen linearelastischer Bedingungen in Spannungen umzurechnen.

Die Vergleichsspannungsschwingbreite $\Delta\sigma_{eq,I}$ und die Vergleichsmittelspannung $\Delta\sigma_{eq,I}$ sind zu ermitteln. Zugspannungen erhalten ein positives, Druckspannungen ein negatives Vorzeichen.

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 $\Delta\sigma$ der veränderliche Anteil dieser Kraft zugrunde gelegt wird.

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

Die Vorspannung ist für die Schrauben von Vorteil. Die Vorspannung ist aus der zyklischen Beanspruchung mit Ausnahme von zyklischen Beanspruchungen durch Ausdehnungsunterschiede abzuleiten.

18.8 Elastisch-plastische Bedingungen

18.8.1 Allgemeines

Übersteigt bei einem Bauteil die berechnete Schwingbreite der pseudoelastischen Strukturspannung für geschweißte Verbindungen und ungeschweißte Bauteile das Doppelte der Dehngrenze des betrachteten Werkstoffs, d. h. wenn $\Delta\sigma_{eq,I} > 2R_{p0,2/T*}$ ist (siehe Anmerkung), muss sie mit einem Plastizitätskorrekturfaktor multipliziert werden. Der anzuwendende Korrekturfaktor für die Spannungsschwingbreite mechanischen Ursprungs ist k_e und k_e für die Spannungsschwingbreite thermischen Ursprungs.

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

18.8.2 Mechanische Beanspruchung

Der Korrekturfaktor für die mechanische Beanspruchung ist:

$$k_e = 1 + A_0 \left(\frac{\Delta\sigma_{eq,I,mechanical}}{2R_{p0,2/T*}} - 1 \right) \quad (18.8.2-1)$$

Die korrigierte Spannungsschwingbreite muss dann $\Delta\sigma_{eq} = k_e \times \Delta\sigma_{eq} = k_e \times \Delta\sigma_{eq,I}$ für geschweißte Verbindungen oder $\Delta\sigma_f = k_e \times \Delta\sigma_{eq,t}$ für ungeschweißte Bereiche sein.

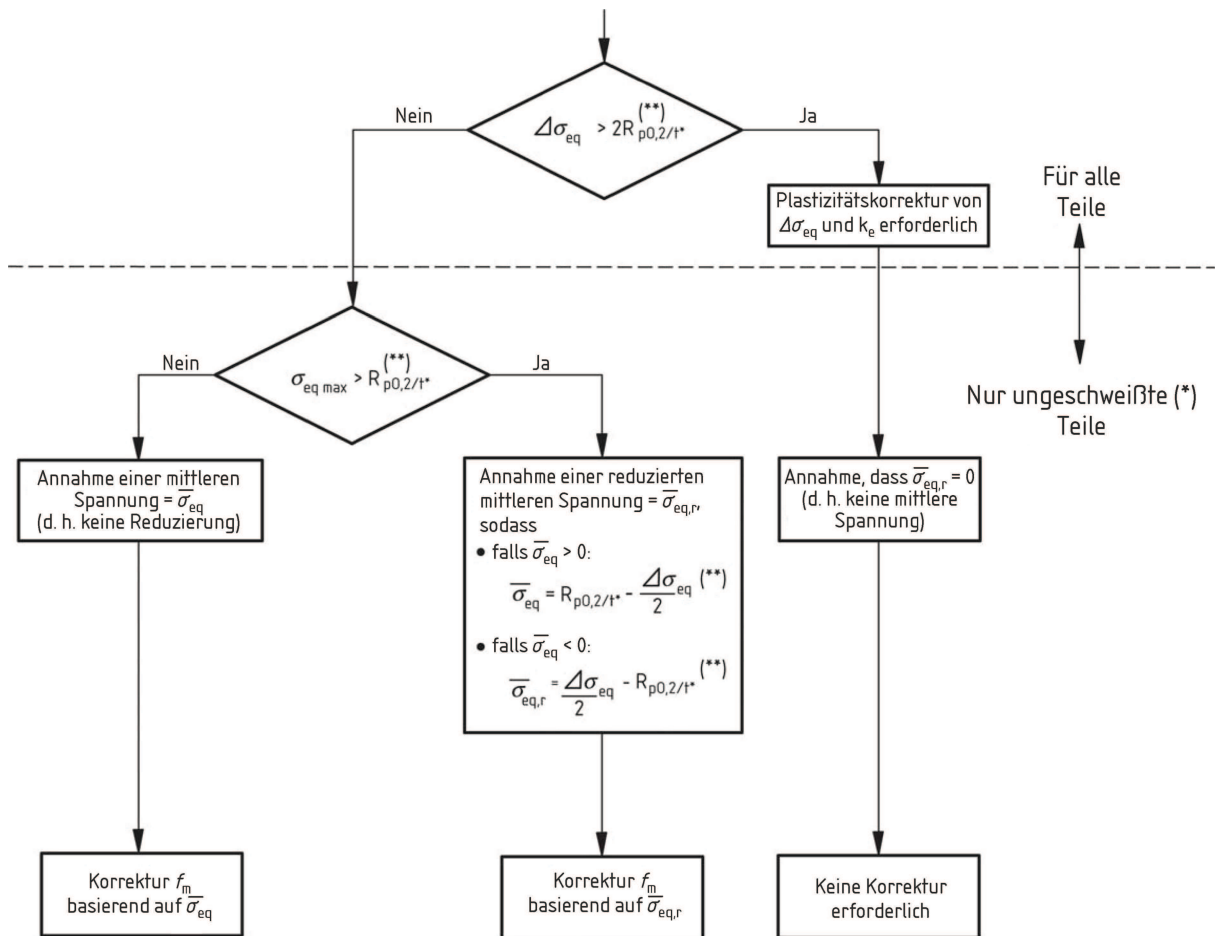
Dabei ist

$A_0 = 0,5$ 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;

$= 0,4 + \frac{(R_m - 500)}{3000}$ 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 18.8-1 dargestellt und wird in 18.11.1.3 angewandt.



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

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

Bild 18.8-1 — Korrektur der Vergleichsmittelspannung zur Berücksichtigung mechanischer Spannungen im überelastischen Bereich

18.8.3 Beanspruchung durch Wärmespannungen

Im Fall einer Wärmespannungsverteilung müssen sowohl die nichtlinearen als auch die äquivalenten linearen Spannungsverteilungen für jede SpannungsKomponente ermittelt werden. Unter Verwendung der linearisierten Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma_{eq,l}$ ist k_v zu berechnen durch:

$$k_v = \max\left(\frac{0,7}{0,5 + \frac{0,4}{\Delta\sigma_{eq,l,thermal}/R_{p0,2/T^*}}}; 1,0\right) \quad (18.8.3-1)$$

Die korrigierte Spannungsschwingbreite muss dann $\Delta\sigma_{eq} = k_v \times \Delta\sigma_{eq,l}$ für geschweißte Verbindungen oder $\Delta\sigma_f = k_v \times \Delta\sigma_{eq,t}$ für ungeschweißte Bereiche sein.

Im Fall lokaler Störstellen muss k_e anstelle von k_v für die Beanspruchung durch Wärmespannung verwendet werden, sofern nicht eine detaillierte Analyse durchgeführt wird. Andere Beanspruchungen durch Wärmespannungen sind als mechanische Beanspruchungen zu behandeln.

18.8.4 Kombinierte Beanspruchung durch mechanische und Wärmespannungen

Wenn eine Kombination aus Beanspruchungen aus mechanischer und Wärmespannung auftritt, ist der Korrekturfaktor k_e für den mechanischen und Wärmeteil der Spannungsschwingbreite zu verwenden.

18.8.5 Analyse des elastisch-plastischen Bereichs

Ist die Gesamtdehnungsschwingbreite $\Delta\varepsilon_{\text{Total}}$ (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 es gilt:

$$\Delta\sigma = E_{T*} \times \Delta\varepsilon_{\text{Total}} \quad (18.8.5-1)$$

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

Die zyklischen Spannungswechsel aus einem gegebenen betrieblichen Lastverlauf oder festgelegten Bemessungslasten müssen durch eines der in Anhang NB angegebenen Verfahren bestimmt werden. Dieser Anhang beschreibt die Berechnung der Vergleichsspannungsschwingbreite aus den Spannungskomponenten der Nenn-, Struktur- oder strukturellen Hotspot-Spannung über 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 Schweißnahtdetails

18.10.1.1 Allgemeine Herangehensweise

Tabelle 18-4 enthält Einzelheiten zu Schweißnähten und die zugehörigen Klassen für die Berechnung der Ermüdungsfestigkeit. Die für die Kurven zu verwendende (Nenn- oder Struktur-) Spannung muss in Übereinstimmung mit 18.6.1(a) und 18.6.1(c) bestimmt werden.

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

ANMERKUNG 1 Da $\Delta\sigma_{\text{eq}}$ keine Richtung aufweist, ist bei der in Tabelle 18-4 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 (Nahtversatz, Aufdachung, Unrundheit usw.) zu berücksichtigen.

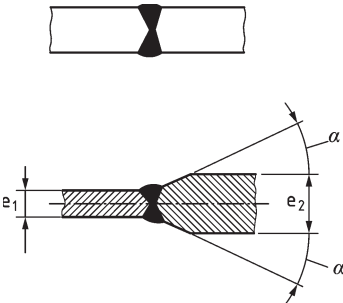
ANMERKUNG 2 Im Allgemeinen hängt die Dauerfestigkeit von folgenden Faktoren ab: Richtung der Wechsellastspannung bezogen auf die Naht; Lage der möglichen Risseinleitung in der Naht; geometrische Anordnung und Proportionen der Naht; Fertigungs- und Prüfverfahren. Eine Schweißnahtart kann daher in den Tabellen mehrfach erscheinen, da sie bei verschiedenen Verbindungen zutreffend sein kann.

ANMERKUNG 3 Ein bestimmtes Detail einer Schweißnaht muss ggf. von verschiedenen Punkten und unter Anwendung verschiedener Klassifikationen und entsprechenden Berechnungskurven auf Ermüdungsbruch geprüft werden.

ANMERKUNG 4 Die Ermüdungslebensdauer eines Behälters oder eines Behälterbauteils 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 nahtversatzfreie Ausrichtung von Nähten erreichbare hohe Nahtklasse nicht erforderlich, wenn die Ermüdungslebensdauer insgesamt durch die Festigkeit von Kehlnähten bestimmt wird.

Tabelle 18-4 — Klassifizierung von Schweißverbindungen auf Grundlage der Vergleichsspannungsschwingbreite

a) Schweißnahtverbindungen

Detail-Nr.	Verbindungsart	Darstellung ^a	Anmerkungen	Klasse	
				Prüfgruppe 1 und 2	Prüfgruppe 3 ^b
1.1	Durchgeschweißte Stumpfnah, bündig geschliffen, einschließlich Reparaturschweißungen	 Ermüdungsanriss, gewöhnlich an Nahtfehlern	Naht zerstörungsfrei geprüft und nachweislich frei von Oberflächenfehlern und größeren oberflächennahen Fehlern f_e ist anstelle von f_{ew} zu verwenden, dabei ist N die erforderliche Zyklenanzahl	90	71
1.2	Durchgeschweißte Stumpfnah, beidseitig geschweißt oder einseitig bis zur abschmelzenden Einlage oder zur temporären nichtschmelzenden Unterlage geschweißt		Naht zerstörungsfrei geprüft und nachweislich frei von größeren Fehlern, bei einseitig geschweißten Nähten Durchschweißung ^c . Dickeverhältnis nicht kleiner als 1/3	80	63
1.3			Einfluss von Mittellinienversatz einschließlich Nahtversatz bei der Spannungsberechnung berücksichtigt. Naht zerstörungsfrei geprüft und nachweislich frei von größeren Fehlern ^d	80	63
1.4			Naht zerstörungsfrei geprüft und nachweislich frei von größeren Fehlern $\alpha \leq 30^\circ$ $\alpha > 30^\circ$	80 71	63 56
1.5	Durchgeschweißte Stumpfnah, einseitig geschweißt, ohne Unterlage		Wenn vollständige Durchschweißung sichergestellt werden kann ^{c,e,h} . Wenn Innenseite für Sichtprüfung nicht zugänglich und vollständige Durchschweißung nicht sichergestellt werden kann ^g	71 40	63 40

Detail-Nr.	Verbindungsart	Darstellung ^a	Anmerkungen	Klasse	
				Prüfgruppe 1 und 2	Prüfgruppe 3 ^b
1.6	Durchgeschweißte Stumpfnah, einseitig geschweißt, mit bleibender Unterlage ^g		Nur Rundnähte (siehe 5.7) Mindestnahtdicke = Schalenwanddicke		
			Wurzellage auf vollständige Verschmelzung zur Unterlage inspiziert.	56	---
			Einlagenschweißnaht	40	---
1.7	Sickennaht ^{f, g}		Nur Rundnähte (siehe 5.7) Mindestnahtdicke = Schalenwanddicke.		
			Wurzellage auf vollständige Verschmelzung zur Unterlage inspiziert.	56	---
			Einlagenschweißnaht	40	---

^a Für Bedingungen siehe EN 1708-1, EN 13445-3 Anhang A und EN 13445-5 für zerstörungsfreie Prüfung.

^b Wenn die Mindestanforderungen für die Prüfgruppe 2 nicht höher sind als für die Prüfgruppe 3, kann die Ermüdungsklasse für die Prüfgruppen 1 und 2 auch für die Prüfgruppe 3 angewendet werden.

^c Bei Nahtversatz siehe 18.10.4.

^d Gilt auch für Nr. 1.1.1, 1.1.4, 1.1.5 und 1.1.7 von EN 1708-1:2010

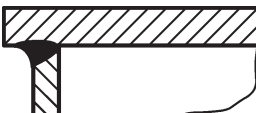
^e Die verwendeten zerstörungsfreien Verfahren müssen in der Lage sein, die volle Durchdringung der Schweißnaht sicherzustellen. Wenn diese nicht sichergestellt werden können, muss Klasse 63 verwendet werden, sofern die Innenoberfläche für eine Sichtprüfung zugänglich ist.

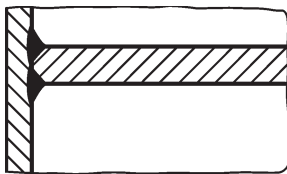
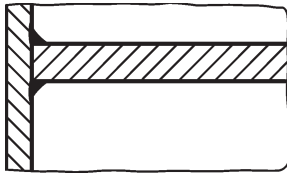
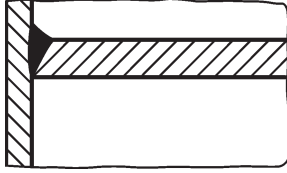
^f Nach den Kriterien von 5.7.4.1

^g Für Schweißnähte, für die keine zerstörungsfreie Prüfung möglich ist, ist nur ein Schadensfaktor *D* von 0,5 zulässig und das Verfahren aus Anhang M ist nicht anwendbar.

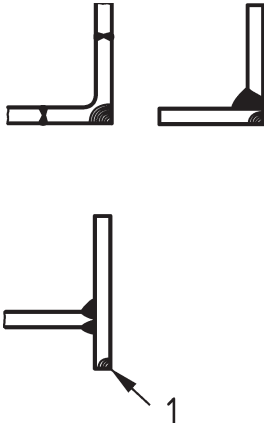
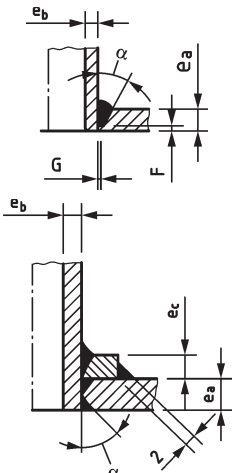
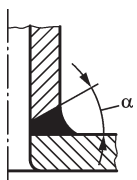
^h Die angegebenen Klassen gelten für die Innenseite des Bauteils. Für die Außenseiten kann Bild Nr. 1.2 verwendet werden.

b) Verbindung Schale-Boden bzw. Schale-Rohrboden

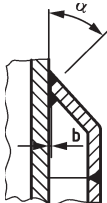
Detail-Nr.	Verbindungsart	Darstellung ^a	Anmerkungen	Klasse	
				Prüfgruppe 1 oder 2	Prüfgruppe 3 ^b
2.1	Aufgeschweißter Boden	(a) 	Boden muss ausreichende Festigkeitseigenschaften über die Dicke aufweisen, um Lamellenrissbildung zu vermeiden.		
		(b) 	Beidseitig durchgeschweißt (Bild a):	71	63
			— wie geschweißt	80	63
			— Übergang nachbearbeitet (siehe 18.10.2.2)		
		(c) 	Von beiden Seiten teilweise durchgeschweißt (Bild b) ^{e,g} :	32	32
			— bezogen auf Ermüdungsrisse in der Naht, auf Grundlage der Spannungsschwingbreite an der Naht.	63	63
2.2	Aufgeschweißter Boden mit Entlastungsnut		Einseitig durchgeschweißt, ohne Gegennaht (Bild c):	63	56
			— wenn die Innenseite vollständig sichtgeprüft oder eine vollständige Durchschweißung sichergestellt werden kann.	40	40
			— wenn die Innenseite für Sichtprüfung nicht zugänglich und vollständige Durchschweißung nicht sichergestellt werden kann ^g .		
			Naht zerstörungsfrei geprüft und nachweislich frei von größeren Fehlern.		
			Beidseitig oder einseitig geschweißt und erste Lage bündig geschliffen.	80	63
			Voll durchgeschweißte Nähte, einseitig geschweißt:	63	56
			— wenn die Innenseite vollständig sichtgeprüft oder eine vollständige Durchschweißung sichergestellt werden kann ^h .	40	40
			— wenn die Innenseite für Sichtprüfung nicht zugänglich ist ^g .		

Detail-Nr.	Verbindungsart	Darstellung ^a	Anmerkungen	Klasse	
				Prüfgruppe 1 oder 2	Prüfgruppe 3 ^b
2.3	Eingeschweißter Boden ^c	(a) 	Beidseitig durchgeschweißt (Bild a): (bezogen auf Ermüdungsrisse vom Nahtübergang in der Schale): — wie geschweißt; — Übergang nachbearbeitet (siehe 18.10.2.2)	71 80	63 63
		(b) 	Von beiden Seiten teilweise durchgeschweißt (Bild b) ^{e,g} : — bezogen auf Ermüdungsrisse in der Naht, auf Grundlage der Spannungsschwingbreite an der Naht ⁱ . — Schweißnaht $\geq 0,8 \times$ Bodendicke.	32 63	32 63
		(c) 	Einseitig durchgeschweißt, ohne Gegennaht (Bild c): — wenn die Innenseite sichtgeprüft werden kann und frei von Schweißgutüberlauf oder Wurzelrückfall ist. — wenn die Innenseite für Sichtprüfung nicht zugänglich ist ^g .	63 40	56 40
^a Für Bedingungen siehe EN 1708-1, EN 13445-3 Anhang A und EN 13445-5 für zerstörungsfreie Prüfung. ^b Wenn die Mindestanforderungen für die Prüfgruppe 2 nicht höher sind als für die Prüfgruppe 3, kann die Ermüdungsklasse für die Prüfgruppen 1 und 2 auch für die Prüfgruppe 3 angewendet werden. ^c Bei Nahtversatz siehe 18.10.4 ^d Gilt auch für Nr. 1.1.1, 1.1.4, 1.1.5 und 1.1.7 von EN 1708-1:2010 ^e Die verwendeten zerstörungsfreien Verfahren müssen in der Lage sein, die volle Durchdringung der Schweißnaht sicherzustellen. Wenn diese nicht sichergestellt werden können, muss Klasse 63 verwendet werden, sofern die Innenoberfläche für eine Sichtprüfung zugänglich ist. ^f Nach den Kriterien von 5.7.4.1 ^g Für Schweißnähte, für die keine zerstörungsfreie Prüfung möglich ist, ist nur ein Schadensfaktor <i>D</i> von 0,5 zulässig und das Verfahren aus Anhang M ist nicht anwendbar. ^h Die angegebenen Klassen gelten für die Innenseite des Bauteils. Für die Außenseiten kann Bild Nr. 1.2 verwendet werden. ⁱ Wenn das Bauteil durch solide Elemente simuliert wird, sollten die Spannungen an der Wurzellage mit Klasse 32 klassifiziert werden. Der Nahtübergang und die Schale können mit Klasse 63 klassifiziert werden.					

c) Verbindungen an Abzweigen

Detail-Nr.	Verbindungsart	Darstellung ^a	Anmerkungen	Klasse	
				Prüfgruppe 1 oder 2	Prüfgruppe 3 ^b
3.1	Lochrand	 1 Rissverlauf von der Ecke ausgehend in das Bauteil; Rissebene dargestellt.	Schweißnähte in Verbindung mit Lochrändern werden nach 3.2, 3.3 und 3.4 unten klassifiziert. Eine Dickenkorrektur wird nicht angewendet. Bei Lochrändern erfolgt die Berechnung üblicherweise durch das Verfahren für ungeschweißte Teile. Eine vereinfachte Berechnung gemäß Anhang Q mit Werten für Klasse 100 ist jedoch zulässig.	100	100
3.2	Nahtübergang in der Schale		Durchgeschweißt: — wie geschweißt — Übergang nachbearbeitet (siehe 18.10.2.2)	71 80	63 63
			Teilweise durchgeschweißt an der Außenseite der Bewehrungsplatte: — Nahtdicke $\geq 0,8 \times$ kleinere Dicke der verbundenen Wände, wie geschweißt — Übergang nachbearbeitet (siehe 18.10.2.2) — Nahtdicke $< 0,8 \times$ kleinere Dicke der verbundenen Wände^h	63 71 32	63 63 32
3.3	Nahtübergang in Abzweig		— wie geschweißt. — Übergang nachbearbeitet (siehe 18.10.2.2)	71 80	63 63
^a Für Bedingungen siehe EN 1708-1, EN 13445-3 Anhang A und EN 13445-5 für zerstörungsfreie Prüfung. ^b Wenn die Mindestanforderungen für die Prüfgruppe 2 nicht höher sind als für die Prüfgruppe 3, kann die Ermüdungsklasse für die Prüfgruppen 1 und 2 auch für die Prüfgruppe 3 angewendet werden.					

d) Doppelmäntel

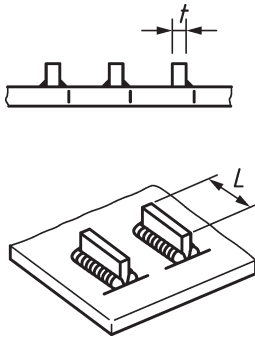
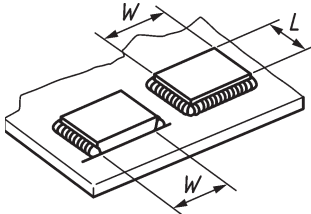
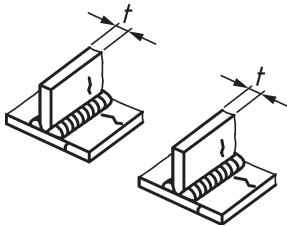
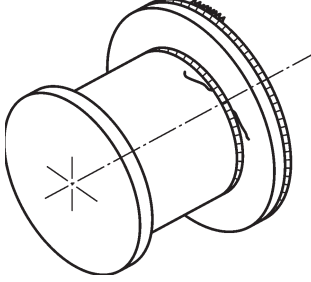
Detail-Nr.	Verbindungsart	Darstellung ^a	Anmerkungen	Klasse	
				Prüfgruppe 1 oder 2	Prüfgruppe 3 ^b
4.1	Verbindungsnaht mit Formdichtung		Durchgeschweißt, Naht zerstörungsfrei geprüft und nachweislich frei von größeren Fehlern		
			Beidseitig geschweißt oder einseitig geschweißt mit Gegennaht.	71	56
			Einseitig geschweißt: — Mehrlagenschweißnaht; Wurzellage auf vollständige Verschmelzung geprüft. — Einlagenschweißnaht ^c .	63 40	40 40

^a Für Bedingungen siehe EN 1708-1, EN 13445-3 Anhang A und EN 13445-5 für zerstörungsfreie Prüfung.

^b Wenn die Mindestanforderungen für die Prüfgruppe 2 nicht höher sind als für die Prüfgruppe 3, kann die Ermüdungsklasse für die Prüfgruppen 1 und 2 auch für die Prüfgruppe 3 angewendet werden.

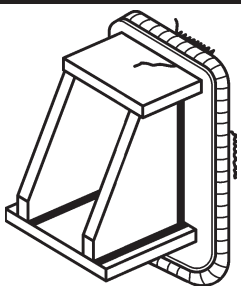
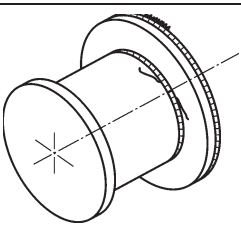
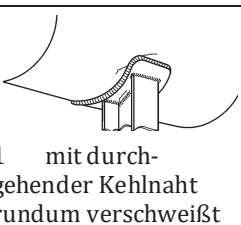
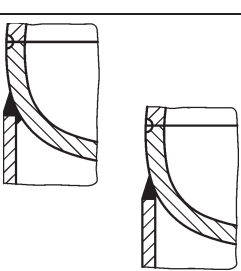
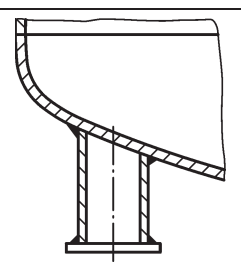
^c Für Schweißnähte, für die keine zerstörungsfreie Prüfung möglich ist, ist nur ein Schadensfaktor *D* von 0,5 zulässig und das Verfahren aus Anhang M ist nicht anwendbar.

e) Anbauteile

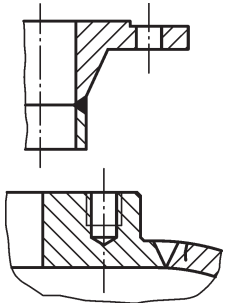
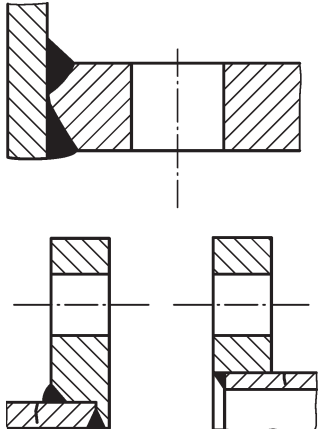
Detail-Nr.	Verbindungs-art	Darstellung ^a	Anmerkungen	Klasse	
				Struktur-vergleichs-spannung	Nennver-gleichs-spannung ohne Last-zyklen
				Prüf-gruppe 1, 2, 3	Prüf-gruppe 1, 2, 3
5.1	Anbauteil beliebiger Form mit Randkehle oder Randabschrägung, mit der Oberfläche eines spannungsbeanspruchten Bauteils stumpfverschweißt, Nähte ggf. um die Enden herumgeführt		Bei um die Enden herumgeführten Nähten eine Klasse höher, wenn Nahtübergang nachbearbeitet (siehe 18.10.2.2) $L \leq 160 \text{ mm}, t \leq 55 \text{ mm}$	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
5.4	Hubösen		wie geschweißt. Nahtübergang abgerichtet in der Schale (siehe 18.10.2.2)	71 80	50 56

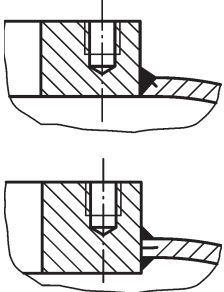
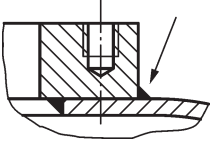
^a Für Bedingungen siehe EN 1708-1, EN 13445-3 Anhang A und EN 13445-5 für zerstörungsfreie Prüfung.

f) Auflagerungen

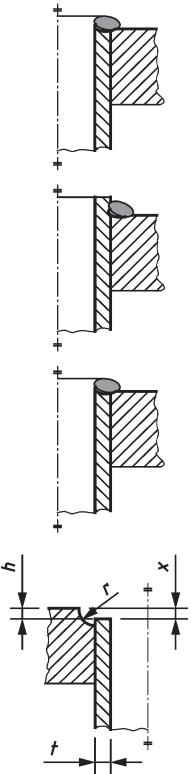
Detail-Nr.	Verbindungsart	Darstellung ^a	Anmerkungen ^b	Klasse
				Prüfgruppe 1, 2, 3
6.1	Auflagerung eines liegenden oder stehenden Behälters		mit durchgehender Kehlnaht rundum verschweißt wie geschweißt. Nahtübergang abgerichtet in der Schale (siehe 18.10.2.2)	71 80
6.2	Zapfenlagerung		wie geschweißt. Nahtübergang abgerichtet in der Schale (siehe 18.10.2.2)	71 80
6.3	Sattelaufleger	 1 mit durchgehender Kehlnaht rundum verschweißt	wie geschweißt. Nahtübergang abgerichtet in der Schale (siehe 18.10.2.2)	71 80
6.4	Standzarge		Beidseitig geschweißt: wie geschweißt; Nahtübergang abgerichtet in der Schale (siehe 18.10.2.2) Einseitig geschweißt	71 80 56
6.5	Tragpratzen (mit oder ohne Verstärkungsblech) mit umlaufender Kehlnaht mit dem Behälter verschweißt			71
^a Für Bedingungen siehe EN 1708-1, EN 13445-3 Anhang A und EN 13445-5 für zerstörungsfreie Prüfung. ^b Die Klassen können für die Schweißnähte zwischen Auflagerungen und Mantel und Schweißnähte der Auflagerungen bei anliegender äußerlicher Ermüdungsbeanspruchung angewendet werden.				

g) Flansche

Detail-Nr.	Verbindungsart	Darstellung ^a	Anmerkungen	Klasse	
				Prüfgruppe 1 oder 2	Prüfgruppe 3 ^b
7.1	Vorschweißflansch oder Ausgleichsflansch, durchgeschweißt, mit Schweißansatz		Schweißnaht muss sich bei zerstörungsfreier Prüfung als frei von Oberflächenfehlern und signifikanten oberflächennahen Fehlern erwiesen haben.		
			Naht beidseitig geschweißt oder einseitig mit Gegennaht oder bis zur abschmelzenden Einlage oder zur temporären nichtschmelzenden Unterlage geschweißt.	80	63
			Einseitig geschweißt: — wenn vollständige Durchschweißung sichergestellt werden kann ^d ; — wenn die Innenseite für Sichtprüfung nicht zugänglich ist ^c .	63 40	40 40
7.2	Vorschweißflansch		Durchgeschweißt: — wie geschweißt — Nahtübergang nachbearbeitet (siehe 18.10.2.2)	71 80	63 63
			Teilweise durchgeschweißt ^c : — Nahtdicke $\geq 0,8 \times$ Schalendicke. — Nahtdicke $< 0,8 \times$ Schalendicke.	40 32	40 32

Detail-Nr.	Verbindungsart	Darstellung ^a	Anmerkungen	Klasse	
				Prüfgruppe 1 oder 2	Prüfgruppe 3 ^b
7.3	Einschweißflansch oder Verstärkungsring		Durchgeschweißt: — wie geschweißt; — Nahtübergang nachbearbeitet (siehe 18.10.2.2)	71 80	63 63
			Naht einseitig geschweißt: — wenn vollständige Durchschweißung sichergestellt werden kann; — wenn die Innenseite für Sichtprüfung nicht zugänglich ist ^c .	63 40	40 40
			Mit versenkter Kehlnaht geschweißt ^c : — Nahtdicke $\geq 0,8 \times$ Schalendicke; — Nahtdicke $< 0,8 \times$ Schalendicke.	40 32	40 32
7.4	Einschweißflansch oder Verstärkungsring, beidseitig geschweißt		Nahtdicke $\geq 0,8 \times$ Schalendicke ^c Nahtdicke $< 0,8 \times$ Schalendicke ^c	40 32	40 32
^a Für Bedingungen siehe EN 1708-1, EN 13445-3 Anhang A und EN 13445-5 für zerstörungsfreie Prüfung. ^b Wenn die Mindestanforderungen für die Prüfgruppe 2 nicht höher sind als für die Prüfgruppe 3, kann die Ermüdungsklasse für die Prüfgruppen 1 und 2 auch für die Prüfgruppe 3 angewendet werden. ^c Für Schweißnähte, für die keine zerstörungsfreie Prüfung möglich ist, ist nur ein Schadensfaktor D von 0,5 zulässig und das Verfahren aus Anhang M ist nicht anwendbar. ^d Die angegebenen Klassen gelten für die Innenseite des Bauteils. Für die Außenseiten kann Bild Nr. 1.2 verwendet werden.					

h) Rohre zu Rohrboden

Detail-Nr.	Verbindungsart	Darstellung ^a	Anmerkungen	Klasse	
				Prüfgruppe 1, 2 oder 3	
8.1			— Nahtdicke $\geq 0,8 \times$ Rohrdicke — Nahtdicke $< 0,8 \times$ Rohrdicke	40 32	40 32
^a Für Bedingungen siehe EN 1708-1, EN 13445-3 Anhang A und EN 13445-5 für zerstörungsfreie Prüfung.					

18.10.1.2 Ausschlüsse

Geschweißte Schrauben sind in den Klassifizierungstabellen nicht erfasst. Das Berechnungsverfahren dieses Abschnitts gilt nicht für derartige Schrauben.

18.10.2 Änderung der Klassifizierung

18.10.2.1 Schweißnähte in Prüfgruppe 3

Schweißnähte der Prüfgruppe 3 sind gemäß der entsprechenden Spalte „Prüfgruppe 3“ in den Tabellen 18-4 einzustufen.

18.10.2.2 Verbesserungsverfahren nach dem Schweißen

18.10.2.2.1 Allgemeines

Der Nahtübergang wird in Übereinstimmung mit den Anforderungen nach IIW Recommendations on Post Weld Improvement of Steel and Aluminium Structures, Literaturhinweis[3] in Anhang N, oder durch andere vergleichbare Verfahren bearbeitet.

Verbesserungsverfahren nach dem Schweißen können die Ermüdungsfestigkeit erhöhen. Diese Verfahren verbessern das Schweißnahtprofil und die Restspannungsbedingungen der geschweißten Verbindung. Die Verbesserungsverfahren sind:

- a) Verfahren zur Verbesserung des Schweißprofils:
 - Nachbearbeiten des Nahtübergangs
 - Maschinelle Bearbeitung oder Schleifen der Schweißnaht plan zur Oberfläche
 - Maschinelle Bearbeitung oder Schleifen am Nahtübergang
 - Nachschmelzen des Nahtübergangs durch WIG-, Plasma- oder Lasernachbearbeiten
- b) Verfahren zur Verbesserung der Restspannungsbedingungen:
 - Hämmern
 - Nadelstrahlen
 - Kugelstrahlen
 - Entspannung durch Wärmebehandlung
 - Überlasten (Nachweisprüfung)
- c) Verfahren zur Verbesserung des Schweißnahtprofils und der Restspannungsbedingungen:
 - Höherfrequentes Hämmern (HFMI)

Verbesserungsverfahren nach dem Schweißen am Nahtübergang beeinflussen die Ermüdungsfestigkeit einer geschweißten Verbindung hinsichtlich der von dem Nahtübergang ausgehenden Fehler. Die Möglichkeit der Ermüdungsrisseinleitung aufgrund anderer Nahtmerkmale (z. B. Nahtwurzel bei Kehlnähten) sollte deshalb nicht außer Acht gelassen werden. Der Nahtübergang sollte vor der maschinellen Bearbeitung nach EN 13445-5 und Anwendung der Verbesserungsverfahren durch Farbeindringung oder Magnetpartikel geprüft werden.

Im Fall des Nacharbeitens des Nahtübergangs wird die Prüfung vereinfacht, wenn der bearbeitete Übergang mit Schleifkörpern geschliffen wird. Diese Maßnahme verbessert zudem die Ermüdungslebensdauer. Das daraus resultierende Profil sollte einen glatten Übergang von der Plattenoberfläche zu der Schweißnaht produzieren. Um sicherzustellen, dass Nahtübergangsfehler entfernt werden, beträgt die erforderliche Tiefe der maschinellen Bearbeitung 0,5 mm unter jeder Einbrandkerbe (siehe Bild 18.10.2.2-1).

Unter korrosiven Umgebungsbedingungen, die Lochfraß (Pitting) an der bearbeiteten Fläche auslösen können, ist das Nachbearbeiten als nicht zweckmäßig anzusehen.

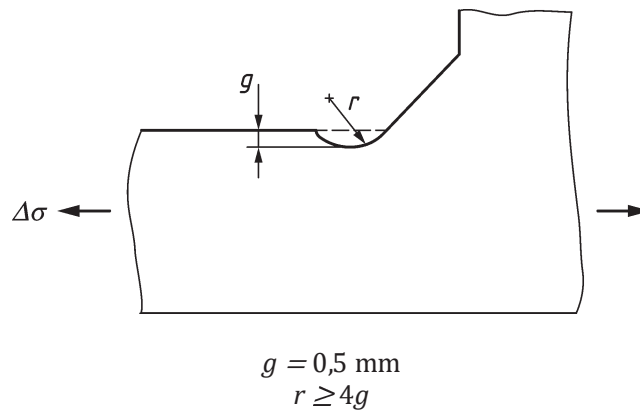


Bild 18.10.2.2-1 — Nachbearbeiten des Nahtübergangs

18.10.2.2.2 Verbesserungsverfahren nach dem Schweißen

Verfahren zur Verbesserung von Verbindungsnahten nach dem Schweißen rechtfertigen eine Höherklassifizierung von Klasse 80 in Klasse 90.

Der schädigenden Wirkung eines Nahtversatzes kann bis zu einem gewissen Grad durch Nachbearbeiten des Nahtübergangs entgegengewirkt werden (siehe 18.10.2.2).

Durch das Nachbearbeiten sichtbar gewordene verdeckte Nahtfehler, die die Ermüdungsfestigkeit beeinträchtigen könnten, sollten berücksichtigt werden (siehe 18.13.5).

18.10.2.3 Nachbearbeiten von Verbindungsnahten

Nachbearbeiten oder Bündelschleifen von Verbindungsnahten rechtfertigt eine Höherklassifizierung von Klasse 80 in Klasse 90.

Der schädigenden Wirkung eines Nahtversatzes kann bis zu einem gewissen Grad durch Nachbearbeiten des Nahtübergangs entgegengewirkt werden (siehe 18.10.2.2).

Durch das Nachbearbeiten sichtbar gewordene verdeckte Nahtfehler, die die Ermüdungsfestigkeit beeinträchtigen könnten, sollten berücksichtigt werden (siehe 18.13.5).

18.10.3 Nicht klassifizierte Schweißnähte

In den Tabellen 18-4 nicht erfasste Schweißnähte sind als der Klasse 32 zugehörig zu betrachten, sofern eine höhere Ermüdungsfestigkeit nicht durch besondere Prüfungen oder bereits vorliegende Ergebnisse von Ermüdungsfestigkeitsprüfungen nachgewiesen ist. Um die Zuordnung zu einer bestimmten $\Delta\sigma_R$ -N-Kurve zu rechtfertigen, müssen mindestens zwei Prüfungen mit Probekörpern durchgeführt werden, die hinsichtlich Konstruktion, Fertigung und Güte repräsentativ für die tatsächlich ausgeführte Behälternaht sind. Die Prüfspannungen sind so zu wählen, dass die Lebensdauer 2×10^6 Zyklen nicht übersteigt. Die geometrisch gemittelte Ermüdungslebensdauer, die in Prüfungen mit einer bestimmten Spannungsschwingbreite ermittelt wurde, darf nicht unter der Lebensdauer liegen, die sich aus der $\Delta\sigma_R$ -N-Kurve für diese Spannung multipliziert mit dem Faktor F aus Tabelle 18-6 ergibt.

Tabelle 18-6 — Werte für den Faktor F

Anzahl der Prüfungen	F
2	15,1
3	13,1
4	12,1
5	11,4
6	11,0
7	10,6
8	10,3
9	10,1
10	9,9

ANMERKUNG F basiert auf der angenommenen Standardabweichung $\log N$ von 0,283, dem größten bei Ermüdungsprüfungen an Druckbehältern für Schweißnähte festgestellten Wert. Falls ein niedrigerer Wert vorliegt, der eingesetzt werden kann, kann dies in Verbindung mit den in Anhang T, Absatz 6.3 angegebenen Prüffaktoren erfolgen.

18.10.4 Abweichungen von der Konstruktionsform

18.10.4.1 Allgemeines

Störstellen und Abweichungen von der vorgesehenen Behälterform (d. h. „Fluchtfehler“) führen als Folge sekundärer Biegung zu lokalen Erhöhungen der druckinduzierten Spannungen in der Schale und damit zu einer Verringerung der Ermüdungsdauer. Dies ist auch der Fall, wenn die in Teil 4 dieser Norm angegebenen Montagetoleranzen eingehalten werden.

Formabweichungen umfassen Versatz an Stoßverbindungen, Winkel zwischen Stoßflächen, Aufdachung an ebenen Flächen von Plattenenden, Aufdachung an Schweißnähten und Unrundheit (siehe Bild 18.10.4.1-1). In den meisten Fällen führen diese Abweichungen zu einem lokalen Anstieg der Umfangsspannung in der Schale; Formabweichungen im Zusammenhang mit Umfangsnähten führen dagegen zu einem Anstieg der Spannung in Schalenlängsrichtung.

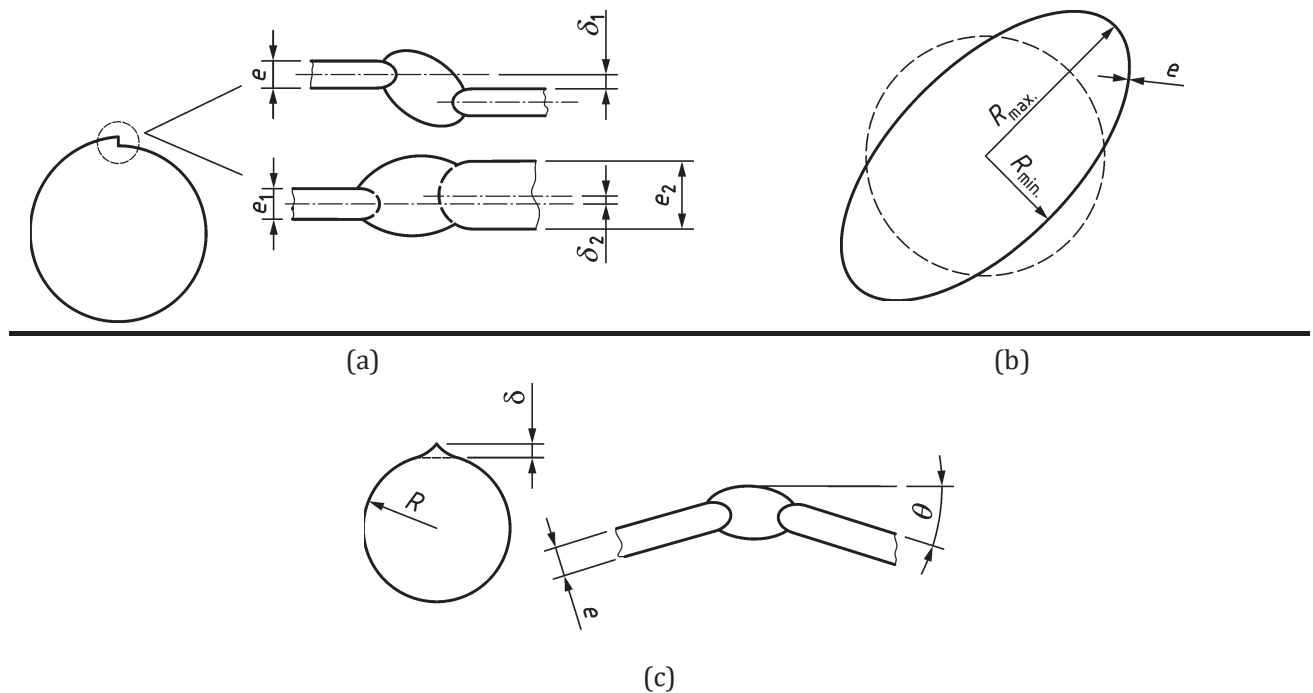


Bild 18.10.4.1-1 — Formabweichungen an Längsnähten

ANMERKUNG Entstehen als Folge der Formabweichungen Spannungen oberhalb der Fließgrenze, führt die Druckprüfung durch plastische Verformung zu einer Verbesserung der Behälterform. Bei Behältern aus Werkstoffen mit einer Fließgrenze erheblich über dem Mindestwert ist dieser vorteilhafte Effekt jedoch weit weniger wahrscheinlich. Die positive Wirkung der Druckprüfung auf die Form des Behälters lässt sich nicht vorhersagen. Wird dieser positive Effekt in gewissem Umfang benötigt, um die Bedingungen der Ermüdungsanalyse zu erfüllen, muss die tatsächliche Behälterform nach der Druckprüfung gemessen werden. Ebenso sollten Dehnungsmessungen zur Ermittlung der tatsächlichen Formzahl erst nach der Druckprüfung durchgeführt werden.

Der Einfluss von Versatz muss in der Konstruktionsphase nach einem der folgenden Verfahren berücksichtigt werden. Ziel beider Verfahren ist es, Ausrichtungstoleranzen für den Zusammenbau zu ermitteln, die mit der erforderlichen Ermüdungslebensdauer vereinbar sind.

- Werte für den Versatz annehmen, die daraus resultierenden sekundären Biegespannungen berechnen und diese in die Berechnung der Strukturspannung der betrachteten Schweißnaht einfließen lassen. Die entsprechende Klasse wird Tabelle 18-4 entnommen und die Ermüdungslebensdauer wird geprüft. Ist der ermittelte Wert nicht annehmbar, werden einige oder alle Toleranzen verringert, bis die geforderte Lebensdauer erzielt wird.
- Für eine Naht der Nennklasse C_{cla1} die für die geforderte Lebensdauer tatsächlich erforderliche Klasse C_{cla2} ermitteln. Die zulässige Spannungszunahme durch Versatz beträgt dann $K_m = C_{cla1}/C_{cla2}$. Hieraus können Toleranzen für den Zusammenbau abgeleitet werden, die zu $K_m \leq C_{cla1}/C_{cla2}$ führen.

Im Fall von Versatz können lokale Erhöhungen druckinduzierter Spannungen in Schalen bestimmt werden, indem die Formabweichungen bei der Festlegung der Geometrie des verwendeten Modells berücksichtigt oder geeignete Korrekturen der bestimmten Spannungen auf der Grundlage der Nenngeometrie des Behälters nach Abschnitt 18.10.4.2 angewendet werden.

18.10.4.2 Konservative Schätzung lokaler Erhöhung druckinduzierter Spannungen in Schalen

Ein konservatives Verfahren zur Bestimmung der auf Membranspannungen ausschließlich durch Druck anzuwendenden Korrekturen, um zusätzliche Biegespannungen durch Formfehler an den geschweißten Verbindungen zu berücksichtigen (siehe Bild 18.10.4.2-1), stellt sich wie folgt dar:

- a) Eine Reihe lokaler Koordinaten mit der Bezeichnung (O, x, y, z) wird am untersuchten Nahtübergang festgelegt.
 - Wenn ein solides Modell verwendet wird: Ein spezifisches unterstützendes Liniensegment wird am Nahtübergang gebildet, der Ursprung wird in die Mitte dieses Liniensegments gesetzt, x wird als Richtung senkrecht zur Naht entlang der Schale gewählt und z wird parallel zu dem Liniensegment gewählt.
 - Wenn ein Schalenmodell verwendet wird: Der Ursprung wird an dem Punkt der untersuchten Schweißnaht gewählt, x wird als Richtung senkrecht zu der Schweißnaht entlang der Schale gewählt und z wird als Richtung senkrecht zur Schale gewählt.
- b) Die Spannungen (Strukturspannungen und Membranspannungen) werden in der in Schritt a) festgelegten lokalen Koordinatenreihe ausgedrückt.
 - Anmerkung: Die Spannungen sind nach einem der in Abschnitt 18.6 d) benannten Verfahren zu berechnen.
- c) Der Wert des Spannungsvergrößerungsfaktors K_m wird bestimmt.
- d) Der Biegewert σ_{xxb} des Elements σ_{xx} der Strukturspannung wird aufgezeichnet. Der Membranwert σ_{xxm} des Elements σ_{xx} der Strukturspannung wird durch $K_m \times \sigma_{xxm}$ ersetzt. Der ursprüngliche Wert des Elements σ_{xx} der Strukturspannung wird durch $(K_m \times \sigma_{xxm} + \sigma_{xxb})$ ersetzt, um zusätzliche Biegespannungen durch Formfehler zu berücksichtigen.

ANMERKUNG Die anderen Elemente der Strukturspannung (σ_{xy} , ...) bleiben unverändert.

Der Wert des Spannungsvergrößerungsfaktors K_m sollte anhand der folgenden Gleichungen berechnet werden:

$$K_m = 1 + A_1 + \text{Max}(A_2, A_4) \text{ für Zylinder} \quad (18.10.4.2-1)$$

oder

$$K_m = 1 + A_1 + \text{Max}(A_3, A_4) \text{ für Kugeln} \quad (18.10.4.2-2)$$

dabei

- berücksichtigt A_1 den Achsenversatz und ist gegeben durch:

$$A_1 = \left(\frac{6\delta_1}{e_{n1}} \right) \left(\frac{e_{n1}^x}{e_{n1}^x + e_{n2}^x} \right) \quad (18.10.4.2-3)$$

dabei ist

- δ_1 der Versatz der Mittellinien der stoßverbundenen Platten;
- $e_{n1} \leq e_{n2}$ dabei sind e_{n1} und e_{n2} die Nenndicken der beiden stoßverbundenen Platten;
- x 1,5 steht für die Umfangsnäht und 0,6 für die Längsnäht einer Zylinderschale

ANMERKUNG Im Fall einer Umfangsnäht an dem Übergang zwischen Boden und einem Zylinder ergibt δ_1 einen algebraischen Wert.

— A_2 steht für die Unrundheit einer Zylinderschale und wird wie folgt berechnet:

a) im Fall eines inneren Drucks

$$A_2 = \frac{3(R_{\max} - R_{\min})}{e \left[1 + \frac{P(1 - \nu^2)}{2E} \left(\frac{2 \times R}{e_n} \right)^3 \right]} \quad (18.10.4.2-4)$$

R ist der mittlere Radius

b) im Fall eines äußeren Drucks

$$A_2 = \frac{3(R_{\max} - R_{\min})}{e} \frac{1}{\left(1 - \frac{3P}{P_m} \right)} \quad (18.10.4.2-5)$$

R ist der mittlere Radius

P_m ist der theoretische elastische Instabilitätsdruck für den Zusammenbruch einer perfekten Zylinderschale nach (8.5.2-5) von Abschnitt 8.5.2.2 b) und wird bei 20 °C berechnet.

— A_3 steht für den Winkelversatz der Platten von Kugelschalen und wird wie folgt berechnet:

$$A_3 = \frac{\theta \left(\frac{R}{e_n} \right)^{0,5}}{49} \quad (18.10.4.2-6)$$

dabei ist

θ der Winkel zwischen den Tangenten zu den Platten an der Naht (in Grad)
(siehe Bild 18.10.4.1-1 (c));

— A_4 steht für die örtliche Aufdachung und wird wie folgt berechnet:

$$A_4 = \frac{6\delta}{e_n} \quad (18.10.4.2-7)$$

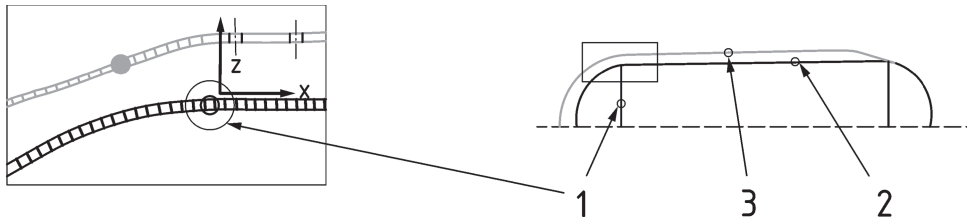
dabei ist

δ die Abweichung von der wahren Form, die nicht von den vorstehenden Parametern erfasst wird, die anderen Parameter sind Bild 18.10.4.1-1 zu entnehmen.

ANMERKUNG Der Schätzwert von A_4 berücksichtigt nicht die vorteilhafte Verringerung der Aufdachung durch Druck und ist daher konservativ. Korrekturen aufgrund von nichtlinearen Effekten, die zu einer Verringerung von A_4 führen, sind zulässig (siehe [4] in Anhang N).

Bei Verbindungsnahten hat ein Übergangskegel am Ort der Dickenänderung keinen Einfluss auf den Wert von A_1 .

Gleichung 18.10.4.2-1 führt zu einem überhöhten Schätzwert von K_m für den Fall, dass die örtliche Biegung begrenzt ist, z. B. bei kurzen Formfehlern, wenn sich eine Neuverteilung der Spannung um den Formfehler ergibt, bei Formfehlern in kurzen zylindrischen Behältern mit Stützwirkung durch die Böden oder im Bereich um Anbauteile, die die Schale versteifen. Ein niedrigerer K_m -Wert ist jedoch nur nach besonderer Analyse gerechtfertigt.



Druckinduzierte Spannungen für ein Modell auf der Grundlage einer Nenngeometrie:

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{xy} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{xz} & \sigma_{yz} & \sigma_{zz} \end{bmatrix}_{\text{Structural Stress}} = \begin{bmatrix} \sigma_{xxm} & \sigma_{xym} & \sigma_{xzm} \\ \sigma_{xym} & \sigma_{yy m} & \sigma_{yzm} \\ \sigma_{xzm} & \sigma_{yzm} & \sigma_{zzm} \end{bmatrix}_{\text{membrane}} + \begin{bmatrix} \sigma_{xxb} & \sigma_{xyb} & \sigma_{xzb} \\ \sigma_{xyb} & \sigma_{yyb} & \sigma_{yzb} \\ \sigma_{xzb} & \sigma_{yzb} & \sigma_{zzb} \end{bmatrix}_{\text{bending}}$$

Erhöhung der druckinduzierten Spannungen zur Berücksichtigung von Formfehlern:

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{xy} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{xz} & \sigma_{yz} & \sigma_{zz} \end{bmatrix}_{\text{Structural Stress}} = \begin{bmatrix} K_m \sigma_{xxm} + \sigma_{xxb} & \sigma_{xym} + \sigma_{xyb} & \sigma_{xzm} + \sigma_{xzb} \\ \sigma_{xym} + \sigma_{xyb} & \sigma_{yy m} + \sigma_{yyb} & \sigma_{yzm} + \sigma_{yzb} \\ \sigma_{xzm} + \sigma_{xzb} & \sigma_{yzm} + \sigma_{yzb} & \sigma_{zzm} + \sigma_{zzb} \end{bmatrix}$$

ANMERKUNG 1 Schweißnaht

ANMERKUNG 2 Ursprüngliche Form

ANMERKUNG 3 Form verändert durch internen Druck - Modell basierend auf Nenngeometrie

Bild 18.10.4.2-1 — Anzuwendendes Verfahren zur Berücksichtigung von Versatz

18.10.5 Korrekturfaktoren

18.10.5.1 Korrekturfaktor zur Berücksichtigung des Wanddickeneinflusses

Für Wanddicken $e_n > 25$ mm ist f_{ew} wie folgt zu berechnen:

$$f_{ew} = \left(\frac{25}{e_n} \right)^{0,25} \quad (18.10.5.1-1)$$

Dabei ist:

e_n die Dicke des betrachteten beanspruchten Teils oder, sofern dies nicht eindeutig ist, der dickste Teil des Details.

Für $e_n \leq 25$ mm, $f_{ew} = 1$.

Für $e_n > 150$ mm gilt der Wert $f_{ew} = 0,6389$ entsprechend $e_n = 150$ mm.

ANMERKUNG Der Korrekturfaktor der Wanddicke f_{ew} entspricht 1 für das Haibach-Verfahren.

18.10.5.2 Temperaturkorrekturfaktor

Für Temperaturen T^* über 100 °C ist f_{T^*} gegeben durch:

— bei ferritischen Werkstoffen:

$$f_{T^*} = 1,03 - 1,5 \times 10^{-4} T^* - 1,5 \times 10^{-6} T^{*2} \quad (18.10.5.2-1)$$

— bei austenitischen Werkstoffen:

$$f_{T^*} = 1,043 - 4,3 \times 10^{-4} T^* \quad (18.10.5.2-2)$$

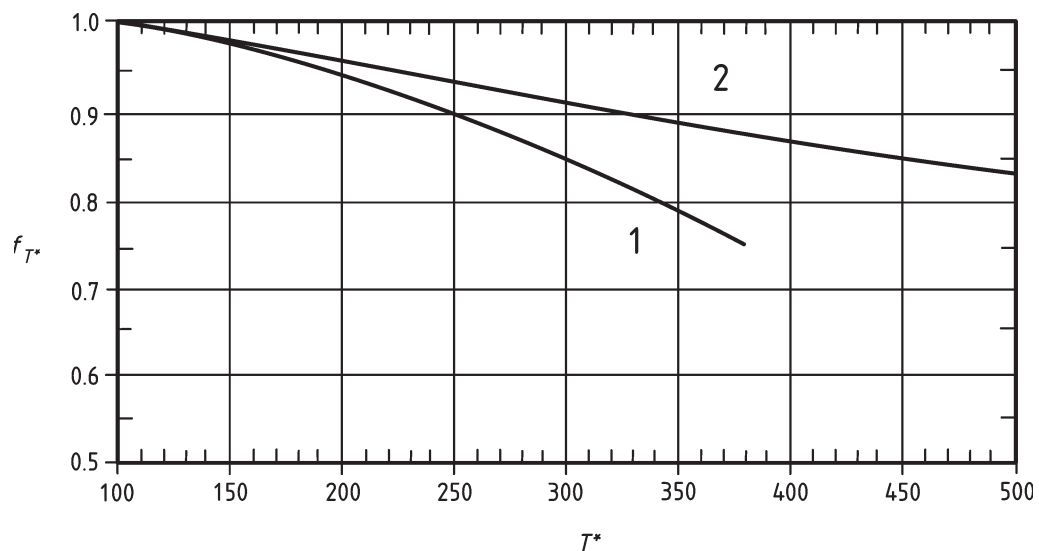
Dabei ist:

$$T^* = 0,75 \times T_{\max} - 0,25 \times T_{\min} \quad (18.10.5.2-3)$$

Für Temperaturen T^* nicht über 100 °C, ist $f_{T^*} = 1$.

ANMERKUNG Alle Temperaturen in 18.10.5.2 sind in Grad Celsius (°C) einzusetzen.

f_{T^*} ist in Bild 18.10.5.2-1 dargestellt.



Legende

1 ferritisch

2 austenitisch

T^* mittlere Temperatur während eines Lastzyklus in °C

Bild 18.10.5.2-1 — Korrekturfaktor f_{T^*}

18.10.5.3 Mittlerer Spannungskorrekturfaktor für vollständig entspannte geschweißte Bauteile

Im Fall vollständig entspannter geschweißter Bauteile mit durchgeschweißten Verbindungen und der Prüfgruppe 1 oder 2 kann ein Spannungskorrekturfaktor f_{m^*} aus dem Faktor f_m für ungeschweißte Bauteile nach 18.11.1.3.1 wie folgt bestimmt werden:

$$f_{m^*} = \max \left(1; 1,3 \frac{0,4343 \times \ln N - 4,699}{1,602} \times f_m \right) \quad (18.10.5.3-1)$$

Für Schweißnähte wie geschweißt oder im teilweise wärmebehandelten Zustand oder für Bauelemente der Prüfgruppe 3 ist $f_{m^*} = 1$.

ANMERKUNG N kann in der obigen Gleichung durch die angewendete Zyklenanzahl n ersetzt werden.

18.10.5.4 Kombiniertes Korrekturfaktor

Der kombinierte Korrekturfaktor für geschweißte Bauelemente f_w ist wie folgt zu berechnen:

$$f_w = f_{ew^*} \times f_{T^*} \times f_{m^*} \quad (18.10.5.4-1)$$

18.10.6 Ermüdungskurven

18.10.6.1 Allgemeines

Die Ermüdungsfestigkeit wird durch eine Reihe von $\Delta\sigma_R - N$ -Kurven in Bild 18.10.6.1-1 ausgedrückt, von denen jede für ein bestimmtes Konstruktionsdetail gilt. Die Kurven werden durch die betreffenden Ermüdungsfestigkeitswerte $\Delta\sigma_R$ (MPa) bei einer Lastzyklenanzahl $N = 2 \cdot 10^6$ gekennzeichnet.

ANMERKUNG 1 Die Kurven wurden anhand von Daten abgeleitet, die an Laborproben in lastgesteuerten oder, bei Dehnungen über die Fließgrenze hinaus (Ermüdung im Niedrig-Lastwechselbereich), in dehnungsgesteuerten Schwingversuchen ermittelt wurden. Kontinuität vom Niedrig- zum Hoch-Lastwechselbereich wird dadurch gewährleistet, dass die Daten im Niedrig-Lastwechselbereich durch die pseudoelastische Spannungsschwingbreite (d. h. Produkt aus Dehnung und Elastizitätsmodul, ggf. korrigiert um den Faktor zur Berücksichtigung von Spannungen im überelastischen Bereich (siehe 18.8)) ausgedrückt werden. Diese Kurven beruhen auf einem Durchriss als Versagensbedingung, einem Durchriss durch das Schweißgut oder das Grundmaterial (in einem Ausmaß, dass in der druckbeaufschlagten Komponente eine messbare Leckage auftritt). Diese Daten sind mit Ergebnissen von Druckwechselprüfungen an ausgeführten Behältern kompatibel.

ANMERKUNG 2 Die für die Auslegung verwendeten Ermüdungskurven liegen etwa drei Standardabweichungen von $\log N$ unter der mittleren Kurve, die durch Regressionsanalyse an die ursprünglichen Prüfdaten angepasst wurde. Damit repräsentieren sie eine Versagenswahrscheinlichkeit von 0,14 %.

ANMERKUNG 3 Das verwendete Verfahren deckt auch die Beanspruchung durch Wärmespannung ab.

ANMERKUNG 4 Für Lebensdauern von mehr als $2 \cdot 10^6$ Zyklen sind die Kurven in Übereinstimmung mit Literaturhinweis [9] in Anhang N konservativ. Die Verwendung alternativer Kurven und Ermüdungsfestigkeitswerte bei konstanter Amplitudenbelastung ist zulässig, sofern ihre Eignung nachgewiesen werden kann.

ANMERKUNG 5 Abschnitt 18.10.6.2 schlägt eine alternative Kurvenreihe vor.

Die Berechnungskurven haben den in Bild 18.10.6.1-2 dargestellten Verlauf und entsprechen folgender Gleichung:

$$N = \frac{C}{\Delta\sigma_R^m} \quad (18.10.6.1-1)$$

Dabei sind m und C Konstanten, deren Werte Tabelle 18-7 zu entnehmen sind.

Für Zyklenanzahlen bis 510^6 und über 510^6 gelten unterschiedliche Werte. Bei konstanter Amplitudenbelastung entspricht die Dauerwechselfestigkeit $\Delta\sigma_D$ (siehe Definition in 18.2.7) der Spannungsschwingbreite bei 510^6 Zyklen. Bei veränderlicher Amplitudenbelastung entspricht die untere Grenze der Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma_{Cut}$ derjenigen von 10^8 Zyklen (siehe Definition in 18.2.2). Die Werte für $\Delta\sigma_D$ und $\Delta\sigma_{Cut}$ für jede Ermüdungskurve sind in Tabelle 18.7 enthalten.

Um die zulässige Zyklenanzahl N bei festgelegter Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma_R$ zu ermitteln, muss Folgendes berechnet werden.

Wenn $\frac{\Delta\sigma_R}{f_w} \geq \Delta\sigma_D$, dann

$$N = \frac{C_1}{\left(\frac{\Delta\sigma_R}{f_w}\right)^{m_1}} \quad (18.10.6.1-2)$$

dabei sind C_1 und m_1 die auf den Bereich von $N \leq 510^6$ Zyklen anzuwendenden Werte.

Wenn $\Delta\sigma_{Cut} \leq \frac{\Delta\sigma_R}{f_w} < \Delta\sigma_D$:

- In Fällen, in denen die angewendeten Spannungsschwingbreiten kleiner als $\Delta\sigma_D$ sind, ist $N = \text{unendlich}$ (d. h. der Anteil an der Ermüdungsschädigung n/N in Gleichung 18.13.2-1 ist null).
- In allen anderen Fällen wird N angegeben durch:

$$N = \frac{C_2}{\left(\frac{\Delta\sigma_R}{f_w}\right)^{m_2}} \quad (18.10.6.1-3)$$

dabei sind C_2 und m_2 die auf den Bereich von $N > 510^6$ Zyklen anzuwendenden Werte.

Wenn $\frac{\Delta\sigma_R}{f_w} < \Delta\sigma_{Cut}$, dann ist $N = \text{unendlich}$ (d. h. der Beitrag zum Ermüdungsschaden n/N in Gleichung 18.13.2-1 ist null).

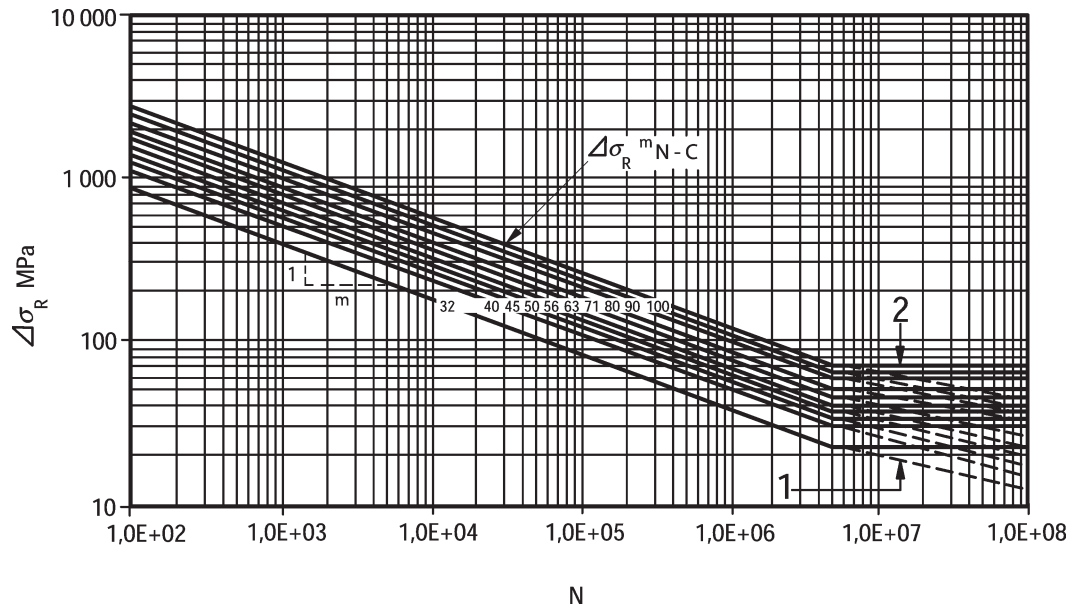
Alternativ gilt $\Delta\sigma_R$ zur Verwendung als Ermüdungskurve, nach der die zulässige Spannungsschwingbreite bei einer festgelegten Zyklenanzahl n ermittelt werden kann:

für $n \leq 510^6$ Zyklen:

$$\Delta\sigma_R = f_w \left(\frac{C_1}{n}\right)^{\frac{1}{m_1}} \quad (18.10.6.1-4)$$

Für $n > 510^6$ Zyklen ist die zulässige Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma_D$.

ANMERKUNG 6 Die Bestimmung der zulässigen Spannungsschwingbreite für eine vorgegebene Anzahl von Belastungszyklen n ist nur im Fall einer konstanten Amplitude der Wechselbeanspruchung von Interesse. Im Fall einer variablen Amplitude erfordert die Beurteilung der Ermüdung die Berechnung der kumulativen Schädigung infolge aller Typen von Wechselbeanspruchungen. Diese kann nur durchgeführt werden, indem die zulässige Anzahl N für die einzelnen Typen von Wechselbeanspruchungen verwendet wird und nicht deren zulässige Spannungsschwingbreiten.



Legende

- (1) Kurven bei veränderlicher Amplitudenbelastung, Steigung $2m - 1$
(2) Bei konstanter Amplitudenbelastung ist die Dauerwechselfestigkeit $\Delta\sigma_D$ bei $5 \cdot 10^6$ Zyklen.

ANMERKUNG Bei $N \geq 210^6$ Zyklen ist die Verwendung alternativer Kurven und $\Delta\sigma_R$ zulässig; siehe ANMERKUNG 4 in 18.10.6.1.

Bild 18.10.6.1-1 — Ermüdungskurven für geschweißte Bauteile

Tabelle 18-7 — Beiwerte der Ermüdungskurven für geschweißte Bauteile

Klasse	Konstanten der $\Delta\sigma_R$ - N-Kurve				Spannungsschwingbreiten bei N Zyklen (MPa)	
	Bei $10^2 < N < 5 \times 10^6$		Bei $5 \times 10^6 < N < 10^8$		$N = 5 \times 10^6$	$N = 10^8$
	m_1	C_1	m_2	C_2	$\Delta\sigma_D$	$\Delta\sigma_{Cut}$
100	3,0	$2,00 \times 10^{12}$	5,0	$1,09 \times 10^{16}$	74	40
90	3,0	$1,46 \times 10^{12}$	5,0	$6,41 \times 10^{15}$	66	36
80	3,0	$1,02 \times 10^{12}$	5,0	$3,56 \times 10^{15}$	59	32
71	3,0	$7,16 \times 10^{11}$	5,0	$1,96 \times 10^{15}$	52	29
63	3,0	$5,00 \times 10^{11}$	5,0	$1,08 \times 10^{15}$	46	26
56	3,0	$3,51 \times 10^{11}$	5,0	$5,98 \times 10^{14}$	41	23
50	3,0	$2,50 \times 10^{11}$	5,0	$3,39 \times 10^{14}$	37	20
45	3,0	$1,82 \times 10^{11}$	5,0	$2,00 \times 10^{14}$	33	18
40	3,0	$1,28 \times 10^{11}$	5,0	$1,11 \times 10^{14}$	29,5	16
32	3,0	$6,55 \times 10^{10}$	5,0	$3,64 \times 10^{13}$	24	13
ANMERKUNG Die Werte der Parameter C_1, C_2, die Dauerwechselfestigkeit $\Delta\sigma_D$ und der untere Grenzwert $\Delta\sigma_{Cut}$ wie oben angegeben werden auf 2 oder 3 signifikante Stellen gerundet. Ihre genauen Werte sind durch die folgenden Gleichungen gegeben: $C_1 = (class)^3 2 \times 10^6, \quad \Delta\sigma_D = (class) \left(\frac{2}{5}\right)^{\frac{1}{3}},$ $C_2 = (class)^5 \left(\frac{2}{5}\right)^{\frac{5}{3}} 5 \times 10^6, \quad \Delta\sigma_{Cut} = (class) \left(\frac{2}{5}\right)^{\frac{1}{3}} (5 \times 10^{-2})^{\frac{1}{5}}$						

18.10.6.2 Alternativ

Alternative Definitionen von Ermüdungskurven für die Klassen 90*, 80* und 71* können auf der Grundlage des Literaturhinweises [7] verwendet werden, sofern alle folgenden Anforderungen erfüllt werden:

- Das Bauteil besteht aus ferritischem Stahl mit einer Nenndehngrenze von < 450 MPa;
- Das Bauteil ist in der folgenden Liste aufgeführt:
 - Zylinder und hemisphärischer oder torisphärischer Boden, für Darstellungen 1.1, 1.2, 1.3;
 - radiales Düsenanbauteil am Zylinder oder Kronenteil des Bodens für Darstellung 3.2, ohne Bewehrung und 3.3;
 - Anbauteile zwischen Boden und Standzarge für Darstellung 6.4;
 - Anbauteile mit durchgeschweißter Naht und ohne äußere Ermüdungslast für Darstellung 5.3;
- Die Verbesserung nach dem Schweißen (siehe 18.10.2.2.2) erhöht nicht die in Tabelle 18-4 festgelegte Klasse;
- Für hauptsächlich druckbeanspruchte Bauteile;

- Mittlerer Spannungskorrekturfaktor für vollständig entspannte geschweißte Bauteile $f_{m^*} = 1$;
- Prüfgruppen 1 und 2;
- Zusätzlich zu den Anforderungen nach EN 13445-5 Anhang G ist die Kennzahl des kumulativen Ermüdungsschadens D für alle Bauteile des Druckbehälters zu dokumentieren.
- Alle druckbelasteten Schweißnähte mit einem Wert D von mehr als 0,5 müssen zu 100 % durch VT und MT geprüft werden. Darüber hinaus müssen diese Schweißnähte einer Ultraschallprüfung unterzogen und die Ergebnisse der Prüfung müssen so dokumentiert werden, dass sie als Grundlage für die nächste Ultraschallprüfung im Betrieb dienen.
- Nach Erreichen des Schadensfaktors $D = 1$ des Bauteils muss einer der beiden folgenden Fälle beachtet und in der Bedienungsanleitung angegeben werden:
 - der Druckbehälter ist außer Betrieb zu nehmen,
 - alle Schweißnähte und alle von stark zunehmender Ermüdung betroffenen Bereiche sind zu 100 % durch zerstörungsfreie volumetrische (RT/UT) und Oberflächenprüfung (MT/PT) zu prüfen. Die Fortsetzung des Betriebs nach M.3 in Anhang M erfordert eine neue Berechnung nach 18.10.6.1.

Wenn eine alternative Definition verwendet wird, um die zulässige Lastzyklenanzahl N bei einer festgelegten Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma_R$ zu erreichen, muss Folgendes berechnet werden.

Wenn $\frac{\Delta\sigma_R}{f_w} \geq \Delta\sigma_A$, dann

$$N = \frac{C_1}{\left(\frac{\Delta\sigma_R}{f_w}\right)^{m_1}} \quad (18.10.6.2-1)$$

dabei sind $\Delta\sigma_A$, C_1 , m_1 die in Tabelle 18.8 angegebenen Werte.

ANMERKUNG 1: C_1 und m_1 sind ebenfalls in Tabelle 18.7 angegebene Werte, die für den Bereich $N = 510^6$ Zyklen gelten.

Wenn $\Delta\sigma_A > \frac{\Delta\sigma_R}{f_w} \geq \Delta\sigma_{\text{Cut}}$:

$$N = \frac{C_1}{\left(\frac{\Delta\sigma_R}{f_w}\right)^m} \quad (18.10.6.2-2)$$

dabei sind $\Delta\sigma_A$, C_1 , m , $\Delta\sigma_{\text{Cut}}$ die in Tabelle 18.8 angegebenen Werte.

ANMERKUNG 2 m ist eine logarithmische Funktion von N , sodass die Gleichung 18.10.6.2-2 wiederholt werden muss. Die Wiederholung ist ausreichend, wenn die Differenz zwischen N_{a-1} und N_a weniger als 1 % ist, dabei ist „a“ die Anzahl der Wiederholungen.

Wenn $\frac{\Delta\sigma_R}{f_w} < \Delta\sigma_{\text{Cut}}$, dann ist $N = \text{unendlich}$ (d. h. der Beitrag zum Ermüdungsschaden n/N in Gleichung 18.13.2-1 ist null).

Alternativ gilt $\Delta\sigma_R$ zur Verwendung als Ermüdungskurve, nach der die zulässige Spannungsschwingbreite bei einer festgelegten Zyklenanzahl n ermittelt werden kann:

für $n < N_A$ Zyklen: