

DIN EN 1999-1-3

ICS 91.010.30; 91.080.10

Ersatz für
DIN V ENV 1999-2:2001-03**Eurocode 9: Bemessung und Konstruktion von Aluminiumtragwerken –
Teil 1-3: Ermüdungsbeanspruchte Tragwerke;
Deutsche Fassung EN 1999-1-3:2007 + A1:2011**

Eurocode 9: Design of aluminium structures –
Part 1-3: Structures susceptible to fatigue;
German version EN 1999-1-3:2007 + A1:2011

Eurocode 9: Calcul des structures en aluminium –
Partie 1-3: Structures sensibles à la fatigue;
Version allemande EN 1999-1-3:2007 + A1:2011

Gesamtumfang 122 Seiten

Normenausschuss Bauwesen (NABau) im DIN

Nationales Vorwort

Die Dokumente EN 1999-1-3:2007 und EN 1999-1-3:2007/A1:2011 wurden im Komitee CEN/TC 250/SC 9 „Eurocode 9 — Bemessung und Konstruktion von Aluminiumtragwerken“ (Sekretariat: BSI, Vereinigtes Königreich) unter deutscher Mitwirkung erarbeitet.

Im DIN Deutsches Institut für Normung e. V. war hierfür der Arbeitsausschuss NA 005-08-07 AA „Aluminiumkonstruktionen (SpA zu CEN/TC 250/SC 9 + CEN/TC 135/ WG 11)“ des Normenausschusses Bauwesen (NABau) zuständig.

Anfang und Ende der durch die Änderung eingefügten oder geänderten Texte sind jeweils durch Änderungsmarken **A1** **A1** angegeben.

Die Deutsche Fassung der EN 1999-1-3:2007 wird jetzt erstmalig als DIN EN 1999-1-3 veröffentlicht, da die Publikation nur zusammen mit der nun vorliegenden Änderungen EN 1999-1-3:2007/A1:2011 erfolgen sollte.

Änderungen

Gegenüber DIN V ENV 1999-2:2001-03 wurden folgende Änderungen vorgenommen:

- a) der Vornorm-Charakter wurde aufgehoben;
- b) die Nummer des Normenteils wurde an die für Eurocodes geläufige Nummerierung angepasst;
- c) die Stellungnahmen der nationalen Normungsinstitute von CEN zu ENV 1999-2:1998 wurden berücksichtigt und der Inhalt wurde vollständig überarbeitet.

Frühere Ausgaben

DIN V ENV 1999-2: 2001-03

ICS 91.010.30; 91.080.10

Deutsche Fassung

Eurocode 9: Bemessung und Konstruktion von
Aluminiumtragwerken —
Teil 1-3: Ermüdungsbeanspruchte Tragwerke

Eurocode 9: Design of aluminium structures —
Part 1-3: Structures susceptible to fatigue

Eurocode 9: Calcul des structures en aluminium —
Partie 1-3: Structures sensibles à la fatigue

Diese Änderung A1 modifiziert die Europäische Norm EN 1999-1-3:2007. Sie wurde vom CEN am 26. Mai 2011 angenommen.

Die CEN-Mitglieder sind gehalten, die CEN/CENELEC-Geschäftsordnung zu erfüllen, in der die Bedingungen festgelegt sind, unter denen diese Änderung in der betreffenden nationalen Norm, ohne jede Änderung, einzufügen ist. Auf dem letzten Stand befindliche Listen dieser nationalen Normen mit ihren bibliographischen Angaben sind beim Management-Zentrum des CEN-CENELEC oder bei jedem CEN-Mitglied auf Anfrage erhältlich.

Diese Änderung besteht in drei offiziellen Fassungen (Deutsch, Englisch, Französisch). Eine Fassung in einer anderen Sprache, die von einem CEN-Mitglied in eigener Verantwortung durch Übersetzung in seine Landessprache gemacht und dem Management-Zentrum des CEN-CENELEC mitgeteilt worden ist, hat den gleichen Status wie die offiziellen

CEN-Mitglieder sind die nationalen Normungsinstitute von Belgien, Bulgarien, Dänemark, Deutschland, Estland, Finnland, Frankreich, Griechenland, Irland, Island, Italien, Kroatien, Lettland, Litauen, Luxemburg, Malta, den Niederlanden, Norwegen, Österreich, Polen, Portugal, Rumänien, Schweden, der Schweiz, der Slowakei, Slowenien, Spanien, der Tschechischen Republik, Ungarn, dem Vereinigten Königreich und Zypern.



EUROPÄISCHES KOMITEE FÜR NORMUNG
EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION
COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION

Management-Zentrum: Avenue Marnix 17, B-1000 Brüssel

Inhalt

Seite

Vorwort	6
Hintergrund des Eurocode-Programmes	6
Status und Gültigkeitsbereich der Eurocodes	7
Nationale Fassungen der Eurocodes	8
Verhältnis zwischen den Eurocodes und den harmonisierten Technischen Spezifikationen für Bauprodukte (ENs und ETAs)	9
Besondere Hinweise zu EN 1999-1-3	9
Nationaler Anhang für EN 1999-1-3	9
Vorwort der Änderung A1	10
1 Allgemeines	11
1.1 Anwendungsbereich	11
1.1.1 Anwendungsbereich von EN 1999	11
1.1.2 Anwendungsbereich von EN 1999-1-3	11
1.2 Normative Verweisungen	12
1.3 Annahmen	12
1.4 Unterscheidung zwischen Prinzipien und Anwendungsregeln	13
1.5 Definitionen	13
1.5.1 Allgemeines	13
1.5.2 Zusätzliche Begriffe, die in EN 1999-1-3 verwendet werden	13
1.6 Symbole	17
1.7 Spezifikationen für die Ausführung	19
1.7.1 Ausführungsspezifikation	19
1.7.2 Betriebsbuch	19
1.7.3 Prüf- und Wartungsbuch	19
2 Grundlagen der Bemessung	20
2.1 Allgemeines	20
2.1.1 Grundlegende Anforderungen	20
2.2 Bemessungsmethoden gegen Ermüdung	21
2.2.1 Schwingbruchsichere Bemessung (SLD)	21
2.2.2 Schadenstolerante Bemessung (DTD)	22
2.2.3 Versuchsunterstützte Bemessung	22
2.3 Ermüdungsbelastung	22
2.3.1 Herkunft der Ermüdungsbelastung	22
2.3.2 Herleitung der Ermüdungsbelastung	23
2.3.3 Äquivalente Ermüdungsbelastung	23
2.4 Teilsicherheitsbeiwerte für Ermüdungslasten	24
2.5 Anforderungen an die Ausführung	24
3 Werkstoffe, Produktbestandteile und Verbindungsmittel	24
4 Dauerhaftigkeit	25
5 Strukturanalyse	25
5.1 Globale Analyse	25
5.1.1 Allgemeines	25
5.1.2 Anwendung von Balkenelementen	26
5.1.3 Anwendung von Membran-, Schalen- und Kontinuumelementen	27
5.2 Spannungsarten	27
5.2.1 Allgemeines	27
5.2.2 Nennspannungen	27
5.2.3 Modifizierte Nennspannungen	28

	Seite
5.2.4	Hot-Spot-Spannungen 28
5.3	Herleitung von Spannungen 30
5.3.1	Herleitung von Nennspannungen 30
5.3.2	Herleitung von modifizierten Nennspannungen 31
5.3.3	Herleitung von Hot-Spot-Spannungen 31
5.3.4	Spannungsrichtung 31
5.4	Spannungsschwingbreiten für bestimmte Rissentstehungsstellen 32
5.4.1	Grundmaterial, Schweißnähte und Verbindungen mit mechanischen Befestigungselementen 32
5.4.2	Kehlnähte und partiell durchgeschweißte Stumpfnähte 32
5.5	Klebeverbindungen 33
5.6	Gussstücke 33
5.7	Spannungskollektive 33
5.8	Berechnung von äquivalenten Spannungsschwingbreiten für standardisierte Ermüdungsbelastungs-Modelle 33
5.8.1	Allgemeines 33
5.8.2	Bemessungswert der Spannungsschwingbreite 34
6	Ermüdungswiderstand und Detailkategorien 34
6.1	Detailkategorien 34
6.1.1	Allgemeines 34
6.1.2	Einflussfaktoren für die Detailkategorien 34
6.1.3	Konstruktionsdetails 35
6.2	Werte der Ermüdungsfestigkeit 35
6.2.1	Klassifizierte Konstruktionsdetails 35
6.2.2	Nicht klassifizierte Details 37
6.2.3	Klebeverbindungen 37
6.2.4	Bestimmung der Referenzwerte für die Hot-Spot-Ermüdungsfestigkeit 38
6.3	Einfluss der Mittelspannung 38
6.3.1	Allgemeines 38
6.3.2	Grundwerkstoff und Verbindungen mit mechanischen Verbindungsmitteln 38
6.3.3	Schweißverbindungen 38
6.3.4	Klebeverbindungen 38
6.3.5	Bereich der Kurzzeitfestigkeit 38
6.3.6	Schwingspielzählung für die Berechnung des <i>R</i> -Verhältnisses 39
6.4	Einfluss der Umgebung 39
6.5	Techniken für die Erhöhung der Ermüdungsfestigkeit 39
Anhang A (normativ) Grundlagen der Berechnung der Ermüdungsfestigkeit 40	
A.1	Allgemeines 40
A.1.1	Einfluss der Ermüdung auf die Bemessung 40
A.1.2	Versagensmechanismus 40
A.1.3	Mögliche Stellen für Ermüdungsrisse 41
A.1.4	Bedingungen für die Ermüdungsanfälligkeit 41
A.2	Bemessung für sichere Lebensdauer 42
A.2.1	Voraussetzungen für die Bemessung nach sicherer Lebensdauer 42
A.2.2	Schwingspielzählung 43
A.2.3	Herleitung des Spannungs-Kollektivs 43
A.3	Schadenstolerante Bemessung 46
A.3.1	Voraussetzungen für schadenstolerante Bemessung 46
A.3.2	Festlegung der Inspektionsstrategie bei schadenstoleranter Bemessung 47
Anhang B (informativ) Hinweise für die Bewertung des Rissfortschritts durch Bruchmechanik 50	
B.1	Geltungsbereich 50
B.2	Grundlagen 50
B.2.1	Fehlerabmessungen 50
B.2.2	Rissfortschrittsabhängigkeit 51
B.3	Rissfortschrittsdaten <i>A</i> und <i>m</i> 51
B.4	Geometriefunktion <i>y</i> 53

B.5	Integration des Rissfortschritts	53
B.6	Ermittlung der maximalen Risslänge a_2	53
Anhang C (informativ) Versuche für die Ermüdungsbemessung		63
C.1	Allgemeines	63
C.2	Ermittlung von Belastungsdaten	63
C.2.1	Feste Tragwerke unter mechanischen Belastungen	63
C.2.2	Feste Tragwerke unter Umweltbelastungen	64
C.2.3	Bewegliche Konstruktionen	64
C.3	Ermittlung der Spannungsdaten	65
C.3.1	Versuchsergebnisse aus Bauteilen	65
C.3.2	Versuchsergebnisse aus Tragwerken	65
C.3.3	Bestätigung des Spannungs-Zeit-Verlaufs	65
C.4	Ermittlung von Lebensdauerdaten	66
C.4.1	Bauteilprüfung	66
C.4.2	Großbauteilprüfung	66
C.4.3	Akzeptanzkriterien	67
C.5	Rissfortschrittsdaten	70
C.6	Berichterstattung	70
Anhang D (informativ) Spannungsanalyse		72
D.1	Anwendung von Finiten-Elementen für die Ermüdungsanalyse	72
D.1.1	Elementtypen	72
D.1.2	Weitere Hinweise für die Anwendung finiter Elemente	73
D.2	Spannungskonzentrationsbeiwerte	73
D.3	Ermüdungsbegrenzung bei wiederholtem lokalem Beulen	75
Anhang E (informativ) Klebeverbindungen		76
Anhang F (informativ) Bereich der Kurzzeitfestigkeit		80
F.1	Einleitung	80
F.2	Modifikation der $\Delta\sigma-N$ Kurven	80
F.3	Versuchsergebnisse	80
Anhang G (informativ) Einfluss des R-Verhältnisses		82
G.1	Erhöhung der Ermüdungsfestigkeit	82
G.2	Fälle, die erhöht werden	82
G.2.1	Fall 1	82
G.2.2	Fall 2	83
G.2.3	Fall 3	83
Anhang H (informativ) Verbesserung der Ermüdungsfestigkeit von Schweißnähten		84
H.1	Allgemeines	84
H.2	Maschinelle Bearbeitung oder Schleifen	85
H.3	Nachbearbeitung durch WIG oder Plasma	85
H.4	Strahlen	85
Anhang I (informativ) Gussstücke		86
I.1	Allgemeines	86
I.2	Ermüdungsfestigkeitsdaten	86
I.2.1	Flachguss	86
I.2.2	Geschweißter Werkstoff	86
I.2.3	Mechanisch verbundene Gussstücke	86
I.2.4	Geklebte Gussstücke	87
I.3	Qualitätsanforderungen	87
Anhang J (informativ) Tabellen der Detailkategorien		88
J.1	Allgemeines	88
Anhang K (informativ) Hot-Spot-Referenz-Detail-Methode		110

Anhang L (informativ) Leitfaden für die Anwendung von Bemessungsmethoden, Wahl der Teilsicherheitsbeiwerte, Grenzen für Schadenswerte, Inspektionsintervalle und Kenngrößen für die Ausführung bei Übernahme von Anhang J.....	111
L.1 Schwingbruchsichere Bemessung.....	111
L.2 Schadenstolerante Bemessung.....	112
L.2.1 Allgemeines	112
L.2.2 DTD-I	112
L.2.3 DTD-II	113
L.3 Beginn der Inspektion und Inspektionsintervalle	114
L.4 Teilsicherheitsbeiwerte γ_{Mf} und Werte für D_{lim}.....	115
L.5 Kenngrößen für die Ausführung.....	117
L.5.1 Beanspruchungskategorie	117
L.5.2 Berechnung des Ausnutzungsgrads.....	118
Literaturhinweise	120

Vorwort

Dieses Dokument (EN 1999-1-3:2007) wurde vom Technischen Komitee CEN/TC 250 „Eurocodes für den konstruktiven Ingenieurbau“ erarbeitet, dessen Sekretariat vom BSI gehalten wird.

Diese Europäische Norm muss den Status einer nationalen Norm erhalten, entweder durch Veröffentlichung eines identischen Textes oder durch Anerkennung bis November 2007, und etwaige entgegenstehende nationale Normen müssen bis März 2010 zurückgezogen werden.

Es wird auf die Möglichkeit hingewiesen, dass einige Texte dieses Dokuments Patentrechte berühren können. CEN [und/oder CENELEC] sind nicht dafür verantwortlich, einige oder alle diesbezüglichen Patentrechte zu identifizieren.

Dieses Dokument ersetzt ENV 1999-2:1998.

Entsprechend der CEN/CENELEC-Geschäftsordnung sind die nationalen Normungsinstitute der folgenden Länder gehalten, diese Europäische Norm zu übernehmen: Belgien, Bulgarien, Dänemark, Deutschland, Estland, Finnland, Frankreich, Griechenland, Irland, Island, Italien, Lettland, Litauen, Luxemburg, Malta, Niederlande, Norwegen, Österreich, Polen, Portugal, Rumänien, Schweden, Schweiz, Slowakei, Slowenien, Spanien, Tschechische Republik, Ungarn, Vereinigtes Königreich und Zypern.

Hintergrund des Eurocode-Programmes

Im Jahre 1975 beschloss die Kommission der Europäischen Gemeinschaften, für das Bauwesen ein Aktionsprogramm auf der Grundlage des Artikels 95 der Römischen Verträge durchzuführen. Das Ziel dieses Programms war die Beseitigung technischer Handelshemmnisse und die Harmonisierung technischer Spezifikationen.

Im Rahmen dieses Aktionsprogramms leitete die Kommission die Erarbeitung von harmonisierten technischen Regelwerken für die Tragwerksplanung von Bauwerken ein, welche zunächst als Alternative zu den in den Mitgliedsländern geltenden nationalen Regeln dienen und diese schließlich ersetzen sollten.

15 Jahre leitete die Kommission mit Hilfe eines Lenkungsausschusses mit Vertretern der Mitgliedsländer die Entwicklung des Eurocode-Programmes, das in den 80er Jahren des zwanzigsten Jahrhunderts zu der ersten Eurocode-Generation führte.

Im Jahre 1989 entschieden sich die Kommission und die Mitgliedsländer der Europäischen Union und der EFTA, die Entwicklung, und Veröffentlichung der Eurocodes über eine Reihe von Mandaten an CEN zu übertragen, damit diese den Status von Europäischen Normen (EN) erhielten. Grundlage war eine Vereinbarung¹⁾ zwischen der Kommission und CEN. Dieser Schritt verknüpft die Eurocodes de facto mit den Regelungen der Richtlinien des Rates und mit den Kommissionsentscheidungen, die die Europäischen Normen behandeln (z. B. die Richtlinie des Rates 89/106/EWG zu Bauprodukten (Bauproduktenrichtlinie), die Richtlinien des Rates 93/37/EWG, 92/50/EWG und 89/440/EWG zur Vergabe öffentlicher Aufträge und Dienstleistungen und die entsprechenden EFTA-Richtlinien, die zur Einrichtung des Binnenmarktes eingeführt wurden).

1) Vereinbarung zwischen der Kommission der Europäischen Gemeinschaften und dem Europäischen Komitee für Normung (CEN) zur Bearbeitung der Eurocodes für die Tragwerksplanung von Hochbauten und Ingenieurbauwerken (BC/CEN/03/89).

Das Eurocode-Programm für den Konstruktiven Ingenieurbau umfasst die folgenden Normen, die in der Regel aus mehreren Teilen bestehen:

EN 1990, *Eurocode 0: Grundlagen der Tragwerksplanung*

EN 1991, *Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke*

EN 1992, *Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken*

EN 1993, *Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten*

EN 1994, *Eurocode 4: Bemessung und Konstruktion von Verbundtragwerken aus Stahl und Beton*

EN 1995, *Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauwerken*

EN 1996, *Eurocode 6: Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten*

EN 1997, *Eurocode 7: Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik*

EN 1998, *Eurocode 8: Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben*

EN 1999, *Eurocode 9: Bemessung und Konstruktion von Aluminiumtragwerken*

Die EN-Eurocodes berücksichtigen die Verantwortlichkeit der Bauaufsichtsorgane in den Mitgliedsländern und haben deren Recht zur nationalen Festlegung sicherheitsbezogener Werte berücksichtigt, so dass diese Werte von Land zu Land unterschiedlich bleiben können.

Status und Gültigkeitsbereich der Eurocodes

Die Mitgliedstaaten der EU und der EFTA betrachten die Eurocodes als Bezugsdokumente für folgende Zwecke:

- als Mittel zum Nachweis der Übereinstimmung von Hoch- und Ingenieurbauten mit den wesentlichen Anforderungen der Richtlinie des Rates 89/106/EWG, besonders mit der wesentlichen Anforderung Nr 1. Mechanische Festigkeit und Standsicherheit und der wesentlichen Anforderung Nr 2. Brandschutz;
- als Grundlage für die Spezifizierung von Verträgen für die Ausführung von Bauwerken und die dazu erforderlichen Ingenieurleistungen;
- als Rahmenbedingung für die Erstellung Harmonisierter Technischer Spezifikationen für Bauprodukte (ENs und ETAs).

Die Eurocodes haben, da sie sich auf Bauwerke beziehen, eine direkte Verbindung zu den Grundlagendokumenten²⁾ auf die in Artikel 12 der Bauproduktenrichtlinie hingewiesen wird, wenn sie auch anderer Art sind als die harmonisierten Produktnormen³⁾. Daher sind die technischen Gesichtspunkte, die sich aus den Eurocodes ergeben, von den Technischen Komitees von CEN und den Arbeitsgruppen von EOTA, die an Produktnormen arbeiten, zu beachten, damit diese Produktnormen mit den Eurocodes vollständig kompatibel sind.

Die Eurocodes liefern Regelungen für den Entwurf, die Berechnung und die Bemessung von kompletten Tragwerken und Bauteilen, die sich für die tägliche Anwendung eignen. Sie gehen auf traditionelle Bauweisen und Aspekte innovativer Anwendungen ein, liefern aber keine vollständigen Regelungen für ungewöhnliche Baulösungen und Entwurfsbedingungen. Für diese Fälle sind zusätzliche Spezialkenntnisse für den Bauplaner erforderlich.

Nationale Fassungen der Eurocodes

Die Nationale Fassung eines Eurocodes enthält den vollständigen Text des Eurocodes (einschließlich aller Anhänge), so wie von CEN veröffentlicht, möglicherweise mit einer nationalen Titelseite und einem nationalen Vorwort sowie einem (informativen) Nationalen Anhang.

Der (informative) Nationale Anhang darf nur Hinweise zu den Parametern geben, die im Eurocode für nationale Entscheidungen offen gelassen wurden. Diese so genannten national festzulegenden Parameter (NDP) gelten für die Tragwerksplanung von Hochbauten und Ingenieurbauten in dem Land, in dem sie erstellt werden.

Sie umfassen:

- Zahlenwerte für die Teilsicherheitsbeiwerte und/oder Klassen, wo die Eurocodes Alternativen eröffnen,
- Zahlenwerte, wo die Eurocodes nur Symbole angeben,
- landesspezifische geographische und klimatische Daten, die nur für ein Mitgliedsland gelten, z. B. Schneekarten,
- die Vorgehensweise, wenn die Eurocodes mehrere Verfahren zur Wahl anbieten,
- Hinweise zur Erleichterung der Anwendung der Eurocodes, soweit diese die Eurocodes ergänzen und ihnen nicht widersprechen.

2) Entsprechend Artikel 3.3 der Bauproduktenrichtlinie sind die wesentlichen Anforderungen in Grundlagendokumenten zu konkretisieren, um damit die notwendigen Verbindungen zwischen den wesentlichen Anforderungen und den Mandaten für die Erstellung harmonisierter Europäischer Normen und Richtlinien für die europäische Zulassung selbst zu schaffen.

3) Nach Artikel 12 der Bauproduktenrichtlinie haben die Grundlagendokumente

- a) die wesentlichen Anforderungen zu konkretisieren, indem die Begriffe und, soweit erforderlich, die technische Grundlage für Klassen und Anforderungsstufen vereinheitlicht werden,
- b) Methoden zur Verbindung dieser Klassen oder Anforderungsstufen mit technischen Spezifikationen anzugeben, z. B. Berechnungs- oder Nachweisverfahren, technische Entwurfsregeln usw.,
- c) als Bezugsdokumente für die Erstellung harmonisierter Normen oder Richtlinien für Europäische Technische Zulassungen zu dienen.

Die Eurocodes spielen de facto eine ähnliche Rolle für die wesentliche Anforderung Nr. 1 und einen Teil der wesentlichen Anforderung Nr. 2.

Verhältnis zwischen den Eurocodes und den harmonisierten Technischen Spezifikationen für Bauprodukte (ENs und ETAs)

Es besteht die Notwendigkeit, dass die harmonisierten Technischen Spezifikationen für Bauprodukte und die technischen Regelungen für die Tragwerksplanung⁴⁾ konsistent sind. Insbesondere sollten alle Hinweise, die mit der CE-Kennzeichnung von Bauprodukten verbunden sind und die die Eurocodes in Bezug nehmen, klar erkennen lassen, welche national festzulegenden Parameter (NDP) zugrunde liegen.

Besondere Hinweise zu EN 1999-1-3

Es ist vorgesehen, EN 1999 gemeinsam mit den Eurocodes EN 1990 – Grundlagen der Tragwerksplanung, EN 1991 – Einwirkungen auf Tragwerke sowie EN 1992 bis EN 1999, soweit hierin auf Tragwerke aus Aluminium oder Bauteile aus Aluminium Bezug genommen wird, anzuwenden.

EN 1999-1-3 ist einer von fünf Teilen von EN 1999 (EN 1999-1-1 bis EN 1999-1-5), die jeweils spezifische Bauteile aus Aluminium, Grenzzustände oder Tragwerksarten behandeln. EN 1999-1-3 beschreibt die Grundlagen, die Anforderungen und die Regeln für die konstruktive Bemessung von Bauteilen und Tragwerken aus Aluminium, die Ermüdungsbeanspruchungen ausgesetzt sind.

Die Zahlenwerte für die Teilsicherheitsbeiwerte und andere Parameter, die die Zuverlässigkeit festlegen, gelten als Empfehlungen, mit denen ein akzeptables Zuverlässigkeitsniveau erreicht werden soll. Bei ihrer Festlegung wurde vorausgesetzt, dass ein angemessenes Niveau der Ausführungsqualität und Qualitätsprüfung vorhanden ist.

Nationaler Anhang für EN 1999-1-3

Diese Norm enthält alternative Verfahren, Zahlenwerte und Empfehlungen für Klassen zusammen mit Anmerkungen, an welchen Stellen nationale Festlegungen möglicherweise getroffen werden müssen. Deshalb sollte die jeweilige nationale Ausgabe von EN 1999-1-3 einen Nationalen Anhang mit allen national festzulegenden Parametern enthalten, die für die Bemessung und Konstruktion von Aluminiumtragwerken, die in dem Ausgabeland gebaut werden sollen, erforderlich sind.

Nationale Festlegungen sind in den folgenden Abschnitten von EN 1999-1-3 erlaubt:

- | | | |
|---------------------------|--|---------------------------|
| — $\boxed{A_1}$ 2.1.1 (1) | — 6.2.1 (2) | — L.3 (2) |
| — 2.2.1 (4) | — 6.2.1 (7) | — L.4 (3) |
| — 2.3.1 (2) $\boxed{A_1}$ | — 6.2.1 (11) | — L.4 (4) |
| — 2.3.2 (6) | — $\boxed{A_1}$ <i>gestrichener Text</i> $\boxed{A_1}$ | — L.4 (5) |
| — 2.4 (1) | — E (5) | — L.5.1 (1) $\boxed{A_1}$ |
| — 3 (1) | — E (7) | |
| — 4 (2) | — I.2.2 (1) | |
| — 5.8.1 (1) | — I.2.3.2 (1) | |
| — 5.8.2 (1) | — I.2.4 (1) | |
| — 6.1.3 (1) | — $\boxed{A_1}$ L.2.2 (5) | |

4) Siehe Artikel 3.3 und Art. 12 der Bauproduktenrichtlinie ebenso wie die Abschnitte 4.2, 4.3.1, 4.3.2 und 5.2 des Grundlagendokumentes Nr. 1.

Vorwort der Änderung A1

Dieses Dokument (EN 1999-1-3:2007/A1:2011) wurde vom Technischen Komitee CEN/TC 250 „Eurocodes für den konstruktiven Ingenieurbau“ erarbeitet, dessen Sekretariat vom BSI gehalten wird.

Diese Änderung zur Europäischen Norm EN 1999-1-3:2007 muss den Status einer nationalen Norm erhalten, entweder durch Veröffentlichung eines identischen Textes oder durch Anerkennung bis August 2012, und etwaige entgegenstehende nationale Normen müssen bis August 2012 zurückgezogen werden.

Es wird auf die Möglichkeit hingewiesen, dass einige Texte dieses Dokuments Patentrechte berühren können. CEN [und/oder CENELEC] sind nicht dafür verantwortlich, einige oder alle diesbezüglichen Patentrechte zu identifizieren.

Entsprechend der CEN/CENELEC-Geschäftsordnung sind die nationalen Normungsinstitute der folgenden Länder gehalten, diese Europäische Norm zu übernehmen: Belgien, Bulgarien, Dänemark, Deutschland, Estland, Finnland, Frankreich, Griechenland, Irland, Island, Italien, Kroatien, Lettland, Litauen, Luxemburg, Malta, Niederlande, Norwegen, Österreich, Polen, Portugal, Rumänien, Schweden, Schweiz, Slowakei, Slowenien, Spanien, Tschechische Republik, Ungarn, Vereinigtes Königreich und Zypern.

1 Allgemeines

1.1 Anwendungsbereich

1.1.1 Anwendungsbereich von EN 1999

(1)P EN 1999 gilt für den Entwurf, die Berechnung und die Bemessung von Bauwerken und Tragwerken aus Aluminium. Sie entspricht den Grundsätzen und Anforderungen an die Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit von Tragwerken, sowie den Grundlagen für ihre Bemessung und Nachweise, die in EN 1990 – Grundlagen der Tragwerksplanung – enthalten sind.

(2) EN 1999 behandelt ausschließlich Anforderungen an die Tragfähigkeit, die Gebrauchstauglichkeit, die Dauerhaftigkeit und den Feuerwiderstand von Tragwerken aus Aluminium. Andere Anforderungen, wie z. B. Wärmeschutz oder Schallschutz, werden nicht behandelt.

(3) EN 1999 gilt in Verbindung mit folgenden Regelwerken:

- EN 1990: „Grundlagen der Tragwerksplanung“
- EN 1991: „Einwirkungen auf Tragwerke“
- Europäische Normen für Bauprodukte, die für Aluminiumtragwerke Verwendung finden
- EN 1090-1: „Ausführung von Stahltragwerken und Aluminiumtragwerken“ — Konformitätsnachweisverfahren für tragende Bauteile⁵⁾
- EN 1090-3: „Ausführung von Stahltragwerken und Aluminiumtragwerken — Teil 3: Technische Anforderungen für Aluminiumtragwerke“⁶⁾

(4) EN 1999 ist in fünf Teile gegliedert:

EN 1999-1-1, „Bemessung und Konstruktion von Aluminiumtragwerken — Allgemeine Bemessungsregeln“

EN 1999-1-2, „Bemessung und Konstruktion von Aluminiumtragwerken — Tragwerksbemessung für den Brandfall“

EN 1999-1-3, „Bemessung und Konstruktion von Aluminiumtragwerken — Ermüdungsbeanspruchte Tragwerke“

EN 1999-1-4, „Bemessung und Konstruktion von Aluminiumtragwerken — Kaltgeformte Profiltafeln“

EN 1999-1-5, „Bemessung und Konstruktion von Aluminiumtragwerken — Schalentragwerke“

1.1.2 Anwendungsbereich von EN 1999-1-3

(1) EN 1999-1-3 gibt die Grundlagen für die Bemessung von Tragwerken aus Aluminiumlegierungen in Bezug auf den Grenzzustand der Ermüdungsfestigkeit.

(2) EN 1999-1-3 enthält Regeln für:

- schwingbruchsichere Bemessung;
- schadenstolerante Bemessung;
- versuchsunterstützte Bemessung.

5) Wird in Kürze veröffentlicht.

6) Wird in Kürze veröffentlicht.

(3) Es ist vorgesehen, dass EN 1999-1-3 in Verbindung mit EN 1090-3 „Technische Anforderungen für Aluminiumtragwerke“, die die erforderlichen Anforderungen zur Erfüllung der Bemessungsannahmen während der Ausführung von Bauteilen und Tragwerken enthält, angewendet wird.

(4) Druckbehälter oder -rohrleitungen sind nicht Gegenstand von EN 1999-1-3.

(5) EN 1999-1-3 behandelt die folgenden Themen:

Kapitel 1: Allgemeines

Kapitel 2: Grundlagen der Bemessung

Kapitel 3: Werkstoffe, Produktbestandteile und Verbindungsmittel

Kapitel 4: Dauerhaftigkeit

Kapitel 5: Strukturanalyse

Kapitel 6: Ermüdungswiderstand und Detailkategorien

Anhang A: Grundlagen der Berechnung der Ermüdungsfestigkeit [normativ]

Anhang B: Hinweise für die Bewertung des Rissfortschritts durch Bruchmechanik [informativ]

Anhang C: Versuche für die Ermüdungsbemessung [informativ]

Anhang D: Spannungsanalyse [informativ]

Anhang E: Klebeverbindungen [informativ]

Anhang F: Bereich der Kurzzeitfestigkeit [informativ]

Anhang G: Einfluss des *R*-Verhältnisses [informativ]

Anhang H: Verbesserung der Ermüdungsfestigkeit von Schweißnähten [informativ]

Anhang I: Gussstücke [informativ]

Anhang J: Tabellen der Detailkategorien [informativ]

Anhang K: Hot-Spot-Referenz-Detail-Methode [informativ]

Literaturhinweise

1.2 Normative Verweisungen

(1) Es gelten die normativen Verweisungen aus EN 1999-1-1.

1.3 Annahmen

(1)P Es gelten die allgemeinen Annahmen nach EN 1990, 1.3.

(2)P Es gelten die Festlegungen nach EN 1999-1-1, 1.8.

(3)P Die Bemessungsverfahren gelten nur, wenn die in EN 1090-3 angegebenen Anforderungen an die Ausführung oder andere, entsprechende Bedingungen erfüllt werden.

1.4 Unterscheidung zwischen Prinzipien und Anwendungsregeln

(1)P Es gelten die Regeln nach EN 1990, 1.4.

1.5 Definitionen

1.5.1 Allgemeines

(1) Es gelten die Regeln der EN 1990, 1.5.

1.5.2 Zusätzliche Begriffe, die in EN 1999-1-3 verwendet werden

(1) Für diese Norm werden zusätzlich zu den Begriffen der EN 1990 und EN 1999-1-1 die Folgenden verwendet:

1.5.2.1

Ermüdung

Schwächung eines Bauteils infolge Rissentstehung und Rissfortschritt, hervorgerufen durch wiederholte Spannungsschwankungen

1.5.2.2

Ermüdungsbelastung

eine Reihe typischer Belastungsereignisse, beschrieben durch die Anordnung oder Bewegung von Lasten, deren Größe, Häufigkeit und Reihenfolge ihres Auftretens

1.5.2.3

Belastungsereignis

eine definierte Folge von auf das Tragwerk aufgebrachten Lasten, die für Bemessungszwecke mit einer bestimmten Auftretenshäufigkeit angenommen wird

1.5.2.4

Nennspannung

Spannung im Grundwerkstoff unmittelbar an einer potentiellen Rissstelle, berechnet nach der elastischen Spannungstheorie für Werkstoffe, d. h. dass ebene Querschnitte eben bleiben und sämtliche Spannungskonzentrations-Einflüsse nicht berücksichtigt werden

1.5.2.5

modifizierte Nennspannung

eine Nennspannung, vergrößert um den maßgebenden geometrischen Spannungskonzentrations-Beiwert K_{gt} , der die geometrischen Abweichungen des Querschnitts erfasst, die bei der Einstufung eines bestimmten Konstruktionsdetails nicht berücksichtigt wurden

1.5.2.6

Strukturspannung (auch als „geometrische Spannung“ bekannt)

elastische Spannung an einer Stelle, bei Berücksichtigung sämtlicher geometrischer Kerben, jedoch unter Vernachlässigung jeder lokalen Singularität, wo der Übergangsradius gegen Null tendiert, wie z. B. an Kerben infolge kleiner Diskontinuitäten, wie Schweißnahtübergänge, Risse, rissähnlicher Merkmale, normale maschinelle Bearbeitungsspuren usw. Bei der Strukturspannung handelt es sich im Prinzip um den gleichen Spannungsparameter wie bei der modifizierten Nennspannung, die aber im allgemeinen anders berechnet wird

1.5.2.7

geometrischer Spannungskonzentrations-Beiwert

Verhältnis zwischen der geometrischen Spannung, berechnet unter der Annahme linear-elastischen Werkstoff-Verhaltens, und der Nennspannung

1.5.2.8

Hot-Spot Spannung

geometrische Spannung an einer bestimmten Rissentstehungsstelle bei einer besonderen Geometrie des Details, wie bei einem Schweißnahtübergang an einem schrägen Hohlprofilquerschnitt-Anschluss, für die Ermüdungsfestigkeit, ausgedrückt als Hot-Spot-Spannungsschwingbreite, meistens bekannt ist

1.5.2.9

Spannungs-Zeit-Verlauf

kontinuierlicher Verlauf, aufgezeichnet oder berechnet, für die Spannungsschwankung an einem besonderen Punkt des Tragwerks innerhalb eines bestimmten Zeitintervalls

1.5.2.10

Spannungs-Umkehr-Punkt

Spannungswert im Spannungs-Zeit-Verlauf, an dem die Spannungsänderungsrate ihr Vorzeichen ändert

1.5.2.12

Spannungsspitze

Umkehrpunkt, an dem die Spannungsänderungsrate von positiv auf negativ umschaltet

1.5.2.12

Spannungstiefpunkt

Umkehrpunkt, an dem die Spannungsänderungsrate von negativ auf positiv umschaltet

1.5.2.13

konstante Amplitude

Spannungsamplitude in einem Spannungs-Zeit-Verlauf, bei dem die Spannung sich zwischen konstanten Spannungsspitzen und konstanten Spannungstiefpunkten bewegt

1.5.2.14

variable Amplitude

Spannungsamplitude in jedem Spannungs-Zeit-Verlauf mit mehr als einem Wert der Spannungsspitzen oder Spannungstiefpunkten

1.5.2.15

Spannungsschwingspiel

Schwingspiel

Element einer Schwing-Einstufenbeanspruchung bei dem die Spannung bei einem Wert beginnt und beim gleichen Wert endet und dabei durch ein Maximum und ein Minimum (oder in umgekehrter Folge) verläuft; auch: Element eines mit einer Zählmethode ermittelten Schwingbeanspruchungskollektivs

1.5.2.16

Schwingspiel-Zählverfahren

Ablauf zur Transformation eines Spannungs-Zeit-Verlaufs mit variabler Amplitude in ein Kollektiv von Spannungsschwingspielen, jedes mit einer bestimmten Spannungsschwingbreite, so z. B. die Reservoir-Methode und die Rainflow-Methode

1.5.2.17

Rainflow-Methode

spezielles Schwingspiel-Zählverfahren zur Ermittlung eines Kollektivs von Spannungsschwingbreiten aus einem vorhandenen Spannungs-Zeit-Verlauf

1.5.2.18

Reservoir-Methode

spezielles Schwingspiel-Zählverfahren zur Ermittlung eines Kollektivs von Spannungsschwingbreiten aus einem vorhandenen Spannungs-Zeit-Verlauf

1.5.2.19

Spannungs-Amplitude

Hälfte des Wertes der Spannungsschwingbreite

1.5.2.20

Spannungsverhältnis

Verhältnis zwischen Minimal- und Maximalspannung in einem Spannungs-Zeit-Verlauf konstanter Amplitude oder einem Schwingspiel, das aus einem Spannungs-Zeit-Verlauf variabler Amplitude hergeleitet wird

1.5.2.21

Spannungsintensitäts-Verhältnis

minimale Spannungsintensität dividiert durch die maximale Spannungsintensität, die aus einem Spannungs-Zeit-Verlauf konstanter Amplitude oder einem Schwingspiel eines Spannungs-Zeit-Verlaufs variabler Amplitude hergeleitet werden

1.5.2.22

Mittelspannung

arithmetisches Mittel der algebraischen Summe vom höchsten und niedrigsten Spannungswert

1.5.2.23

Spannungsschwingbreite

algebraische Differenz zwischen der Spannungsspitze und dem Spannungstiefpunkt in einem Spannungsschwingspiel

1.5.2.24

Spannungsintensitäts-Schwingbreite

algebraische Differenz zwischen der höchsten und niedrigsten Spannungsintensität, die aus der Spannungsspitze bzw. dem Spannungstiefpunkt in einem Spannungsschwingspiel ermittelt werden

1.5.2.25

Spannungsschwingbreiten-Kollektiv (auch als „Spannungs-Kollektiv“ bekannt)

Histogramm zur Darstellung der Auftretenshäufigkeit für alle Spannungsschwingbreiten verschiedener Größe aus der Messung oder Berechnung für ein besonderes Belastungsereignis

1.5.2.26

Bemessungs-Kollektiv

Gesamtheit aller Spannungsschwingbreiten-Kollektive, die für den Ermüdungsnachweis zugrunde gelegt werden

1.5.2.27

Detailkategorie

Bezeichnung einer bestimmten Entstehungsstelle für die Ermüdung bei einer bestimmten Richtung der Spannungsschwankung, zwecks Zuordnung einer Ermüdungsfestigkeitskurve für den Ermüdungsnachweis

1.5.2.28

Lebensdauer

Lebensdauer beim Versagen, ausgedrückt als Anzahl der Schwingspiele bis zum Bruch, bei Einwirkung eines Spannungs-Zeit-Verlaufs konstanter Spannungsamplitude

1.5.2.29

Ermüdungsfestigkeitskurve (Wöhlerkurve)

quantitative Beziehung zwischen der Spannungsschwingbreite und der Lebensdauer – in logarithmischen Koordinaten in dieser Norm –, die für den Ermüdungsnachweis einer Konstruktionsdetail-Kategorie verwendet wird

1.5.2.30

charakteristische Ermüdungsfestigkeit

Spannungsschwingbreite bei konstanter Amplitude $\Delta\sigma_C$ für eine bestimmte Detailkategorie bei der Lebensdauer von $N_C = 2 \times 10^6$ Schwingspiele

1.5.2.31

Dauerfestigkeit

Wert der Spannungsschwingbreite, unterhalb dem alle Spannungsschwingbreiten eines Bemessungskollektivs liegen sollten, damit ein Ermüdungsschaden ignoriert werden darf

1.5.2.32

Schwellenwert der Ermüdungsfestigkeit

Grenzwert, unterhalb dem Spannungsschwingbreiten des Bemessungskollektivs bei der Schadensakkumulations-Berechnung vernachlässigt werden dürfen

1.5.2.33

Bemessungslebensdauer

Bezugszeitraum, für den ein sicheres Tragwerksverhalten, d. h. dass mit ausreichender Wahrscheinlichkeit kein Versagen infolge Ermüdungsrisse eintritt, verlangt wird

1.5.2.34

sichere Lebensdauer

Zeitraum, für den sich mit ausreichender Wahrscheinlichkeit nach einer schwingbruchsicheren Bemessung kein Versagen infolge Ermüdung ergibt

1.5.2.35

Schadenstoleranz

Fähigkeit des Tragwerks, Ermüdungsrisse aufzunehmen, ohne dass es zum Versagen oder zur negativen Beeinträchtigung der Gebrauchstauglichkeit kommt

1.5.2.36

Ermüdungsschaden

Verhältnis der für eine bestimmte Betriebszeit zu ertragenden Spannungsschwingweite eines Konstruktionsdetails bei einer gegebenen Spannungsschwingbreite zur Lebensdauer unter der gleichen Beanspruchungsschwingbreite

1.5.2.37

Miner-Regel

Schadensakkumulation infolge aller Spannungsschwingweite eines Spannungsschwingbreiten-Kollektivs (oder eines Bemessungs-Kollektivs) nach der Palmgren-Miner-Regel

1.5.2.38

schadensäquivalente Ermüdungsbelastung

vereinfachte Ermüdungsbelastung, meist eine Einzellast bei vorgegebener Zahl der Wiederholungen, so dass diese anstelle einer realistischeren Belastungsreihe, im Rahmen bestimmter Voraussetzungen, mit hinreichender Annäherung einen äquivalenten Ermüdungsschaden hervorruft

1.5.2.39

schadensäquivalente Spannungsschwingbreite

durch die Einwirkung einer schadensäquivalenten Ermüdungsbelastung an einem Konstruktionsdetail hervorgerufene Spannungsschwingbreite

1.5.2.40

Schadensäquivalente Ermüdungsbelastung konstanter Amplitude

vereinfachte Ermüdungsbelastung mit konstanter Amplitude, die den gleichen Ermüdungsschaden hervorruft wie eine reelle Belastungsreihe variabler Amplitude

1.6 Symbole

A	Werkstoff-Konstante bei Berechnung der Rissfortschrittgeschwindigkeit
a	Kehlnahtdicke
a	Risslänge
a_c	Rissbreite an der Oberfläche
da/dN	Rissfortschrittgeschwindigkeit (m/Schwingspiel)
D	Ermüdungsschaden-Wert, berechnet für eine bestimmte Betriebsdauer
D_L	Ermüdungsschaden-Wert, berechnet für die gesamte Lebensdauer
$\langle A_1 \rangle D_{L,d}$	für die gesamte Bemessungslebensdauer berechneter Bemessungswert des Ermüdungsschadens $\langle A_1 \rangle$
D_{lim}	vorgeschriebener Bemessungs-Grenzwert für D_L
$f_{V,adh}$	Charakteristische Schubfestigkeit eines Klebers
K_{gt}	Geometrischer Spannungskonzentrations-Beiwert
K	Spannungsintensität
ΔK	Spannungsintensitäts-Schwingbreite
k_{adh}	Beiwert der Ermüdungsfestigkeit für Klebeverbindungen
k_F	Anzahl der Standardabweichungen über dem vorhergesagten Mittelwert der Belastung
k_N	Anzahl der Standardabweichungen über dem vorhergesagten Mittelwert der Anzahl der Belastungszyklen
L_{adh}	Wirksame Länge von überlappten Klebeverbindungen
l_d	Minimale wahrnehmbare Risslänge
l_f	Bruchkritische Risslänge
\log	Logarithmus zur Basis 10
m	Neigung einer $\log \Delta \sigma - \log N$ Ermüdungsfestigkeitskurve bzw. Exponent im mathematischen Ausdruck der Rissfortschrittgeschwindigkeit
m_1	Wert von m für $N \leq 5 \times 10^6$ Schwingspiele
m_2	Wert von m für $5 \times 10^6 < N \leq 10^8$ Schwingspiele
N	Anzahl (oder gesamte Anzahl) der Schwingspiele
N_i	$\langle A_1 \rangle$ vorausgesetzte Anzahl von Schwingspielen bis zum Versagen bei der Spannungsschwingbreite $\Delta \sigma_i \langle A_1 \rangle$
N_C	Anzahl der Schwingspiele (2×10^6), bei der die charakteristische Ermüdungsfestigkeit definiert ist
N_D	Anzahl der Schwingspiele (5×10^6), bei der die Dauerfestigkeit bei konstanter Amplitude definiert ist
N_L	Anzahl der Schwingspiele (10^8), bei der der Schwellenwert der Ermüdungsfestigkeit definiert ist
n_i	Anzahl der Schwingspiele bei der Spannungsschwingbreite $\Delta \sigma_i$
P	Wahrscheinlichkeit

R	Spannungsverhältnis
t	Dicke
$\boxed{A1} T_i$	Inspektionsintervall
T_F	Zeitraum nach Fertigstellung, der für den Beginn der Inspektion auf Ermüdung empfohlen wird; dabei beinhaltet die Inspektion auf Ermüdung die Inspektion von Bereichen mit einer erhöhten Rissentstehungswahrscheinlichkeit
T_G	Zeitraum nach Fertigstellung, der für den Beginn der allgemeinen Inspektion empfohlen wird; dabei beinhaltet die allgemeine Inspektion die Prüfung, dass sich das Tragwerk (weiterhin) in dem Zustand nach der Fertigstellung und Abnahme befindet, d. h. dass keine Verschlechterung des Zustands eingetreten ist, wie z. B. Verschlechterungen durch Hinzukommen von schädlichen Löchern und oder Schweißnähten zur Befestigung von Zusatzelementen, Schäden auf Grund von Vandalismus oder Unfällen, unerwartete Korrosion, usw. $\boxed{A1}$
T_f	Zeit für das Wachstum eines wahrnehmbaren Risses bis zu einer versagungskritischen Größe
T_L	Bemessungslebensdauer
T_S	Sichere Lebensdauer
y	von der Rissgeometrie abhängiger Faktor in der Berechnungsformel der Rissfortschrittsgeschwindigkeit
$\boxed{A1} \lambda_i$	schadensäquivalenter Beiwert, abhängig von der Lastsituation und den konstruktiven Merkmalen sowie von anderen Faktoren
γ_{Ff}	Teilsicherheitsbeiwert für die Ermüdungsbelastung
γ_{Mf}	Teilsicherheitsbeiwert für die Ermüdungsfestigkeit
$\Delta\sigma$	Schwingbreite der Nennspannung (Normalspannung) ANMERKUNG Abhängig vom Kontext bezieht sich $\Delta\sigma$ entweder auf die Schnittgrößen oder auf die Ermüdungsfestigkeit.
$\Delta\tau$	effektive Schwingbreite der Schubspannung
$\Delta\sigma_i$	konstante Spannungsschwingbreite für die Hauptspannungen im Konstruktionsdetail für n_i Schwingspiele;
$\Delta\sigma_C$	Referenzwert der Ermüdungsfestigkeit bei 2×10^6 Schwingspielen (Normalspannung)
$\Delta\sigma_D$	Dauerfestigkeit
$\Delta\sigma_E$	Schwingbreite der Nennspannung aus Ermüdungsbeanspruchungen
$\Delta\sigma_{E,Ne}$	schadensäquivalente Spannungsschwingbreite konstanter Amplitude bei N_{max}
$\Delta\sigma_{E,2e}$	schadensäquivalente Spannungsschwingbreite konstanter Amplitude bei 2×10^6 Schwingspielen
$\Delta\sigma_L$	Schwellenwert der Ermüdungsfestigkeit
$\Delta\sigma_R$	Ermüdungsfestigkeit (Normalspannung)
ΔT_F	empfohlenes maximales Zeitintervall für die Inspektion auf Ermüdung
ΔT_G	empfohlenes maximales Zeitintervall für die allgemeine Inspektion
$\sigma_{max}, \sigma_{min}$	Maximal- bzw. Minimalwert der Spannungen in einem Schwingspiel
σ_m	Mittelspannung $\boxed{A1}$

1.7 Spezifikationen für die Ausführung

1.7.1 Ausführungsspezifikation

(1) Die Ausführungsspezifikation sollte alle Anforderungen an die Materialvorbereitung, Montage, Verbindung, Nachbehandlung sowie Inspektion beinhalten, um die gewünschte Ermüdungsfestigkeiten zu erreichen.

1.7.2 Betriebsbuch

(1) Das Betriebsbuch sollte enthalten:

- Einzelheiten für die Ermüdungsbelastung und die in der Bemessung angenommene Bemessungslebensdauer;
- jede erforderliche Maßnahme zur Beobachtung der Belastungshöhe und -Häufigkeit im Betrieb;
- das Verbot künftiger Änderungen am Tragwerk, bspw. Bohren von Löchern oder Anbringen von Anschweißungen, ohne fachgerechte Analyse der Auswirkungen auf das Tragwerksverhalten;
- Instruktionen für den Aus- und Wiedereinbau von Bauteilen, beispielsweise das Festmachen von Befestigungsmitteln;
- akzeptable Reparaturmethoden im Falle von zufälligen Beschädigungen während des Betriebs (z. B. Kerben, Beulen, Risse, etc.).

1.7.3 Prüf- und Wartungsbuch

(1) Das Prüf- und Wartungsbuch sollte einen Zeitplan jeder im Betrieb erforderlichen Inspektion von ermüdungskritischen Teilen enthalten. Besonders in Fällen, bei denen eine schadenstolerante Bemessung durchgeführt wurde, sollte dieses Folgendes enthalten:

- Die Inspektionsmethoden;
- die zu untersuchenden Stellen;
- die Häufigkeit der Inspektionen;
- die maximal zulässige Rissgröße vor einer erforderlichen Ausbesserung;
- Details akzeptabler Reparaturmethoden oder des Auswechselns von Teilen mit Ermüdungsrissen.

2 Grundlagen der Bemessung



2.1 Allgemeines

2.1.1 Grundlegende Anforderungen

(1)P Ziel der Bemessung eines Tragwerks gegen den Grenzzustand der Ermüdung ist, mit einem akzeptablen Wahrscheinlichkeitsniveau ein zufriedenstellendes Verhalten des Tragwerks während seiner gesamten Bemessungslebensdauer sicherzustellen, damit das Tragwerk während der Bemessungslebensdauer nicht infolge Ermüdung versagt bzw. es nicht wahrscheinlich ist, dass vorzeitige reparaturbedürftige Schäden durch Ermüdung entstehen. Die Bemessung von Aluminiumtragwerken gegen den Grenzzustand der Ermüdung darf auf einer der folgenden Methoden beruhen:

- a) Bemessung nach dem Konzept der sicheren Lebensdauer (schwingbruchsichere Bemessung - SLD, *safe life design*) (siehe 2.2.1);
- b) Bemessung nach dem Konzept der Schadenstoleranz (schadenstolerante Bemessung DTD, *damage tolerant design*) (siehe 2.2.2).

Jede der Methoden a) und b) darf durch versuchsunterstützte Bemessung ergänzt oder ersetzt werden (siehe 2.2.3).

ANMERKUNG Der Nationale Anhang darf die Bedingungen für die Anwendung der oben angegebenen Bemessungsmethoden angeben.

(2) Die Methode für die Bemessung gegen Ermüdung sollte unter Berücksichtigung der Nutzung des Tragwerks und der für die Bauteile festgelegten Schadensfolgeklasse gewählt werden. Insbesondere sollte die Zugänglichkeit der Bauteile für die Inspektion und die Einzelheiten der Stellen, an denen Ermüdungsrisse zu erwarten sind, berücksichtigt werden.

(3) Ein Ermüdungsnachweis der Bauteile und Tragwerke sollte in den Fällen in Erwägung gezogen werden, in denen sich die Lasten häufig ändern, insbesondere bei Lastumkehr. Situationen, in denen dies gewöhnlich geschehen kann, sind z. B. wenn

- Bauteile durch Lasten von Hebezeugen oder rollende Lasten beansprucht werden;
- Bauteile wiederholten Belastungen ausgesetzt sind, die durch Schwingungen von Maschinen verursacht werden;
- Bauteile vom Wind verursachten Schwingungen ausgesetzt sind;
- Bauteile von Menschenmengen verursachten Schwingungen ausgesetzt sind;
- bei fliegenden Bauten Beschleunigungskräfte auftreten;
- Bauteile Schwingungen ausgesetzt sind, die durch Flüssigkeitsströmungen oder Welleneinwirkungen verursacht werden.

ANMERKUNG Die in dieser Norm angegebenen Regeln bezüglich der Ermüdungsfestigkeit gelten in der Regel für die Ermüdung bei hohen Lastspielzahlen. Hinweise für die Ermüdung bei niedrigen Lastspielzahlen sind Anhang F zu entnehmen.

(4) Die Bemessungsregeln der anderen Teilen von EN 1999 gelten ebenfalls.

2.2 Bemessungsmethoden gegen Ermüdung

2.2.1 Schwingbruchsichere Bemessung (SLD)

(1) Die Methode der schwingbruchsicheren Bemessung basiert auf der Berechnung des während der Bemessungslebensdauer des Tragwerks akkumulierten Schadens oder dem Vergleich der maximalen Spannungsschwingbreite mit der Dauerfestigkeit unter Verwendung einer standardmäßigen unteren Grenze für die Ermüdungsfestigkeit und einer oberen Grenze für die geschätzte Ermüdungsbelastung; dabei beruhen alle Berechnungen auf Bemessungswerten. Dieser Ansatz bietet eine konservative Abschätzung der Ermüdungsfestigkeit und hängt in der Regel nicht von einer betrieblichen Inspektion auf Ermüdungsschäden ab.

ANMERKUNG Arten möglicher betrieblicher Inspektionen sind L.1 zu entnehmen; sie gelten nur bei Übernahme der in Anhang J enthaltenen Ermüdungswiderstandsdaten.

(2) Die Bemessung gegen Ermüdung beinhaltet die Vorhersage von Spannung-Zeit-Verläufen an potentiellen Rissentehungsstellen, gefolgt durch die Zählung von Belastungszyklen mit den zugehörigen Spannungsschwingbreiten und die Aufstellung von Spannungs-Kollektiven. Anhand dieser Informationen wird für das betrachtete Konstruktionsdetail mit Hilfe einschlägiger Lebensdauerdaten bei der gegebenen Spannungsschwingbreite die Bemessungslebensdauer abgeschätzt. Dieses Verfahren ist in A.2 beschrieben.

(3) Um einen ausreichenden Widerstand des Bauteils oder Tragwerks sicherzustellen, darf der Bemessung nach dem Konzept der sicheren Lebensdauer eine von zwei verschiedenen Methoden zugrunde gelegt werden. Diese beruhen

- a) auf der Berechnung der linearen Schadensakkumulation, siehe (4); oder
- b) dem Ansatz mit äquivalenten Spannungsschwingbreiten, siehe (5).

ANMERKUNG Eine dritte Methode für den Fall, dass alle Bemessungs-Spannungsschwingbreiten die Bemessungs-Dauerfestigkeit unterschreiten, ist in L.1(4) angegeben.

(4) Bei der schwingbruchsicheren Bemessung auf der Grundlage der Annahme der linearen Schadensakkumulation (Miner-Regel) sollte der Ermüdungsschaden D_L aller Spannungsschwingspiele die folgende Bedingung erfüllen:

$$D_{L,d} \leq 1 \quad (2.1 \text{ a})$$

Dabei ist

$$D_{L,d} = \sum n_i / N_i, \text{ berechnet nach der in A.2 angegebenen Methode;}$$

oder

$$D_L \leq D_{lim} \quad (2.1 \text{ b})$$

Dabei ist

$$D_L = \sum n_i / N_i, \text{ berechnet nach der in A.2 angegebenen Methode mit } \gamma_{Mf} = \gamma_{Ff} = 1,0.$$

ANMERKUNG Der Wert für D_{lim} darf im Nationalen Anhang festgelegt werden, siehe L.4. Empfohlene Werte für D_{lim} sind in L.4 angegeben; sie gelten nur bei Übernahme der in Anhang J enthaltenen Ermüdungswiderstandsdaten.

(5) Falls die Bemessung auf dem Ansatz mit äquivalenten Spannungsschwingbreiten ($\Delta\sigma_{E,2e}$) beruht, sollte die folgende Bedingung erfüllt werden:

$$\frac{\gamma_{Ff} \Delta\sigma_{E,2e}}{\Delta\sigma_C / \gamma_{Mf}} \leq 1 \quad (2.2)$$

ANMERKUNG Empfohlene Werte für γ_{Mf} sind in L.4 angegeben. Für γ_{Ff} siehe 2.4.

2.2.2 Schadenstolerante Bemessung (DTD)

(1)P Eine schadenstolerante Bemessung erfordert, dass ein vorgeschriebenes Inspektions- und Wartungsprogramm zur Feststellung und zur Behebung von Ermüdungsschäden erstellt und während der Bemessungslebensdauer des Tragwerks befolgt wird. Die Bemessung sollte zu einer Ausführungsqualität führen, bei der davon ausgegangen werden kann, dass das Verhalten eines Tragwerks während der Bemessungslebensdauer einwandfrei ist. Die Voraussetzungen für die Anwendung dieser Methode und für die Festlegung einer Inspektionsstrategie sind A.3 zu entnehmen.

ANMERKUNG 1 Die Bemessung nach dem Konzept der Schadenstoleranz kann in solchen Anwendungen als geeignet angesehen werden, bei denen die Bewertung nach dem Konzept der sicheren Lebensdauer zeigt, dass die Ermüdung einen signifikanten Einfluss auf die Kosten der konstruktiven Ausführung hat und dass ein höheres Ermüdungsrisiko während der Bemessungslebensdauer hingenommen werden kann als bei Anwendung der Regeln der Bemessung nach dem Konzept der sicheren Lebensdauer. Dieser Ansatz wurde entwickelt mit dem Ziel, das gleiche Zuverlässigkeitsniveau zu erreichen wie die Bemessung nach dem Konzept der sicheren Lebensdauer.

ANMERKUNG 2 Die Bemessung nach dem Konzept der Schadenstoleranz darf mit zwei verschiedenen Ansatzvarianten, DTD-I und DTD-II, angewendet werden, siehe Anhang L.

(2) Bei der Wahl der Tragwerksart und deren baulichen Durchbildung sollten folgende Hinweise berücksichtigt werden:

- Die Details, die Werkstoffe und die Höhe der Spannungen sollten so gewählt sein, dass sich bei einer Rissbildung ein niedriger Rissfortschritt und eine hohe kritische Risslänge ergeben;
- soweit möglich, sollte eine Tragwerksart gewählt werden, bei der im Falle von Ermüdungsschäden eine Umverteilung der Schnittgrößen im Tragwerk oder im Bauteilquerschnitt stattfinden kann (Redundanzprinzip);
- rissstoppende Konstruktionsdetails sollten vorgesehen werden;
- es sollte sichergestellt werden, dass kritische Bauteile und Details für die regelmäßigen Inspektionen leicht zugänglich sind;
- es sollte sichergestellt werden, dass Risse durch Überwachung unter Kontrolle gehalten werden oder, sofern erforderlich, dass Bauteile leicht instand gesetzt oder ersetzt werden können.

2.2.3 Versuchsunterstützte Bemessung

(1) Dieser Ansatz sollte angewendet werden, wenn die erforderlichen Angaben zur Belastung, zum Tragwerkverhalten, zur Ermüdungsfestigkeit oder zum Rissfortschritt aus Normen oder anderen Quellen für eine bestimmte Anwendung nicht verfügbar sind sowie zur Optimierung von Konstruktionsdetails. Versuchsergebnisse sollten anstelle genormter Daten nur unter der Voraussetzung eingesetzt werden, dass sie unter kontrollierten Bedingungen ermittelt und angewendet wurden.

ANMERKUNG Der Nachweis für die Bemessung mit Unterstützung durch Versuche sollte entsprechend Anhang C durchgeführt werden.

2.3 Ermüdungsbelastung

2.3.1 Herkunft der Ermüdungsbelastung

(1)P Spannungsveränderungen jeglicher Herkunft sollten im Tragwerk identifiziert werden. Gewöhnliche Situationen, in denen eine Ermüdungsbelastung auftritt, sind in 2.1.1 angegeben.

ANMERKUNG Für die Begrenzung der Ermüdung bei wiederholtem lokalem Beulen siehe D.3.

(2) Die Ermüdungsbelastung sollte EN 1991 oder anderen maßgebenden Europäischen Normen entnommen werden.

ANMERKUNG Der Nationale Anhang darf Regeln zur Bestimmung der Ermüdungslasten für solche Fälle festlegen, die durch keine Europäische Norm abgedeckt sind.

(3) Dynamische Einflüsse sollten berücksichtigt werden, sofern sie nicht bereits in den Einflüssen der Ermüdungslasten enthalten sind.

2.3.2 Herleitung der Ermüdungsbelastung

- (1) Zusätzlich zu den Normen, in denen die Ermüdungsbelastung behandelt wird, sind die folgenden Abschnitte zu beachten.
- (2) Die Ermüdungsbelastung sollte üblicherweise durch ein Bemessungslastkollektiv beschrieben werden, welches einen Bereich von Intensitäten eines spezifischen Nutzlastereignisses und die Anzahl der Wiederholungen jeder Lastintensität während der Bemessungslebensdauer des Tragwerks definiert. Wenn zwei oder mehrere voneinander unabhängige Nutzlastereignisse zu erwarten sind, wird es erforderlich sein, die jeweilige Phasenverschiebung anzugeben.
- (3) Eine realistische Bewertung der Ermüdungsbelastung ist ausschlaggebend für die Berechnung der Lebensdauer des Tragwerks. Wo keine veröffentlichten Nutzlastdaten existieren, sollten Werte für die Ermüdungsbelastung bestehender Tragwerke unter ähnlichen Beanspruchungsbedingungen angesetzt werden.
- (4) Durch die kontinuierliche Messung von Beanspruchungen oder Verformungen als Stichprobe in einem geeigneten Zeitraum sollten Daten für die Ermüdungsbelastung aus der nachfolgenden Analyse des Tragwerksverhaltens abgeleitet werden. Liegen die Lastfrequenzen in der Nähe der Eigenfrequenzen des Tragwerkes, so sind die dynamischen Vergrößerungseinflüsse besonders zu beachten.

ANMERKUNG Weitere Hinweise werden in Anhang C gegeben.

- (5) Das Bemessungslastkollektiv sollte auf der Grundlage gewählt werden, dass es einen geschätzten oberen Grenzwert der akkumulierten Betriebsbedingungen während der gesamten Bemessungslebensdauer des Tragwerks darstellt. Alle wahrscheinlichen betrieblichen und umweltbedingten Einflüsse aus der vorausgesehenen Nutzung des Tragwerks während der erwähnten Zeit sollten berücksichtigt werden.
- (6) Der Grenzwert des Konfidenzbereiches für die Ermittlung der Intensität des Bemessungslastkollektivs sollte auf der Grundlage des vorausgesagten Mittelwerts plus k_F mal Standardabweichungen festgelegt werden. Der Grenzwert des Konfidenzbereiches für die Ermittlung der Anzahl der Schwingspiele im Bemessungslastkollektiv sollte auf der Grundlage des vorausgesagten Mittelwerts plus k_N mal Standardabweichungen festgelegt werden.

ANMERKUNG Werte für k_F und k_N dürfen im Nationalen Anhang definiert werden. Empfohlene Zahlenwerte sind $k_F = 2$ und $k_N = 2$. Siehe auch ANMERKUNG 2 in 2.4 (1).

2.3.3 Äquivalente Ermüdungsbelastung

- (1) Eine vereinfachte äquivalente Ermüdungsbelastung darf eingesetzt werden, wenn die folgenden Voraussetzungen erfüllt sind:
 - a) Das Tragwerk entspricht in seiner grundlegenden Struktur und Form sowie in seinen Abmessungen denjenigen Konstruktionen, für die die äquivalente Ermüdungsbelastung ursprünglich ermittelt wurde;
 - b) die tatsächliche Ermüdungsbelastung entspricht bezüglich Intensität, Frequenz und Wirkungsweise derjenigen, die für die Herleitung der äquivalenten Ermüdungsbelastung eingesetzt wurde;
 - c) die für die Herleitung der äquivalenten Ermüdungsbelastung angenommenen Werte für m_1 , m_2 , N_D und N_L – siehe Bild 6.1 – entsprechen den für das nachzuweisende Detail geltenden Werten;

ANMERKUNG In manchen Fällen werden äquivalente Ermüdungslasten unter Annahme einer einfachen einheitlichen Neigung mit $m_2 = m_1$ und $\Delta\sigma_L = 0$ ermittelt. Bei vielen Anwendungen mit zahlreichen Schwingspielen niedriger Amplitude führt dies zu einer sehr konservativen Schätzung der Lebensdauer.

- d) das dynamische Verhalten des Tragwerks ist ausreichend niedrig, so dass Resonanzeffekte, die von Unterschieden in Masse, Steifigkeit und Dämpfungsbeiwert beeinflusst werden, nur eine geringe Auswirkung auf die gesamte Schadensakkumulation nach der Palmgren-Miner-Regel haben.
- (2) Im Fall, dass eine äquivalente Ermüdungsbelastung speziell für eine Konstruktion aus einer Aluminiumlegierung abgeleitet wird, sollten sämtliche unter (1) angesprochenen Punkte berücksichtigt werden.

2.4 Teilsicherheitsbeiwerte für Ermüdungslasten

((1) In Fällen, in denen die Ermüdungslasten F_{Ek} entsprechend den Anforderungen in 2.3.1 (2) and 2.3.2 ermittelt wurden, sollte auf diese Lasten ein Teilsicherheitsbeiwert zur Ermittlung der Bemessungslast F_{Ed} angewandt werden.

$$F_{Ed} = \gamma_{Ff} F_{Ek} \tag{2.2}$$

Dabei ist

γ_{Ff} der Teilsicherheitsbeiwert für Ermüdungslasten.

ANMERKUNG 1 Die Teilsicherheitsbeiwerte dürfen im Nationalen Anhang festgelegt werden. Der empfohlene Wert ist $\gamma_{Ff} = 1,0$.

ANMERKUNG 2 In Fällen, in denen Ermüdungslasten auf der Grundlage anderer Konfidenzgrenzwerte als in 2.3.2(6) angegeben definiert wurden, sind Teilsicherheitsbeiwerte für Lasten in Tabelle 2.1 gegeben. Alternative Werte dürfen im Nationalen Anhang festgelegt werden.

Tabelle 2.1 — Empfohlene Teilsicherheitsbeiwerte γ_{Ff} für die Intensität und Anzahl der Schwingenspiele im Ermüdungslastkollektiv

k_F	γ_{Ff}	
	$k_N = 0$	$k_N = 2$
0	1,5	1,4
1	1,3	1,2
2	1,1	1,0

2.5 Anforderungen an die Ausführung

(1) In EN 1090-3 wird die Festlegung von Ausführungsklassen gefordert. Diese können von der Beanspruchungskategorie abhängig sein.

ANMERKUNG Hinweise zur Wahl der Ausführungsklasse und der Beanspruchungskategorie sind in EN 1999-1-1 angegeben. Hinweise zum Ausnutzungsgrad sind L.5 zu entnehmen; sie gelten nur bei Übernahme der in Anhang J enthaltenen Ermüdungswiderstandsdaten. ^(A1)

3 Werkstoffe, Produktbestandteile und Verbindungsmittel

(1) Die Bemessungsregeln der EN 1999-1-3 gelten – wie in EN 1999-1-1:05-2005 aufgelistet – für Produkte, die Bestandteile von Bauteilen und Tragwerken bilden, mit der Ausnahme folgender Legierungen niedriger Festigkeit: EN AW-3005, EN AW-3103, EN AW-5005, EN AW-8011A in allen Zuständen sowie EN AW-6060 im Zustand T5.

ANMERKUNG 1 Für die oben erwähnten Legierungen und Zustände niedriger Festigkeit existieren keine zuverlässigen Ermüdungsdaten.

Der Nationale Anhang kann Ermüdungsdaten für solche Legierungen beziehungsweise Zustände geben. Versuche zur Ermittlung der Daten sollten entsprechend Anhang C durchgeführt werden.

ANMERKUNG 2 Für Gussstücke siehe Anhang I.

(2) EN 1999-1-3 deckt Bauteile mit offenen und geschlossenen Querschnitten, einschließlich solcher Teile, die aus Kombinationen solcher Bauteile aufgebaut sind, ab.

- (3) EN 1999-1-3 deckt Bauteile und Tragwerke mit folgenden Verbindungsmitteln:
- Lichtbogen-Schweißen (Metall-Schutzgas-Schweißen und Wolfram-Inert-Gasschweißen);
 - Stahlschrauben, die in EN 1999-1-1, Tabelle 3.4 aufgelistet sind.

ANMERKUNG Für Klebeverbindungen siehe Annex E.

- (4) Für die Ermüdungsbemessung und den Nachweis für Stahlschrauben bei Zug und Schub siehe EN 1993-1-9, Tabelle 8.1.

4 Dauerhaftigkeit

- (1) Daten zur Ermüdungsfestigkeit in EN 1999-1-3 sind bei normaler Witterung bis zu einer Temperatur von 100 °C anwendbar. Jedoch gelten im Fall der Legierung EN AW-5083 bei Temperaturen größer als 65 °C Ermüdungsfestigkeitsdaten in EN 1999-1-3 nur unter Anwendung einer effizienten Korrosions-Schutzbeschichtung.

- (2) Ermüdungsfestigkeitsdaten könnten bei manchen Typen aggressiver Umweltbedingungen nicht angewandt werden. Eine Anleitung über Werkstoffe und Umweltbedingungen geben 6.2 und 6.4.

ANMERKUNG Der Nationale Anhang darf weitere Informationen zu der lokalen Umweltbedingungen entsprechenden Lebensdauer geben.

- (3) Bei Klebeverbindungen müssten gegebenenfalls besondere Umweltbedingungen und -wirkungen berücksichtigt werden.

ANMERKUNG Siehe Anhang E.

5 Strukturanalyse

5.1 Globale Analyse

5.1.1 Allgemeines

- (1) Die Analysemethode sollte so gewählt werden, dass diese eine genaue Voraussage des elastischen Spannungsverhaltens der Konstruktion unter der vorgeschriebenen Ermüdungslast liefert, so dass die maximalen und minimalen Spannungsspitzen im Spannungs-Zeit-Verlauf bestimmt werden, siehe Bild 5.1.

ANMERKUNG Ein elastisches Modell für die statische Berechnung (für den Grenzzustand der Tragfähigkeit oder der Gebrauchstauglichkeit) in Übereinstimmung mit EN 1990-1-1 braucht nicht unbedingt für die Ermüdungsberechnung ausreichend sein.

- (2) Dynamische Einflüsse sollten bei der Berechnung des Spannungs-Zeit-Verlaufs einbezogen werden, außer bei Anwendung einer äquivalenten Einwirkung, die diese Einflüsse bereits berücksichtigt.

- (3) Wo das elastische Verhalten vom Dämpfungsgrad beeinflusst wird, sollte dies durch Versuche festgestellt werden.

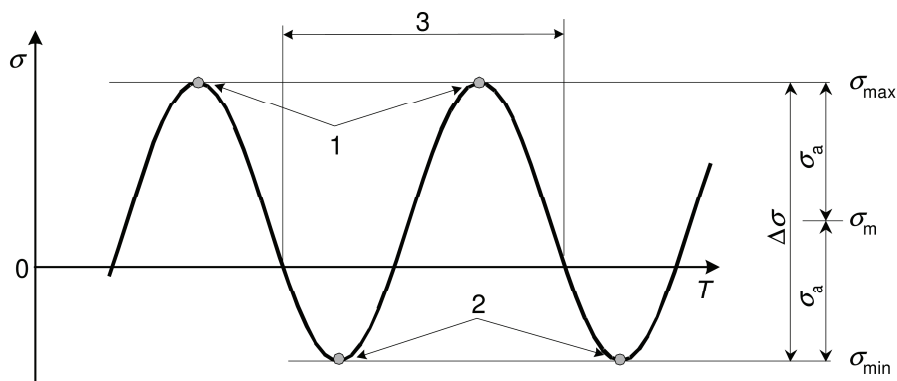
ANMERKUNG Siehe Anhang C.

- (4) Für statisch unbestimmte Tragwerke sollte keine plastische Umverteilung der Kräfte zwischen den Bauteilen angenommen werden.

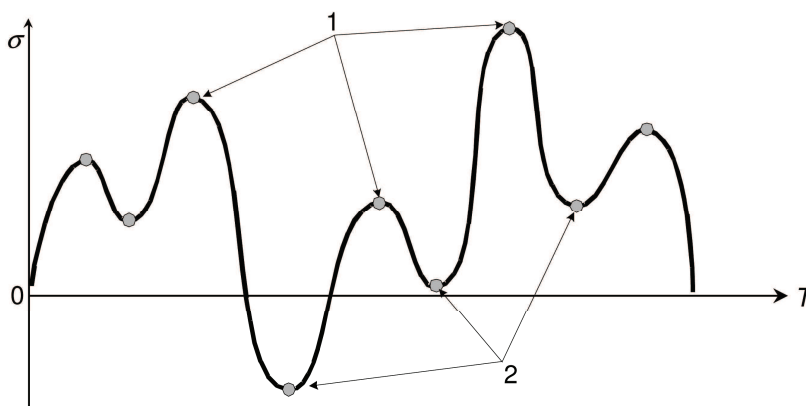
- (5) Der Aussteifungseffekt anderer Werkstoffe, die dauerhaft an der Aluminiumkonstruktion angebracht werden, sollte in der elastischen Analyse berücksichtigt werden.

- (6) Modelle für die Globalanalyse statisch unbestimmter Tragwerke und Fachwerkrahmen mit steifen oder halbsteifen Verbindungen (z. B. Finite-Elemente-Modelle) sollten auf ein elastisches Werkstoffverhalten basieren, außer wenn Beanspruchungsdaten an Prototypen oder maßstabgetreu nachgebildeten Modellen ermittelt worden sind.

ANMERKUNG Der Ausdruck „Finite-Element-Analyse“ wird verwendet für Analyseverfahren, wo Tragwerksteile und Verbindungen durch Anordnungen von Stab-, Balken-, Membran-, Kontinuumselementen oder anderen Elementformen repräsentiert werden. Zweck der Analyse ist den Spannungszustand zu bestimmen, bei dem Verformungskompatibilität und statisches (oder dynamisches) Gleichgewicht herrscht.



a) Konstante Amplitude



b) Variable Amplitude

Legende

- 1 Spannungsspitze
- 2 Spannungstiefpunkt
- 3 Spannungsschwingspiel
- Spannungs-Umkehrpunkt

- σ_{max} Maximalspannung
- σ_{min} Minimalspannung
- σ_m Mittelspannung
- $\Delta\sigma$ Spannungsschwingbreite
- σ_a Spannungsamplitude

Bild 5.1 — Terminologie von Spannungs-Zeit-Verläufen und Spannungsschwingspielen

5.1.2 Anwendung von Balkenelementen

(1) Balkenelemente sollten bei der Globalanalyse von Balken, Rahmen oder Fachwerken eingesetzt werden, die den nachfolgenden Begrenzungen in (2) bis (7) entsprechen.

(2) Balkenelemente sollten nicht bei der Ermüdungsanalyse von ausgesteiften Plattenkonstruktionen in ebenen oder Schalenkonstruktionen oder für Guss- oder Schmiedeteile verwendet werden, es sei denn sie haben eine einfache prismatische Form.

(3) Die Axial-, Biege-, Scher- und Torsionssteifigkeitseigenschaften der Balkenelemente sollten entsprechend der linear-elastischen Theorie berechnet werden unter der Annahme, dass ebene Querschnitte eben bleiben. Eine Verwölbung des Querschnitts infolge Torsion sollte jedoch berücksichtigt werden.

(4) Wenn Balkenelemente in Tragwerken unter Torsionsbeanspruchung mit Bauteilen aus offenen oder Hohlquerschnitten, die für Verwölbung anfällig sind, verwendet werden, sollten diese 7 Freiheitsgrade bei Berücksichtigung der Verwölbung besitzen. Alternativ sollten Schalenelemente zum Modellieren des Querschnitts verwendet werden.

(5) Die Querschnittseigenschaften der Balkenelemente in der Nähe von Bauteilstößen oder -anschlüssen sollten, die wegen der Verbindungsabmessungen und der Anwesenheit weiterer Komponenten (z. B. Knoten- oder Verbindungsbleche etc.) erhöhte Steifigkeit berücksichtigen.

(6) Die Steifigkeitseigenschaften von Balkenelementen bei der Modellierung von schrägen Kreuzungen zwischen offenen Profilen oder Hohlprofilen, deren Querschnitte nicht in die Kreuzverbindung hineinragen (z. B. bei nicht ausgesteiften Rohrknoten), oder bei halbsteifen Ausbildung (z. B. angeschraubte Kopfplatte oder Winkelquerverbindungen) sollten entweder durch Schalenelemente oder durch Federverbindungen der Elemente erfasst werden. Die Federn sollten ausreichende Steifigkeit für jeden Freiheitsgrad besitzen und ihre Steifigkeit sollte entweder durch Versuche oder durch Schalenelementmodelle der Verbindung bestimmt werden.

(7) Wo Balkenelemente verwendet werden für die Modellierung eines Tragwerks mit Exzentrizitäten zwischen den Bauteilachsen an Verbindungen oder wenn Lasten und Verschiebungen exzentrisch auf Bauteile wirken, sollten steife Verbindungselemente an diesen Stellen verwendet werden, um das richtige statische Gleichgewicht beizubehalten. Ähnliche Federn wie in 5.1.2(6) sollten nach Bedarf verwendet werden.

5.1.3 Anwendung von Membran-, Schalen- und Kontinuumelementen

(1) Membranelemente sollten nur an solchen Stellen eines Tragwerks verwendet werden, wo Biegespannungen außerhalb ihrer Ebene bekanntlich vernachlässigbar sind.

(2) Schalenelemente sollten bei allen Tragwerkstypen anwendbar sein, außer bei Guss-, Schmiede- oder maschinell geformten Teilen komplizierter Form, wo dreidimensionale Spannungsfelder vorkommen und hier Kontinuumelemente verwendet werden sollten.

(3) Wo Membran- oder Schalenelemente bei der Globalanalyse zur Berücksichtigung von größeren Spannungs-Konzentrationseinflüssen, wie unter 5.2.2 beschrieben, eingesetzt werden, sollte die Netzweite im Bauteilbereich der Rissentstehungsstelle zur vollständigen Erfassung des Einflusses ausreichend klein sein.

ANMERKUNG Siehe Anhang D.

5.2 Spannungsarten

5.2.1 Allgemeines

(1) Drei verschiedene Arten von Spannungen dürfen angewandt werden und zwar:

- a) Nennspannungen, siehe 5.2.2. Für die Herleitung von Nennspannungen siehe 5.3.1;
- b) modifizierte Nennspannungen, siehe 5.2.3. Für die Herleitung von modifizierten Nennspannungen siehe 5.3.2;
- c) Hot-Spot-Spannungen, siehe 5.2.4 und 5.3.3.

5.2.2 Nennspannungen

(1) Nennspannungen, siehe Bild 5.2, sollten direkt für die Bewertung von Rissentstehungsstellen in einfachen Bauteilen und Verbindungen verwendet werden, wo die folgenden Bedingungen gelten:

- a) Die Konstruktionsdetails in Verbindung mit der Rissentstehungsstelle entsprechen den Detailkategorien;
- b) die Detailkategorie wurde durch Versuche bestimmt, wobei die Versuchsergebnisse auf der Grundlage von Nennspannungen definiert wurden;

ANMERKUNG Versuche sollten entsprechend Anhang C durchgeführt werden.

- c) große geometrische Einflüsse, wie die in 5.2.3 aufgelisteten, liegen nicht in der Nähe der Rissentstehungs-Stelle.

5.2.3 Modifizierte Nennspannungen

(1) Modifizierte Nennspannungen sollten anstelle von Nennspannungen verwendet werden, wenn die Rissentstehungsstelle sich in der Nähe einer oder mehrerer der nachfolgenden großen geometrischen Spannungskonzentrationseinflüsse (siehe Bild 5.2) befindet, unter der Voraussetzung, dass die Bedingungen 5.2.1(a) und (b) weiter gelten:

- a) Grosse Änderungen der Querschnittsform, z. B. Ausschnitte oder Übergangsecken;
- b) große Änderungen der Steifigkeit in der Umgebung des Bauteilquerschnitts an ungesteiften, schrägen Verbindungen von offenen oder Hohlquerschnitten;
- c) Richtungsänderung oder Versatz größer als in den Tabellen der Detailkategorien zugelassen;
- d) nicht gleichmäßig verteilte Schubbeanspruchungen in breiten Platten;

ANMERKUNG Siehe EN 1999-1-1, K.1.

- e) Verformung von Hohlbauteilen;
- f) nicht-lineare, außerhalb der Ebene wirkende Biegebeanspruchungen in schlanken Bauteilen, d. h. Querschnitte der Klasse 4, wo die statische Beanspruchung sich in der Nähe der kritischen elastischen Spannung befindet, z. B. Zugfeld im Steg.

ANMERKUNG Siehe Anhang D.

(2) Die oben genannten geometrischen Spannungskonzentrationseinflüsse sollten berücksichtigt werden durch den Beiwert K_{gt} , siehe Bild 5.2, der als theoretische Spannungskonzentration beim linear elastischen Werkstoff definiert wird, bei Vernachlässigung aller Einflüsse (lokal oder geometrisch), die bereits enthalten sind bei der $\Delta\sigma-N$ Ermüdungsfestigkeitskurve des klassifizierten konstruktiven Referenz-Details.

5.2.4 Hot-Spot-Spannungen

(1) Hot-Spot-Spannungen können nur verwendet werden, wenn die folgenden Bedingungen gelten:

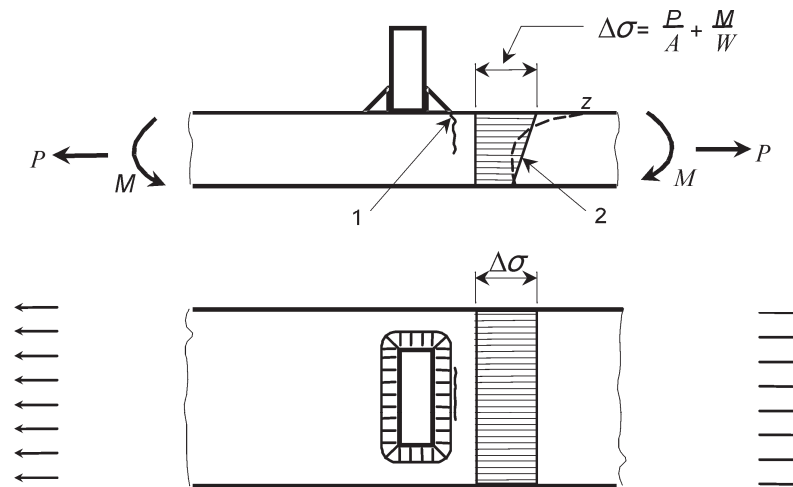
- a) Die Rissentstehungsstelle ist ein Schweißnahtübergang in einer Verbindung mit einer komplizierten Geometrie, wo die Nennspannungen nicht klar definiert sind;

ANMERKUNG Wegen der großen Auswirkung der Wärmeeinflusszone auf die Festigkeit von geschweißten Aluminiumbauteilen sind Erfahrungen mit Details von Stahlkonstruktionen auf Aluminium meistens nicht übertragbar.

- b) eine Hot-Spot-Detailkategorie ist durch Versuche definiert und die Versuchsergebnisse sind auf der Grundlage von Hot-Spot-Spannungen für den geeigneten Belastungsfall ausgedrückt worden;
- c) Schalen-Biegespannungen treten in verformungsfähigen Verbindungen entsprechend 5.1.2(6) auf;

ANMERKUNG Siehe Anhänge C, D und K.

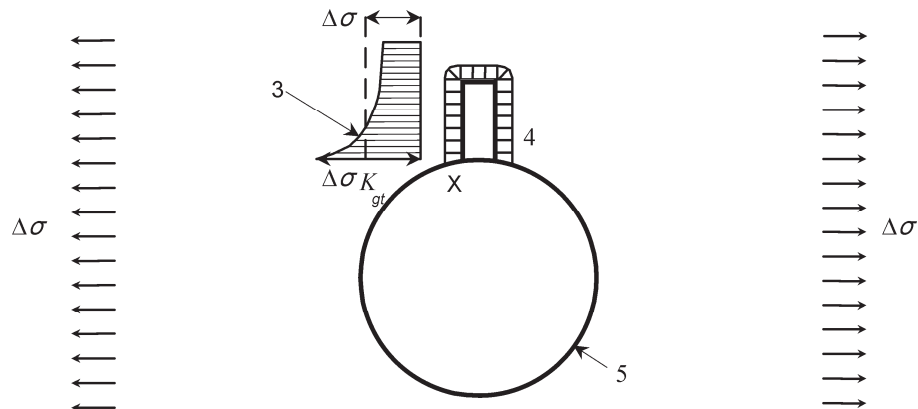
- d) für die Herleitung von Hot-Spot-Spannungen siehe 5.3.3 und 6.2.4.



Legende

- 1 Rissentstehungsstelle
- 2 Lineare Spannungsverteilung, der Spannungserhöhungsbeiwert am Nahtübergang bei z nicht berechnet

a) Lokale Spannungskonzentration beim Schweißnahtübergang

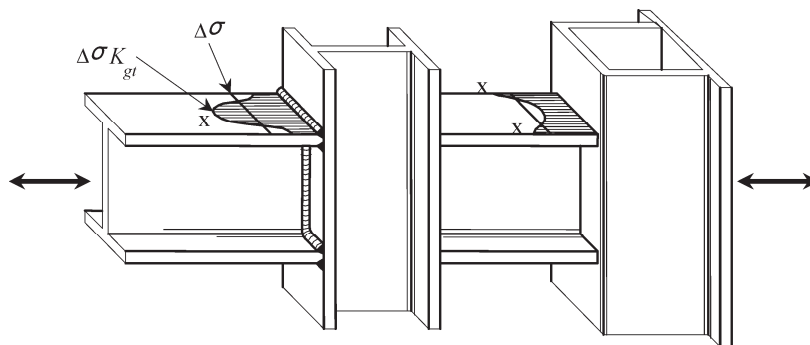


Legende

- 3 Nichtlineare Spannungsverteilung
- 4 Schweißnaht
- 5 große Öffnung

b) Brutto Spannungskonzentration bei großer Öffnung

$\Delta\sigma$ = Schwingbreite der Nennspannung;
 $\Delta\sigma K_{gt}$ = Schwingbreite der modifizierten Nennspannung an Rissentstehungsstelle x infolge der Öffnung



Legende

- $\Delta \sigma$ Schwingbreite der Nennspannung
 $\Delta \sigma K_{gt}$ modifizierte Nennspannung an Rissentstehungsstelle x infolge der geometrischen Spannungskonzentrationseffekte

c) Verbindungsbereich hoher Steifigkeit

Bild 5.2 — Beispiele für Nennspannungen und modifizierte Nennspannungen

5.3 Herleitung von Spannungen

5.3.1 Herleitung von Nennspannungen

5.3.1.1 Konstruktionsmodelle mit Balkenelementen

(1) Axial- und Schubspannungen an der Rissentstehungsstelle sollten aus den Axialkräften, Biegemomenten, Schub- und Torsionskräften an dem betrachteten Querschnitt mit Hilfe linear-elastischer Querschnittseigenschaften ermittelt werden.

(2) Querschnittsflächen und Widerstandsmomente sollten sämtliche spezifischen Anforderungen einer Detailkategorie berücksichtigen.

5.3.1.2 Konstruktionsmodelle mit Membran-, Schalen- oder Kontinuumselementen

(1) Wo die Verteilung der Axialspannung um beide Achsen eines Bauteilquerschnitts linear verläuft, dürfen die Spannungen an der Rissentstehungsstelle direkt benutzt werden.

(2) Wo die Verteilung der Axialspannung um irgend eine der Achsen eines Bauteilquerschnitts nicht linear verläuft, sollten die Spannungen entlang des Querschnitts integriert werden, um die Axialkraft und das Biegemoment zu ermitteln.

ANMERKUNG Letztere sollten zusammen mit den geeigneten Querschnittsfläche und Widerstandsmomente für die Ermittlung der Nennspannungen verwendet werden.

5.3.2 Herleitung von modifizierten Nennspannungen

5.3.2.1 Konstruktionsmodelle mit Balkenelementen

(1) Nennspannungen sollten mit den geeigneten elastischen Spannungskonzentrationsbeiwerten K_{gt} entsprechend der Position der Rissentstehungsstelle und der Art des Spannungsfeldes multipliziert werden.

(2) K_{gt} sollte sämtliche geometrische Fehlstellen berücksichtigen, außer denjenigen die bereits in der Detailkategorie enthalten sind.

(3) K_{gt} sollte nach einer der folgenden Methoden bestimmt werden:

a) Standardlösungen für Spannungskonzentrationsbeiwerte;

ANMERKUNG Siehe D.2.

b) Vernetzung der umgebenden Geometrie mit Schalenelementen unter Berücksichtigung von (2) und Anbringung der Nennspannungen an die Ränder;

c) Messung elastischer Beanspruchungen auf einem physikalischen Modell, das die großen geometrischen Fehlstellen beinhaltet, diejenigen Merkmale jedoch ausschließt, die bereits in der Detailkategorie enthalten worden sind (siehe (2)).

5.3.2.2 Konstruktionsmodelle mit Membran-, Schalen- oder Kontinuumelementen

(1) Wo die modifizierte Nennspannung aus der Globalanalyse im Bereich der Rissentstehungsstelle zu ermitteln sein wird, sollte diese auf der folgenden Grundlage gewählt werden:

a) Lokale Spannungskonzentrationen wie das bereits im Kerbfall enthaltene klassifizierte Konstruktionsdetail und das in der Detailkategorie bereits enthaltene Nahtprofil sollten ausgeschlossen werden;

b) die Netzweite im Bereich der Rissentstehungsstelle sollte ausreichend klein sein, um das allgemeine Spannungsfeld um diese Stelle herum genau vorauszusagen, jedoch ohne Berücksichtigung der Merkmale unter (a).

ANMERKUNG Siehe D.1.

5.3.3 Herleitung von Hot-Spot-Spannungen

(1) Die Hot-Spot-Spannung ist die Hauptspannung meist quer zur Schweißnahtübergangslinie und sollte im allgemeinen durch numerische oder experimentelle Methoden berechnet werden, außer in Fällen, wo Standardlösungen vorhanden sind.

ANMERKUNG Siehe D.1

(2) In einfachen Fällen, wie in Bild 5.2 (c), die Hot-Spot-Spannung darf der modifizierten Nennspannung gleich gesetzt und nach 5.2.3 berechnet werden.

(3) Im Allgemeinen sollte die Ermüdungsspannung an dem Schweißnahtübergang die Spannungskonzentrationseinflüsse, d. h. die Schweißnahtgeometrie, am klassifizierten Referenzdetail ausschließen, für Konstruktionsfälle, bei denen die Standardbeiwerte der Spannungskonzentration nicht anwendbar sind und für die somit eine besondere Analyse erforderlich ist.

5.3.4 Spannungsrichtung

(1) Die Hauptspannungsschwingbreite ist die größte algebraische Differenz zwischen den Hauptspannungen, sofern ihre Hauptebenen weniger als 45° voneinander differieren.

(2) Um entscheiden zu können ob ein konstruktives Detail normal oder parallel zur Schweißnahtachse verläuft, ist dieses als parallel hierzu einzustufen, wenn die Zug-Hauptspannungsrichtung weniger als 45° zu der Nahtachse beträgt.

5.4 Spannungsschwingbreiten für bestimmte Rissentstehungsstellen

5.4.1 Grundmaterial, Schweißnähte und Verbindungen mit mechanischen Befestigungselementen

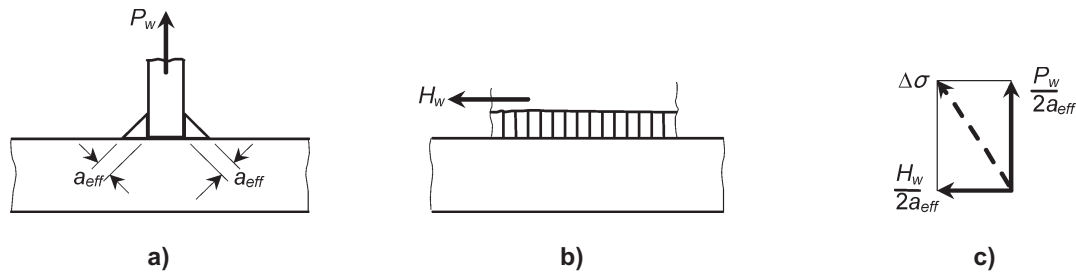
(1) Risse die an Nahtübergangsstellen, Nahtüberhöhungen, Löchern von Verbindungsmitteln, Reibkontaktflächen, usw. entstehen und durch den Grundwerkstoff oder voll durchgeschweißten Nahtwerkstoff fortschreiten, sollten auf der Grundlage der Nenn-Hauptspannungsschwingbreite im Bauteil an dieser Stelle berechnet werden (siehe Bild 5.3).

(2) Der lokale Spannungskonzentrationseinfluss von Nahtprofil, Schraub- und Nietlöchern, etc. sind in den $\Delta\sigma$ - N Festigkeitsdaten für die maßgebende konstruktive Detailkategorie berücksichtigt.

5.4.2 Kehlnähte und partiell durchgeschweißte Stumpfnähte

(1) Risse, die an Schweißnahtwurzeln entstehen und durch die Naht fortschreiten, sollten auf der Grundlage der vektoriellen Summe $\Delta\sigma$ der Spannungen im Schweißwerkstoff, bezogen auf der effektiven Nahtdicke, berechnet werden – siehe Bild 5.3.

ANMERKUNG Der Referenz-Festigkeitswert kann wie beim Konstruktionsdetail 9.2 in Tab. J.9 gewählt werden.



P_w und H_w sind Kräfte pro Längeneinheit

Bild 5.3 — Spannungen im Nahtals

(2) In einseitigen Überlappverbindungen darf die auf der Nahtlänge bezogene Spannung auf der Grundlage der Durchschnittsfläche für Axialkräfte und eines elastischen polaren Trägheitsmomentes der Nahtgruppe, im Fall von Momentenbeanspruchung in der Ebene, berechnet werden (siehe Bild 5.4).

ANMERKUNG Der Referenz-Festigkeitswert kann wie beim Konstruktionsdetail 9.4 in Tabelle J.9 gewählt werden.

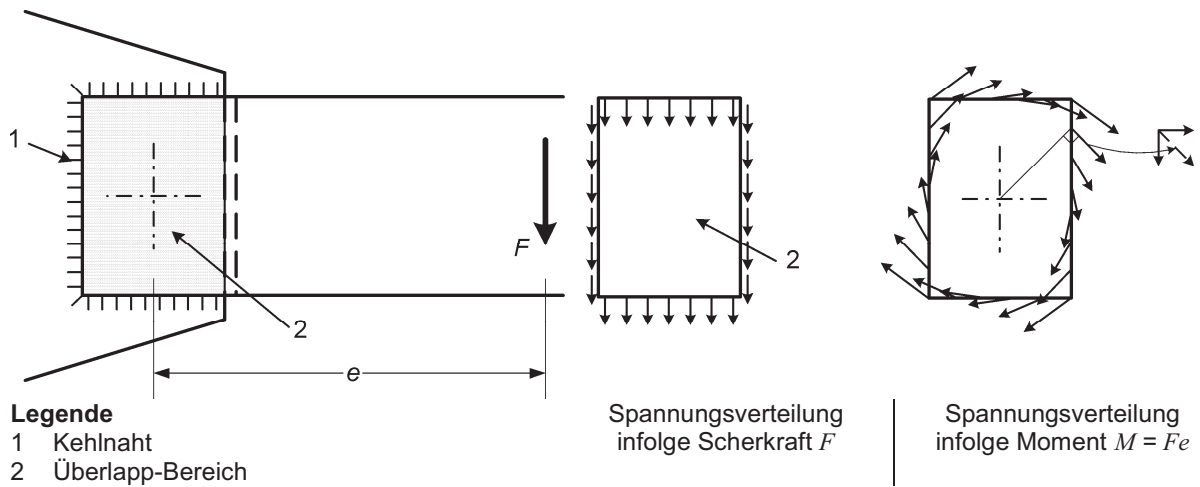


Bild 5.4 — Spannungen in Überlappverbindungen

5.5 Klebeverbindungen

- 1) Der Ermüdungsnachweis sollte eine Fehler enthaltende Oberfläche in der Kleberschicht beinhalten.

ANMERKUNG Siehe Anhang E.

5.6 Gussstücke

- (1) Die Haupt-Strukturspannung sollte verwendet werden. Finite-Element-Analyse oder Dehnungsmessung im Fall komplizierter Formen, für die keine Standardlösungen vorhanden sind, könnte erforderlich sein.

5.7 Spannungskollektive

- (1) Die Methoden für die Zählung von Spannungsschwingbreiten zur Herleitung von Spannungskollektiven werden im Anhang A angegeben.

5.8 Berechnung von äquivalenten Spannungsschwingbreiten für standardisierte Ermüdungsbelastungs-Modelle

5.8.1 Allgemeines

- (1) Der Ermüdungsnachweis für standardisierte Ermüdungslasten, wie in EN 1991 festgelegt, sollte nach einer der folgenden Methoden durchgeführt werden:

- Nenn-Spannungsschwingbreiten für Konstruktionsdetails aus der Beschreibung in den Detailkategorien;
- modifizierte Nenn-Spannungsschwingbreiten bei plötzlichen Querschnitts-Änderungen in der Nähe der Rissentstehungsstelle, die nicht in den Angaben der Konstruktionsdetails beschrieben sind;
- Strukturspannungsschwingbreiten, wo hohe Spannungsgradienten in der Nähe des Schweißnaht-übergangs auftreten.

ANMERKUNG Der Nationale Anhang darf Information über die Anwendung von Nenn-Spannungsschwingbreiten oder modifizierten Nenn-Spannungsschwingbreiten geben.

- A1** (2) Der Bemessungswert der Spannungsschwingbreite für den Ermüdungsnachweis sollte die Spannungs-Schwingbreite $\gamma_{Ff} \Delta\sigma_{E,2e}$ bei $N_C = 2 \times 10^6$ Schwingspielen sein. **A1**

5.8.2 Bemessungswert der Spannungsschwingbreite

A1 (1) Der Bemessungswert für die Schwingbreite der Nennspannung $\gamma_{Ff}\Delta\sigma_{E,2e}$ sollte wie folgt ermittelt werden:

$$\gamma_{Ff}\Delta\sigma_{E,2e} = \lambda_1 \times \lambda_2 \times \dots \lambda_i \times \dots \lambda_n \times \Delta\sigma(\gamma_{Ff} Q_k) \quad \text{für Nennspannungen} \quad (5.1)$$

$$\gamma_{Ff}\Delta\sigma_{E,2e}^* = K_{gt} \gamma_{Ff}\Delta\sigma_{E,2e} \quad \text{für modifizierte Nennspannungen} \quad (5.2)$$

Dabei ist

- $\Delta\sigma(\gamma_{Ff} Q_k)$ die Spannungsschwingbreite aus den in EN 1991 festgelegten Ermüdungslasten
- λ_i die schadensäquivalenten Beiwerte, abhängig von der Lastsituation und den konstruktiven Merkmalen sowie von anderen Faktoren;
- K_{gt} der Spannungskonzentrations-Beiwert, der die lokale Spannungserhöhung in Abhängigkeit von der Detailgeometrie berücksichtigt, die nicht in der Referenz- $\Delta\sigma_C$ - N -Kurve enthalten ist, siehe 5.3.2.1.

ANMERKUNG 1 Die Werte für λ_i dürfen im Nationalen Anhang festgelegt werden.

ANMERKUNG 2 Die λ_i -Werte für Stahlbauteile dürfen nicht ohne Weiteres auf Aluminiumbauteile übertragen werden. **A1**

6 Ermüdungswiderstand und Detailkategorien

6.1 Detailkategorien

6.1.1 Allgemeines

Der Nachweis ausreichender Ermüdungsfestigkeit basiert auf Festigkeitswerten einer Anzahl von standardisierten Detailkategorien. Eine Detailkategorie kann eine oder mehrere häufig benutzte und klassifizierte Konstruktionsdetails beinhalten. Die Detailkategorien sollten durch ihre Referenz-Ermüdungsfestigkeit und den entsprechenden Wert der Neigung im Hauptbereich der linearisierten $\Delta\sigma$ - N Beziehung definiert werden, und sollten den Bestimmungen in 6.2 gerecht werden.

6.1.2 Einflussfaktoren für die Detailkategorien

(1) Die Ermüdungsfestigkeit für eine Detailkategorie sollte die folgenden Faktoren berücksichtigen:

- die Richtung der veränderlichen Spannung relativ zum Konstruktionsdetail;
- die Position des entstehenden Risses im Konstruktionsdetail;
- die geometrische Anordnung und relative Proportionen des Konstruktionsdetails.

(2) Die Ermüdungsfestigkeit hängt von den folgenden Punkten ab:

- der Produktform;
- dem Werkstoff (außer im geschweißten Zustand);
- der Methode der Ausführung;
- der Qualitätsstufe (bei Schweißungen und Gussstücken);
- der Art der Verbindung.

6.1.3 Konstruktionsdetails

(1) Konstruktionsdetails können in die folgenden drei Hauptgruppen eingeteilt werden:

- a) nicht geschweißte Bauteile, geschweißte Bauteile, Schraubverbindungen;
- b) Klebeverbindungen;
- c) Gussstücke.

ANMERKUNG 1 Eine Reihe von Detailkategorien und Konstruktionsdetails mit $\Delta\sigma$ - N Beziehungen für die Ermüdungsfestigkeit von Bauteilen der Gruppe a) unter Umgebungstemperatur, die keinen Oberflächenschutz benötigen (siehe Tabelle 6.2), enthält Anhang J. Der Nationale Anhang darf weitere Reihen von Detailkategorien und Konstruktionsdetails in Verbindung mit Übereinstimmungskriterien unter Berücksichtigung der Regeln in 6.1.2 und 6.1.3 für solche Bauteile festlegen. Die im Anhang J angegebene Reihe von Kategorien wird empfohlen.

ANMERKUNG 2 Der Nationale Anhang darf Konstruktionsdetails festlegen, die nicht in Anhang J erfasst sind.

ANMERKUNG 3 Für Hinweise über Gussstücke siehe Anhang I.

ANMERKUNG 4 Für Hinweise über Klebeverbindungen siehe Anhang E.

6.2 Werte der Ermüdungsfestigkeit

6.2.1 Klassifizierte Konstruktionsdetails

(1) Die verallgemeinerte Form der $\Delta\sigma$ - N Beziehung wird in Bild 6.1 gezeigt, in logarithmischen Koordinaten. Die Ermüdungsfestigkeitskurve entspricht einem unteren Grenzwert im Abstand der zweifachen Standardabweichung vom Mittelwert aus.

(2) Die Grundbeziehung für die Ermüdungsbemessung für eine Lebensdauer im Bereich zwischen 10^5 und 5×10^6 Schwingspielen wird definiert durch die Gleichung:

$$N_i = 2 \times 10^6 \left(\frac{\Delta\sigma_c}{\Delta\sigma_i} \frac{1}{\gamma_{Ff} \gamma_{Mf}} \right)^{m_1} \quad (6.1)$$

Dabei ist

- N_i die berechnete Anzahl von Schwingspielen bis zum Versagen bei der Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma_i$;
- $\Delta\sigma_c$ der Referenzwert der Ermüdungsfestigkeit bei 2×10^6 Schwingspielen, abhängig von der Detailkategorie, wozu Tabelle 6.1 standardisierte Werte gibt;
- $\Delta\sigma_i$ die konstante Spannungsschwingbreite für die Hauptspannungen im Konstruktionsdetail für n_i Schwingspiele; $\langle A_1 \rangle$
- m_1 die Neigung der $\log\Delta\sigma$ - $\log N$ -Ermüdungsfestigkeitskurve, abhängig von der Detailkategorie; $\langle A_1 \rangle$
- γ_{Ff} der Teilsicherheitsbeiwert, der Unsicherheiten in der Bestimmung des Belastungskollektivs und in der Verhaltensanalyse abdeckt;
- γ_{Mf} der Teilsicherheitsbeiwert für Unsicherheiten in Werkstoffen und Ausführung (siehe 6.2.1(4)).

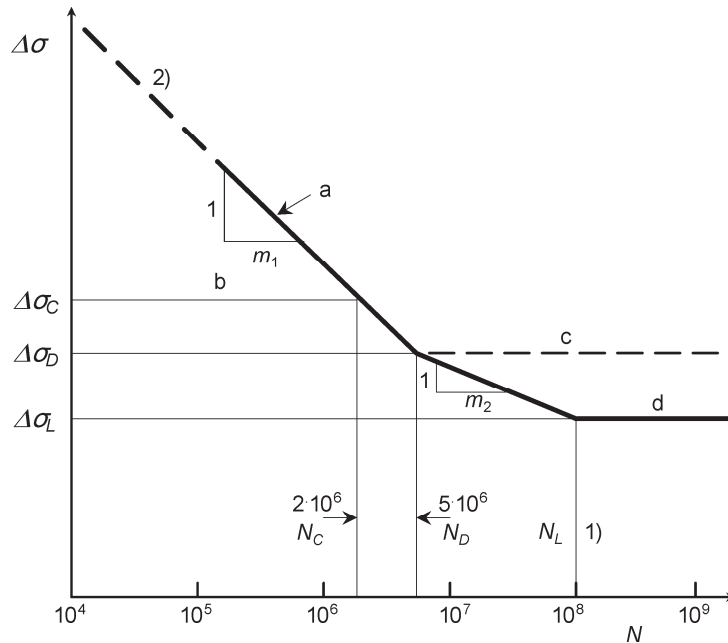
ANMERKUNG 1 Für Werte von γ_{Ff} siehe 2.4.

$\langle A_1 \rangle$ ANMERKUNG 2 Der Zahlenwert des Teilsicherheitsbeiwerts γ_{Mf} für einen bestimmten Konstruktionsdetail-Typ darf im Nationalen Anhang festgelegt werden. Die empfohlenen Werte sind Abschnitt L.4 zu entnehmen; sie gelten nur bei Übernahme der in Anhang J enthaltenen Ermüdungswiderstandsdaten. $\langle A_1 \rangle$

ANMERKUNG 3 Für den Zahlenwert des Teilsicherheitsbeiwerts γ_{Mf} für Klebeverbindungen siehe Anhang E.

Tabelle 6.1 — Liste der standardisierten $\Delta\sigma_c$ -Werte (N/mm²) für die Verwendung innerhalb der Detailkategorien

140, 125, 112, 100, 90, 80, 71, 63, 56, 50, 45, 40, 36, 32, 28, 25, 23, 20, 18, 16, 14, 12
--



Legende

- a Ermüdungsfestigkeitskurve;
- b charakteristische Ermüdungsfestigkeit;
- c Dauerfestigkeit;
- d Schwellenwert der Ermüdungsfestigkeit

Bild 6.1 — Ermüdungsfestigkeitskurve $\log\Delta\sigma - \log N$

(3) Für N_L unter bestimmten Umweltbedingungen, siehe 6.4.

(4) Die Grundbeziehung für die Ermüdungsbemessung für eine Lebensdauer im Bereich zwischen 5×10^6 und 10^8 Schwingspielen wird definiert durch die Gleichung:

$$N_i = 5 \times 10^6 \left(\frac{\Delta\sigma_c}{\Delta\sigma_i} \frac{1}{\gamma_{Ff} \gamma_{Mf}} \right)^{m_2} \left(\frac{2}{5} \right)^{\frac{m_2}{m_1}} \tag{6.2}$$

(5) Die Dauerfestigkeit bei konstanten Schwingbreiten, $\Delta\sigma_D$, tritt bei 5×10^6 Schwingspielen auf (für nicht geschweißten Werkstoff wird diese bei 2×10^6 angenommen), darunter werden Schwingspiele konstanter Spannungsamplitude als nicht schädigend angenommen. Jedoch, sofern auch einige Schwingspiele mit Spannungswerten oberhalb dieses Grenzwertes vorkommen, werden sie einen Rissfortschritt verursachen; bei wachsendem Riss werden dann auch Schwingspiele mit niedrigeren Amplituden anfangen, schadenswirksam zu werden. Aus diesem Grund sollte die Neigung der Grundkurve $\Delta\sigma-N$ im Bereich zwischen 5×10^6 und 10^8 Schwingspielen für allgemeine Belastungskollektiv-Bedingungen zu m_2 geändert werden, wobei $m_2 = m_1 + 2$.

ANMERKUNG Die Anwendung des Neigungswertes $m_2 = m_1 + 2$ kann für einige Kollektive konservativ sein.

(6) Jedes Spannungsschwingenspiel unterhalb des Schwellenwertes der Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_L$, der bei 10^8 Schwingspielen angenommen wird, sollte als nicht schädigend angenommen werden.

(7) Für Spannungsschwingbreiten unterhalb von 10^5 Schwingspielen können Festigkeitswerte gemäß Bild 6.1 unnötig konservativ sein für bestimmte Konstruktionsdetails.

ANMERKUNG Anhang F enthält Empfehlungen für die Ermüdungsbemessung bei Lebensdauern im Bereich unterhalb 10^5 Schwingspielen. Der Nationale Anhang darf weitere Bestimmungen festlegen.

(8) Im Bereich zwischen 10^3 und 10^5 Schwingspielen sollte ein Nachweis erbracht werden, dass die Bemessungsschwingbreite nicht in eine maximale Zugspannung resultiert, die andere Tragsicherheitsbemessungswerte für das Konstruktionsdetail übertrifft, siehe EN 1999-1-1.

(9) Um einen endlichen Bereich von Detailkategorien aufstellen und eine Auf- bzw. Abstufung von Detailkategorien in konstanten geometrischen Intervallen vornehmen zu können, wird ein Bereich von standardisierten $\Delta\sigma_c$ Werten in Tabelle 6.1 angegeben. Eine Auf- oder Abstufung um eine Detailkategorie bedeutet, dass der nächstgelegene größere oder kleinere $\Delta\sigma_c$ Wert gewählt wird und dabei m_1 und m_2 unverändert bleiben. Diese Regelung wird nicht bei Klebeverbindungen angewandt.

(10) Die Detailkategorien gelten für alle Werte der Mittelspannung, wenn nicht anders angegeben.

ANMERKUNG Siehe Anhang G für Anleitung über erhöhte Ermüdungsfestigkeitswerte für Druck- oder niedrige Zugfestigkeitswerte.

(11) Für flache Bauteile unter Biegespannungen, wo $\Delta\sigma_1$ und $\Delta\sigma_2$ (siehe Bild 6.2) vom entgegengesetzten Vorzeichen sind, können die entsprechenden Ermüdungsspannungswerte für bestimmte Konstruktionsdetails um eine oder zwei Detailkategoriestufen nach Tabelle 6.1 für $t \leq 15$ mm erhöht werden.

ANMERKUNG Der Nationale Anhang darf den Detail-Typ und den Dickenbereich, für welchen eine Erhöhung zulässig ist, sowie die Anzahl von Kategorien bestimmen. Es wird empfohlen, dass die Erhöhung nicht über 2 Kategorien hinausgeht.

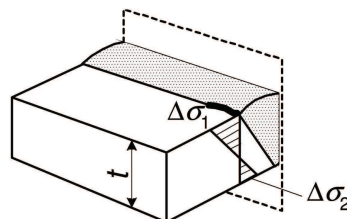


Bild 6.2 — Flaches Bauteil unter Biegespannungen

6.2.2 Nicht klassifizierte Details

(1) Details, die durch eine vorliegende Detailkategorie nicht vollständig abgedeckt werden, sollten durch Verweis auf veröffentlichte Daten, wenn vorhanden, berechnet werden. Alternativ dürfen zur Überprüfung Ermüdungsversuche durchgeführt werden.

ANMERKUNG Ermüdungsversuche sollten entsprechend Anhang C durchgeführt werden.

6.2.3 Klebeverbindungen

(1) Der Bemessung von Klebeverbindungen sollten anwendungsspezifische Versuchsergebnisse, unter Berücksichtigung relevanter Umweltwirkungen zugrunde gelegt werden.

ANMERKUNG Für die Bemessung von Klebeverbindungen siehe Anhang E.

6.2.4 Bestimmung der Referenzwerte für die Hot-Spot-Ermüdungsfestigkeit

(1) Die kalkulierten Hot-Spot-Spannungen sind abhängig von der angewandten Hot-Spot-Bemessungsmethode, und die Bemessungswerte für die Referenz-Hot-Spot-Ermüdungsfestigkeit sollten dem verwendeten Bemessungsverfahren entsprechen.

ANMERKUNG Anhang K enthält eine Hot-Spot-Referenz-Detail-Methode. Dieser Anhang kann in Kombination mit Anhang J verwendet werden, um die Referenzwerte der Hot-Spot-Ermüdungsfestigkeit zu bestimmen.

6.3 Einfluss der Mittelspannung

6.3.1 Allgemeines

(1) Die in den Detailkategorie-Tabellen angegebenen Ermüdungsfestigkeitswerte entsprechen hohen Zug-Mittelspannungs-Verhältnissen. Ist die Mittelspannung im Druckbereich oder im niedrigen Zugbereich, so kann unter bestimmten Bedingungen die Lebensdauer verlängert werden.

ANMERKUNG Siehe Anhang G für weitere Anleitung.

6.3.2 Grundwerkstoff und Verbindungen mit mechanischen Verbindungsmitteln

(1) Sofern die Einflüsse aus Zug-Eigenstressungen und Zwängungsspannungen aus mangelhafter Ausführung zu den einwirkenden Spannungen addiert werden, darf ein Ermüdungs-Erhöhungskoeffizient angewandt werden.

ANMERKUNG Siehe Anhang G.

6.3.3 Schweißverbindungen

(1) Bei Schweißverbindungen sollte keine Erhöhung der Ermüdungsfestigkeit wegen des Mittelspannungs-Verhältnisses erlaubt werden, außer unter den folgenden Fällen:

- a) Wo Versuche durchgeführt wurden, die dem wahren und endgültigen Spannungszustand im betrachteten Verbindungstyp entsprechen (Eigenstressungen und Zwängungsspannungen aus mangelhafter Ausführung einbezogen) und eine ständige Zunahme der Ermüdungsfestigkeit bei Abnahme der Mittelspannungs-Verhältnisses demonstrieren;
- b) wo Techniken zur Erhöhung der Ermüdungsfestigkeit angewandt werden, die nachweislich Druck-eigenstressungen erzeugen, und die einwirkende Spannung nicht von einer solchen Größe ist, dass im Betrieb die Druckeigenstressungen durch Fließen abgemindert werden

ANMERKUNG Siehe Anhang G.

6.3.4 Klebeverbindungen

(1) Eine Erhöhung der Ermüdungsfestigkeit wegen des Mittelspannungs-Verhältnisses sollte ohne versuchstechnische Bestätigung nicht vorgenommen werden.

6.3.5 Bereich der Kurzzeitfestigkeit

(1) Für bestimmte Konstruktionsdetails können bei negativen R -Verhältnissen und bei $N < 10^5$ Schwingspielen höhere Ermüdungsfestigkeiten angewandt werden.

ANMERKUNG Siehe Anhang G.

6.3.6 Schwingenspielzählung für die Berechnung des R -Verhältnisses

(1) Um maximale, minimale und Mittelspannungs-Werte für einzelne Schwingenspiele eines Kollektivs zu ermitteln ist die Reservoir-Methode, wie unter Anhang A, Bild A.2, anzuwenden.

6.4 Einfluss der Umgebung

(1) Für Kombinationen bestimmter Legierungen und Umweltbedingungen sollte die Stufe der einem Konstruktionsdetail zugeordneten Detailkategorie reduziert werden. Die in dieser Norm angegebenen Ermüdungsfestigkeits-Daten sollten im Falle von Außentemperaturen größer 65 °C oder größer 30 °C im Meeresumgebung nicht gelten, ohne dass ein effektiver Korrosionsschutz vorliegt.

ANMERKUNG Tabelle 6.2 gibt für die im Anhang G angegebenen Detailkategorien die Anzahl von Detailkategorien an, um die sie herabgestuft werden müssen entsprechend der Umweltbedingungen und Legierung.

Tabelle 6.2 — Anzahl der Detailkategoriestufen, um die $\Delta\sigma_c$ entsprechend den Umweltbedingungen und der Legierung abgemindert werden sollte

Werkstoff			Umweltatmosphäre							
Legierungs- serie ^a	Grund- zusammen- setzung	Schutz- bewertungen (siehe EN 1999-1-1)	Länd- lich	Industriell/ Städtisch		Meer			Eingetaucht	
				Mode- rat	Stark	Nicht indus- triell	Mode- rat	Stark ^b	Süß- wasser	Meeres- wasser ^b
3xxx	AlMn	A	0	0	(P) ^a	0	0	0	0	0
5xxx	AlMg	A	0	0	(P) ^a	0	0	0	0	0
5xxx	AlMgMn	A	0	0	(P) ^a	0	0	0	0	1
6xxx	AlMgSi	B	0	0	(P) ^a	0	0	1	0	2
7xxx	AlZnMg	C	0	0	(P) ^a	0	0	2	1	3

^a (P) = sehr vom Ausmaß der Umweltbelastung abhängig. Regelmäßig erneuerter Schutz könnte erforderlich werden, um lokale Angriffe zu vermeiden, die besonders schädlich im Hinblick auf die Rissentstehung sein könnten.

^b Der Wert von N_D sollte von 5×10^6 auf 10^7 Schwingenspiele erhöht werden.

ANMERKUNG Eine Herabstufung für Detailkategorien $< 25 \text{ N/mm}^2$ ist nicht erforderlich.

6.5 Techniken für die Erhöhung der Ermüdungsfestigkeit

(1) Methoden zur Erhöhung der Ermüdungsfestigkeit bestimmter konstruktiver Details dürfen verwendet werden.

ANMERKUNG Methoden zur Erhöhung der Ermüdungsfestigkeit sind im Allgemeinen teuer und bringen Schwierigkeiten der Qualitätskontrolle mit sich. Für allgemeine Konstruktionsfälle sollte man sich nicht auf sie verlassen, außer im Fall, dass Ermüdung besonders kritisch für die Gesamtwirtschaftlichkeit des Tragwerks ist; hier sollte man Expertenrat aufsuchen. Techniken für die Erhöhung der Ermüdungsfestigkeit werden eher für das Beheben vorhandener Mängel in Bemessung und Ausführung angewandt. Siehe Anhang H.

Anhang A (normativ)

Grundlagen der Berechnung der Ermüdungsfestigkeit

A.1 Allgemeines

A.1.1 Einfluss der Ermüdung auf die Bemessung

(1)P Tragwerke, die häufig schwankenden Betriebslasten ausgesetzt werden, können gegen Ermüdungsversagen anfällig sein und müssen für diesen Grenzzustand nachgewiesen werden.

(2) Der Grad der Übereinstimmung mit den Kriterien zum Nachweis des Grenzzustands der Tragfähigkeit oder der Gebrauchstauglichkeit nach EN 1999-1-1 sollte nicht als Maßstab der Gefährdung durch Ermüdungsschäden herangezogen werden (siehe A.1.3).

(3) Das Ausmaß der möglichen Beeinflussung der Bemessung durch Ermüdung sollte in der Konzeptionsphase des Planungsprozesses festgestellt werden. Um eine hinreichende Genauigkeit für die Voraussage der Ermüdungssicherheit zu erreichen, ist es notwendig:

- a) eine genaue Voraussage der vollständigen Folge der Betriebslasten für die gesamte Bemessungslebensdauer zu treffen;
- b) das elastische Verhalten des Tragwerks unter den vorausgesagten Lasten hinreichend genau zu ermitteln;
- c) die Ausbildung konstruktiver Details durchzuführen und das Herstellungsverfahren sowie das Ausmaß der Qualitätskontrolle entsprechend festzulegen. Diese Punkte können einen größeren Einfluss auf die Ermüdungsfestigkeit ausüben und brauchen evtl. eine genauere Kontrolle als bei Tragwerken, die für andere Grenzzustände bemessen werden. Für Informationen über die Ausführungsanforderungen siehe EN 1090-3.

A.1.2 Versagensmechanismus

(1) Es sollte angenommen werden, dass Ermüdungsversagen meistens an hoch beanspruchten Stellen (als Folge abrupter Änderungen der geometrischen Form, Zugeigenspannungen oder scharfer, rissähnlicher Fehlstellen) entsteht. Ermüdungsrisse wachsen stufenweise unter der Last sich wiederholender Spannungsänderungen. Die Risse bleiben normalerweise stabil unter konstanter Last. Versagen tritt ein, wenn der Restquerschnitt für die Aufnahme der höchsten Last nicht ausreicht.

(2) Es sollte angenommen werden, dass Ermüdungsrisse ungefähr im rechten Winkel zur Richtung der maximalen Hauptspannungsschwingbreite fortschreiten. Die Rissfortschrittsgeschwindigkeit nimmt exponentiell zu. Aus diesem Grund ist das Risswachstum oft anfangs langsam und Ermüdungsrisse werden für den größten Teil ihrer Lebensdauer meistens schwer als signifikant zu erkennen sein. Dadurch könnten Probleme bei deren Entdeckung im Betrieb entstehen.

A.1.3 Mögliche Stellen für Ermüdungsrisse

(1) Die folgenden Stellen für die Entstehung von Ermüdungsrisse bei spezifizierten Konstruktionsdetails sollten berücksichtigt werden:

- a) Schweißnahtübergänge und -Wurzeln von Schmelz-Schweißnähten;
- b) maschinell bearbeitete Ecken;
- c) gestanzte oder gebohrte Löcher;
- d) mit Schere oder Säge getrennte Kanten;
- e) Flächen unter hohem Kontaktdruck (Reibkorrosion);
- f) Gewindewurzeln von Befestigungsmitteln.

(2) Ermüdungsrisse vermögen auch bei nicht spezifizierten Merkmalen, die jedoch in der Praxis vorkommen können, entstehen. Die folgenden sollten, sofern sie relevant sind, berücksichtigt werden:

- a) Materialfehlstellen oder Schweißfehler;
- b) Kerben oder Kratzer aus mechanisch zugefügten Schäden;
- c) Korrosionsfehlstellen.

A.1.4 Bedingungen für die Ermüdungsanfälligkeit

(1) Bei der Bewertung der Wahrscheinlichkeit auf Ermüdungsanfälligkeit sollte Folgendes beachtet werden:

- a) Hohes Verhältnis dynamischer zu statischen Lasten: Sich bewegende oder hebende Konstruktionen, wie Land- oder Seetransportmittel, Kräne, usw., sind anfälliger für Ermüdungsprobleme als feste Konstruktionen, es sei denn, dass letztere hauptsächlich fahrende Lasten, wie bei Brücken, aufzunehmen haben;
- b) Häufiges Auftreten der Last: Dies führt zu einer großen Zahl von Spannungsschwingspielen während der Bemessungslebensdauer. Schlanke Tragwerke oder Bauteile mit niedrigen natürlichen Frequenzen neigen besonders zu Resonanz und dadurch zu einer Vergrößerung der dynamischen Spannung, auch wenn die statischen Spannungen bei der Bemessung niedrig sind. Tragwerke, die hauptsächlich Strömungslasten – bspw. von Wind – ausgesetzt sind und Tragwerke, die Maschinen stützen, sollten sorgfältig auf Resonanzeffekte überprüft werden;
- c) Anwendung von Schweißen: Einige häufig verwendete Schweißdetails weisen niedrige Ermüdungsfestigkeit auf. Dies trifft nicht nur für Verbindungen zwischen Bauteilen zu, sondern auch für jede Anschweißung auf einem lasttragenden Bauteil, egal ob die resultierende Verbindung als lasttragend oder nicht betrachtet wird;
- d) Komplexität des Verbindungsdetails: Komplizierte Verbindungen weisen oft hohe Spannungskonzentrationen auf, als Folge der lokalen Steifigkeitsänderungen längs des Lastübertragungsweges. Während diese oft wenig Einfluss auf die statische Tragfähigkeit der Verbindung haben, so können sie einen starken Einfluss auf die Ermüdungsfestigkeit ausüben. Bei Dominanz der Ermüdung sollte die Querschnittsform des Bauteils so ausgewählt werden, dass dadurch die Gleichmäßigkeit und Einfachheit in der Bemessung der Verbindung sichergestellt werden, so dass Spannungen berechnet und entsprechende Anforderungen für die Herstellung und Inspektion gewährleistet werden können;
- e) In einigen thermisch und chemisch beanspruchten Umgebungen kann die Ermüdungsfestigkeit reduziert werden, wenn die Metalloberfläche nicht geschützt wird.

A.2 Bemessung für sichere Lebensdauer

A.2.1 Voraussetzungen für die Bemessung nach sicherer Lebensdauer

(1) Der vorhergesagte Betriebsverlauf des Tragwerks sollte in Form einer Belastungsfolge und -häufigkeit vorliegen. Alternativ sollte das durch Spannungen hervorgerufene Tragwerksverhalten an allen potentiellen Rissentstehungsstellen in Form eines Spannungs-Zeit-Verlaufs vorliegen.

(2) Die Charakteristika der Ermüdungsfestigkeit aller potentiellen Rissentstehungsstellen sollten in Form von Ermüdungsfestigkeitskurven vorliegen.

(3) Alle potentielle Rissentstehungsstellen, die große Spannungsschwankungen und/oder größere Spannungskonzentrationen aufweisen, sollten nachgewiesen werden.

(4) Die bei der Herstellung der Bauteile mit potentiellen Rissentstehungsstellen benutzten Qualitätsnormen sollten den verwendeten Detailkategorien entsprechen.

A) (5) Der grundsätzliche Ablauf ist wie folgt (siehe Bild A.1):

- a) Ermittlung eines oberen Grenzwertes des Schätzwertes der Betriebslastenfolge für die Bemessungslebensdauer des Tragwerks (siehe 2.3);
- b) Schätzung des resultierenden Spannungs-Zeit-Verlaufes an der nachzuweisenden potentiellen Rissentstehungsstelle ab (siehe A.2.3);
- c) wo Nennspannungen vorkommen, Modifizierung des Spannungs-Zeit-Verlaufes in jedem Bereich der geometrischen Spannungskonzentration, die noch nicht in der Detailkategorie enthalten ist, durch Anwendung eines geeigneten Spannungskonzentrationsbeiwerts (siehe 5.3.2);
- d) Reduzierung des Spannungs-Zeit-Verlaufes auf eine äquivalente Anzahl von Schwingspielen (n_i) verschiedener Spannungsschwingbreiten $\Delta\sigma_i$ durch Anwendung eines Schwingspielzählverfahrens (siehe A.2.3);
- e) Anordnen der Schwingspiele in abnehmender Reihenfolge der Schwingbreite $\Delta\sigma_i$, so dass ein Spannungsschwingbreiten-Kollektiv entsteht, wobei $i = 1, 2, 3$ usw. für das erste, zweite, dritte Teilkollektiv steht (siehe A.2.3);
- f) Klassifizierung des Konstruktionsdetails in Übereinstimmung mit der festgelegten Reihe von Detailkategorien. Für die geeignete Detailkategorie und die entsprechende $\Delta\sigma$ - N Beziehung Bestimmung der zulässigen Lebensdauer (N_i) für die Bemessungs-Spannungsschwingbreite ($\Delta\sigma_i$);
- g) Berechnung des Gesamtschadens $D_{L,d}$ aller Schwingspiele auf Basis linearer Schadensakkumulation, wobei:

$$D_{L,d} = \sum \frac{n_i}{N_i} \quad (\text{A.1})$$

- h) Berechnung der sicheren Lebensdauer T_S :

$$T_S = \frac{T_L}{D_{L,d}} \quad (\text{A.2})$$

wobei die Bemessungslebensdauer T_L die gleichen Einheiten wie T_S hat;

- i) ist T_S kleiner als T_L , so sind eine oder mehrere der folgenden Maßnahmen durchzuführen:
- Neubemessung des Tragwerks oder Bauteils mit dem Ziel, die Spannungshöhe zu reduzieren;
 - Ersetzen des Konstruktionsdetails durch ein anderes aus einer höheren Kategorie;
 - Durchführung der Bemessung nach dem Konzept der Schadenstoleranz, sofern geeignet, (siehe A.3). $\overline{A1}$

A.2.2 Schwingspielzählung

- (1) Die Schwingspielzählung ist ein Verfahren zur Aufschlüsselung eines komplizierten Spannungs-Zeit-Verlaufs in ein einfacher handhabbares Schwingspielkollektiv mit Angabe der Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma$, Anzahl der Schwingspiele n und, falls notwendig, des R -Verhältnisses.
- (2) Für kurze Spannungs-Zeit-Verläufe, wo sich einfache Einwirkungsereignisse mehrmals wiederholen, wird die Reservoir-Methode empfohlen. Sie ist leicht zu veranschaulichen und einfach zu benutzen (siehe Bild A.2). Wo lange Spannungs-Zeit-Verläufe benutzt werden müssen, wie solche, die aus in realen Bauwerken gemessenen Beanspruchungen ermittelt wurden (siehe Anhang C), wird die Rainflow-Methode empfohlen. Beide Methoden sind zur Computeranalyse geeignet.

A.2.3 Herleitung des Spannungs-Kollektivs

- (1) Die Auflistung der Schwingspiele in abnehmender Reihenfolge der Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma$ ergibt ein Spannungs-Kollektiv. Für eine leichtere Berechnung kann es erforderlich sein, ein kompliziertes Kollektiv in weniger Blöcke zu vereinfachen. Eine konservative Methode ist das Zusammentragen mehrerer Blöcke in größere Blöcke mit der gleichen Gesamtzahl der Schwingspiele, dabei jedoch mit der höchsten vorkommenden Spannungsschwingbreite. Genauer ist es, den gewichteten Durchschnitt aller Blöcke in einer Gruppe mit dem Exponenten m zu berechnen, wobei m die Neigung der am wahrscheinlichsten zu benutzenden $\Delta\sigma-N$ Kurve ist (siehe Bild A.3). Die Verwendung eines arithmetischen Mittelwerts wird immer nicht konservativ sein.

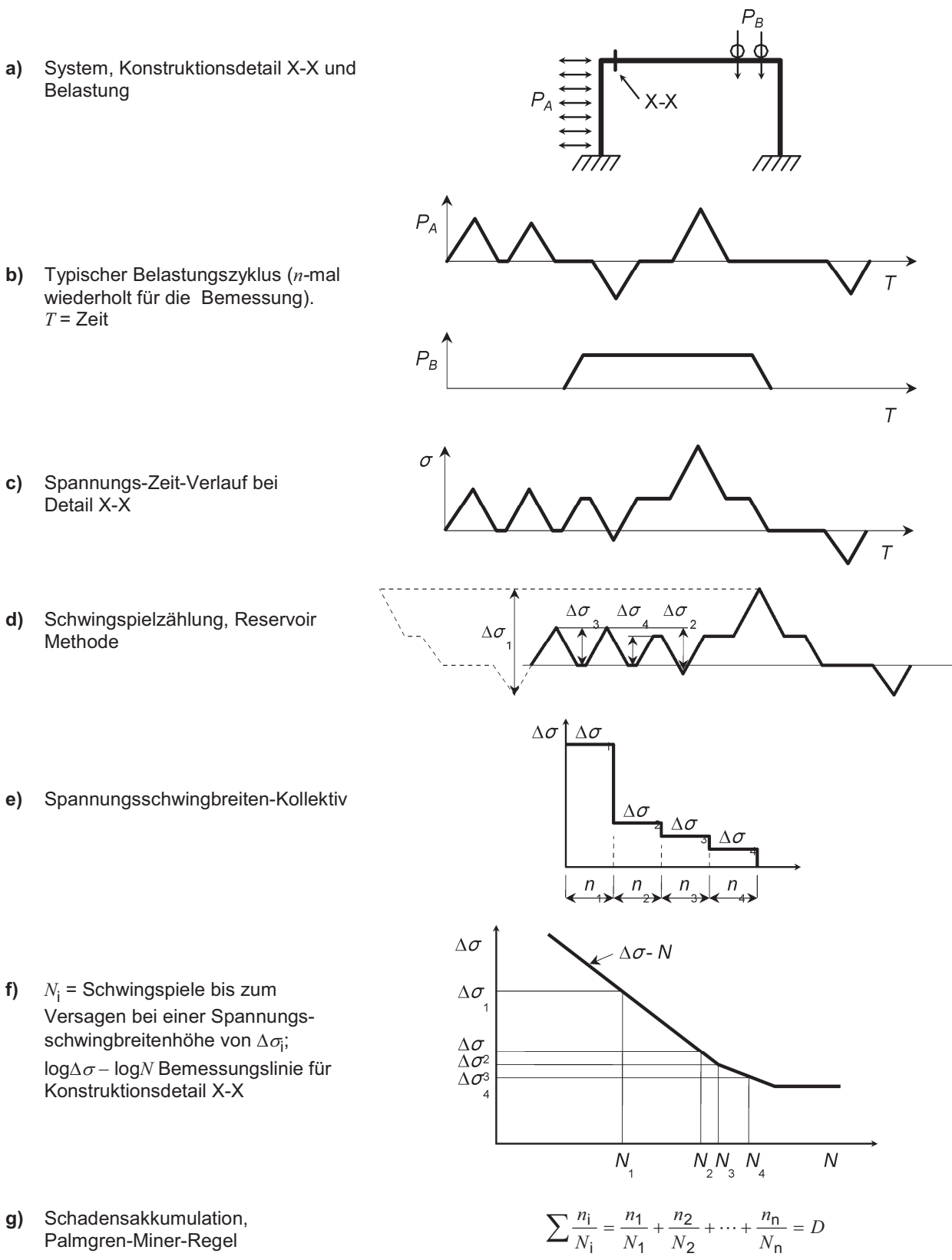
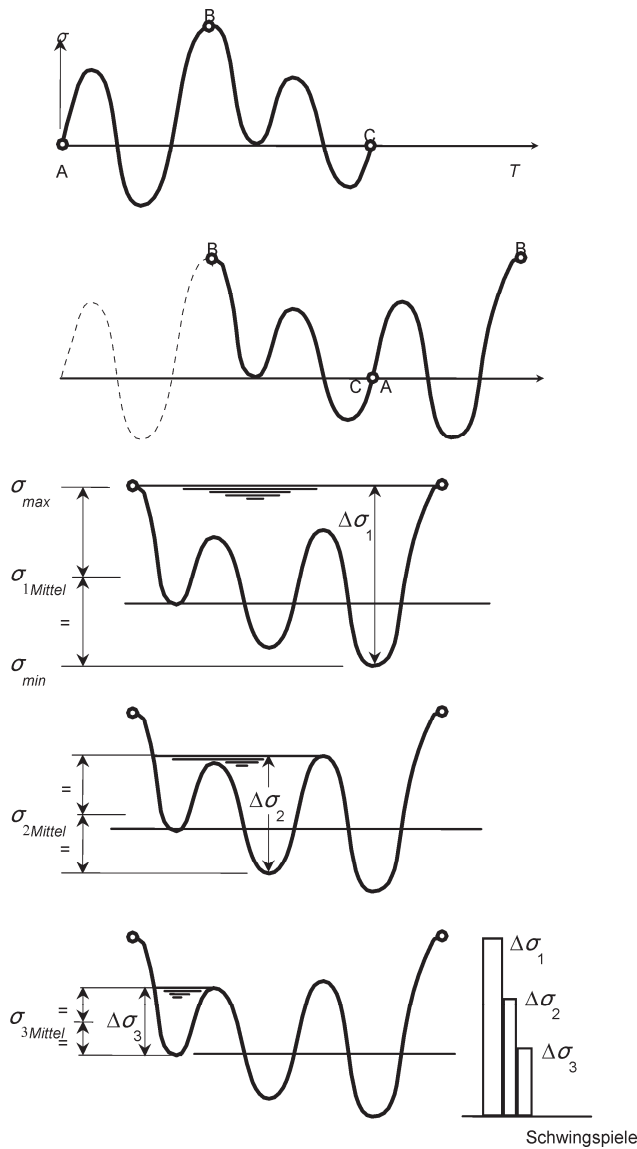


Bild A.1 — Ermüdungs-Bewertungs-Verfahren



1. Schritt: Bestimmung des Spannungs-Zeit-Verlaufs des Belastungsereignisses. Ermittlung der Spitze B.

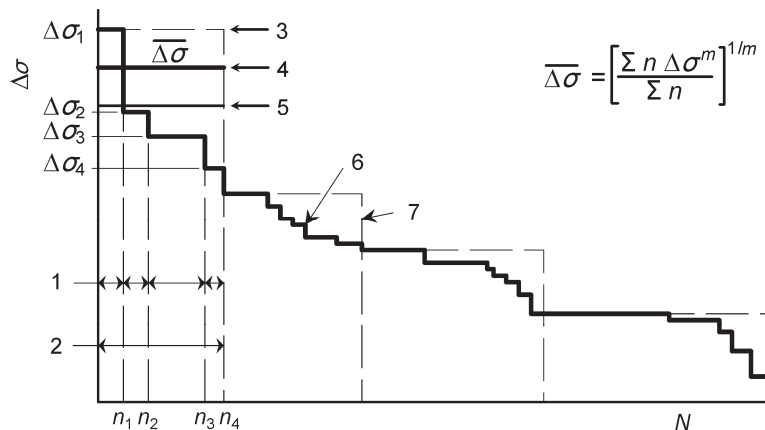
2. Schritt: Verschiebung des Abschnitts links von B nach rechts im Spannungs-Zeit-Verlauf.

3. Schritt: Befüllung des „Reservoirs“ mit „Wasser“. Die größte Tiefe ergibt das größte Schwingspiel.

4. Schritt: Ablassen des Wasser an der tiefsten Stelle. Suchen des nächsten größten Tiefenwertes. Dies wird das zweitgrößte Schwingspiel sein.

5. Schritt: Und so weiter. Wiederholung des Prozesses bis das ganze „Wasser“ abgelassen ist. Die Gesamtheit aller Schwingspiele bildet das Spannungs-Kollektiv für den oben ermittelten Spannungs-Zeit-Verlauf.

Bild A.2 — Das Reservoir-Schwingspielzählverfahren



Legende

- 1 Original-Blöcke;
- 2 Vereinfachter Block; $\Delta\sigma$ Spannungsschwingbreite; N kumulierte Häufigkeit (alle Schwingspiele);
- 3 Belastungsspitze (konservativ);
- 4 Gewichtetes Mittel (am genauesten);
- 5 Arithmetisches Mittel (nicht konservativ)
- 6 Registriertes Kollektiv;
- 7 Vereinfachtes Kollektiv für die Bemessung

Bild A.3 — Vereinfachtes Spannungsschwingbreiten-Kollektiv

A.3 Schadenstolerante Bemessung

A1

A.3.1 Voraussetzungen für schadenstolerante Bemessung

- (1) Eine schadenstolerante Bemessung sollte nur unter den folgenden Bedingungen vorgenommen werden.
 - a) Die Entstehungsstellen für Ermüdungsrisse sollten sich auf oder in der Nähe einer Oberfläche befinden, die im Betrieb leicht zugänglich sein sollte;
 - b) praktische Inspektionsmethoden sollten vorhanden sein, die zum Auffinden der Risse und zu ihrer Größenbestimmung taugen, bevor sie ihre versagenskritische Größe erreicht haben. Siehe 1.7.3;
 - c) die Vorgehensweise in A.3.2 sollte angewendet werden, um die Mindest-Inspektionshäufigkeit und die maximal zulässige Rissgröße vor einer erforderlichen Korrektur zu bestimmen;

ANMERKUNG Ein weiteres Verfahren zur Bestimmung der Inspektionshäufigkeit ist L.2 und L.3 zu entnehmen; es gilt nur bei Übernahme der in Anhang J enthaltenen Ermüdungswiderstandsdaten.

- d) das Wartungsbuch sollte für jede potentielle Rissstelle die in 1.7.3 aufgelisteten Informationen spezifizieren. **A1**

A.3.2 Festlegung der Inspektionsstrategie bei schadenstoleranter Bemessung

A1 (1) An jeder potentiellen Rissentstehungsstelle, wo die nach Gleichung (A.2) berechnete sichere Lebensdauer T_S kleiner ist als die Bemessungslebensdauer T_L , sollte das Inspektionsintervall T_i berechnet werden. **A1**

(2) Das Wartungsbuch sollte festlegen, dass die erste Inspektion an jeder potentiellen Rissentstehungsstelle vor Ablauf der sicheren Lebensdauer stattfinden sollte.

(3) Das Wartungsbuch sollte festlegen, dass nachfolgende Inspektionen in regelmäßigen Intervallen T_i stattfinden sollten:

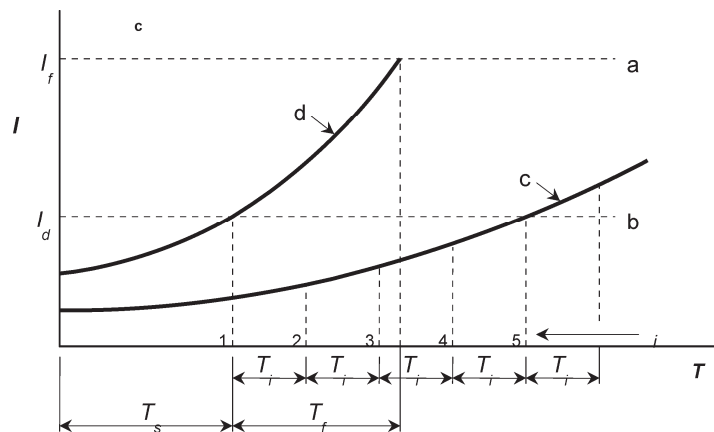
$$T_i \leq 0,5 T_f \quad (\text{A.3})$$

wobei T_f die errechnete Zeit für einen Riss ist, der an der nachzuweisenden Stelle entstanden ist, um von einer auf der Oberfläche wahrnehmbaren Länge l_d bis zu einer bruchkritischen Länge l_f (siehe Bild A.4) zu wachsen.

ANMERKUNG Die angenommene minimale exponierte Länge eines Oberflächenrisses sollte die Zugänglichkeit, Position, den wahrscheinlichen Oberflächenzustand und die Inspektionsmethode berücksichtigen. Wenn nicht durch spezifische Versuche nachgewiesen wird, dass kürzere Längen mit einer Wahrscheinlichkeit höher als 90 % entdeckt werden können, so sollte die angenommene Länge l_d nicht niedriger als der Wert in Tabelle A.1 angesetzt werden, wobei die volle Risslänge für eine Inspektion zugänglich ist.

(4) In Fällen, wo irgendein dauerhaft eingebautes Konstruktions- oder anderes Bauteil die vollständige Zugänglichkeit des Risses behindert, sollte die abgedeckte Risslänge zum geeigneten Wert aus Tabelle A.1 addiert werden, um den Rechenwert für l_d zu ermitteln.

(5) Wo schwere, dicke Konstruktionsteile zur Anwendung kommen und die Entstehungsstelle auf einer unzugänglichen Oberfläche sich befindet (z. B. die Wurzel einer einseitig auf einer Rohrwand geschweißten Stumpfnah), könnte die Planung einer Inspektionsstrategie geeignet sein, die auf eine Ultraschalluntersuchung basiert, für die Entdeckung und Messung von Rissen bevor diese zur zugänglichen Oberfläche gelangen. Ein solches Verfahren sollte nicht ohne vorherige experimentelle Untersuchung und Auswertung unternommen werden.



Legende

- a Bruchkritische Länge;
- b Angenommene kleinste wahrnehmbare Länge;
- c Tatsächliche Risswachstumskurve;
- d Angenommene Kurve für schnellstes Wachstum, siehe Anhang B für obere Grenze;
- i Inspektionsnummer;
- T_i Inspektionsintervall;
- T_s Zeitintervall bis zur Erreichung der wahrnehmbaren Risslänge;
- T_f Zeitintervall, in dem der Riss von der kleinsten wahrnehmbaren Länge bis zur bruchkritischen Länge wächst

Bild A.4 — Inspektionsstrategie für schadenstolerante Bemessung

Tabelle A.1 — Empfohlene sichere wahrnehmbare Längen von Oberflächenrissen l_d in mm

Inspektionsmethode	Rissstelle		
	Ebene glatte Oberfläche	Rauhe Oberfläche, Nahtüberhöhung	Scharfe Ecke, Nahtübergangsstelle
Visuell, mit Vergrößerungslinse	20	30	50
Farbeindringprüfung	5	10	15

ANMERKUNG Die oberen Werte setzen eine Beobachtungsmöglichkeit aus der Nähe, gute Lichtverhältnisse und das Entfernen von Anstrichen auf der Oberfläche voraus.

(6) Der Wert von l_f sollte so festgelegt werden, dass der Nettoquerschnitt – bei Berücksichtigung des wahrscheinlichen Rissprofils durch die Wanddicke – die maximalen statischen Dehnungskräfte aus der mit dem Sicherheitsbeiwert multiplizierten Belastung aufnehmen sollte, entsprechend der Berechnung nach EN 1999-1-1, ohne ein instabiles Risswachstum zu entwickeln.

(7) T_f sollte durch Berechnung und/oder Versuche folgendermaßen abgeschätzt werden, bei Annahme einer um den Sicherheitsbeiwert vervielfachten Belastung (siehe 2.4):

- a) Die Berechnungsmethode sollte auf bruchmechanischen Grundlagen basieren (siehe Anhang B). Eine obere Grenze, definiert als Mittelwert zuzüglich zwei Standardabweichungen, sollte bei der Beziehung des Risswachstums angewandt werden. Alternativ können spezifische Risswachstumsdaten aus Standardprüfkörpern aus dem gleichen Werkstoff wie im Bereich des Risswachstums gewonnen werden. In diesem Fall sollte die Rissfortschrittsgeschwindigkeit um den entsprechenden Ermüdungsversuchsbeiwert F multipliziert werden (siehe Tabelle C.1);

- b) wo das Risswachstum aus Tragwerks- oder Komponenten-Versuchen bei Simulation des richtigen Werkstoffs, der Geometrie und Herstellungsmethode ermittelt wird, sollte der Versuchskörper durch die relevante Belastungsstruktur beansprucht werden (siehe Anhang C);
 - c) die zwischen den Risslängen l_d und l_f registrierten Risswachstumsgeschwindigkeiten sollten um den Ermüdungsversuchsbeiwert F multipliziert werden (siehe Tabelle C.1).
- (8) Das Wartungsbuch sollte die Maßnahmen für den Fall der Entdeckung eines Ermüdungsrissses während einer Routineinspektion folgendermaßen festlegen:
- a) Wenn die gemessene Risslänge weniger als l_d beträgt, ist keine Ausbesserung notwendig;
 - b) wenn die gemessene Risslänge gleich oder größer als l_d ist, sollte das Bauteil bezüglich seiner Tauglichkeit für den Verwendungszweck bewertet werden, um festzustellen, wie lange das Tragwerk mit Sicherheit und ohne Ausbesserung oder Auswechseln im Betrieb belassen werden darf. Wird der Betrieb fortgesetzt, so sollte eine Erhöhung der Inspektionshäufigkeit an der fraglichen Stelle in Erwägung gezogen werden;
 - c) wenn die gemessene Risslänge größer als l_f ist, so sollte das Tragwerk sofort aus dem Betrieb genommen werden.
- A1** (9) Weitere Hinweise finden sich in Anhang L für den Fall, dass die Ermüdungswiderstandsdaten aus Anhang J übernommen werden. **A1**

Anhang B (informativ)

Hinweise für die Bewertung des Rissfortschritts durch Bruchmechanik

B.1 Geltungsbereich

(1) Ziel dieses Anhangs ist es, Information bereitzustellen über die Anwendung der Bruchmechanik zur Bewertung des Fortschritts von Ermüdungsrissen von scharfen, ebenen Fehlstellen. Die Hauptanwendungen sind in der Bewertung von:

- bekannten Fehlern (inklusive im Betrieb entdeckte Fehler);
- angenommenen Fehler (beinhaltet die Berücksichtigung der Originalverbindung oder die Grenzen der Fehlererkennung bei der Anwendung zerstörungsfreier Prüfverfahren);
- der Toleranz gegenüber Fehlern (beinhaltet die Bewertung von Herstellungsfehlern bezüglich ihrer Eignung für den vorgesehenen Einsatz (fitness-for-purpose) in Verbindung mit bestimmten Betriebsanforderungen).

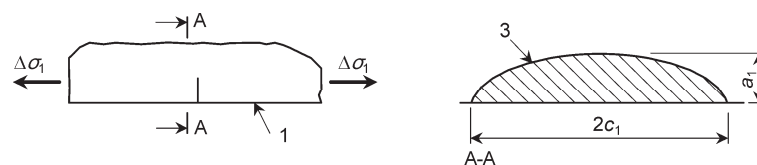
(2) Die Methode deckt den Rissfortschritt senkrecht zur Haupt-Zugspannungs-Richtung (Modus 1).

B.2 Grundlagen

B.2.1 Fehlerabmessungen

(1) Es wird angenommen, dass der Ermüdungfortschritt an einem vorhandenen ebenen Fehler mit scharfer Rissfront, senkrecht zur Richtung der Haupt-Zug-Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma$ an dieser Stelle anfängt.

(2) Die Abmessungen für vorhandene Fehler werden in Bild B.1 gezeigt in Abhängigkeit davon, ob diese bereits zur Oberfläche gedungen oder innere Fehler im Werkstoff sind.

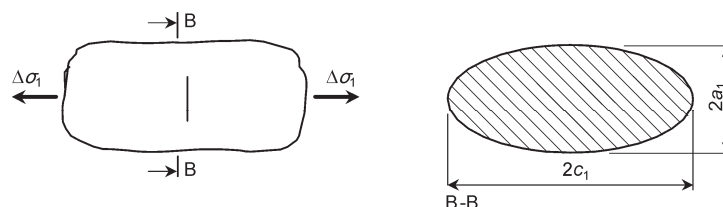


Legende

1 freie Oberfläche

2 Fehler

a) Fehler bis zur Oberfläche reichend



b) Innerer Fehler

Bild B.1 — Vorhandener ebener Fehler

B.2 Rissfortschrittsabhängigkeit

(1) Unter der Einwirkung der zyklisch wiederholten Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma$ schreitet die Rissfront in den Werkstoff fort entsprechend der Rissfortschrittsregel. Die Rissfortschrittsgeschwindigkeit beträgt in Richtung der Abmessung „ a “:

$$\frac{da}{dN} = A \times (\Delta\sigma a^{0,5} y)^m \quad (\text{B.1})$$

Dabei ist

- A die Werkstoff-Konstante der Rissfortschrittsgeschwindigkeit;
- m der Exponent der Rissfortschrittsgeschwindigkeit;
- y der Geometriefaktor, abhängig von Rissform, -Orientierung und Oberflächengrenzverhältnissen.

ANMERKUNG Die Einheiten für Spannungsintensitäts-Beiwerte ΔK sind $\text{Nmm}^{-2} \text{m}^{0,5}$ [$\text{MPam}^{0,5}$] und für Rissfortschrittsgeschwindigkeiten da/dN ist es [m/Schwingspiel]. Werte in B.3 gelten nur für diese Einheiten.

(2) Obige Gleichung kann transformiert werden in:

$$\frac{da}{dN} = A \Delta K^m \quad (\text{B.2})$$

wobei ΔK ist die Spannungsintensitäts-Schwingbreite und sie ist gleich $\Delta\sigma a^{0,5} y$.

(3) Nach Anwendung einer Anzahl von N Schwingspielen der Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma$ wird der Riss von Abmessung a_1 zur Abmessung a_2 wachsen entsprechend folgender Integration:

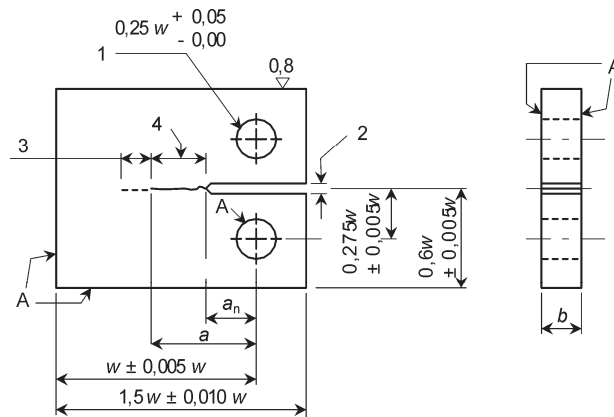
$$N = \int_{a_1}^{a_2} \frac{da}{A \Delta K^m} \quad (\text{B.3})$$

(4) Für den allgemeinen Fall sind A , ΔK und m von „ a “ abhängig.

B.3 Rissfortschrittsdaten A und m

(1) A und m werden aus Rissfortschrittsmessungen an standardisierten gekerbten Proben mit LT, TL oder ST Ausrichtung (Beispiel siehe in Bild B.2) unter Anwendung standardisierter Prüfverfahren ermittelt. Die Probenform sollte eine sein, für die eine genaue Spannungsintensitäts-Beiwert (K)-Lösung (d. h. das Verhältnis zwischen der vorkommenden Einwirkung und Rissgröße „ a “) vorhanden ist.

ANMERKUNG Für weitere Information über standardisierte Testverfahren siehe Literaturangabe B.1.



Legende

- 1 Lochdurchmesser
- 3 Risszuwachs
- 2 Spaltbreite
- 4 Ermüdungs-Vorriss

Empfohlene Dicke $w / 20 \leq b \leq w / 4$

Bild B.2 — Typische Versuchsprobe für Rissfortpflanzung (Beispiel aus Literaturangabe B.3)

(2) Die Versuche werden mit konstantem Spannungsintensitäts-Verhältnis $R = K_{\min}/K_{\max}$ entweder für konstantes R oder konstantes K_{\max} und genauer Messung des Rissfortschritts von der Kerbe aus durchgeführt, wobei dies durch rechnergesteuerte zyklische Einwirkung auf die Probe erfolgt..

ANMERKUNG Für weitere Information über die Prüfbedingungen siehe Literaturangabe B.2.

(3) Werden bestimmte Werte für die Risslänge „a“ ermittelt, so wird eine Ausgleichskurve an die Daten angepasst mithilfe der Methode, die in der Prüfnorm beschrieben ist. Die Rissfortschrittsgeschwindigkeit da/dN für eine gegebene Risslänge wird dann hieraus als die Neigung der Kurve am Punkt „a“ berechnet.

(4) Der entsprechende Wert der Spannungsintensitäts-Schwingbreite ΔK wird durch Anwendung der maßgebenden K -Lösung für den Testkörper in Verbindung mit der vorkommenden Einwirkungs-Schwingbreite ermittelt. Die Ergebnisse da/dN werden in Abhängigkeit von ΔK auf logarithmischen Skalen aufgezeichnet.

(5) Für eine allgemeine Anwendung könnten Rissfortschrittskurven für verschiedene R -Werte notwendig sein. Bild B.3 zeigt eine typische Gruppe von $da/dN - \Delta K$ -Kurven für die bei Strangpressprofilen verwendeten Aluminium-Knetlegierung EN AW-6005A T6. In Bild B.3(a) war die Prüfbedingung ein konstantes Spannungsintensitätsverhältnis K_{\min}/K_{\max} , und in Bild B.3(b) wird das Ergebnis der Prüfung bei konstantem $K_{\max} = 10 \text{ Nmm}^{-2}\text{m}^{0,5}$ mit den konservativen Ästen der Kurven aus Bild B.3(a) kombiniert. Diese Kombination der Ergebnisse aus den konstant R - und konstant K -Werten ist eine ingenieurmäßige konservative Annäherung, und kann zur Abschätzung der Ermüdungslebensdauer bei hohen Eigenspannungen oder bei der Bewertung von kurzen Ermüdungsrissen verwendet werden. Die Werte für m und A in Bild B.3 werden in Tabellen B.1(a) und (b) angegeben.

(6) In Bild B.4(a) werden die konstant R -Rissfortschrittsgeschwindigkeiten von Aluminiumknetlegierungen für $R = 0,1$ aufgezeichnet und in Bild B.4(b) die entsprechenden Daten für $R = 0,8$ gegeben. Bild B.5 zeigt die Gruppe von konstant R -Rissfortschrittsgeschwindigkeits-Kurven von drei Formgusslegierungen bei $R = 0,1$ und $R = 0,8$. Bild B.6 stellt die kombinierten Daten von konstant R - und konstant K_{\max} -Prüfungen von Aluminiumknetlegierungen bei $R = 0,1$ und $R = 0,8$ dar. Die Werte von m und A für die Obergrenzen der Einhüllenden der Rissfortschrittsgeschwindigkeits-Kurven in Bildern B.4 bis B.6 sind in den Tabellen B.2 bis B.4 entsprechend enthalten.

ANMERKUNG Für weitere da/dN zu ΔK -Werte siehe die Literaturangaben B.3 und B.4.

(7) Korrosive Umgebung kann A und m beeinflussen. Prüfergebnisse unter Bedingungen von Raumfeuchtigkeit werden geeignet für die Abdeckung der meisten normalen atmosphärischen Bedingungen sein.

B.4 Geometriefunktion y

- (1) Die Geometriefunktion y hängt von den Rissabmessungen (Form und Länge), den Abmessungen der Oberflächengrenzen des umgebenden Werkstoffs und der Spannungsstruktur im Bereich des Rissfortschritts ab.
- (2) Diese Information kann aus Finite-Element-Analysen des Konstruktionsdetails unter Anwendung von Rissspitzen-Elementen ermittelt werden. Die Spannungsintensität für verschiedene Risslängen wird durch Anwendung des J -Integral-Verfahrens berechnet. Alternativ kann diese aus dem Verschiebungs- oder Spannungsfeld um die Rissspitze oder der gesamten elastischen Deformationsenergie berechnet werden.
- (3) Veröffentlichte Lösungen für häufig verwendete Geometrien (Grundmaterial und Schweißverbindungen) sind eine alternative Quelle von y -Werten. Standarddaten werden oft in Form von Y angegeben, wobei $Y = y\pi^{0,5}$. Ein typisches Beispiel für einen bis zur Oberfläche reichenden Riss in einer Platte zeigt Bild B.7(a). Geht der Riss von einer Nahtübergangsstelle auf der Plattenoberfläche aus, so kann eine weitere Anpassung für die lokalen Spannungskonzentrationseinflüsse durch den Vergrößerungsfaktors M_K vorgenommen werden (siehe Bild B.7(b)).

ANMERKUNG Für weitere Information über veröffentlichte Lösungen für y siehe die Literaturangaben B.1 und B.5.

- (4) Das Produkt aus Y für die einfache Platte und M_K für die Nahtübergangsstelle gibt die Änderung von y an bei wachsendem Riss durch die Materialdicke. (siehe Bild B.7(c)).

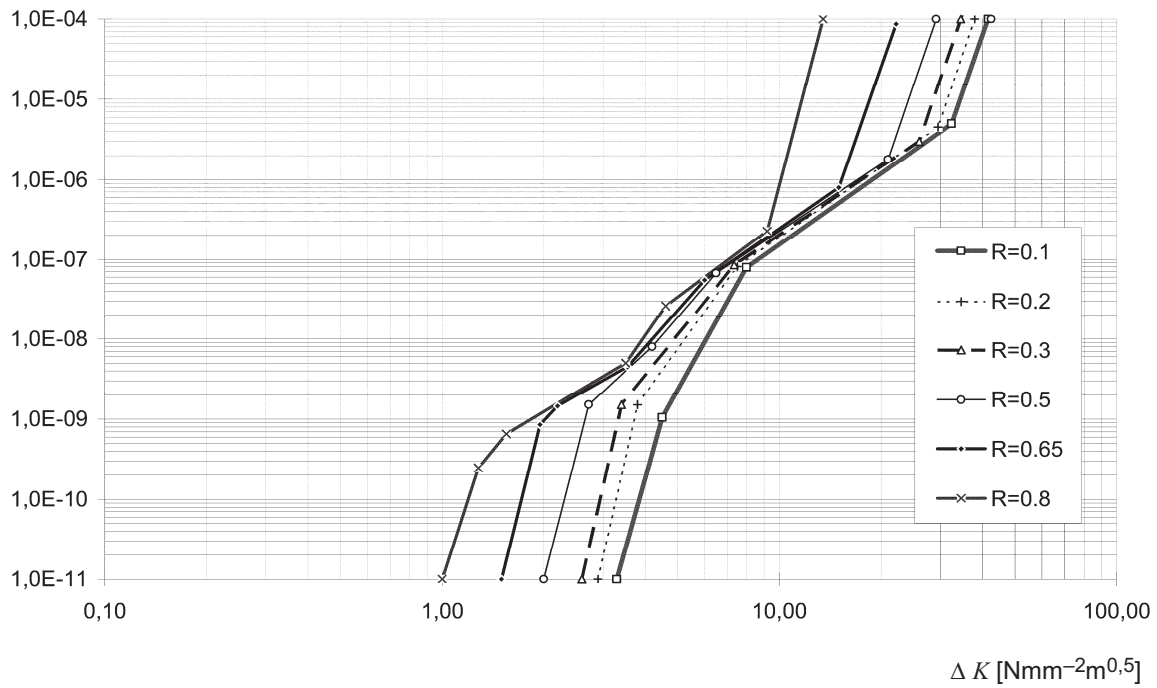
B.5 Integration des Rissfortschritts

- (1) Für den allgemeinen Fall eines Spannungs-Zeit-Verlaufs variabler Amplitude muss ein Spannungs-Kollektiv ermittelt werden (siehe 2.2.1). In der Praxis sollte das Gesamtkollektiv mit mindestens einer zehnmaligen Wiederholung identischer Folgen angewandt werden, die alle die gleiche Spannungsschwingbreite und gleiches R -Verhältnis aber nur ein Zehntel der Anzahl der Spannungsschwingspiele aufweisen. Der Block mit der höchsten Spannungsschwingbreite sollte als erster in jeder der Folgen angesetzt werden (siehe Bild A.3). Der stufenweise ermittelte Rissfortschritt wird aus dem Rissfortschrittsgeschwindigkeits-Polygon für das maßgebende R -Verhältnis berechnet, für jeden einzelnen Block von Spannungsschwingspielen konstanter Amplitude.
- (2) Im Bereich von Schweißnähten, außer im Fall dass Verteilung und Größe der Eigenspannungen tatsächlich bekannt sind, sollte eine Rissfortschrittskurve mit entweder hohem R -Verhältnis ($R = 0,8$) oder mit $K_{\max} =$ konstant zur Anwendung kommen.
- (3) Die Risslänge „ a “ wird auf dieser Grundlage integriert bis die maximal benötigte Risslänge a_2 erreicht wird und die Nummern berechnet werden.

B.6 Ermittlung der maximalen Risslänge a_2

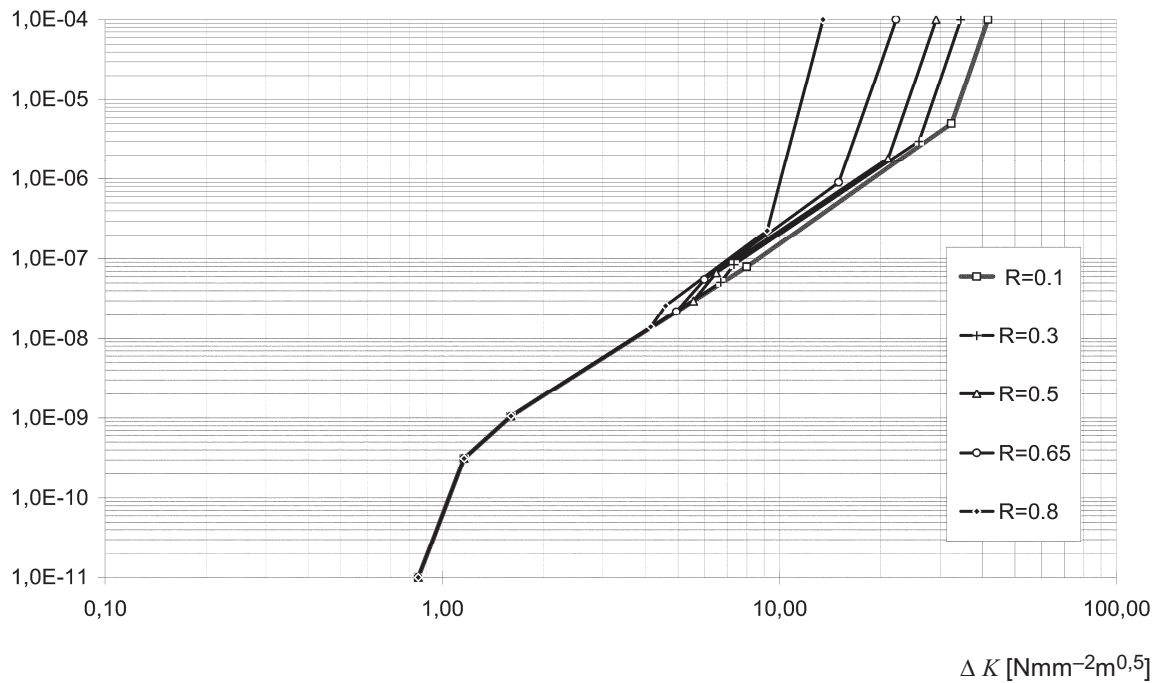
- (1) Diese wird meist auf der Grundlage des Zerreißens im Nettoquerschnitt unter der maximalen angewandten Zugeinwirkung, mithilfe des maßgebenden Teilsicherheitsbeiwerts, siehe EN 1999-1-1, bestimmt.

da/dN [m/Schwingspiel]



a) $R = K_{min}/K_{max} = \text{konstant}$

da/dN [m/Schwingspiel]



b) $K_{max} = 10 \text{ Nmm}^{-2}\text{m}^{0,5}$

Bild B.3 — Typische Ermüdungs-Risswachstums-Kurven für die Aluminiumlegierung EN AW-6005A T6 LT

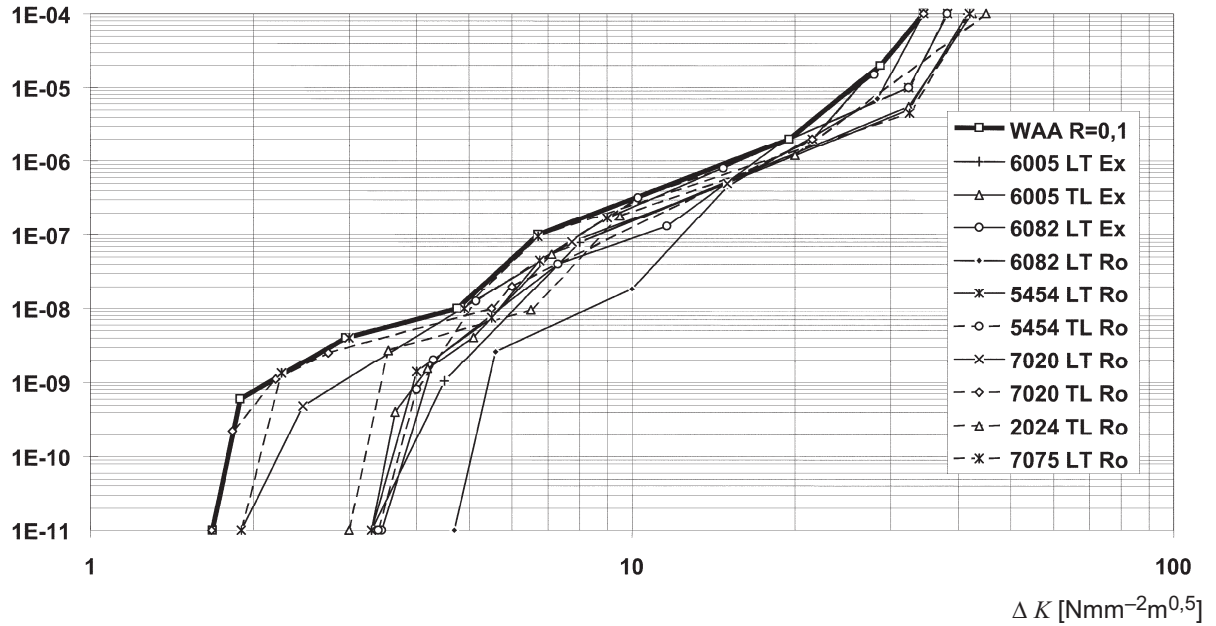
Tabelle B.1(a) — Ermüdungs-Risswachstumsdaten für EN AW-6005A T6 LT,
 $R = K_{\min}/K_{\max} = \text{konstant}$

<i>R</i> - Verhältnis	Spannungs- intensität ΔK [Nmm ⁻² m ^{0,5}]	<i>m</i>	<i>A</i>	<i>R</i> - Verhältnis	Spannungs- intensität ΔK [Nmm ⁻² m ^{0,5}]	<i>m</i>	<i>A</i>
0,100	3,30	15,00	1,65789E-19	0,500	2,00	16,29	1,24322E-16
	4,50	7,52	1,29310E-14		2,72	3,85	3,17444E-11
	8,00	2,96	1,67380E-10		4,20	4,87	7,41477E-12
	32,4	12,0	4,10031E-24		6,50	2,81	3,50674E-10
	41,61	12,0	4,10031E-24		21,00	12,23	1,21158E-22
	60,00	12,0	4,10031E-24		29,17	12,23	1,21158E-22
0,200	2,90	18,53	2,67965E-20	0,650	1,50	16,93	1,04285E-14
	3,80	5,87	5,94979E-13		1,95	4,43	4,41861E-11
	7,50	2,93	2,22754E-10		2,20	2,39	2,20681E-10
	29,60	12,43	2,25338E-24		3,55	4,77	1,06838E-11
	37,98	12,43	2,25338E-24		6,00	3,05	2,32639E-10
	55,00	12,43	2,25338E-24		15,00	12,00	6,08450E-21
0,300	2,60	18,67	1,77471E-19	0,800	1,00	13,03	9,99999E-12
	3,40	5,24	2,47080E-12		1,28	4,99	7,28970E-11
	7,35	2,82	3,06087E-10		1,55	2,50	2,16851E-11
	26,00	12,40	8,41151E-24		3,50	6,03	2,61124E-12
	34,49	12,40	8,41151E-24		4,60	3,12	2,22506E-10
	50,00	12,40	8,41151E-24		9,20	15,93	9,83032E-23
				13,48	15,93	9,83032E-23	

Tabelle B.1(b) — Ermüdungs-Risswachstumsdaten für EN AW-6005A-T6 LT,
 $K_{\max} = 10 \text{ Nmm}^{-2}\text{m}^{0,5} = \text{konstant}$

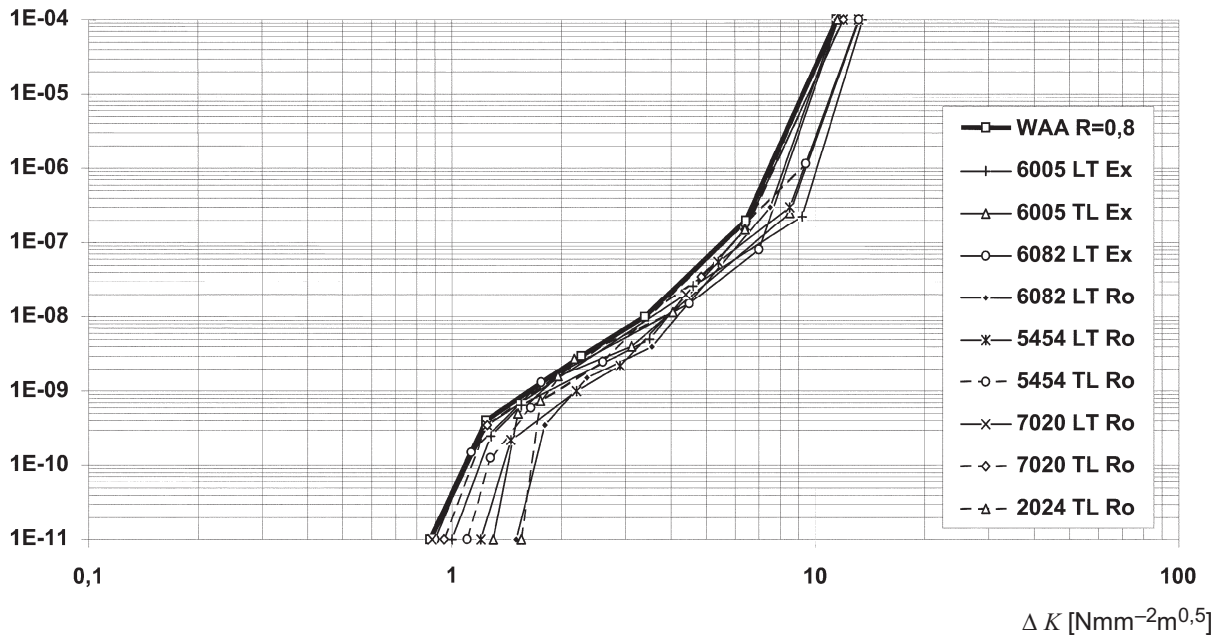
<i>R</i> - Verhältnis	Spannungs- intensität ΔK [Nmm ⁻² m ^{0,5}]	<i>m</i>	<i>A</i>	<i>R</i> - Verhältnis	Spannungs- intensität ΔK [Nmm ⁻² m ^{0,5}]	<i>m</i>	<i>A</i>
0,100	0,85	11,09	6,06810E-11	0,500	0,85	11,09	6,06910E-11
	1,16	3,74	1,80712E-10		1,16	3,74	1,80712E-10
	1,60	2,69	2,96984E-10		1,60	2,70	2,95817E-10
	8,00	2,96	1,67380E-10		5,55	5,09	4,92250E-12
	32,40	12,0	4,10322E-24		6,50	2,81	3,50674E-10
	41,61	12,0	4,10322E-24		21,00	12,20	1,20951E-22
					29,17	12,20	1,20951E-22
0,300	0,85	11,09	6,06910E-11	0,650	0,85	11,09	6,06910E-11
	1,16	3,74	1,80712E-10		1,16	3,74	1,80712E-10
	1,60	2,71	2,93585E-10		1,60	2,69	2,96037E-10
	6,70	5,52	1,41317E-12		4,95	4,76	1,08127E-11
	7,35	2,82	3,06087E-10		6,00	3,05	2,32639E-10
	26,00	12,40	8,42100E-24		15,00	12,04	6,08100E-21
	34,49	12,40	8,42100E-24		22,18	12,04	6,08100E-21
				0,800	0,85	11,09	6,06910E-11
					1,16	3,74	1,80712E-10
					1,60	2,72	2,92718E-10
					4,15	6,01	2,68983E-10
					4,60	3,12	2,22506E-10
					9,20	15,93	9,81913E-23
				13,48	15,93	9,81913E-23	

da/dN [m/Schwingspiel]



a) $R = 0,1$

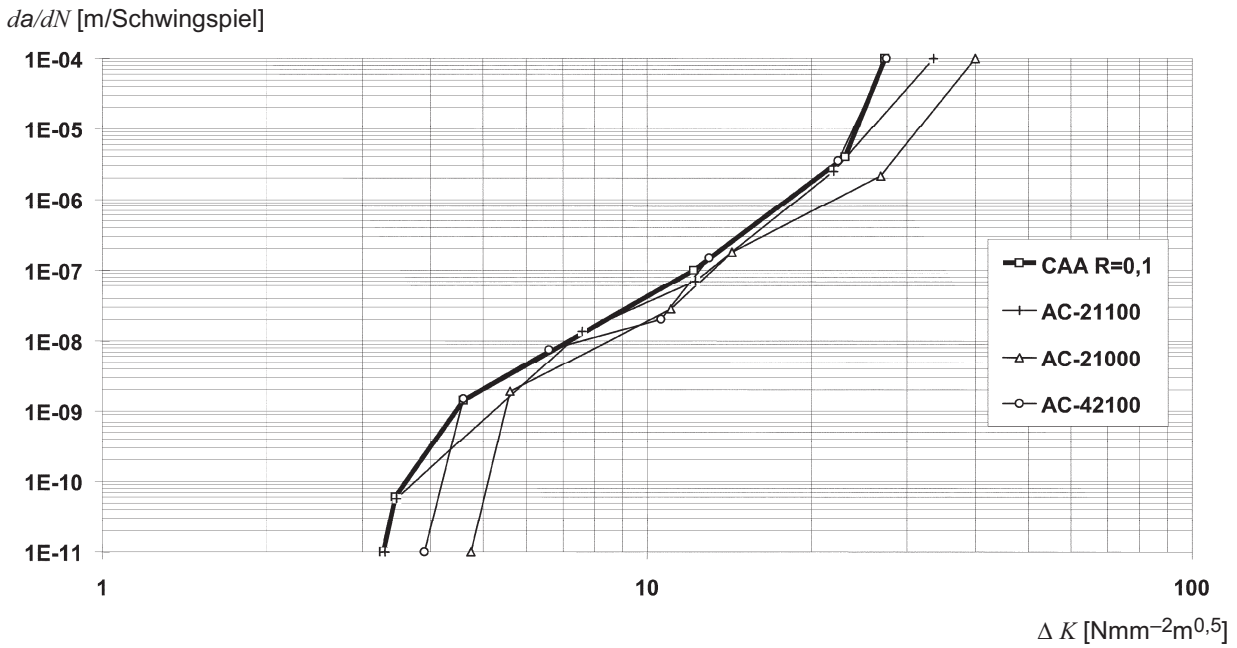
da/dN [m/Schwingspiel]



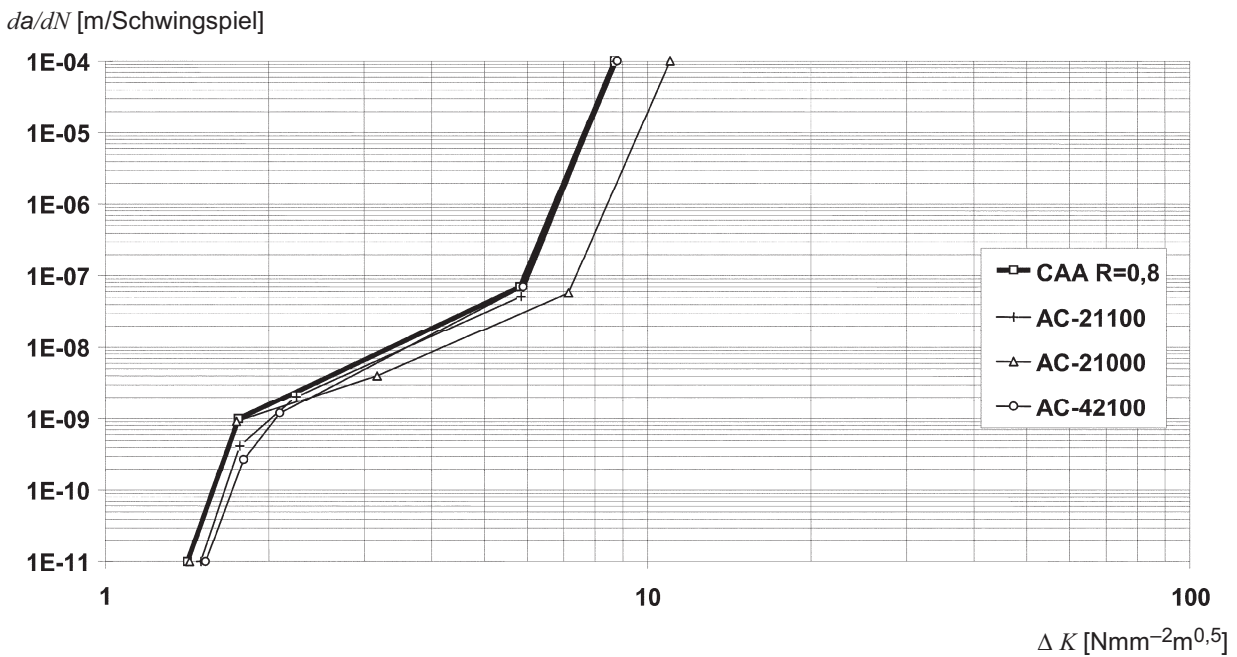
b) $R = 0,8$

Bild B.4 — Typische Ermüdungs-Risswachstums-Kurven für verschiedene Knetlegierungen

ANMERKUNG Die Legierungen 2024 TL Ro und 7075 LT Ro werden für Anwendungen im Bereich des Hoch- und Ingenieurbaus nicht empfohlen. Sie dienen hier nur zum Vergleich.



a) $R = 0,1$

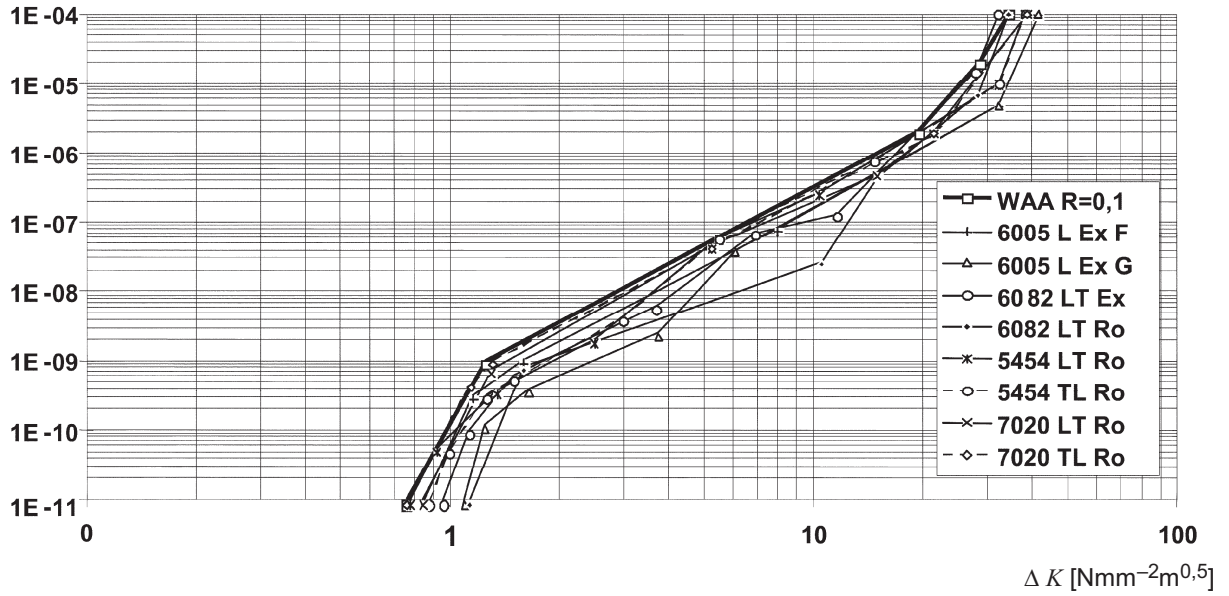


b) $R = 0,8$

Bild B.5 — Typische Ermüdungs-Risswachstums-Kurven für verschiedene Gusslegierungen

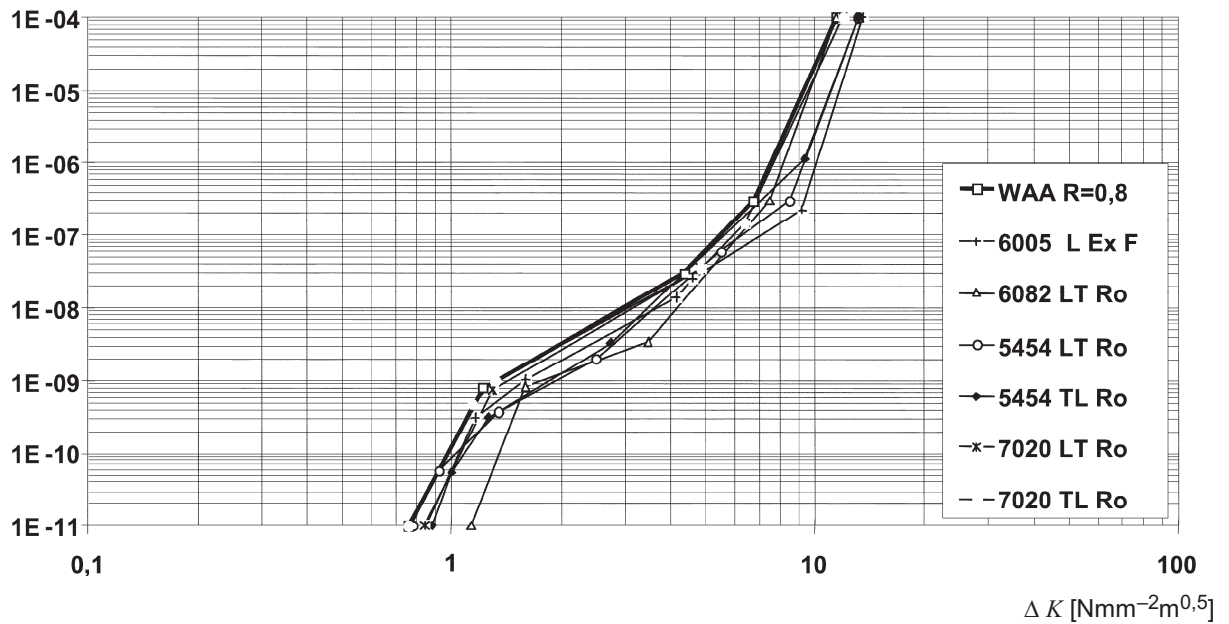
ANMERKUNG Die Legierungen AC-21100 und AC-211000 werden für Anwendungen im Bereich des Hoch- und Ingenieurbaus nicht empfohlen. Sie dienen hier nur zum Vergleich.

da/dN [m/Schwingspiel]



a) $R = 0,1; K_{max} = 10 \text{ Nmm}^{-2}\text{m}^{0,5}$

da/dN [m/Schwingspiel]



b) $R = 0,8; K_{max} = 10 \text{ Nmm}^{-2}\text{m}^{0,5}$

Bild B.6 — Ermüdungs-Risswachstums-Kurven für verschieden Knetlegierungen

Tabelle B.2 — Ermüdungs-Risswachstumsdaten für Knetlegierungen,
 $R = K_{\min}/K_{\max} = \text{konstant}$

R-Verhältnis	Spannungsintensität ΔK [Nmm ⁻² m ^{0,5}]	<i>m</i>	<i>A</i>
a) 0,100	1,68	34,8	1,47182E-19
	1,89	4,23	4,06474E-11
	2,96	1,94	4,88644E-10
	4,75	6,69	2,95135E-13
	6,70	2,80	4,82538E-10
	19,51	5,96	4,12350E-14
	28,70	8,74	3,57541E-18
b) 0,800	34,50	8,74	3,57541E-18
	0,87	10,43	4,27579E-11
	1,24	3,33	1,95935E-10
	2,27	2,98	2,60324E-10
	3,40	4,69	3,24644E-11
	6,44	10,8	3,73040E-16
	11,45	10,8	3,73040E-16

ANMERKUNG Diese Werte stammen aus einer oberen Umhüllenden der Kurven in Bild B.4(a) and (b).

Tabelle B.3 — Ermüdungs-Risswachstumsdaten für Gusslegierungen,
 $R = K_{\min}/K_{\max} = \text{konstant}$

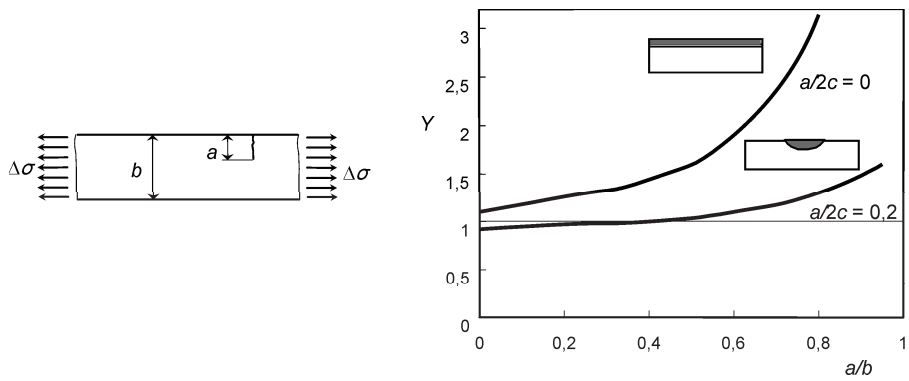
R-Verhältnis	Spannungsintensität ΔK [Nmm ⁻² m ^{0,5}]	<i>m</i>	<i>A</i>
a) 0,100	3,28	35,46	5,10219E-30
	3,45	11,01	7,18429E-17
	4,60	4,37	1,82159E-12
	12,18	5,78	5,37156E-14
	23,07	19,12	3,47503E-32
	27,30	19,12	3,47503E-32
b) 0,800	1,42	21,24	6,08486E-15
	1,76	3,55	1,34235E-10
	5,82	18,1	1,05480E-21
	8,70	18,1	1,05480E-21

ANMERKUNG Diese Werte stammen aus einer oberen Umhüllenden der Kurven in Bild B.5(a) and (b).

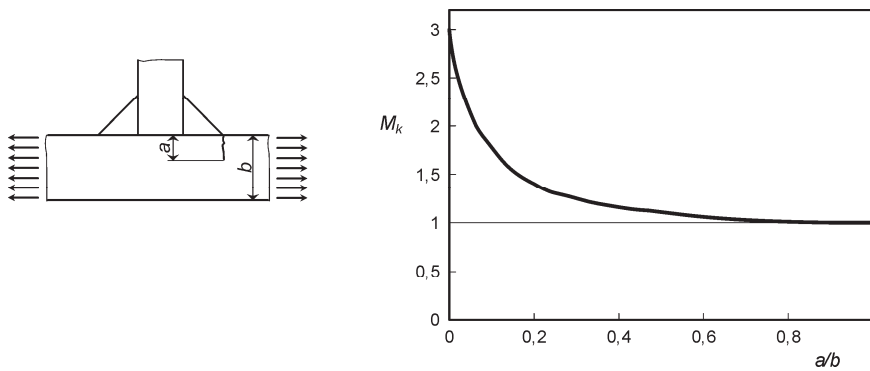
Tabelle B.4 — Ermüdungs-Risswachstumsdaten für Knetlegierungen,
 $K_{\max} = 10 \text{ Nmm}^{-2}\text{m}^{0,5} = \text{konstant}$

<i>R</i> -Verhältnis	Spannungsintensität ΔK [Nmm ⁻² m ^{0,5}]	<i>m</i>	<i>A</i>
0,100	0,76	9,13	1,21148E-10
	1,26	2,77	5,26618E-10
	19,50	5,95	4,18975E-14
	28,71	8,79	3,07173E-18
	34,48	8,79	3,07173E-18
0,800	0,76	9,27	1,27475E-10
	1,22	2,84	4,56026E-10
	4,37	5,28	1,24266E-11
	6,76	11,02	2,12818E-16
	11,45	11,02	2,12818E-16

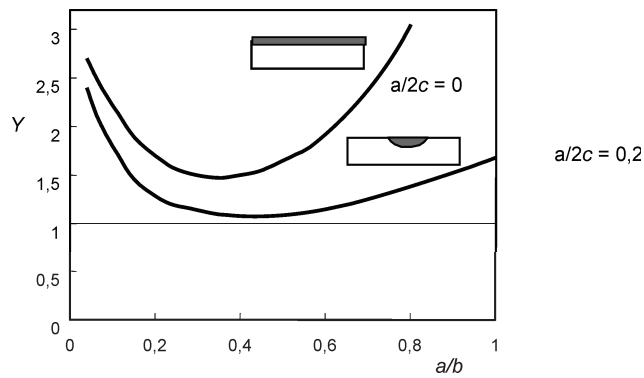
ANMERKUNG Diese Werte stammen aus einer oberen Umhüllenden der Kurven in Bild B.6(a) and (b).



a) Y -Wert für einfache Platte; a/b = Risstiefenverhältnis



b) M_k -Wert für Spannungskonzentration an der Nahtübergangsstelle



c) Y -Wert für die Schweißverbindung

Bild B.7 — Anwendung typischer geometrischer Standardlösungen für Y und M_k

Anhang C (informativ)

Versuche für die Ermüdungsbemessung

C.1 Allgemeines

(1) Wo es keine ausreichenden Daten für den vollständigen Nachweis eines Tragwerks durch Berechnungen nach 2.2.1 oder 2.2.2 gibt, sollten zusätzliche Nachweise durch ein spezielles Versuchsprogramm erbracht werden. In diesem Fall könnten Versuchsergebnisse aus einem oder mehreren nachfolgender Gründe erforderlich werden:

- a) Der vorkommende Last-Zeit-Verlauf oder -Kollektiv, für entweder Einzel- oder Mehrfach-Lasten, ist nicht vorhanden und kann mit praktischen Tragwerksberechnungsmethoden nicht ermittelt werden (siehe 2.3.1 und 2.3.2). Dies könnte insbesondere bei sich bewegenden, hydraulisch oder aerodynamisch belasteten Konstruktionen der Fall sein, wo dynamische Effekte und Resonanzeffekte vorkommen können;
- b) die Tragwerksgeometrie ist so komplex, dass Schätzungen für auf die Bauteile wirkenden Kräfte oder lokale Spannungsfelder mit praktischen Berechnungsmethoden nicht ermittelt werden können (siehe 5.2 und 5.4);
- c) die Werkstoffe, Abmessungsdetails, oder Herstellungsverfahren von Bauteilen oder Verbindungen sind anders als in den Tabellen der Detailkategorien angegeben;
- d) Rissfortschrittsdaten werden bei der schadenstoleranten Bemessung benötigt.

(2) Die Prüfung darf an vollständigen Prototypen, an Tragwerken, die mit dem zu erbauenden Tragwerk gleichwertig sind, oder an ihren Komponenten durchgeführt werden. Die Art aus dem Versuch ermittelte Informationen sollte den Grad berücksichtigen, zu dem die Belastung, Materialien, Konstruktionsdetails und Herstellungsverfahren des Versuchskörpers oder seiner Komponenten das zu erbauende Tragwerk wiedergeben.

(3) Versuchsergebnisse sollten anstatt Standarddaten nur dann verwendet werden, wenn diese unter Verwendung überwachter Prozessbedingungen ermittelt werden und zur Ausführung kommen.

C.2 Ermittlung von Belastungsdaten

C.2.1 Feste Tragwerke unter mechanischen Belastungen

(1) Diese umfassen Tragwerke wie Brücken, Kranbahnen und Maschinenfundamente. Vorhandene ähnliche Tragwerke, die den gleichen Belastungsquellen ausgesetzt sind, dürfen zur Ermittlung von Amplitude, Phase und Frequenz der einwirkenden Lasten benutzt werden.

(2) Beanspruchungs-, Verformungs- oder Beschleunigungsgeber an ausgewählten Bauteilen angebracht, die unter bekannten Lasten geeicht wurden, können den Kräfteablauf über einen typischen Betriebsabschnitt des Tragwerks registrieren, unter Benutzung analoger oder digitaler Datenermittlungsapparaturen. Die Bauteile sollten so gewählt werden, dass die Hauptbelastungsanteile unabhängig voneinander mit Hilfe von Einflussbeiwerten aus den Eichbelastungen abgeleitet werden können.

(3) Alternativ können Kräftemessdosen an den Schnittstellen zwischen der einwirkenden Lasten und dem Tragwerk angebracht, und so ein kontinuierlicher Schrieb mithilfe der gleichen Geräte ermittelt werden.

(4) Das Massen-, Steifigkeits- und logarithmische Dekrement des Prüftragwerks sollte innerhalb von 30 % des entsprechenden in der endgültigen Bemessung sein und die natürliche Frequenz der Schwingungsformen, die die größten Beanspruchungsschwankungen verursachen, sollte innerhalb von 10 % sein. Ist dies nicht der Fall, so sollte das Belastungsverhalten an einer der endgültigen Bemessung entsprechenden Konstruktion nachträglich nachgewiesen werden.

(5) Die Frequenzkomponente des während der Betriebsperiode ermittelten Lastkollektivs sollte mit dem Verhältnis der Bemessungslebensdauer über der Betriebsabschnittslebensdauer multipliziert werden, um das endgültige Bemessungskollektiv zu ermitteln. Eine Erhöhung der Intensität oder Frequenzen oder eine statistische Extrapolation von der gemessenen Periode auf die Bemessungslebensdauer sollte ebenfalls nach Bedarf vorgenommen werden.

C.2.2 Feste Tragwerke unter Umweltbelastungen

(1) Diese umfassen Tragwerke wie Maste, Schornsteine und Aufbauten bei off-shore Konstruktionen. Die Methoden der Ermittlung des Belastungskollektivs sind im wesentlichen die gleichen wie in C.2.1, außer dass der Betriebsabschnitt im allgemeinen länger sein muss, um ein repräsentatives Kollektiv der Umweltbelastungen, z. B. aus Wind- oder Welleneinwirkung, zu bekommen. Der Ermüdungsschaden wird oft hauptsächlich durch einem bestimmten Abschnitt des gesamten Belastungskollektivs verursacht, infolge Flüssigkeitsströmung induzierter Resonanzeffekte. Meist hängt dies von der Richtung, Frequenz und Dämpfung sehr stark ab. Aus diesem Grund ist eine große Genauigkeit bei der Simulation von sowohl der Tragwerkeigenschaften (Masse, Steifigkeit, Dämpfung) wie der aerodynamischen Eigenschaften (Querschnittsgeometrie) notwendig.

(2) Es wird empfohlen, die Belastung nachträglich an einem der endgültigen Bemessung entsprechenden Tragwerk nachzuweisen, falls die ursprünglichen Belastungsdaten an Tragwerken ermittelt wurden mit Unterschieden größer als 10 % in natürlicher Frequenz oder Dämpfung oder falls die Querschnittsform nicht identisch ist.

(3) Ein endgültiges Bemessungskollektiv bezüglich Richtung, Intensität und Frequenz der Belastung kann ermittelt werden, wenn man durch Vergleich meteorologischer Beobachtungen während einer typischen Bemessungslebensdauer für das Tragwerk, die Belastungsdaten aus dem beobachteten Betriebsabschnitt passend modifiziert.

C.2.3 Bewegliche Konstruktionen

(1) Diese umfassen Konstruktionen wie fahrende Kräne und andere Konstruktionen auf Rädern, Fahrzeuge und schwimmende Konstruktionen. Bei diesen Konstruktionstypen sollte die Fahrbahngeometrie bezüglich Form und Amplitude von Wellen und Frequenz ausreichend definiert sein, da diese einen signifikanten Einfluss auf dynamische Belastung des Tragwerks ausübt.

(2) Andere Lasteinflüsse wie Be- und Entladungsvorgänge können unter Verwendung der in C.2.1 formulierten Grundlagen gemessen werden.

(3) Laufflächen für ad-hoc Prüfstrecken dürfen für die Ermittlung von Last-Zeit-Verläufen für die Bemessung von Prototypen eingesetzt werden. Lastdaten früherer Tragwerke sollten mit Vorsicht eingesetzt werden, da kleine Änderungen, insbesondere z. B. bei der Bemessung von Laufkatzen, das dynamische Reaktionsverhalten grundlegend verändern können. Es wird empfohlen, die Belastung für die endgültige Bemessung nachzuweisen, wenn kein Ermüdungsfestigkeitsversuch am Großbauteil vorgenommen wird (siehe C.3).

C.3 Ermittlung der Spannungsdaten

C.3.1 Versuchsergebnisse aus Bauteilen

(1) Sofern bei einfachen Bauteilen die Hauptkomponenten der Kräfte im Bauteil leicht berechnet oder gemessen werden können, wird es treffend sein, Bauteile mit der zu analysierenden Verbindung oder Konstruktionsdetail zu prüfen.

(2) Ein geeigneter Prüfkörper identischer Abmessungen wie in der endgültigen Bemessung sollte entsprechend der vereinfachten geometrischen Spannungsbewertung (siehe Annex D) gemessen werden, durch Anwendung einer passenden Methode wie z. B. Dehnungsmessstreifen mit elektrischem Widerstand, Moiré Netz oder thermoelastischer Verfahren. Die Bauteilenden sollten in ausreichender Entfernung von dem betrachteten Bereich sein, so dass lokale Effekte am Lasteinbringung die Spannungsverteilung an gleicher Stelle nicht beeinflussen. Die Kraftkomponenten und die Spannungsgradienten im betrachteten Bereich sollten identisch mit denen im Gesamttragwerk sein.

(3) Einflussbeiwerte können aus statisch eingesetzten Lasten ermittelt werden, die die Ermittlung der Spannungsverteilung für jede erwünschte Kombination von Lastkomponenten ermöglicht. Falls erforderlich, können die Beiwerte aus verkleinerten Prüfkörpern ermittelt werden, sofern das gesamte Bauteil gleichmäßig verkleinert worden ist.

C.3.2 Versuchsergebnisse aus Tragwerken

(1) Bei bestimmten Tragwerkstypen wie Schalentragwerken könnte es durch die Kontinuität des Konstruktionswerkstoffs nicht praktisch sein, Bauteile mit einfachen Einwirkungen zu isolieren. In einem solchen Fall sollten Spannungsdaten aus Prototypen oder Tragwerken aus der Produktionsserie ermittelt werden.

(2) Ähnliche Messmethoden dürfen angewendet werden wie bei der Bauteilprüfung. Für die häufigste Verwendung wird empfohlen statische Lasten als unabhängige Komponenten anzubringen, so dass die Spannungen durch Anwendung der einzelnen Einflussbeiwerte für den betrachteten Ort miteinander kombiniert werden können. Die Last sollte einen shake-down Zyklus vor Ermittlung der Einflussbeiwerte durchlaufen.

C.3.3 Bestätigung des Spannungs-Zeit-Verlaufs

(1) Die gleiche Methode wie in C.3.2 beschrieben darf für den Nachweis des Spannungs-Zeit-Verlaufs an einer Stelle während der Prototyp-Prüfung unter einer bestimmten Belastung verwendet werden. In diesem Fall sollten Datenermittlungsgeräte wie in C.2.1 verwendet werden, entweder für das Aufnehmen des gesamten Spannungs-Zeit-Verlaufs oder für die Durchführung einer Zyklenzählung. Letztere kann zur Lebensdauerabschätzung verwendet werden, wenn die geeignete $\Delta\sigma$ -N Kurve gewählt worden ist.

(2) Eine weitere Option, die bei nicht sicheren Last-Zeit-Verläufen verwendet werden darf, besteht in der dauerhaften Anbringung eines Zyklenzählgerätes an dem Tragwerk im Betrieb.

C.4 Ermittlung von Lebensdauerdaten

C.4.1 Bauteilprüfung

(1) Wenn Kraftkollektive oder Spannungs-Zeit-Verläufe bekannt sind, kann durch Bauteilversuche die Bemessung kritischer Tragwerksteile bestätigt werden. Das zu prüfende Bauteil sollte in genau den gleichen Abmessungen und nach denselben Verfahren wie das in der endgültigen Ausführung hergestellt werden. All diese Aspekte sollten vor der Herstellung des Prüfbauteils vollständig dokumentiert werden. Zusätzlich sollten die zerstörungsfreien Prüfmethode und die Abnahmekriterien dokumentiert werden, zusammen mit dem Prüfbericht zur Qualität der zu prüfenden Verbindungen.

(2) Die Probekörper sollten in ähnlicher Weise wie in C.2.1 beschrieben belastet werden. Dehnungsmessstreifen, insbesondere im Fall von Bauteilen, sollten verwendet werden zur Bestätigung, dass die Spannungsschwankungen wie erforderlich vorkommen. Die Anordnung der Dehnungsmessstreifen sollte so sein, dass diese den richtigen Spannungsparameter registrieren. Wenn die Nennspannung registriert wird, sollte der Messstreifen mindestens 10 mm entfernt von allen Schweißnahtübergangsstellen sein. Bei steilen Spannungsgradienten sollte die Verwendung von drei Messstreifen eine Interpolation ermöglichen.

(3) Die Ermittlung von Bemessungslebensdauerwerten durch Versuche sollte den gleichen statistischen Bewertungsverfahren folgen, die in 6.2 zur Ermittlung der Ermüdungsfestigkeitswerte verwendet wurden. Meistens beinhaltet dies eine statistische Bewertung, basierend auf Schätzwerte für die mittlere und Standardabweichung, unter Annahme einer Normalverteilung der beobachteten logarithmischen Lebensdauer-Schwingspielzahl (abhängige Variable) für vorhandene logarithmische Spannungswerte (unabhängige Variable) bzw. einer linearen $\log\Delta\sigma - \log N$ Regressionsanalyse für unterschiedliche Lebensdauerbereiche, siehe Bild 6.1. Dabei wird eine Mittelwert-Regressionslinie oder eine charakteristische Regressionslinie für eine bestimmte Überlebenswahrscheinlichkeit (meistens etwa 97,7 % oder zwei Standardabweichungen vom Mittelwert entfernt) bestimmt. Für Bemessungszwecke wird die letztere parallel zur ersten angenommen. Die oben definierte charakteristische Regressionslinie sollte nicht höher als 80 % des Ermüdungsfestigkeits-Mittelwerts sein. Dies erlaubt für eine breitere Streuung in der Herstellung als normalerweise in einer einzigen Reihe von Ermüdungsproben erwartet wird.

(4) Es sollte im Auge behalten werden, dass dieses vereinfachte Ermittlungsverfahren oft verwendet wird obwohl es bei kleinen Probengrößen möglicherweise unzuverlässig ist. Für entsprechende Korrekturbeiwerte geben die Methoden unter C.4.3 Hinweise.

(5) Für eine schadenstolerante Bemessung sollte ein Protokoll des Ermüdungsrisswachstums mit Anzahl der Schwingspiele aufgenommen werden.

(6) Alternativ, wenn der Bemessungsspannungs-Zeit-Verlauf bekannt und eine Prüfmöglichkeit mit variabler Amplitude vorhanden ist, darf der Prüfkörper mit dem Spannungs-Zeit-Verlauf ohne den entsprechenden Sicherheitsbeiwert geprüft werden.

C.4.2 Großbauteilprüfung

(1) Die Großbauteilprüfung (Prüfung von Tragwerken im Originalmaßstab) darf unter tatsächlichen Betriebsbedingungen oder in einer Prüfeinrichtung vorgenommen werden, wobei die Prüflastkomponenten hydraulisch oder durch andere Methoden aufgebracht werden.

(2) Die angewandten Lasten sollten nicht höher als die Nennlasten sein.

(3) Wenn die Betriebslasten auf zufällige Weise zwischen Grenzwerten variieren, sollten diese in Vereinbarung zwischen Lieferanten und Erwerbenden durch eine äquivalente Lastenfolge repräsentiert werden.

(4) Alternativ sollten die Prüflasten gleich den mit keinem Beiwert erhöhten Lasten sein.

(5) Die Lastanbringung auf die Probe sollte für das Tragwerk oder Bauteil genau die während des Betriebs erwarteten Bedingungen hervorrufen.

(6) Die Prüfung sollte bis zum Bruch oder Unvermögen der Probe die Gesamtprüflast aufzunehmen, infolge eingetretenen Schadens, fortgesetzt werden.

(7) Die Anzahl der angebrachten Prüflast(en)wiederholungen bis zum Versagen sollte genau gezählt und zusammen mit Beobachtungen des Rissfortschritts aufgenommen werden.

C.4.3 Akzeptanzkriterien

(1) Das Akzeptanzkriterium hängt davon ab, ob das Tragwerk entsprechend dem Konzept der sicheren Lebensdauer, siehe unten auf (2) bis (7), oder entsprechend dem der Schadenstoleranz ausgelegt werden soll, siehe unten auf (11).

(2) Für die Akzeptanz einer schwingbruchsicheren Bemessung sollte die Lebensdauer bis zum Versagen aus Versuchsergebnissen, nach einer Anpassung entsprechend der vorhandenen Probenzahl, nicht kleiner sein als die nach A.2.1 definierte Bemessungslebensdauer und zwar folgendermaßen:

$$T_L = \frac{T_m}{F} \quad (C.1)$$

Dabei ist

T_L die Bemessungslebensdauer (in Schwingspielen);

T_m der Mittelwert der Lebensdauer zum Versagen nach Versuchen bestimmt (in Schwingspielen);

F der Ermüdungsversuch-Beiwert, abhängig von der tatsächlich vorhandenen Anzahl der Versuchsergebnisse, wie in Tabelle C.1 definiert.

(3) Bei der Abschätzung von Werten für den Beiwert F werden die folgenden allgemeinen statistischen Prinzipien und Annahmen angewandt. Ein charakteristischer statistischer Wert wird durch den folgenden Ausdruck ermittelt:

$$x_c = \mu - K\sigma \quad (C.2)$$

wobei K von der Wahrscheinlichkeitsverteilung und der erforderlichen Überlebenswahrscheinlichkeit abhängt bei einer statistischen Verteilung mit dem Mittelwert μ und der Standardabweichung σ . In der Praxis können nur Schätzungen für den Mittelwert und der Standardabweichung errechnet werden, d. h. x_m und s entsprechend, für einen Versuchsumfang n . Entsprechend sollten Korrekturbeiwerte angewandt werden, die die Konfidenzintervalle sowohl für den Mittelwert wie für die Varianz (oder Standardabweichung) ausdrücken. Die vorhergehende Beziehung kann dann folgendermaßen ausgedrückt werden:

$$x_c = x_m - k s \quad (C.3)$$

Dabei ist

$$k = k_1 k_2 + k_3$$

k_1 der theoretische Wert der Verteilung, der zu einer bestimmten Überlebenswahrscheinlichkeit gehört;

k_2 die Korrektur für das Konfidenzintervall der Standardabweichung;

k_3 die Korrektur für das Konfidenzintervall des Mittelwerts;

k_2 und k_3 sind abhängig von der Standardabweichung s , dem Versuchsumfang n , und dem vorgeschriebenen Konfidenzniveau.

Im Allgemeinen ist

$$k = k_1 k_2 + k_3 = z_{(1-\alpha/2)} \sqrt{\frac{n}{\chi^2_{(\alpha/2, n-1)}}} + \frac{t_{(1-\alpha/2, n-1)}}{\sqrt{n}} \quad (\text{C.4})$$

Dabei ist

- n der Versuchsumfang;
- α das Konfidenzniveau oder der Wert der Wahrscheinlichkeit (im Fall der Normalverteilung);
- $z_{(1-\alpha/2)}$ der Wert der Normal-Wahrscheinlichkeitsverteilung bei einer vorgegebenen Versagenswahrscheinlichkeit von $(1-\alpha/2)$, entsprechend einer beiderseitigen Wahrscheinlichkeit von $(1-\alpha)$;
- $\chi^2_{(\alpha/2, n-1)}$ der Wert der Chi-Quadrat-Wahrscheinlichkeitsverteilung bei einem vorgegebenen Konfidenzintervall von $\alpha/2$ und $n-1$ Freiheitsgrade;
- $t_{(1-\alpha/2, n-1)}$ der Wert der t -Wahrscheinlichkeitsverteilung für eine vorgegebene Wahrscheinlichkeit von $(1-\alpha/2)$, entsprechend einer beiderseitigen Wahrscheinlichkeit von $(1-\alpha)$ und $n-1$ Freiheitsgraden.

Im Rahmen dieser Regeln werden die folgenden Annahmen gemacht:

- Der Wert der Standardabweichung ist aus vorherigen Erfahrung bekannt, d. h. dieser basiert auf einen ausreichend großen Versuchsumfang;
- dies erlaubt für k_2 den Wert gleich 1 zu setzen;
- ausreichende Kenntnis über die herrschende Verteilung ist vorhanden oder es gibt keine signifikante Abweichung von der Normalverteilung; und
- bei der Korrektur für das Konfidenzintervall des Mittelwerts darf die t -Verteilung durch die Normalverteilung ersetzt werden.

(4) Beim allgemeinen Fall von mehreren Proben, die alle bis zum Versagen untersucht werden, wird dann der Ausdruck (C.3) zu

$$k = k_1 + k_3 = z_{(1-\alpha/2)} + \frac{z_{(1-\alpha/2)}}{\sqrt{n}} \quad (\text{C.5})$$

(5) Im Fall von mehreren gleichzeitig geprüften Proben bis zum Versagen der ersten Probe, um den Wert k abzuschätzen, wird angenommen, dass

- Die sich ergebende Lebensdauer der ersten Probe – entspricht T_L aus dem Ausdruck (C.1) – befindet sich auf der oberen Grenze der entsprechenden Verteilung;
- die erforderliche Lebensdauer oder Bemessungslebensdauer – entspricht T_m aus dem Ausdruck (C.1) – befindet sich auf der unteren Grenze der entsprechenden Verteilung.

Die untere Grenze wird bestimmt aus $x_m - k_1 s$, mit k_1 entsprechend dem Ausdruck in (C.4). Die obere Grenze bestimmt sich entsprechend aus $x_m + k_4 s$ bestimmt. Der zugehörige Wert von k_4 wird mit der Annahme bestimmt, dass wenn die Überlebenswahrscheinlichkeit von einer Probe, beim Versagen an der entsprechenden Lebensdauer, gleich P ist, so wird die Überlebenswahrscheinlichkeit von n Proben auf dem gleichen Niveau gleich P^n sein. Um auf der sicheren Seite zu sein wird ein ausreichend niedriger Wert von

$P^n = c$ definiert und k_4 wird aus der Normalverteilung bei $c^{1/n}$ Wahrscheinlichkeit bei entsprechenden Werten n errechnet.

Der Beiwert k wird dann errechnet aus

$$k = k_1 + k_2 = z_{(1-\alpha/2)} + z_P \quad (\text{C.6})$$

(6) Aus dem Ausdruck (C.1) wird der folgende Ausdruck ermittelt:

$$\log T_L = \log T_m - \log F \quad (\text{C.7})$$

der beim Vergleich zum Ausdruck (C.2) folgendes ergibt

$$\log F = k s \quad (\text{C.8})$$

oder

$$F = 10^{ks} \quad (\text{C.9})$$

und F aus Tabelle C.1.

(7) Der Wert der Standardabweichung muss abgeschätzt werden. Vorherige Erfahrung mit ähnlichen Konstruktionsfällen liefert zuverlässigere Werte. Vorhandene Daten (Literatur in C.1 und C.2) für verschiedene geschweißte Konstruktionsdetails in Aluminium ergeben einen Bereich verschiedener Werte $s_{\log \Delta \sigma}$ für die Standardabweichung. Für eine entsprechende durchschnittliche Neigung von $m = 4$ für die Regressionslinie können diese zu entsprechenden $s_{\log N}$ Werten transformiert werden, für den Lebensdauerbereich bis zum Grenzwert von 5×10^6 Schwingspielen für die Dauerfestigkeit bei konstanter Amplitude der Beanspruchung. Für Lebensdauerwerte bis zu 10^8 Schwingspielen kann es zweckmäßig sein, entsprechend der Neigung von $m + 2$, größere Werte der Streuung zu benutzen. Man braucht spezielle Überlegungen über dieser Grenze hinaus.

(8) Die Werte für F , errechnet auf der Grundlage der oben beschriebenen statistischen Verhältnisse, werden in Tabelle C.1 angegeben und gelten für identische Proben, die alle bis zum Versagen untersucht werden.

(9) Die Werte in Tabelle C.1 basieren auf einer Überlebenswahrscheinlichkeit von 95 % und einem Konfidenzniveau von 0,95 für die Normalverteilung und einem Wert von $s_{\log N} = 0,18$ für die Standardabweichung. Im Fall des Versagens der ersten Probe wird ein Wert der Überlebenswahrscheinlichkeit von $P^n = 5 \%$ angenommen.

(10) Kriterien für die Korrektur der gemessenen Lebensdauer und für die Abnahme werden von Anwendung zu Anwendung verschieden sein und sollten mit dem für die Abnahme verantwortlichen Ingenieur vereinbart werden.

(11) Die Akzeptanz einer schadenstoleranten Bemessung hängt von der Lebensdauer ab, bei der ein Riss eine Länge erreicht, welche bei einer während des Betriebs anwendbaren Inspektionsmethode erfasst werden könnte. Diese hängt auch ab, von der Rissgeschwindigkeit, von der Bedeutung kritischer Risslängen und von den Folgen für die Restsicherheit der Konstruktion und den Reparaturkosten.

Tabelle C.1 — Ermüdungsversuchs-Beiwert F

Versuchsergebnisse	Anzahl der untersuchten Proben n											
	1	2	3	4	5	6	8	10	15	20	30	100
Identische Proben, alle bis zum Versagen geprüft.	3,91	3,20	2,93	2,78	2,68	2,61	2,52	2,45	2,36	2,30	2,24	2,12
Identische Proben, alle gleichzeitig geprüft. Erste Probe versagt.	3,91	2,71	2,27	2,03	1,88	1,77	1,61	1,51	1,36	1,26	1,15	0,91

C.5 Rissfortschrittsdaten

Hinweise für die Ermittlung von Risswachstumsdaten werden in Anhang B gegeben.

C.6 Berichterstattung

(1) Beim Abschluss eines jeden Versuchs, durchgeführt in Anlehnung an diesem Abschnitt, sollte ein Zertifikat ausgestellt werden, folgende Information enthaltend:

- a) Name und Adresse der Prüfanstalt;
- b) Akkreditierungsangaben für die Prüfanstalt (wo angebracht);
- c) Prüfdatum;
- d) Name(n) der Person(en), die für die Prüfung verantwortlich sind;
- e) Beschreibung der untersuchten Probe durch
 - 1) Verweis auf Seriennummer wo möglich; oder
 - 2) Verweis auf Zeichnungsnummer(n) wo möglich; oder
 - 3) Beschreibung durch Skizzen oder Diagramme; oder
 - 4) Bildaufnahmen;
- f) Beschreibung der aufgebrachten Lastanordnungen samt Verweise auf weitere Europäische Normen, wo zweckmäßig;
- g) Aufzeichnung der Lastereignisse und der gemessenen Reaktionen auf Belastung, d. h. Durchbiegungen, Dehnung, Lebensdauer;
- h) Summe der Lasten und Deformationen und Spannung an kritischen Punkten für die Abnahme der Konstruktion;
- i) Aufzeichnung der Lebensdauer und Versagensart;
- j) Aufzeichnung der beobachteten Punkte mit Verweis auf e) 2 bis 4) oben;

- k) Notierung jedes beobachteten in Bezug auf Sicherheit oder Gebrauchstauglichkeit relevanten Verhaltens des Prüfobjekts, d. h. Art und Ort der Risse im Ermüdungsprüfung;
- l) Aufzeichnung der Umweltbedingungen zur Versuchszeit, wo relevant;
- m) Bescheinigung einer akkreditierten Kalibrierstelle für alle eingesetzten Messgeräte;
- n) Erklärung über Zweck oder Ziele der Prüfung;
- o) Aussage über Entsprechung oder Nichtentsprechung mit relevanten Abnahmekriterien wo geeignet;
- p) Aufzeichnung der Namen und der Funktion der für die Prüfung und Aufstellung des Berichts zuständigen Personen;
- q) Seriennummer des Berichts und Ausstellungsdatum.

Anhang D (informativ)

Spannungsanalyse

D.1 Anwendung von Finiten-Elementen für die Ermüdungsanalyse

D.1.1 Elementtypen

D.1.1.1 Balkenelemente

(1) Balkenelemente werden hauptsächlich für die Analyse von Nennspannungen in Rahmen und ähnlichen Tragwerken verwendet. Ein konventionelles Balkenelement für die Analyse von dreidimensionalen Rahmen hat 6 Freiheitsgrade an jedem Endknoten: drei Verschiebungen und drei Rotationen. Dieses Element kann das Torsionsverhalten nur in solchen Fällen korrekt beschreiben, in denen der Querschnitt gegen Verwölbung nicht anfällig ist oder eine Verwölbung sich frei entwickeln kann. Eine Analyse der Wölbspannungen ist unmöglich, wenn offene dünnwandige Tragwerke analysiert werden.

(2) Meist sind die Balkenelemente an den Knotenpunkten steif miteinander verbunden. Alternativ können auch frei drehbare Verbindungen spezifiziert werden. In vielen Tragwerken sind die Verbindungen jedoch halbsteif. Zusätzlich ist in Rohrverbindungen die Steifigkeit ungleichmäßig verteilt, was weitere Biegemomente verursacht. Solche Konstruktionsmerkmale verlangen ausgefeilteres Modellieren als nur mit steifen oder frei drehbaren Verbindungen.

D.1.1.2 Membranelemente

(1) Membranelemente sind für das Modellieren in der Ebene beanspruchter Plattenkonstruktionen vorgesehen. Sie können keine Schalenbiegespannungen behandeln. Drei- oder viereckige Plattenelemente sind geeignet für die Berechnung von Membrannennspannungsfeldern in großen ausgesteiften Plattenkonstruktionen.

D.1.1.3 Dünne Schalenelemente

(1) Finite-Elemente Programme beinhalten verschiedene Typen von dünnen Schalenelementen. Diese umfassen flache Elemente, Elemente mit einfacher oder zweifacher Krümmung. Die Deformationsfelder werden meist linear (4-Knoten-Element) oder parabolisch (8-Knoten-Element) formuliert. Im Allgemeinen sind dünne Schalenelemente geeignet für die Berechnung der elastischen Strukturspannungen nach der Schalentheorie. Die Spannung in der Mittelebene ist der Membranspannung gleich, die Spannungen in der oberen und unteren Oberfläche sind superponierte Membran- und Schalenbiegespannungen.

(2) Dünne Schalenelemente können nur die Mittelebenen der Platten modellieren. Die tatsächliche Materialdicke wird nur als eine Eigenschaft für das Element angegeben. Es gibt auch dünne Schalenelemente mit abnehmender Dicke, die beispielsweise für das Modellieren von Tragwerken aus Gussbauteilen geeignet sind. Der wichtigste Nachteil von dünnen Schalenelementen ist, dass diese die wahre Steifigkeit und Spannungsverteilung innerhalb und in der Umgebung der Schweißzone sich kreuzender Schalen nicht modellieren können.

D.1.1.4 Dicke Schalenelemente

(1) Einige Finite-Elemente Pakete beinhalten auch so genannte dicke Schalenelemente. Diese erlauben die Erfassung von Schubquerdeformationen in Dickenrichtung der Schale. Dicke Schalenelemente funktionieren besser als dünne Schalenelemente in bspw. solchen Konstruktionsdetails, bei denen die Entfernung zwischen benachbarten Schalenkreuzungen kurz ist und dies zu signifikanten Schubspannungen führt.

D.1.1.5 Elemente mit ebenem Dehnungszustand

(1) Manchmal ist es nützlich, lokale Spannungsfelder um Kerben mit einem 2-D Modell zu studieren. Ein Querschnitt von der Einheitsdicke kann dann als zweidimensionale Struktur mit Hilfe von Elementen mit ebenem Dehnungszustand modelliert werden.

D.1.2 Weitere Hinweise für die Anwendung finiter Elemente

(1) Kontinuumselemente sind für das Modellieren von Strukturen mit dreidimensionalen Spannungs- und Dehnungsfeldern notwendig. Gekrümmte isoparametrische 20-Knoten-Elemente sind im Allgemeinen die geeignetsten. In geschweißten Bauteilen sind diese manchmal für das Modellieren der Kreuzungszone von Platten oder Schalen erforderlich.

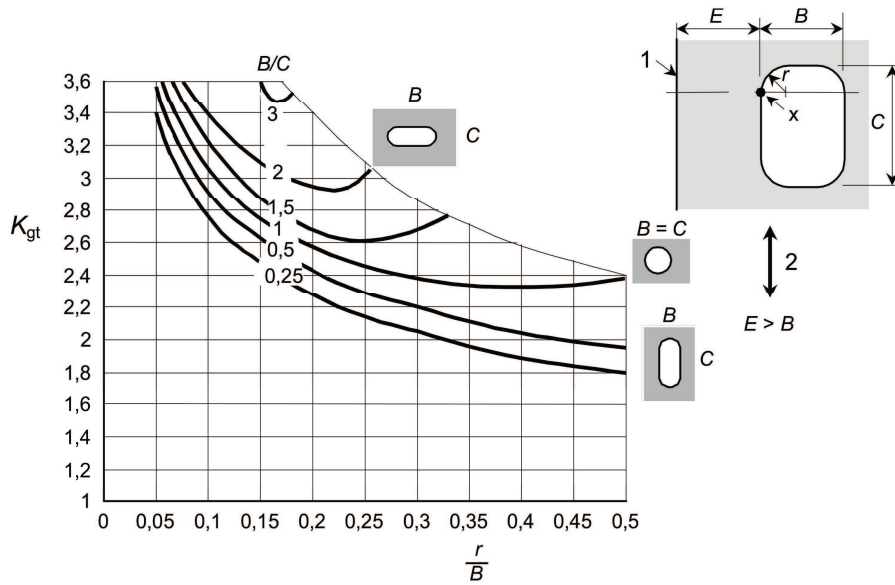
(2) Kontinuumselemente mit linearer Verformung werden wegen unzureichender Konvergenz bei einer Netzverfeinerung nicht empfohlen.

(3) Vollwandige Bauteile mit Form eines vierseitigen Tetraeders und zehn Knoten sind sehr effektiv in der automatischen Netzbildung und haben ein gutes Konvergenzverhalten.

D.2 Spannungskonzentrationsbeiwerte

(1) Werte für Spannungskonzentrationsbeiwerte und Kerbfaktoren für üblich vorkommende Geometrien können aus veröffentlichten Daten entnommen werden (siehe Literaturangaben D.1 und D.2).

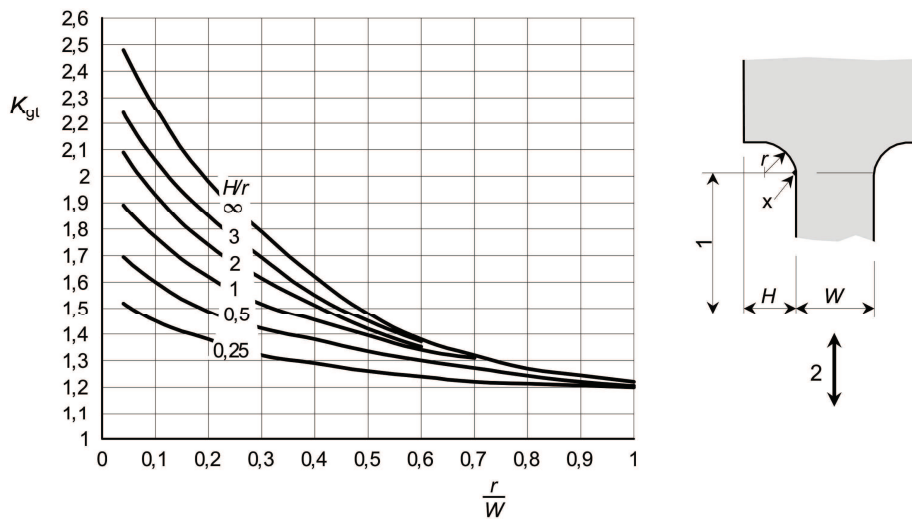
(2) Typische Werte von K_{gt} für Eckradien in flachen Plattenelementen werden in Bild D.1 angegeben.



Legende

- 1 Freie Kante
- 2 Wirkrichtung der Spannung

a) Ermüdungs-Spannungskonzentrations-Beiwert K bezogen auf Nennspannung am Punkt x für nicht verstärkte Öffnungen



Legende

- 1 Länge der geraden Strecke $> 2r$;
- 2 Wirkrichtung der Spannung

b) Ermüdungs-Spannungskonzentrations-Beiwert K bezogen auf Nennspannung am Punkt x für Ausrundungen an Querschnittsübergängen

Bild D.1 — Typische Spannungskonzentrationsbeiwerte für Eckenausrundungen in flachen Platten

D.3 Ermüdungsbegrenzung bei wiederholtem lokalem Beulen

- (1) Die Schlankheit der Plattenelemente sollte begrenzt werden, um wiederholtes lokales Beulen, das an oder vor Kanten-Anschlüssen zur Ermüdung führen könnte, zu vermeiden.
- (2) Übermäßiges wiederholtes örtliches Beulen darf vernachlässigt werden, wenn die folgende Anforderung erfüllt ist:

$$\sqrt{\left(\frac{\sigma_{x,Ed,ser}}{k_{\sigma}\sigma_E}\right)^2 + \left(\frac{1,1 \tau_{x,Ed,ser}}{k_{\chi}\sigma_E}\right)^2} \leq 1,1 \quad (D.1)$$

Dabei sind

$\sigma_{x,Ed,ser}, \tau_{x,Ed,ser}$ die Spannungen für die häufige Lastkombination;

k_{σ}, k_{χ} die linearen elastischen Beulwerte unter Annahme von frei dehnbaren Kanten beim Plattenelement;

$$\sigma_E = 0,904 E (t_w/b_w)^2$$

t_w, b_w die Dicke und die Tiefe des Stegbleches.

ANMERKUNG In der Literatur kann der Begriff „Stegatmen“ vorkommen, der gleichbedeutend ist mit wiederholten lokalen Beulen.

Anhang E (informativ)

Klebeverbindungen

(1) Die Bemessung von Klebeverbindungen sollte Folgendes berücksichtigen:

- Abschäl-Einwirkung sollte zu einem Minimum reduziert werden;
- Spannungskonzentrationen sollten zu einem Minimum reduziert werden;
- Beanspruchungen im Grundmaterial sollten unterhalb der Dehngrenze bleiben;
- Chemische Umwandlung oder Anodisieren der Oberflächen verbessert die Haftung im Vergleich zu Entfetten oder mechanischer Aufrauung (Abrieb);
- aggressive Umgebungsbedingungen verkürzen meistens die Ermüdungslebensdauer.

(2) Für Überlappverbindungen, die an der Kleberschicht versagen, sollte die effektive Scherspannungsschwingbreite $\Delta\tau$ aus der auf der Breite der Verbindung bezogenen Kraft dividiert durch die effektive Überlapplänge L_{adh} , bestimmt werden, dabei ist:

L_{adh} = Überlapplänge L mit $L \leq 15$ mm

L_{adh} = 15 mm bei $L > 15$ mm

(3) Der Referenzwert der Ermüdungsfestigkeit einer geklebten Doppel-Überlappverbindung, die in der Überlapplinie versagt wird durch die Gleichung

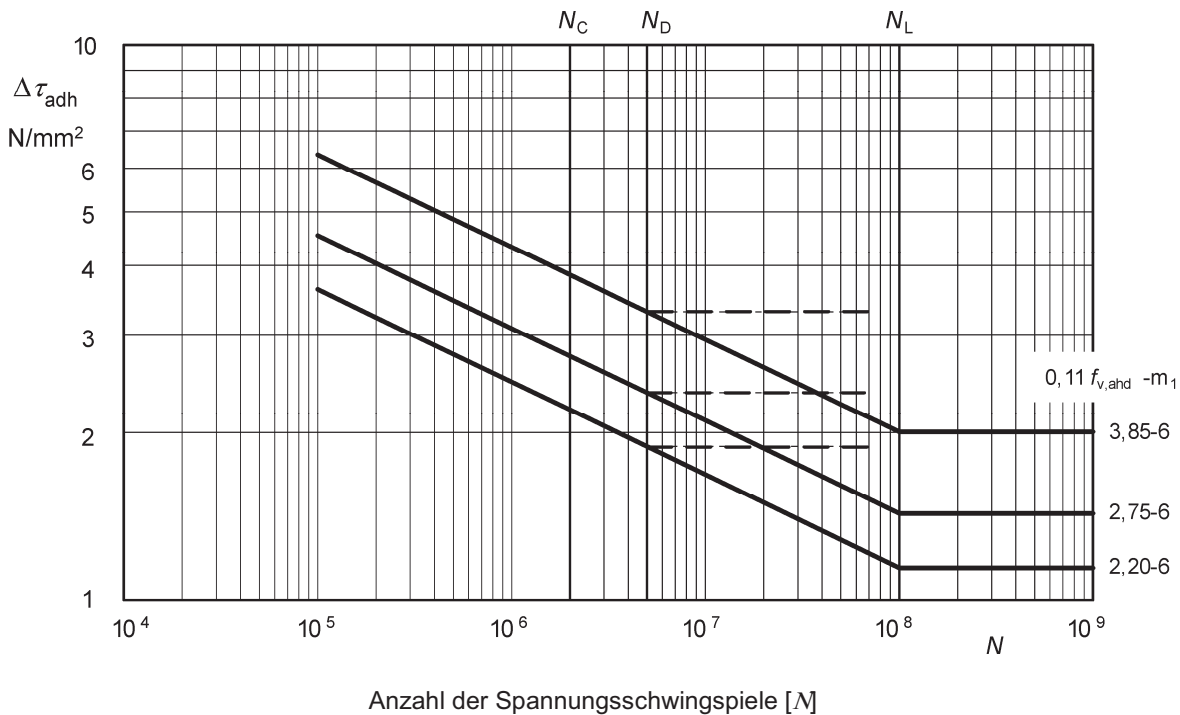
$$\Delta\tau_{c,adh} = k_{c,adh} \times f_{v,adh} \quad (E.1)$$

definiert, dabei ist:

$k_{c,adh}$ der Wert des Ermüdungsfestigkeitsbeiwertes der Klebeverbindung k_{adh} bei $N_C = 2 \times 10^6$ Schwingspiele;

$f_{v,adh}$ die charakteristische Scherfestigkeit des Klebers, ermittelt durch einen statischen Standard-scherversuch an einer Überlappverbindung ist (siehe EN 1999-1-1).

Spannungsschwingbreite [N/mm²]



Ermüdungs-Scherfestigkeits-Kurve: 3,85-6 Einkomponenten-, wärmhärtendes, modifiziertes Epoxidharz, $f_{v,adh} = 35 \text{ N/mm}^2$
 Ermüdungs-Scherfestigkeits-Kurve: 2,75-6 Zweikomponenten-, kalthärtendes, modifiziertes Epoxidharz, $f_{v,adh} = 25 \text{ N/mm}^2$
 Ermüdungs-Scherfestigkeits-Kurve: 2,20-6 Zweikomponenten-, kalthärtendes, modifiziertes Acryl, $f_{v,adh} = 20 \text{ N/mm}^2$

Bild E.1 — $\Delta\tau_{adh}-N$ Kurve für Klebeverbindungen

Tabelle E.2 — Numerische Werte für $k_{adh} (= \Delta\tau/f_{v,adh})$ bei Klebeverbindungen

Detailkategorie ($N = 2 \times 10^6$)		$N = 10^5$	$N_D = 5 \times 10^6$	$N_L = 10^8$
$\Delta\tau_{c,adh}/f_{v,adh}$	m_1	$\Delta\tau/f_{v,adh}$	$\Delta\tau_D/f_{v,adh}$	$\Delta\tau_L/f_{v,adh}$
0,11	6	0,181	0,094	0,065

(4) Die Grundbeziehung für die Ermüdungsbemessung für eine Lebensdauer im Bereich zwischen 10^5 und 5×10^6 Schwingspielen oder im Bereich zwischen 5×10^6 und 10^8 Schwingspielen ist entsprechend 6.2.1 (2) bzw. 6.2.1 (4) in diesem Dokument definiert.

(5) Die Bemessungswerte der Ermüdungsfestigkeit für Klebeverbindungen sollten einen Teilsicherheitsbeiwert γ_{Mf} zu den oben angegebenen Festigkeitswerten anwenden.

ANMERKUNG Der Teilsicherheitsbeiwert γ_{Mf} für bestimmte Konstruktionsdetail-Typen darf im Nationalen Anhang definiert werden. Der Wert von $\gamma_{Mf} = 3,0$ wird empfohlen.

(6) Versuche unter repräsentativen Verhältnissen von Geometrie, Güte der Ausführung und Umgebung werden bei entscheidenden Anwendungen empfohlen.

(7) Ermüdungsdaten für Klebeverbindungen gelten nur innerhalb eines Temperaturbereichs von – 20 °C bis + 60 °C.

ANMERKUNG Die angegebenen Temperaturgrenzen basieren auf vorliegenden Versuchsdaten. Andere Werte dürfen im Nationalen Anhang festgelegt werden, wenn sie durch Versuche entsprechend Anhang C bestätigt werden.

(8) Keine Toleranz sollte für den Einfluss der Mittelspannung hingenommen werden ohne Bestätigung durch Versuche (siehe Anhang C).

Anhang F (informativ)

Bereich der Kurzzeitfestigkeit

F.1 Einleitung

(1) Wo signifikanter Schaden durch hohe Spannungsschwingbreiten verursacht wird, die in weniger als 10^5 Schwingspielen auftreten, könnten die in 6.2 angegebenen $\Delta\sigma$ - N Kurven für bestimmte Konstruktionsdetails und R -Verhältnisse unnötig konservativ sein. Die unten angegebenen Daten dürfen zu einer genaueren Lebensdauer-Abschätzung eingesetzt werden.

F.2 Modifikation der $\Delta\sigma$ - N Kurven

(1) Für die Lebensdauer zwischen 10^3 und 10^5 Schwingspielen darf die Ermüdungsfestigkeitskurve wie folgt definiert werden:

$$N_i = \left(\frac{\Delta\sigma_c}{\Delta\sigma_i} \frac{1}{\gamma_{Ff} \gamma_{Mf}} \right)^{m_0} \times 20^{m_0 / m_1} \times 10^5 \quad (\text{F.1})$$

Dabei ist

- N_i berechnete Schwingspielzahl zum Versagen auf einer Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma_i$;
- $\Delta\sigma_c$ Bezugswert der Ermüdungsfestigkeit bei 2×10^6 Schwingspielen in Abhängigkeit von der Detailkategorie;
- $\Delta\sigma_i$ Spannungsschwingbreite für die Hauptspannungen beim Detail, und ist konstant für alle Schwingspiele;
- m_0 logarithmische Neigung der $\Delta\sigma$ - N Kurve im Bereich von 10^3 und 10^5 Schwingspielen, abhängig von der Detailkategorie, Legierung und R -Wert;
- m_1 logarithmische Neigung der $\Delta\sigma$ - N Kurve, abhängig von der Detailkategorie;
- γ_{Ff} Teilsicherheitsbeiwert für die Berücksichtigung von Unsicherheiten im Belastungskollektiv und Analyse des Tragwerksverhaltens (siehe 2.4);
- γ_{Mf} Teilsicherheitsbeiwert für Unsicherheiten bei Werkstoffen und der Ausführung (siehe 6.2.1(2)).

F.3 Versuchsergebnisse

(1) Tabelle F.1 gibt Werte von m_0 für einige ausgewählte Details in bestimmten Knetlegierungsprodukten an, die aus Versuchsergebnissen ermittelt worden sind.

ANMERKUNG 1 Für R -Verhältnisse zwischen $R = -1$ und $R = 0$ darf ein linear interpolierter Wert der Neigung m_0 verwendet werden.

ANMERKUNG 2 Der R -Wert darf nur auf den angewandten Spannungen basieren ohne Berücksichtigung der Eigenspannungen.

Tabelle F.1 — Werte für m_0

Typ-Nr.	Detail Kategorie-Tabelle	Legierungen	Produktformen	m_0	
				$R = -1$	$R \geq 0$
1.1	J.1	7020	Bleche, Platten und einfache Strangpressprofile	5,0	m_1
1.2		6000 Serie ^a	Bleche, Platten und einfache Strangpressprofile	4,0	m_1
1.3		7020	Geformte Strangpressprofile	4,0	m_1
1.4		6000 Serie ^a	Geformte Strangpressprofile	4,0	m_1
7.6	J.7 und J.9	EN 1999-1-1, Tabelle 3.1a ¹⁾		3,0	m_1
9.1				3,0	m_1
9.2				3,0	m_1
9.3				3,0	m_1
9.4				3,0	m_1
15.1	J.15	7020	EN 1999-1-1, Tabelle 3.1a	3,3	m_1
15.2		7020		3,3	m_1

^a Ausnahmen - siehe 3(1)

Anhang G (informativ)

Einfluss des R -Verhältnisses

G.1 Erhöhung der Ermüdungsfestigkeit

(1) Für angewandte Spannungsverhältniswerte niedriger als $R = +0,5$ darf ein erhöhter Bezugswert der Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_{C(R)}$ anstelle $\Delta\sigma_C$ wie folgt benutzt werden:

$$\Delta\sigma_{C(R)} = f(R) \Delta\sigma_C \tag{G.1}$$

Dabei ist

$f(R)$ der Erhöhungsbeiwert in Abhängigkeit vom R -Verhältnis und vom Komponent- und Konstruktionsdetail-Typ, wie unten in G.2. angegeben.

ANMERKUNG Gezogene Rohre und geformte Profile (gefaltet; gewalzt) könnten Eigenspannungen haben, die nicht vernachlässigbar sind, so dass eine Erhöhung im Sinne dieses Anhangs nicht zulässig ist.

G.2 Fälle, die erhöht werden

G.2.1 Fall 1

(1) Dieser betrifft Entstehungsstellen im Grundwerkstoff und Knetprodukte in Konstruktionselementen weit entfernt von Verbindungen.

(2) Zusätzlich zu den vorkommenden Spannungen sollten Vorbelastungen oder Montagetoleranzen berücksichtigt werden.

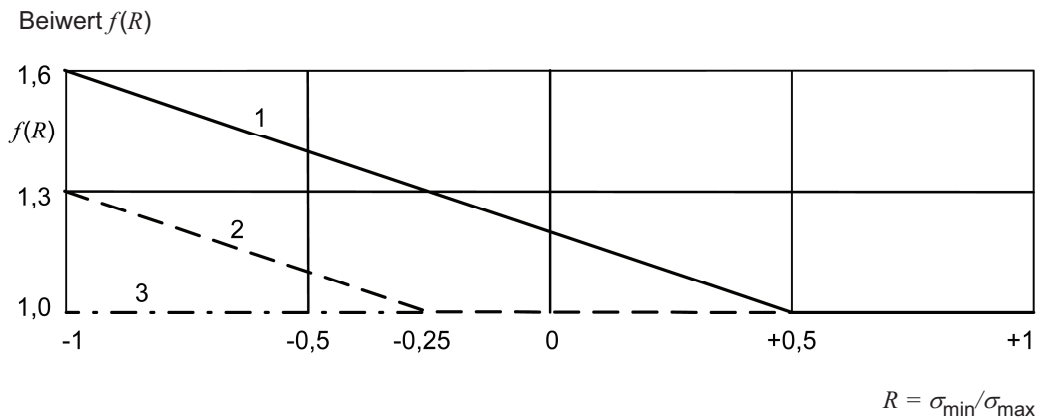
(3) Die Zahlenwerte für den Erhöhungsbeiwert $f(R)$ werden durch

$$f(R) = 1,2 - 0,4R \tag{G.2}$$

angegeben, siehe auch Tabelle G.1 und Bild G.1.

Tabelle G.1 — Werte von $f(R)$ für Fall 1

R	$f(R)$
≤ -1	1,6
> -1 $< +0,5$	$1,2 - 0,4R$
$\geq +0,5$	1,0



Legende

- 1 vollkommen spannungsfreie Bereiche
- 2 teilweise spannungsfreie Bereiche
- 3 Bereiche mit Eigenspannungen

Bild G.1 — Festigkeits-Erhöherungs-Beiwert $f(R)$ bei 2×10^6 Schwingspielen

G.2.2 Fall 2

(1) Dieser betrifft Entstehungsstellen in Verbindung mit geschweißten oder mechanisch befestigten Anschlüssen in einfachen Tragwerkselementen, wo die Eigenspannungen σ_{re} ermittelt worden sind, durch Berücksichtigung von allen Vorbelastungen oder Montagetoleranzen.

(2) Das effektive R -Verhältnis R_{eff} sollte folgendermaßen abgeschätzt werden:

$$R_{eff} = \frac{2\sigma_{res} - \Delta\sigma}{2\sigma_{res} + \Delta\sigma} \tag{G.3}$$

wobei $\Delta\sigma$ die angewandte Spannungsschwingbreite ist.

(3) Die Werte von $f(R)$ werden durch

$$f(R) = 0,9 - 0,4R \tag{G.4}$$

angegeben, siehe auch Tabelle G.2 und Bild G.1.

Tabelle G.2 — Werte von $f(R)$ für Fall 2

R_{eff}	$f(R)$
≤ -1	1,3
> -1	$0,9 - 0,4R$
$\geq -0,25$	1,0

G.2.3 Fall 3

(1) Dieser gilt in der Nähe von Anschweißungen und bei komplexen Konstruktionsbaugruppen, bei denen eine Kontrolle der Eigenspannungen nicht realisierbar ist.

(2) In diesem Fall sollte $f(R)$ mit Eins für alle R -Verhältnisse angenommen werden (siehe auch Bild G.1).

Anhang H (informativ)

Verbesserung der Ermüdungsfestigkeit von Schweißnähten

H.1 Allgemeines

(1) In Fällen, wo Ermüdungsrisse an der Schweißnahtübergangsstelle entstehen würden, kann die Tragfähigkeit von Schweißverbindungen erhöht werden. Solche Methoden werden normalerweise bei den höchstbeanspruchten Schweißnähten oder zur Verbesserung von Schweißnähten niedriger Festigkeit verwendet.

(2) Die folgenden Methoden werden hier betrachtet:

- maschinelles Bearbeiten oder Schleifen;
- Nachbearbeitung durch WIG (Aufschmelzen der Nahtübergangszone) oder Plasma;
- Strahlen (Sand- oder Nadel- oder Hammerstrahlen).

(3) In Fällen, bei denen spezifizierte Verbesserungstechniken verwendet wurden, kann eine Verbesserung von 30 % im Bereich der mittleren und langen Ermüdungslebensdauer, an der Spannungsschwingbreite gemessen, erreicht werden. Die höchste Verbesserung wird erreicht durch Kombination von zwei Methoden wie maschinelles Bearbeiten (oder Schleifen) und Hammerstrahlen, wobei die doppelte Verbesserung verglichen mit den einzelnen Methoden erreicht werden kann.

(4) Bei allen Methoden sollten die folgenden Aspekte betrachtet werden:

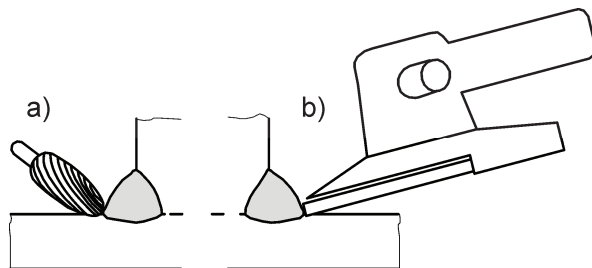
- a) Ein geeigneter Arbeitsvorgang sollte vorhanden sein.
- b) Vor Anwendung der Verbesserungsmaßnahmen sollte man sicherstellen, dass es keine Oberflächenrisse an den kritischen Stellen gibt.
- c) Dies sollte durch die Farbeindringmethode oder andere geeignete zerstörungsfreie Methoden vorgenommen werden.
- d) Im Bereich kurzer Lebensdauern, wo die lokalen Spannungen die Dehngrenze übertreffen, ist die Rissentstehungszeit kurz (unabhängig vom Kerbfall), und folglich ist die Verbesserung gering. Daraus folgt keine Verbesserung für die Bemessung bei 10^5 Schwingspielen (Die $\Delta\sigma-N$ Kurve wird damit um einen bei 10^5 fixierten Wert gedreht).
- e) Andere mögliche Ermüdungsbruchstellen als die gerade verbesserte sollten berücksichtigt werden: z. B. bei Verbesserung des Schweißnahtübergangsbereichs könnten Stellen wie an der Naht selbst oder Innenrisse (teils durchschweiß) kritisch werden.
- f) Es sollten die Ermüdungslebensdauer und der Nutzen von Verbesserungsmethoden in Erwägung gezogen werden.
- g) Unter Bedingungen im Wasser, die eine freie Korrosion ermöglichen, wird die Verbesserung oft verloren gehen. Methoden, die Druckeigenspannungen erzeugen (Strahlen), sind weniger empfindlich. Korrosionsschutz ist somit erforderlich, wenn eine Verbesserung erreicht werden muss.

(5) Bemessungswerte für verbesserte Schweißnähte sollten durch Versuche bestimmt werden, siehe Anhang C.

H.2 Maschinelle Bearbeitung oder Schleifen

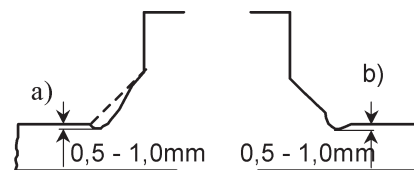
(1) Maschinelle Bearbeitung kann durch einen schnell rotierenden Entgraterstab erfolgen und hat den Vorteil einen genauer definierten Radius zu erzeugen, hinterlässt Spuren parallel zur Spannungsrichtung und erreicht Ecken. Alternativ darf eine Schleifscheibe benutzt werden, wenn die Zugänglichkeit dies ermöglicht, siehe Bild H.1. In beiden Fällen sollte der Radius der Schnittkante richtig gewählt werden.

(2) Um Einrisse usw. sicher entfernen zu können muss das maschinelle Entgraten bis zu einer Mindestdiefe von 0,5 mm unterhalb der Unterkante jedes optisch feststellbaren Einschnitts reichen, sollte allerdings nicht tiefer als 2 mm oder 5 % der Plattendicke betragen – dem entsprechend, was weniger beträgt –, siehe Bild H.2. Die geringfügige Abnahme der Plattendicke und die entsprechende Erhöhung der Nennspannungen ist nicht signifikant für Plattendicken ab 10 mm aufwärts. Im Fall von Nähten mit mehreren Lagen sollten mindestens zwei Nahtübergangsstellen bearbeitet werden. Außerdem sollte man aufpassen, dass die erforderliche Nahtdicke erhalten bleibt.



Legende
a) Entgraten
b) Scheibenschleifen

Bild H.1 — Maschinelle Bearbeitungs- und Schleifverfahren



Legende
a) Volles Profil
b) Nahtübergangsstelle

Bild H.2 — Profilgeometrien

H.3 Nachbearbeitung durch WIG oder Plasma

(1) Während das WIG Schweißen nur ein praktisches Verfahren für Tragwerke mit 4 mm oder weniger dicken Platten ist, kann es zur Verbesserung der Ermüdungsfestigkeit eingesetzt werden in Fällen, in denen die Nahtübergangsstelle die kritische Stelle ist. Beim Wiederschmelzen des ursprünglichen Nahtübergangsbereichs können innere Imperfektionen und Einbrände entfernt und der Radius des Übergangsbereiches vergrößert werden, was den lokalen Spannungskonzentrationsbeiwert vermindert.

(2) Standardmäßige WIG-Schweißausrüstung sollte benutzt werden, ohne Fülldraht. Die Nachbearbeitung durch WIG ist empfindlich für die Fertigkeiten des Schweißers und es ist wichtig auf saubere Oberflächen zu achten, um Poren zu vermeiden. Detaillierte Verfahrensanweisungen müssen ausgearbeitet werden.

(3) Die Verbesserung sollte durch Versuche bestätigt werden.

H.4 Strahlen

(1) Die größten Vorteile werden normalerweise durch Methoden erreicht, die Druckeigenspannungen erzeugen. Die üblichsten Methoden sind das Hammerstrahlen, Nadelstrahlen und Kugelstrahlen. Strahlen ist ein Kaltverformungsverfahren bei dem der Werkzeugstoß die Oberfläche plastisch verformt. Das umgebende (elastische) Material drückt auf das deformierte Volumen. Hohe Druck-Betriebsbelastung kann die Höhe der Eigenspannung reduzieren und dies sollte bei Anwendung zufälliger Einwirkungskollektiven berücksichtigt werden.

(2) Verfahrensanweisungen für sämtliche Strahlverfahren sollten ausgearbeitet werden: Durchgänge, Verformungen an der Nahtübergangsstelle und Einkerbung für das Hammer- und Drahtbündelstrahlen; Intensität, Abdeckung und Verformung nach der Almen strip Methode für das Kugelstrahlen.

Anhang I (informativ)

Gussstücke

I.1 Allgemeines

(1) Die folgenden Daten dürfen für Gussstücke verwendet werden, vorausgesetzt dass die Regeln der Spannungsberechnung in EN 1999-1-1, 3.2.3.1 und ihrem Anhang C.3.4 befolgt werden.

(2) Die Bemessungsregeln in EN 1999-1-3 für Gussstücke unter Ermüdungsbelastung dürfen für die in EN 1999-1-1, Tabelle 3.3 angegebenen Legierungen verwendet werden, wenn die zusätzlichen Anforderungen in I.3 beachtet werden.

I.2 Ermüdungsfestigkeitsdaten

I.2.1 Flachguss

(1) In Abhängigkeit von der geforderten Qualitätsstufe, siehe I.3, dürfen die Zahlenwerte für $\Delta\sigma$ aus Tabelle I.1 verwendet werden.

Tabelle I.1 — Numerische Werte von $\Delta\sigma$ (N/mm²) für den ungeschweißten Werkstoff

Detail Kategorie ($N_C = 2 \times 10^6$)		$N = 10^5$	$N_D = 2 \times 10^6$	$N_L = 10^8$
$\Delta\sigma_C$	$m_1 = m_2$	$\Delta\sigma$	$\Delta\sigma_D$	$\Delta\sigma_L$
71^a	7	108,9	71	40,6
50	7	76,7	50	28,6
40	7	61,4	40	22,9
32	7	49,1	32	18,3
25	7	38,4	25	14,3

^a siehe ANMERKUNG in I.3

I.2.2 Geschweißter Werkstoff

(1) Ermüdungsfestigkeitswerte für geschweißte Gussstücke werden durch EN 1999-1-3 nicht behandelt.

ANMERKUNG Ermüdungsfestigkeitswerte für Schweißverbindungen zwischen Gussstücke dürfen im Nationalen Anhang definiert werden.

I.2.3 Mechanisch verbundene Gussstücke

I.2.3.1 Geschraubte Verbindungen

(1) Die Zahlenwerte für $\Delta\sigma$ aus Tabelle I.2 dürfen für Schrauben der Kategorie A: Scher-/Lochleibungsverbindung, verwendet werden, siehe EN 1999-1-1.

Tabelle I.2 — Numerische Werte von $\Delta\sigma$ (N/mm²) für geschraubte Verbindungen

Detailkategorie ($N_C = 2 \times 10^6$) für ungeschweißten Werkstoff	Entsprechende Detailkategorie ($N_C = 2 \times 10^6$) für geschraubte und genietete Verbindungen		$N = 10^5$	$N_D = 5 \times 10^6$	$N_L = 10^8$
	$\Delta\sigma_C$	$m_1 = m_2$	$\Delta\sigma$	$\Delta\sigma_D$	$\Delta\sigma_L$
71	45	4	95,2	35,8	16,9
50	40	4	84,6	31,8	15,0
40	25	4	52,9	19,9	9,4
32	20	4	42,3	15,9	7,5
25	16	4	33,8	12,7	6,0

I.2.3.2 Bolzenverbindungen

(1) Ermüdungsfestigkeitswerte für Bolzenverbindungen werden durch EN 1999-1-3 nicht abgedeckt.

ANMERKUNG 1 Ermüdungsfestigkeitswerte aus Tabelle J.15 für geschraubte Verbindungen dürfen unter der Voraussetzung verwendet werden, dass die Bemessungsanalyse die Spannungsverteilung entlang des Bolzens und des angeschlossenen Bauteils angemessen und zuverlässig berücksichtigt, bspw. durch Berechnung der geometrischen Spannungen.

ANMERKUNG 2 Ermüdungsfestigkeitswerte für Bolzenverbindungen von Gussstücken dürfen im Nationalen Anhang definiert werden.

I.2.4 Geklebte Gussstücke

(1) Geklebte Verbindungen in Gussstücke werden durch EN 1999-1-3 nicht abgedeckt.

ANMERKUNG Ermüdungsfestigkeitswerte für geklebte Verbindungen in Gussstücken dürfen im Nationalen Anhang festgelegt werden.

I.3 Qualitätsanforderungen

(1) Die zusätzlichen Beschränkungen in Tabelle I.3 bezüglich des maximalen Porendurchmessers sollten beachtet werden.

Tabelle I.3 — Werte für maximalen Porendurchmesser [mm] bei Gussteilen

Detailkategorie ($N_C = 2 \times 10^6$)	71	50	40	32	25
Maximaler Poren-Durchmesser	0,2	0,5	0,9	1,5	2,0 (normal)

ANMERKUNG Die Herstellung von Gussstücken mit einem Porendurchmesser kleiner als 0,6 mm bedarf spezieller Fertigkeiten, Erfahrung, Gusstechnik und Technologie. Darüber hinaus sind für die Erkennung von Poren kleiner als 0,6 mm spezielle Geräte notwendig, insbesondere für den Bereich bis zu 0,2 mm, wo die Möglichkeit der Erkennung von Fehlstellen dieser Größe auch von der Form (Dicke) des Gussstücken abhängt. Die bei der Planung getroffenen Annahmen über die Materialeigenschaften der für das Tragwerk vorgesehenen Gussstücke sollten durch den Hersteller der Gussstücke bestätigt werden.

Anhang J (informativ)

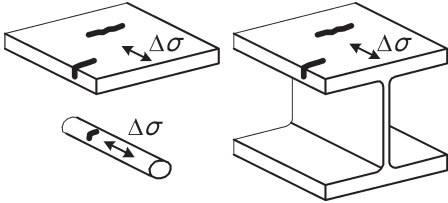
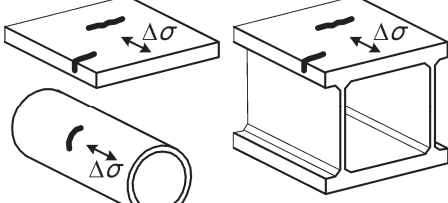
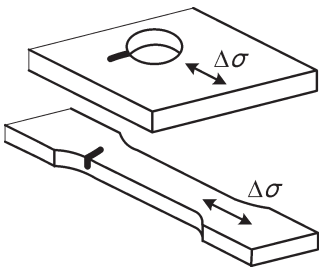
Tabellen der Detailkategorien

J.1 Allgemeines

(1) Die Detailkategorien und $\Delta\sigma$ - N Beziehungen in diesem Anhang dürfen nur zusammen mit den Bestimmungen von Kapitel 6 verwendet werden.

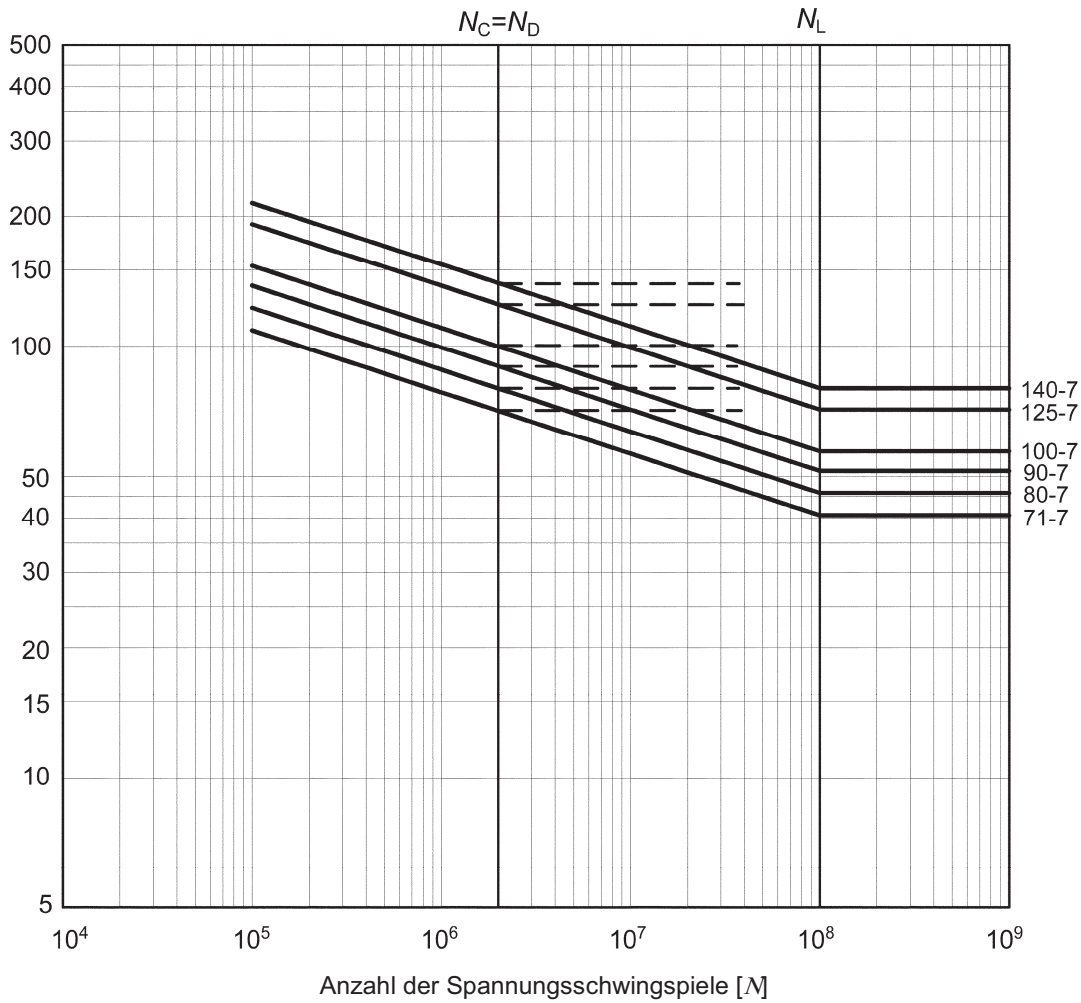
(2) Die Detailkategorie-Werte sind für Außentemperaturen und Umweltbedingungen gültig, wo kein Oberflächenschutz erforderlich ist (siehe Tabelle 6.2), sowie in Verbindung mit den Ausführungsbedingungen von EN 1090-3. Diese Werte sind für Spannungsverhältnisse ermittelt, die nicht kleiner sind als 0,5.

Tabelle J.1 — Detailkategorien für nicht geschweißte Bauteile

Typ-Nr.	Detail-Kategorie $\Delta\sigma - m_1^a$ Legierungs- beschrän- kung	Produktformen Konstruktionsdetail Rissentstellungsstelle	Spannungsrichtung	Spannungsanalyse	Ausführungs- Anforderungen		
1.1	125-7 nur 7020	Blech, Band und einfache strang- gepresste Stäbe und Stangen, maschinell bearbeitete Teile 	Parallel oder quer ^b zur Walz- oder Strangpressrichtung	Haupt-Nennspannung an der Rissentstellungsstelle	Keine Übergangs- Ecken im Profilquer- schnitt, kein Kontakt mit anderen Teilen Maschinelle Oberflächen- bearbeitung $R_{z5} < 40 \mu\text{m}^c$ Visuelle Inspektion		
1.2	90-7	Unebenheit an der Oberfläche					
1.3	80-7 nur 7020	Bleche, Platten, Strangpressprofile, Rohre, Schmiedestücke 					
1.4	71-7	Unebenheit an der Oberfläche				Oberfläche frei von scharfen Ecken, wenn diese nicht parallel zur Spannungsrichtung sind, Kanten frei von Kerben	
1.5	140-7 nur 7020	Kerben, Löcher 					Berücksichtigung der Spannungs- Konzentration: siehe Anhang D.2
1.6	100-7	Unebenheit an der Oberfläche					

^a $m_1 = m_2$, Dauerfestigkeit bei 2×10^6 Schwingspielen.
^b Wenn die Spannungsrichtung quer zur Strangpressrichtung ist, sollte der Hersteller bezüglich der Qualitätssicherung im Falle von Strangpressprofilen, hergestellt durch Kammer- bzw. Brückenwerkzeug, konsultiert werden.
^c R_{z5} siehe EN ISO 4287 und EN ISO 4288.

Spannungsschwingbreite [N/mm²]



**Bild J.1 — Ermüdungsfestigkeitskurven $\Delta\sigma-N$ für nicht geschweißte Bauteile —
 Detailkategorien entsprechend Tabelle J.1**

**Tabelle J.2 — Numerische Werte von $\Delta\sigma-N$ (N/mm²) für nicht geschweißte Bauteile —
 Detailkategorien entsprechend Tabelle J.1**

Neigung		Schwingspiele N						
m_1	m_2	1E+05	1E+06	2E+06	5E+06	1E+07	1E+08	1E+09
7,0	7,0	214,8	154,6	140,0	122,8	111,2	80,1	80,1
7,0	7,0	191,8	138,0	125,0	109,7	99,3	71,5	71,5
7,0	7,0	153,4	110,4	100,0	87,7	79,5	57,2	57,2
7,0	7,0	122,7	88,3	80,0	70,2	63,6	45,7	45,7
7,0	7,0	108,9	78,4	71,0	62,3	56,4	40,6	40,6

Tabelle J.3 — Detailkategorien für Bauteile mit Anschweißungen — Quernaht-Schweißübergang

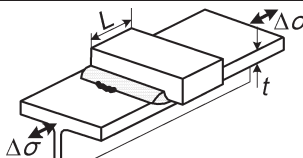
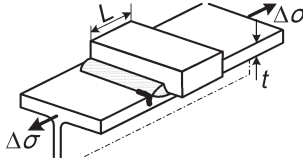
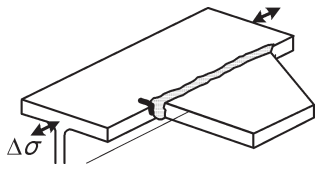
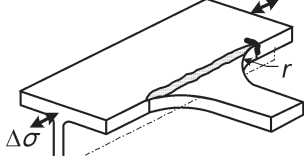
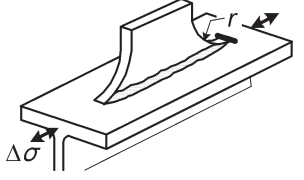
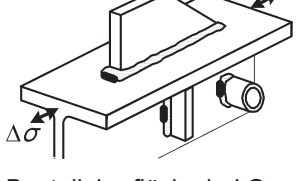
Typ-Nr	Detailkategorie $\Delta\sigma - m_1^{a,b}$		Konstruktionsdetail Rissentstellungsstelle	Abmessungen (mm)	Spannungsanalyse		Ausführungsanforderungen	
					Spannungsparameter	Spannung berücksichtigt für		Qualitätsstufe ^c
3.1	32 – 3,4			$L \leq 20$	Nennspannung an der Rissentstellungsstelle	Aussteifende Wirkung der Anschweißung	Einbrand glatt schleifen	C
3.2	25-3,4	$t \leq 4$	An der Quernaht-Übergangsstelle am beanspruchten Bauteil, entfernt von der Kante (Naht wird in Längs-Richtung fortgesetzt an der Flanschseite)	$L > 20$				
	23-3,4	$4 < t \leq 10$						
	20-3,4	$10 < t \leq 15$						
3.3	28 – 3,4			$L \leq 20$				
3.4	23-3,4	$t \leq 4$	An der Quernaht-Übergangsstelle am beanspruchten Bauteil, an der Kante (Naht wird in Längs-Richtung fortgesetzt an der Flanschseite)	$L > 20$				
	20-3,4	$4 < t \leq 10$						
	18-3,4	$10 < t \leq 15$						
3.5	18-3,4		Kein Radius					

Tabelle J.3 (fortgesetzt)

Typ-Nr	Detail-kategorie $\Delta \sigma - m_1$ ^{a,b}	Konstruktionsdetail Rissentstehungsstelle	Abmes-sungen (mm)	Spannungs-analyse		Ausführungs-anforderungen	
				Spannungs-parameter	Spannung berücksichtig für		Qualitätsstufe ^c
3.6	36-3,4	 An der abgeschliffenen Nahtübergangsstelle an der Kante	$r \geq 50$	Nennspannung an der Rissentstehungsstelle	Aussteifende Wirkung der Anschweißung	Radius parallel zur Spannungsrichtung schleifen	C
3.7	36-3,4	 An der abgeschliffenen Nahtübergangsstelle am Nahtende	$r \geq 50$			Nahtübergangsstelle sollte voll abgeschliffen sein	
3.8	23-3,4	 Bauteiloberfläche bei Quernaht	Kein Radius				

^a $m_2 = m_1 + 2$
^b Für flache Bauteile unter Biegungsspannungen siehe 6.2.1 (11) und erhöhe um zwei Detailkategorien
^c Nach EN ISO 10042:2005.

Spannungsschwingbreite [N/mm²]

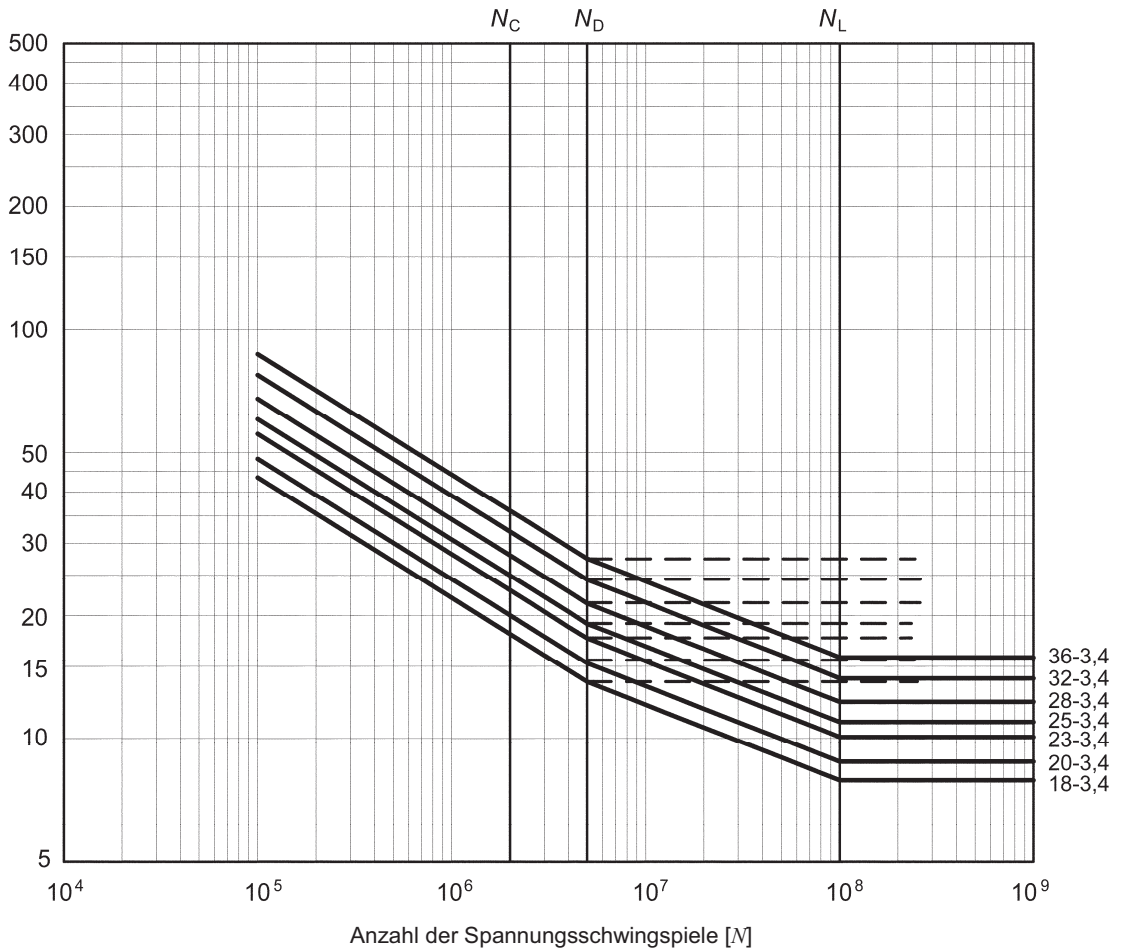


Bild J.2 — Ermüdungsfestigkeitskurven $\Delta\sigma-N$ für Bauteile mit Anschweißungen, Quernaht-Schweißübergang — Detailkategorien entsprechend Tabelle J.3

Tabelle J.4 — Numerische Werte von $\Delta\sigma-N$ (N/mm²) für Bauteile mit Anschweißungen, Quernaht-Schweißübergang — Detailkategorien entsprechend Tabelle J.3

Neigung		Schwingspiele N						
m_1	m_2	1E+05	1E+06	2E+06	5E+06	1E+07	1E+08	1E+09
3,4	5,4	86,9	44,1	36,0	27,5	24,2	15,8	15,8
3,4	5,4	77,2	39,2	32,0	24,4	21,5	14,0	14,0
3,4	5,4	67,6	34,3	28,0	21,4	18,8	12,3	12,3
3,4	5,4	60,3	30,7	25,0	19,1	16,8	11,0	11,0
3,4	5,4	55,5	28,2	23,0	17,6	15,5	10,1	10,1
3,4	5,4	48,3	24,5	20,0	15,3	13,4	8,8	8,8
3,4	5,4	43,4	22,1	18,0	13,7	12,1	7,9	7,9

Tabelle J.5 — Detailkategorien für Bauteile mit Längs-Schweißnähten

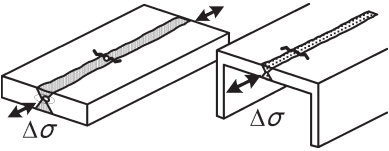
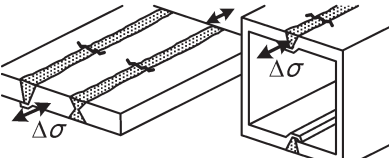
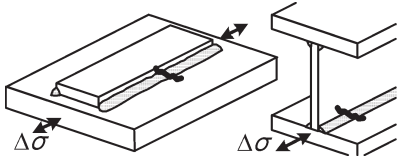
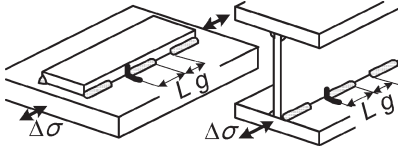
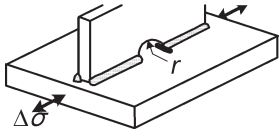
Typ-Nr	Detailkategorie $\Delta\sigma - m_1^a$	Konstruktionsdetail Rissentstehungsstelle	Nahttyp		Spannungs-Analyse		Ausführungs-Anforderungen		
			Spannungsparameter	Bereits berücksichtigte Spannungskonzentration	Schweiß-technische Anforderungen	Qualitäts-Stufe ^c	Zusätzlich		
							Intern	Oberfläche u. geometrisch	
5.1	63-4,3	 Bei Nahtdiskontinuität	Voll durchgeschweißte Stumpfnäht; Nahtüberhöhung blecheben abgearbeitet	Nennspannung an der Rissentstehungsstelle		Kontinuierliches automatisches Schweißen	B	C	
5.2	56-4,3						C	C	
5.3	45-4,3	 Bei Nahtdiskontinuität	Voll durchgeschweißte Stumpfnäht				C	D	

Tabelle J.5 (fortgesetzt)

Typ-Nr	Detailkategorie $\Delta\sigma - m_1^a$	Konstruktionsdetail Rissentstellungsstelle	Nahttyp	Spannungs-Analyse		Ausführungs-Anforderungen			
				Spannungsparameter	Bereits berücksichtigte Spannungskonzentration	Schweiß-technische Anforderungen	Qualitäts-Stufe ^c		Zusätzlich
					Intern		Oberfläche u. geometrisch		
5.4	45-4,3		Durchgehende Kehlnaht	Nennspannung an der Rissentstellungsstelle			B	C	
5.5	40-4,3	Bei Nahtdiskontinuität					C	D	
5.6	36-4,3	 Nahtübergangsstelle oder Krater	Unterbrochene Kehlnaht $g \leq 25L$				C	D	
5.7	28-4,3	 Nahtübergangsstelle oder Krater	Freischnitt-Loch auf Nahtachse zentriert $r \leq 25$				Anwesenheit von Freischnitt-Loch	C	

^a $m_2 = m_1 + 2$

^b Diskontinuität in Richtung einer Längs-Schweißnaht sollte nicht höher als 1/10 der Blechdicke sein oder eine Steigung größer als 1:4 haben.

^c Nach EN ISO 10042:2005.

Spannungsschwingbreite [N/mm²]

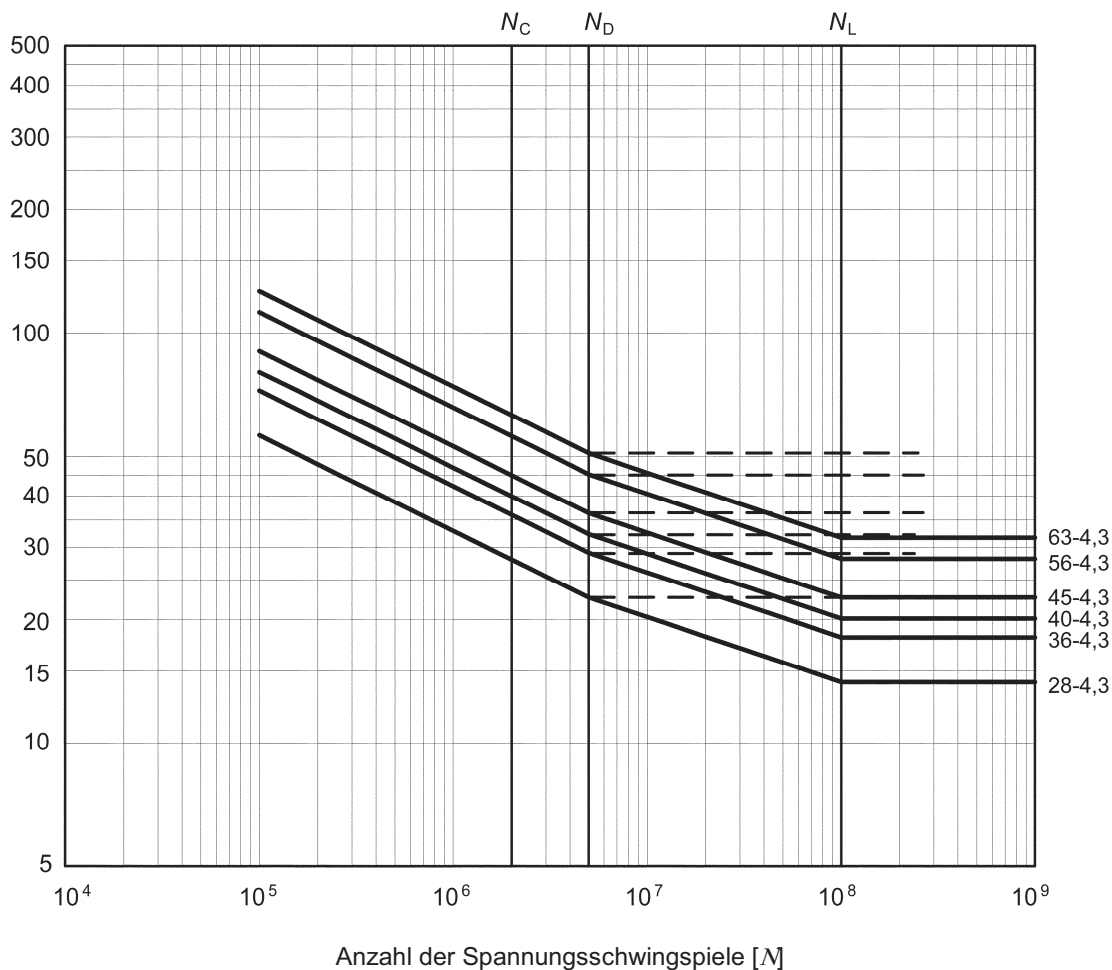


Bild J.3 — Ermüdungsfestigkeitskurven $\Delta\sigma-N$ für Bauteile mit Längs-Schweißnähten — Detailkategorien entsprechend Tabelle J.5

Tabelle J.6 — Numerische Werte von $\Delta\sigma-N$ (N/mm²) für Bauteilen mit Längs-Schweißnähten — Detailkategorien entsprechend Tabelle J.5

Neigung		Schwingspiele N						
m_1	m_2	1E+05	1E+06	2E+06	5E+06	1E+07	1E+08	1E+09
4,3	6,3	126,4	74,0	63,0	50,9	45,6	31,6	31,6
4,3	6,3	112,4	65,8	56,0	45,3	40,5	28,1	28,1
4,3	6,3	90,3	52,9	45,0	36,4	32,6	22,6	22,6
4,3	6,3	80,3	47,0	40,0	32,3	29,0	20,1	20,1
4,3	6,3	72,3	42,3	36,0	29,1	26,1	18,1	18,1
4,3	6,3	56,2	32,9	28,0	22,6	20,3	14,1	14,1

Tabelle J.7 — Detailkategorien für Quer-Stumpfnah-Stöße zwischen Bauteilen

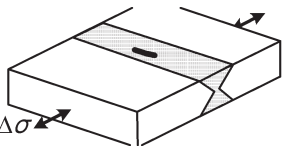
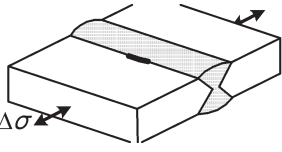
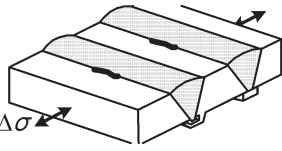
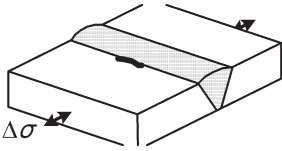
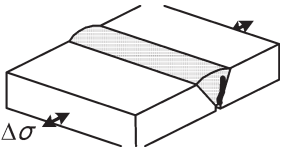
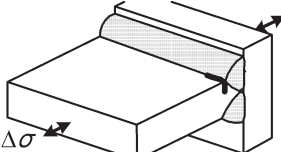
Typ-Nr	Detailkategorie $\Delta\sigma - m_1^a$	Konstruktionsdetail Rissentstellungsstelle	Nahttyp	Verbundenes Bauteil	Spannungsparameter	Ausführungs-Anforderungen										
						Schweiß-anforderungen	Qualitätsstufe ^c		Zusätzlich							
							Intern	Oberfläche, geometrisch								
7.1.1	56-7		Voll durchgeschweißt, Nahtüberhöhung an beiden Seiten blecheben abgearbeitet	Flachteile und Vollquer-schnitte	Netto-Querschnitt	Wurzel abgeschliffen	Auslaufbleche an den Enden eingesetzt, abgetrennt und blecheben abgeschliffen in Spannungsrichtung	B	B							
7.1.2	45-7							Naht	Offene Quer-schnitte		C	C				
7.2.1	50-4,3		Beidseitig, voll durchgeschweißt	Flachteile und Vollquer-schnitte				B	B		d					
7.2.2	40-3,4							Nahtübergangsstelle	Offene Quer-schnitte			B	C			
7.2.3	36-3,4							Nahtübergangsstelle	Offene Quer-schnitte			C	C			
7.3.1	40-4,3		Nur einseitig, voll durchgeschweißt, mit permanenter Unterlage	Flachteile und Voll-Quer-schnitte				Netto-Querschnitt	Auslaufbleche an den Enden eingesetzt, abgetrennt und blecheben abgeschliffen in Spannungsrichtung		C	C				
7.3.2	32-3,4										Nahtübergangsstelle	Offene und Hohl-profile, Rohre		C	C	
7.4.1	45-4,3											Nur einseitig, voll durchgeschweißt, ohne Unterlage		Flachteile und Voll-quer-schnitte	B	B
7.4.2	40-4,3	Nahtübergangsstelle	Offene und Hohl-profile, Rohre	C											C	
7.4.3	32-3,4	Nahtübergangsstelle	Offene und Hohl-profile, Rohre	C											C	

Tabelle J.7 (fortgesetzt)

Tabelle J.7 (fortgesetzt) Typ-Nr	Detailkategorie $\Delta\sigma - m_1^a$	Konstruktionsdetail Rissentstehungsstelle	Nahttyp	Verbundenes Bauteil	Spannungsparameter	Ausführungs- Anforderungen			
						Schweiß- anforderungen	Qualitäts- stufe ^c		Zusätzlich
							Intern	Oberfläche, geometrisch	
7.5	18-3,4	 Naht	Partiell durch- geschweißt		Netto Hals- Querschnitt		D	C	
7.6	36-3,4	 Nahtübergangsstelle	Voll durch- geschweißt		Netto-Querschnitt ^b		B	B	

^a $m_2 = m_1 + 2$

^b Die Spannungskonzentration durch aussteifendes Querelement ist bereits berücksichtigt.

^c Nach EN ISO 10042:2005.

^d Nahtüberhöhungswinkel $\geq 150^\circ$ für beide Nahtseiten.

^e Nahtüberhöhungswinkel $\geq 150^\circ$.

^f Neigungswinkel $< 1:4$ bei Breiten- oder Dickenänderung.

Spannungsschwingbreite [N/mm²]

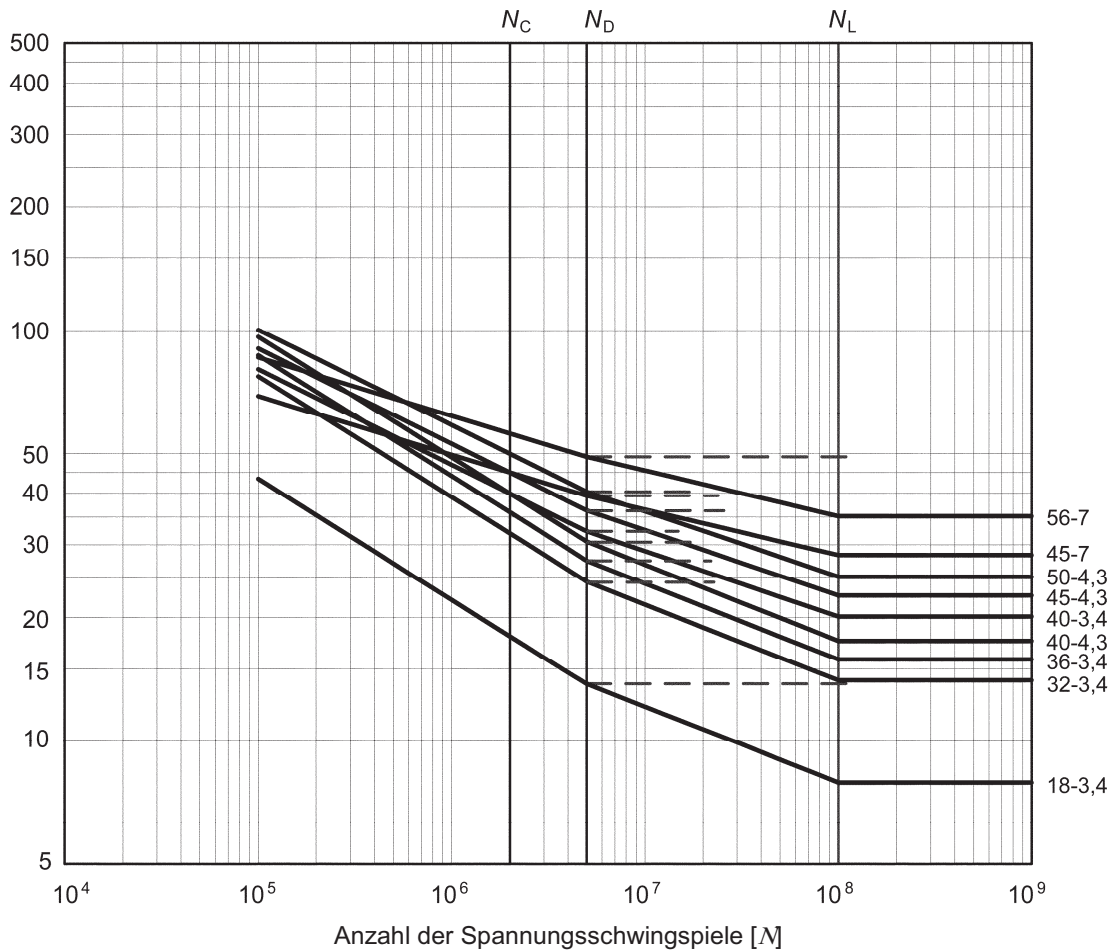


Bild J.4 — Ermüdungsfestigkeitskurven $\Delta\sigma$ - N für Quer-Stumpfnah-Stöße zwischen Bauteilen — Detailkategorien entsprechend Tabelle J.7

Tabelle J.8 — Numerische Werte von $\Delta\sigma$ - N (N/mm²) für Quer-Stumpfnah-Stöße zwischen Bauteilen- Detailkategorien entsprechend Tabelle J.7

Neigung		Schwingspiele N						
m_1	m_2	1E+05	1E+06	2E+06	5E+06	1E+07	1E+08	1E+09
7	9	85,9	61,8	56,0	49,1	45,5	35,2	35,2
7	9	69,0	49,7	45,0	39,5	36,6	28,3	28,3
4,3	6,3	100,4	58,7	50,0	40,4	36,2	25,1	25,1
4,3	6,3	90,3	52,9	45,0	36,4	32,6	22,6	22,6
3,4	5,4	96,5	49,0	40,0	30,6	26,9	17,5	17,5
4,3	6,3	80,3	47,0	40,0	32,3	29,0	20,1	20,1
3,4	5,4	86,9	44,1	36,0	27,5	24,2	15,8	15,8
3,4	5,4	77,2	39,2	32,0	24,4	21,5	14,0	14,0
3,4	5,4	43,4	22,1	18,0	13,7	12,1	7,9	7,9

Tabelle J.9 — Detailkategorien für Kehlnaht-Stöße zwischen Bauteilen

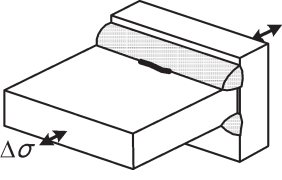
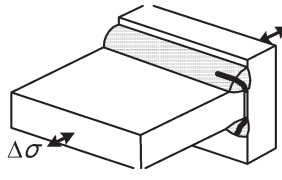
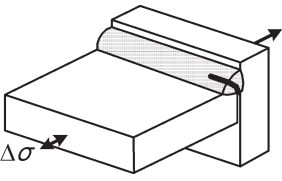
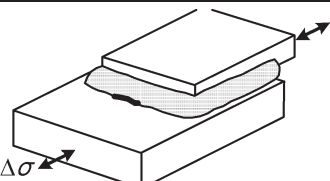
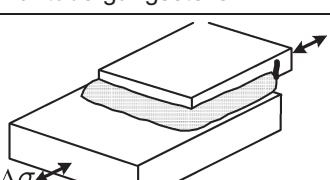
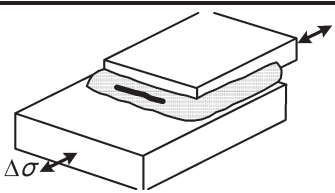
Typ-Nr	Detailkategorie $\Delta\sigma - m_1^a$	Konstruktionsdetail Rissentstellungsstelle	Nahttyp	Spannungsanalyse		Ausführungsanforderungen			
				Spannungsparameter	Bereits berücksichtigte Spannungskonzentration	Herstellung	Qualitätsstufe ^c		Zusätzlich
							Intern	Oberfläche, geometrisch	
9.1	28-3,4	 Nahtübergangsstelle	Doppel- Kehlnaht, partiell durchgeschweißt; Nahtübergangsriss bei $a/t > 0,6$	Netto-Querschnitt	Aussteifende Wirkung des Querelements	Auslaufbleche an den Enden eingesetzt, abgetrennt und blecheben ab geschliffen in Richtung $\Delta\sigma$	C	C	
9.2	25-3,4	 Naht	Doppel- Kehlnaht, partiell durchgeschweißt; Wurzelriss bei $a/t \leq 0,6$	Netto-Nahtalsquerschnitt			C	C	
9.3	12-3,4	 Naht	Einseitige Kehlnaht ^b , Wurzelriss bei $a/t \leq 0,6$	Netto-Nahtalsquerschnitt			C	C	
9.4	23-3,4	 Nahtübergangsstelle	Kehlnaht	Netto-Querschnitt	C		C		
9.5	18-3,4	 Nahtübergangsstelle	Kehlnaht		Spannungsspitze an Nahtenden		C	C	

Tabelle J.9 (fortgesetzt)

Typ-Nr	Detailkategorie $\Delta\sigma - m_1^a$	Konstruktionsdetail Rissentstehungsstelle	Nahttyp	Spannungsanalyse		Ausführungsanforderungen			
				Spannungsparameter	Bereits berücksichtigte Spannungskonzentration	Herstellung	Qualitätsstufe ^c		Zusätzlich
							Intern	Oberfläche, geometrisch	
9.6	14-3,4	 <p>Naht</p>	Kehlnaht	Netto Halsquerschnitt, s. 5.4.2	Spannungsspitze an Nahtenden		C	C	
<p>^a $m_2 = m_1 + 2$</p> <p>^b Im Fall von Rohrquerschnitten Bemessung entsprechend Typ-Nr 9.1 oder 9.2.</p> <p>^c Nach EN ISO 10042:2005.</p>									

Spannungsschwingbreite [N/mm²]

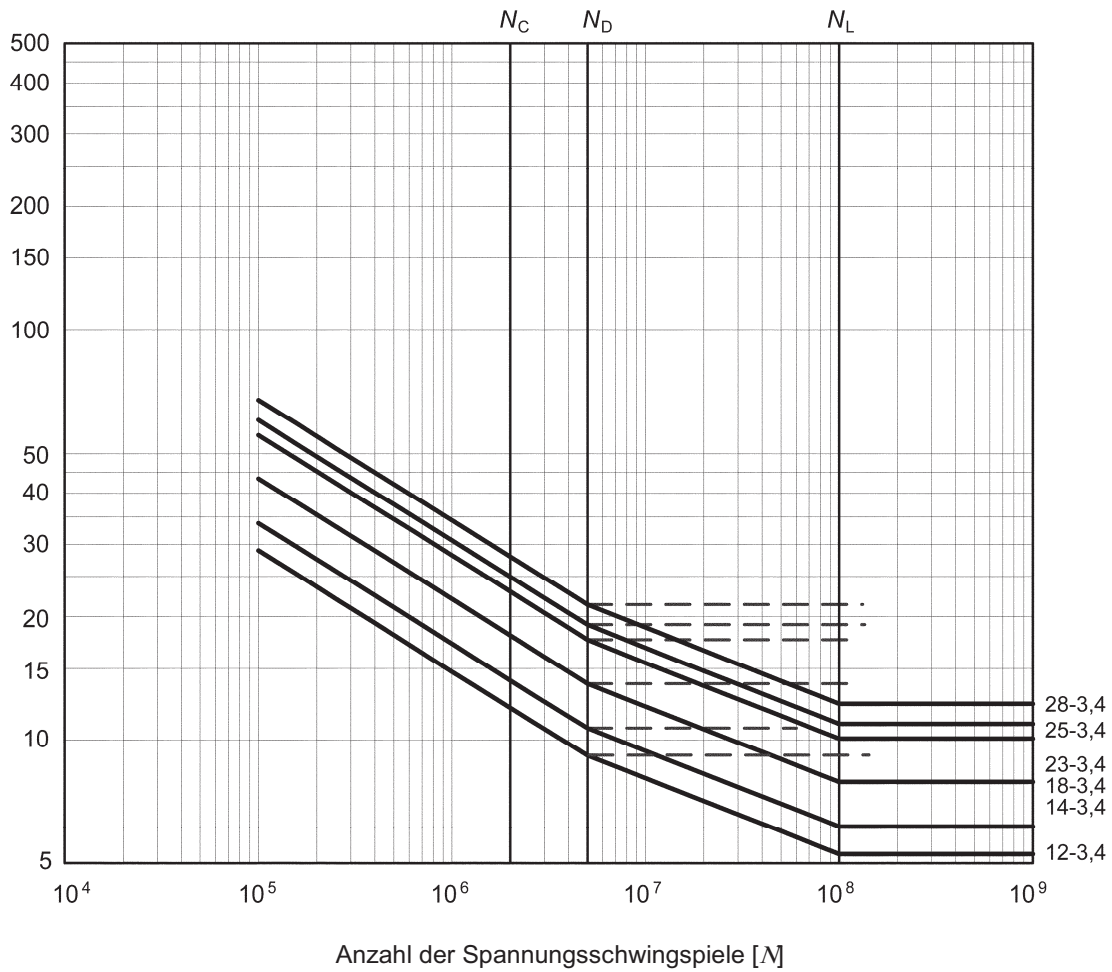
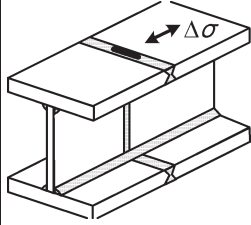
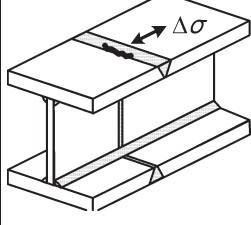
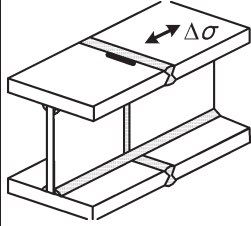
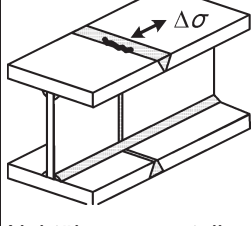


Bild J.5 — Ermüdungsfestigkeitskurven $\Delta\sigma-N$ für Kehlnaht-Stöße zwischen Bauteilen — Detailkategorien entsprechend Tabelle J.9

Tabelle J.10 — Numerische Werte von $\Delta\sigma-N$ (N/mm²) für Kehlnaht-Stöße zwischen Bauteilen — Detailkategorien entsprechend Tabelle J.9

Neigung		Schwingspiele N						
m_1	m_2	1E+05	1E+06	2E+06	5E+06	1E+07	1E+08	1E+09
3,4	5,4	67,6	34,3	28,0	21,4	18,8	12,3	12,3
3,4	5,4	60,3	30,7	25,0	19,1	16,8	11,0	11,0
3,4	5,4	55,5	28,2	23,0	17,6	15,5	10,1	10,1
3,4	5,4	43,4	22,1	18,0	13,7	12,1	7,9	7,9
3,4	5,4	33,8	17,2	14,0	10,7	9,4	6,1	6,1
3,4	5,4	29,0	14,7	12,0	9,2	8,1	5,3	5,3

Tabelle J.11 — Detailkategorien für kreuzende Nähte in zusammengesetzten Trägern

Typ-Nr	Detail-kategorie $\Delta\sigma - m_1^a$	Konstruktionsdetail Rissentstehungsstelle	Nahttyp ^{b,c}	Spannungsparameter	Ausführungsanforderungen				
					Schweiß-technische Anforderungen	Qualitätsstufe ^d		Zusätzlich	
						Intern	Oberfläche, geometrisch		
11.1	40-3,4	 Naht	Doppel-Stumpfnah, voll durchgeschweißt Beidseitig Nahtoberfläche blecheben geschliffen	Netto-Querschnitt	An- und Auslaufbleche verwenden, abtönen und blecheben in Richtung von $\Delta\sigma$ schleifen	Wurzel ausgeschliffen	B	B	Für Steg-Flansch-Halskehlnähte siehe Tabelle 6.5, Typ.-Nr 5.4 oder 5.5.
11.2	40-3,4	 Naht	Einseitige Stumpfnah, voll durchgeschweißt, Wurzel und Nahtoberfläche blecheben geschliffen			B	B		
11.3	36-3,4	 Nahtübergangsstelle	Doppel-Stumpfnah, voll durchgeschweißt			Nahtüberhöhungswinkel $\geq 150^\circ$	B	C	
11.4	32-3,4	 Nahtübergangsstelle	Einseitige Stumpfnah, voll durchgeschweißt				C	C	

^a $m_2 = m_1 + 2$
^b Ausführung von Quer-Stumpfnähte auf Stegen und Flanschen vor endgültigem Zusammenbau des Trägers mit Längsnähten.
^c Übergangsneigung < 1:4 bei Änderung der Breite oder der Blechdicke.
^d Nach EN ISO 10042:2005.

Spannungsschwingbreite [N/mm²]

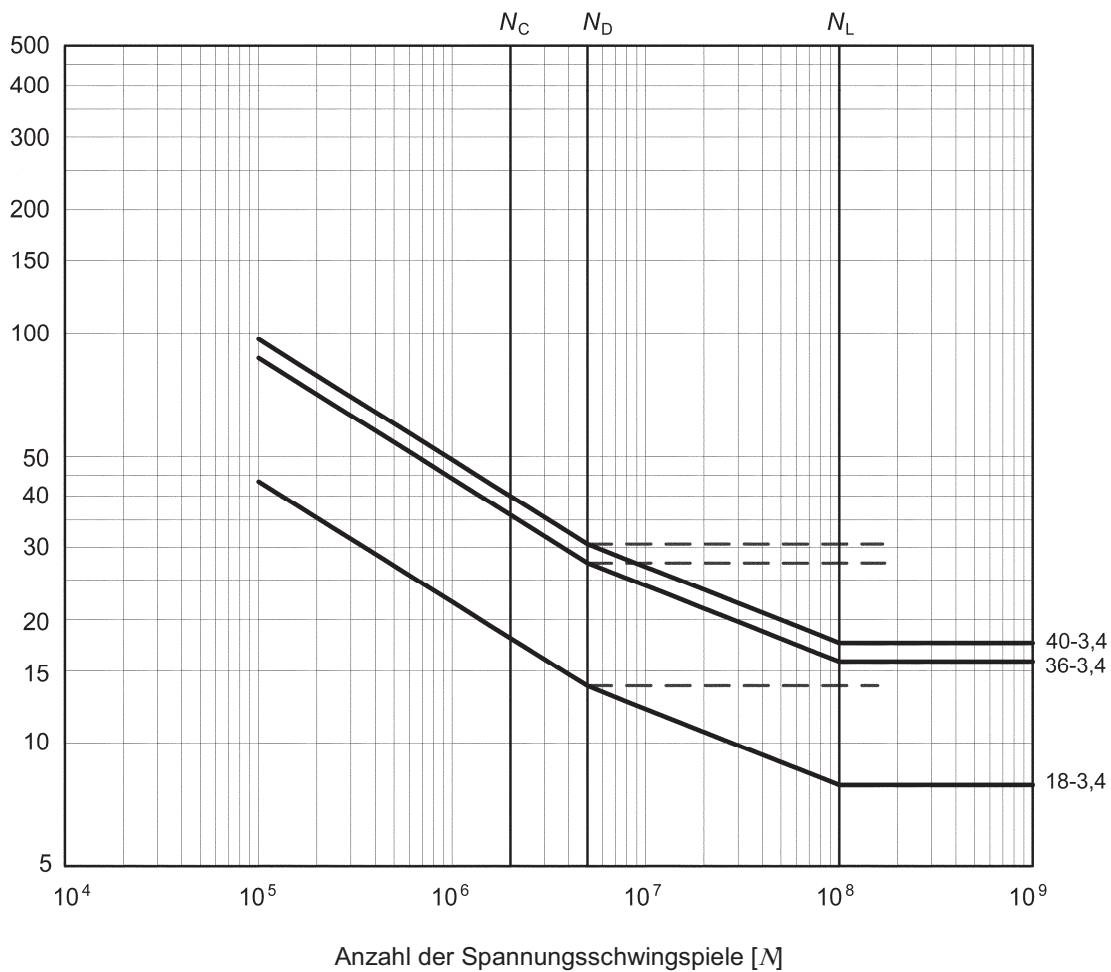


Bild J.6 — Ermüdungsfestigkeitskurven $\Delta\sigma$ - N für kreuzende Nähte in zusammengesetzten Trägern — Detailkategorien entsprechend Tabelle J.11

Tabelle J.12 — Numerische Werte von $\Delta\sigma$ - N (N/mm²) für kreuzende Nähte in zusammengesetzten Trägern — Detailkategorien entsprechend Tabelle J.11

Neigung		Schwingspiele N						
m_1	m_2	1E+05	1E+06	2E+06	5E+06	1E+07	1E+08	1E+09
3,4	5,4	96,5	49,0	40,0	30,6	26,9	17,5	17,5
3,4	5,4	86,9	44,1	36,0	27,5	24,2	15,8	15,8
3,4	5,4	43,4	22,1	18,0	13,7	12,1	7,9	7,9

Tabelle J.13 — Detailkategorien für Anschweißungen auf zusammengesetzten Trägern

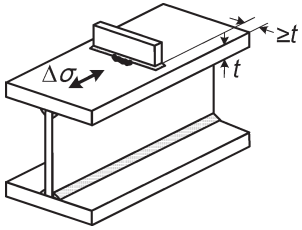
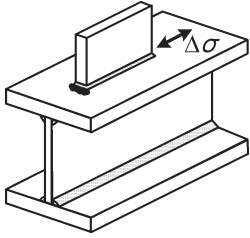
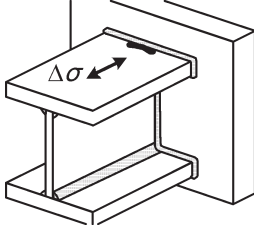
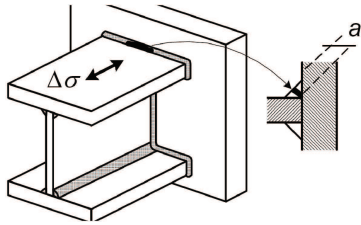
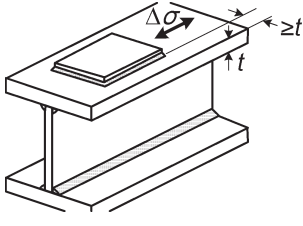
Typ-Nr	Detail-kategorie $\Delta\sigma - m_1^a$	Konstruktionsdetail Rissentstehungsstelle	Nahttyp	Spannungs-analyse		Ausführungs-anforderungen		
				Spannungsparameter	Bereits berücksichtigte Spannungskonzentration	Qualitäts-stufe ^b		Zusätzlich
						Intern	Oberfläche, geometrisch	
13.1	23-3,4		Querans- schweißung, Dicke < 20 mm, ein- oder beidseitig geschweißt	Netto-Querschnitt	Aussteifende Wirkung der Anschweißung / Spannungskonzentration im steifen Verbindungsbereich (vgl. Bild 5.2)	C	C	Für Steg-Flansch-Halskehlnähte siehe Tabelle 6.5, Typ-Nr 5.4 oder 5.5
13.2	18-3,4		Längsans- schweißung, Länge ≥ 100 mm, an allen Seiten geschweißt					
13.3	32-4,3		Kreuz- oder T-Stoß, voll durchge- schweißt					
13.4	25-4,3		Kreuz- oder T-Stoß, voll durchge- schweißte Doppel- Kehlnaht; Wurzelriss bei $a/t \leq 0,6$	Netto-Nahthals - Querschnitt				

Tabelle J.13 (fortgesetzt)

Typ-Nr	Detail-kategorie $\Delta\sigma - m_1^a$	Konstruktionsdetail Rissentstehungsstelle	Nahttyp	Spannungs-analyse		Ausführungs-anforderungen		
				Spannungsparameter	Bereits berücksichtigte Spannungskonzentration	Qualitäts-stufe ^b		Zusätzlich
						Intern	Oberfläche, geometrisch	
13.5	20-4,3	 <p>Nahtübergangsstelle</p>	Verstärkungs-Platte Länge ≥ 100 mm, an allen Seiten geschweißt	Netto-Querschnitt				
<p>^a $m_2 = m_1 + 2$</p> <p>^b Nach EN ISO 10042:2005</p>								

Spannungsschwingbreite [N/mm²]

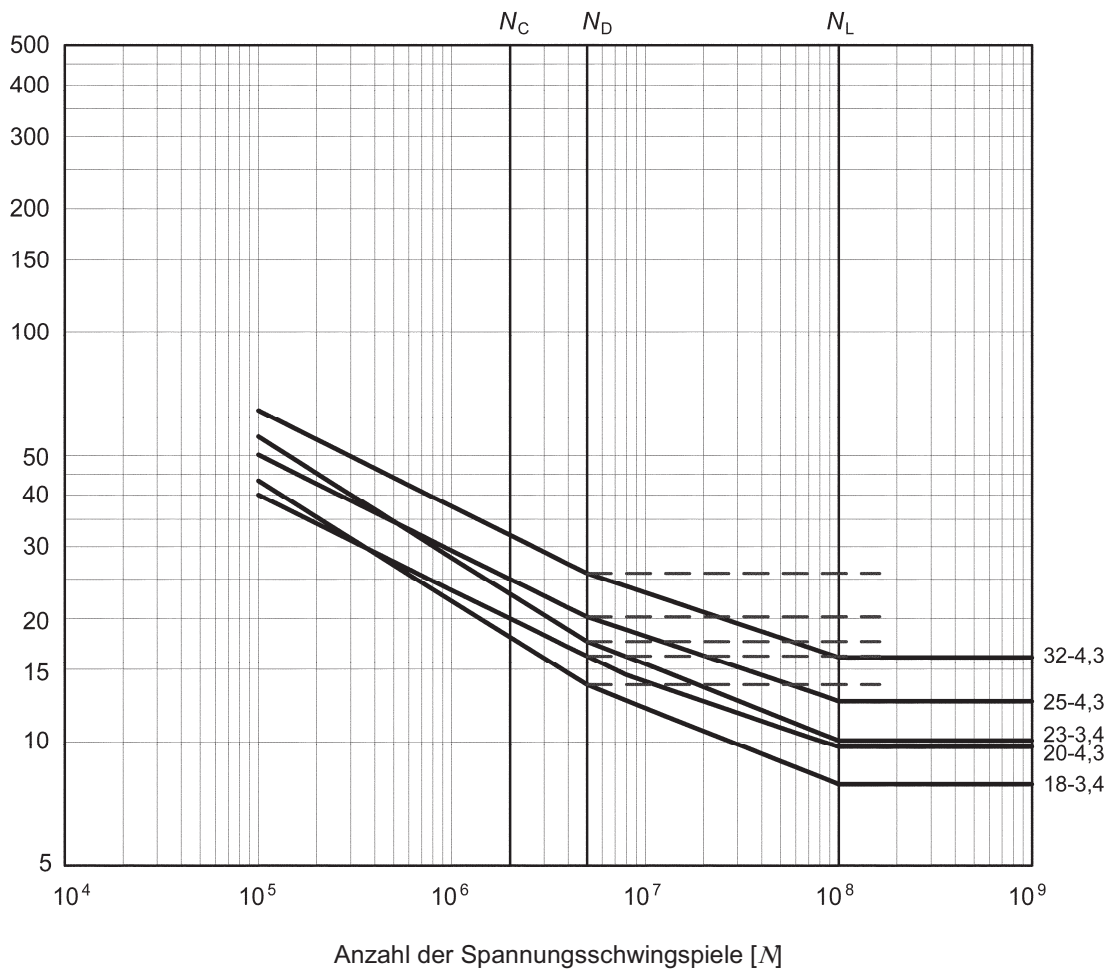
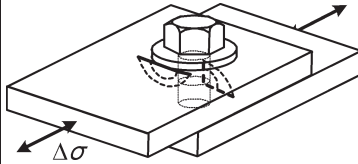
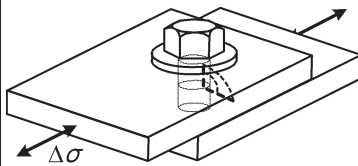


Bild J.7 — Ermüdungsfestigkeitskurven $\Delta\sigma$ - N für Anschweißungen auf zusammengesetzten Trägern — Detailkategorien entsprechend Tabelle J.13

Tabelle J.14 — Numerische Werte von $\Delta\sigma$ - N (N/mm²) für Anschweißungen auf zusammengesetzten Trägern — Detailkategorien entsprechend Tabelle J.13

Neigung		Schwingspiele N						
m_1	m_2	1E+05	1E+06	2E+06	5E+06	1E+07	1E+08	1E+09
4,3	6,3	64,2	37,6	32,0	25,9	23,2	16,1	16,1
4,3	6,3	50,2	29,4	25,0	20,2	18,1	12,6	12,6
3,4	5,4	55,5	28,2	23,0	17,6	15,5	10,1	10,1
4,3	6,3	40,1	23,5	20,0	16,2	14,5	10,0	10,0
3,4	5,4	43,4	22,1	18,0	13,7	12,1	7,9	7,9

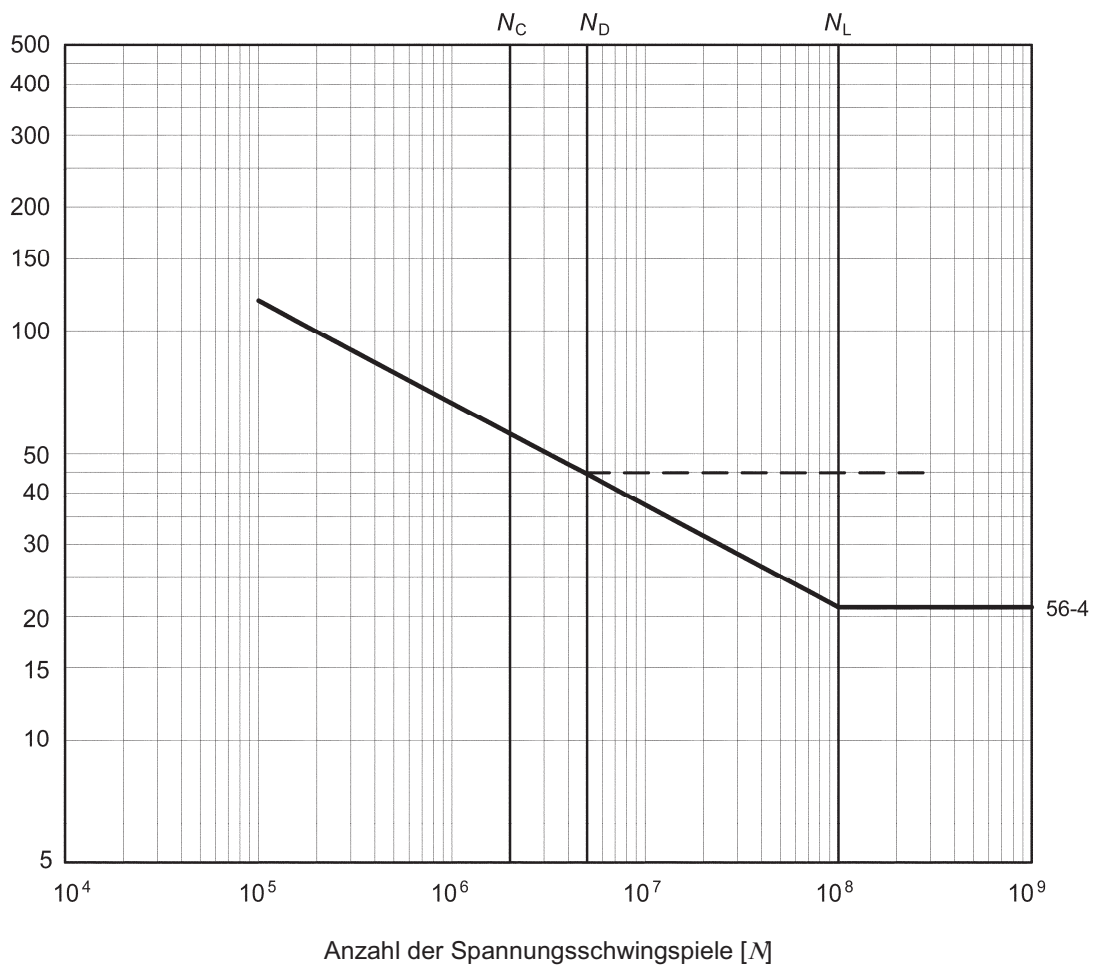
Tabelle J.15 — Detailkategorien für Schraubverbindungen

Typ-Nr	Detail-kategorie $\Delta\sigma - m_1^a$	Konstruktionsdetail Rissentstellungsstelle	Spannungsanalyse		Ausführungs-anforderungen
			Spannungs-parameter	Bereits berücksichtigte Spannungs-konzentration	
15.1	56-4	<p>Vorgespannte (gleitfeste) hochfeste Stahlschraube</p>  <p>Vor dem Loch (manchmal am Lochrand)</p>	Nennspannung auf Brutto-Querschnitt bezogen	<p>Oberflächenbeschaffenheit, Lochgeometrie;</p> <p>Ungleichmäßige Lastverteilung zwischen Schrauben-Reihen;</p> <p>Eine Exzentrizität der Lastführung darf nur bei symmetrischen Doppel-Überlapp-Verbindungen unberücksichtigt bleiben</p>	<p>Überlapp-Verbindung mit ebenen parallelen Oberflächen;</p> <p>Maschinelle Bearbeitung nur mit schnelllaufender Fräse; Löcher gebohrt (Reibahle wahlweise) oder gestanzt (mit obligatorischer Bearbeitung mit Reibahle wenn Dicke > 6 mm);</p> <p>Für vorgespannte Schrauben sollte die Qualität 8.8 ($f_y \geq 640\text{N/mm}^2$) oder höher gewählt werden, s. EN 1999-1-1.</p>
15.2	56-4	<p>Nicht-vorgespannte Stahlschraube (Lochleibung)</p>  <p>Am Lochrand</p>	Nennspannung auf Netto-Querschnitt bezogen		<p>Überlapp-Verbindung mit ebenen parallelen Oberflächen;</p> <p>Maschinelle Bearbeitung nur mit schnelllaufender Fräse; Löcher gebohrt (Reibahle wahlweise) oder gestanzt (mit obligatorischer Bearbeitung mit Reibahle wenn Dicke > 6 mm);</p> <p>Für Schrauben s. EN 1999-1-1.</p>

^a $m_1 = m_2$

^b Nachweis der Stahlschrauben: siehe EN 1999-1-9.

Spannungsschwingbreite [N/mm²]



**Bild J.8 — Ermüdungsfestigkeitskurven $\Delta\sigma$ - N für Schraubverbindungen —
 Detailkategorien entsprechend Tabelle J.15**

**Tabelle J.16 — Numerische Werte von $\Delta\sigma$ - N (N/mm²) für Schraubverbindungen —
 Detailkategorien entsprechend Tabelle J.15**

Neigung		Schwingspiele N						
m_1	m_2	1E+05	1E+06	2E+06	5E+06	1E+07	1E+08	1E+09
4	4	118,4	66,6	56,0	44,5	37,4	21,1	21,1

Anhang K (informativ)

Hot-Spot-Referenz-Detail-Methode

(1) Für die Hot-Spot-Referenz-Detail-Ermüdungsfestigkeit-Methode wie in diesem Anhang beschrieben, sollten entsprechend den Anforderungen dieser Norm ermittelte Daten verwendet werden.

(2) Der Berechnungsablauf ist wie folgt:

- a) Auswahl eines Referenz-Details mit bekanntem Ermüdungswiderstand aus den Detailkategorie-Tabellen, welches bezüglich Schweißqualität sowie geometrischer Parameter und Belastungsparameter soweit wie möglich dem in der Berechnung verwendeten Detail ähnlich ist;
- b) Identifizierung der Spannungsart, mit der der Ermüdungswiderstand ausgedrückt wird. Diese ist üblicherweise die Nennspannung (wie in den Detailkategorie-Tabellen);
- c) Aufstellung eines Finite-Elemente-Modells für das Referenz-Detail und das zu berechnende Detail, mit Vernetzung und Elementen von gleichem Typ, dabei die Empfehlungen unter 5.1 beachtend;
- d) Belastung des Referenz-Details und des zu berechnenden Details mit der unter b) identifizierten Spannung;
- e) Bestimmung der Hot-Spot-Spannungsschwingbreiten $\Delta\sigma_{HS,ref}$ des Referenz-Details und der Hot-Spot-Spannungsschwingbreiten $\Delta\sigma_{HS,assess}$ des zu berechnenden Details;
- f) Berechnung der Ermüdungsfestigkeit für 2 Millionen Schwingspiele des zu berechnenden Details $\Delta\sigma_{C,assess}$ aus der Ermüdungsklasse des Referenz-Details $\Delta\sigma_{C,ref}$:

$$\Delta\sigma_{C,assess} = \frac{\sigma_{HS,ref}}{\sigma_{HS,assess}} \Delta\sigma_{C,ref} \quad (K.1)$$

g) Annahme der gleichen Neigungen m_1, m_2 für das zu berechnende Detail wie für das Referenz-Detail.

(3) Im Falle, dass zum Nachweis berechneter Spannungen Kontrolluntersuchungen durchgeführt werden, sollte eine korrekte Positionierung der Dehnungsmessstreifen außerhalb der Wärmeeinflusszone gewährleistet werden.

ANMERKUNG Zusätzliche Information zu der Referenz Detail Methode: siehe Literaturangabe D.3.



Anhang L (informativ)

Leitfaden für die Anwendung von Bemessungsmethoden, Wahl der Teilsicherheitsbeiwerte, Grenzen für Schadenswerte, Inspektionsintervalle und Kenngrößen für die Ausführung bei Übernahme von Anhang J

L.1 Schwingbruchsichere Bemessung

(1) Diese Ausführungen gelten nur bei Übernahme der in Anhang J für die Bemessung angegebenen Werte für die Ermüdungsfestigkeit.

(2) Es kann eine von zwei Ansätzen zur Bemessung nach dem Konzept der sicheren Lebensdauer angewendet werden. Sie werden als SLD-I und SLD-II bezeichnet.

Für SLD-I ist ein Programm für die regelmäßige Inspektion nicht erforderlich.

ANMERKUNG Der Begriff „regelmäßige Inspektion“ deckt sowohl die allgemeine Inspektion als auch die Inspektion auf Ermüdung ab. Für die Klärung der Begriffe siehe Tabelle L.2.

Für SLD-II ist ein Programm für eine allgemeine Inspektion erforderlich, die nach L.3 erstellt werden sollte.

ANMERKUNG Da bei der Bemessung von einer korrekten Durchführung des Inspektionsprogramms während der vorgesehenen Betriebsdauer ausgegangen wird, bedeutet dies für den Bauherrn, sicherzustellen, dass das Inspektionsprogramm während der Lebensdauer des Tragwerks eingehalten wird.

(3) Die Bemessung nach dem Konzept der sicheren Lebensdauer sollte angewendet werden, wenn für die Inspektion auf Ermüdung eine örtliche Zugänglichkeit nicht gewährleistet ist oder wenn aus anderen Gründen eine Inspektion auf Ermüdung nicht vorausgesetzt werden kann.

ANMERKUNG Die Anwendung der Bemessung nach dem Konzept der sicheren Lebensdauer kann die kostengünstigste Lösung in solchen Fällen sein, bei denen die Instandsetzungskosten als verhältnismäßig hoch eingeschätzt werden.

(4) Für den Fall, dass alle Bemessungs-Spannungsschwingbreiten die Bemessungs-Dauerfestigkeit unterschreiten, sollte die folgende Bedingung erfüllt werden:

$$\frac{\gamma_{Ff} \Delta\sigma}{\Delta\sigma_D / \gamma_{Mf}} \leq 1 \quad (L.1)$$

ANMERKUNG Für γ_{Mf} siehe L.4. Für γ_{Ff} siehe 2.4.

(5) Spannungsschwingbreiten-Kollektive dürfen durch Vernachlässigung von Spannungsspitzen im Lastkollektiv, die einen Beitrag zum Wert des Ermüdungsschadens ($D_{L,d}$) von weniger als 0,01 erbringen, modifiziert werden.

L.2 Schadenstolerante Bemessung

L.2.1 Allgemeines

(1) Diese Ausführungen gelten nur bei Übernahme der in Anhang J für die Bemessung angegebenen Werte für die Ermüdungsfestigkeit.

(2) Es kann eine von zwei Methoden der Bemessung nach dem Konzept der Schadenstoleranz angewendet werden. Die Methoden werden als DTD-I und DTD-II bezeichnet, siehe L.2.2 und L.2.3.

L.2.2 DTD-I

(1) Bei der Methode DTD-I wird davon ausgegangen, dass alle während der Inspektion festgestellten Risse repariert werden bzw. dass Bauteile, die Risse ausweisen, ersetzt werden.

(2) Ein Programm für die regelmäßige Inspektion sollte in Übereinstimmung mit L.3 erstellt werden.

ANMERKUNG Da bei der Bemessung von einer korrekten Durchführung des Inspektionsprogramms während der vorgesehenen Betriebsdauer ausgegangen wird, bedeutet dies für den Bauherrn, sicherzustellen, dass das Inspektionsprogramm während der Lebensdauer des Tragwerks eingehalten wird.

(3) Es kann eine der beiden Optionen für DTD-I angewendet werden. Diese werden als DTD-IA und DTD-IB bezeichnet:

a) Für die Option DTD-IA sollte das Tragwerk eine ausreichende Redundanz aufweisen, also statisch unbestimmt sein, damit die Lastenflüsse so umverteilt werden, dass jedes Wachstum eines entstandenen Risses zum Stillstand kommt und das Tragwerk weiterhin in der Lage ist, die umverteilten Lastenflüsse aufzunehmen;

b) für die Option DTD-IB sollte das Tragwerk ausreichend große Querschnitte aufweisen, um die Belastungen nach Auftreten der ersten mit bloßem Auge sichtbaren Risse aufnehmen zu können. Solche Risse sollten nicht zum Versagen des Tragwerks führen. Die Resttragfähigkeit für die quasi-statischen Bemessungslasten nach der Rissentstehung sollte nachgewiesen werden. Es sollte gefordert werden, dass das Tragwerk nach Feststellung von Rissen instandgesetzt wird oder dass das Risswachstum durch wirkungsvolle Maßnahmen aufgehalten wird.

(4) Um einen ausreichenden Widerstand des Bauteils oder Tragwerks sicherzustellen, darf dem DTD-I-Ansatz eine von zwei Methoden zugrunde gelegt werden. Diese beruhen

a) auf der Berechnung der linearen Schadensakkumulation, siehe (5); oder

b) auf der äquivalenten Spannungsschwingbreite, siehe (6).

(5) Für DTD-I sollte der Ermüdungsschaden-Wert D_L aller Schwingspiele auf Basis linearer Schadensakkumulation, eine der folgenden Bedingungen erfüllen:

$$D_{L,d} \leq 1 \quad (L.1)$$

oder

$$D_L \leq D_{lim} \quad (L.2)$$

Dabei wird

$D_{L,d} = \sum n_i / N_i$ nach der in A.2 angegebenen Methode berechnet;

$D_L = \sum n_i / N_i$ nach der in A.2 angegebenen Methode mit $\gamma_{Mf} = \gamma_{Ff} = 1,0$ berechnet.

ANMERKUNG Werte für D_{lim} dürfen im Nationalen Anhang festgelegt werden. Empfohlene Werte sind in L.4 angegeben.

(6) Beruht die Bemessung auf dem Ansatz mit der äquivalenten Spannungsschwingbreite ($\Delta\sigma_{E,2e}$) sollte die folgende Bedingung erfüllt werden:

$$\frac{\gamma_{Ff} \Delta\sigma_{E,2e}}{\Delta\sigma_C / \gamma_{Mf}} \quad (L.3)$$

L.2.3 DTD-II

(1) PDTD-II erlaubt ermüdungsbedingte Risse im Tragwerk, vorausgesetzt, dass das Risswachstum überwacht wird und durch ein auf der Bruchmechanik basiertes Programm der Inspektion auf Ermüdung unter Kontrolle gehalten wird.

ANMERKUNG In Bezug auf Inspektionsprogramme siehe L.3.

(2) An potentiellen Rissentstehungsstellen sollte die kleinste wahrnehmbare Rissgröße bestimmt werden.

(3) P Das Tragwerk sollte ausreichend große Querschnitte besitzen, um die Bemessungsbelastungen nach Auftreten der ersten mit bloßem Auge sichtbaren Risse aufnehmen zu können.

(4) Es sollten die Spannung-Zeit-Verläufe an den potentiellen Rissentstehungsstellen ermittelt werden, gefolgt durch die Zählung der Spannungsschwingbreiten und die Zusammenstellung von Spannungsintensitäts-Kollektiven.

(5) Auf der Grundlage von (2) und (4) und unter Verwendung der Risswachstumskurven der jeweiligen Legierung sollten die Rissfortschrittsgeschwindigkeiten mittels eines bruchmechanischen Verfahrens berechnet werden. Bei Anwendung dieses Ansatzes sollte die Zeit bis zum Erreichen der bruchkritischen Rissgröße abgeschätzt werden.

Die so geschätzten Zeiten sollten für die Festlegungen des entsprechenden Programms der Inspektion auf Ermüdung berücksichtigt werden.

ANMERKUNG Empfehlungen für Werte von Rissgrößen sind in Anhang B angegeben.

(6) Die Resttragfähigkeit für die quasi-statischen Bemessungslasten für den Fall einer Rissentstehung sollte nachgewiesen werden.

(7) Ein Programm für die regelmäßige Inspektion und Überwachung eines Risswachstums sollte in Übereinstimmung mit (6) erstellt werden. Der Zeitpunkt für den Beginn der Inspektion und die maximalen Inspektionsintervalle sollten festgelegt werden, siehe L.3.

ANMERKUNG Da bei der Bemessung von einer korrekten Durchführung des Inspektionsprogramms während der vorgesehenen Betriebsdauer ausgegangen wird, bedeutet dies für den Bauherrn, sicherzustellen, dass das Inspektionsprogramm während der Lebensdauer des Tragwerks eingehalten wird, siehe L.3.

(8) Für DTD-II sollte D_L die folgende Bedingung erfüllen:

$$D_{L,d} \leq D_{lim} \quad (L.4)$$

Dabei ist

D_{lim} größer als 1,0, sollte jedoch begrenzt werden, siehe L.4.

L.3 Beginn der Inspektion und Inspektionsintervalle

(1) Diese Ausführungen gelten nur bei Übernahme der in Anhang J für die Bemessung angegebenen Werte für die Ermüdungsfestigkeit.

(2) In den Inspektionsprogrammen sollten der Zeitpunkt für die erste Inspektion nach der Inbetriebnahme (Inspektionsbeginn) sowie die Inspektionsintervalle festgelegt werden.

ANMERKUNG Der Inspektionsbeginn und die Inspektionsintervalle dürfen im Nationalen Anhang festgelegt werden. Empfehlungen sind in Tabelle L.1 angegeben.

(3) Für DTD-I sollte der zur Bestimmung von T_F und ΔT_F verwendete Wert von T_S nach A.2.1(5) berechnet werden. Sofern nicht anders angegeben, sollte das Zeitintervall zwischen den Inspektionen $T_S/4$ nicht überschreiten.

(4) Für DTD-II sollte der zur Bestimmung von T_F verwendete Wert von T_S nach A.2.1(5) berechnet werden. ΔT_F sollte unter Anwendung von bruchmechanischen Verfahren bestimmt werden.

Tabelle L.1 — Empfohlener Beginn der Inspektion und maximale Inspektionsintervalle

Bemessungsansatz	Bemessungsverfahren	Art des Bemessungsansatzes	Empfohlener Inspektionsbeginn ^a	Empfohlene maximale Inspektionsintervalle
Schwingbruchsichere Bemessung SLD	Schadensakkumulation	SLD-I	—	—
		SLD-II	$T_G = 0$	$\Delta T_G = 6$ Jahre
	Dauerfestigkeit (d. h. $\max. \Delta\sigma_{E,d} < \Delta\sigma_{D,d}$)	SLD-I	-	-
		SLD-II	$T_G = 0$	$\Delta T_G = 6$ Jahre
Schadenstolerante Bemessung DTD	Schadensakkumulation	DTD-IA	$T_G = 0$ $T_F = 0,5 T_S$	$\Delta T_G = 6$ Jahre $\Delta T_F = 0,25 T_S$
		DTD-IB	$T_G = 0$ $T_F = 0,5 T_S$	$\Delta T_G = 6$ Jahre $\Delta T_F = 0,25 T_S$
	Schadensakkumulation und Bruchmechanik	DTD-II	$T_G = 0$ $T_F = 0,8 T_S$	$\Delta T_G = 6$ Jahre ΔT_F wird durch bruchmechanische Verfahren ermittelt

^a T_G ist der für den Beginn der allgemeinen Inspektion empfohlene Zeitraum nach Fertigstellung. Die allgemeine Inspektion beinhaltet die Prüfung, dass sich das Tragwerk (weiterhin) in dem Zustand nach der Fertigstellung und Abnahme befindet, d.h. dass keine Verschlechterung des Zustands eingetreten ist, wie z. B. Verschlechterungen durch Hinzukommen von schädlichen Löchern und Schweißnähten zur Befestigung von Zusatzelementen, Schäden auf Grund von Vandalismus oder Unfällen, unerwartete Korrosion, usw.

ΔT_G ist das empfohlene maximale Zeitintervall für die allgemeine Inspektion.

T_F ist der Zeitraum nach Fertigstellung, der für den Beginn der Inspektion auf Ermüdung empfohlen wird. Die Inspektion auf Ermüdung beinhaltet die Inspektion von Bereichen mit einer erhöhten Rissentstehungswahrscheinlichkeit.

ΔT_F ist das empfohlene maximale Zeitintervall für die Inspektion auf Ermüdung.

L.4 Teilsicherheitsbeiwerte γ_{Mf} und Werte für D_{lim}

(1) Diese Ausführungen gelten nur bei Übernahme der in Anhang J für die Bemessung angegebenen Werte für die Ermüdungsfestigkeit.

(2) Der Ermüdungsnachweis sollte entweder auf dem Bemessungswert der Ermüdungsfestigkeit beruhen, der durch Anwendung eines Teilsicherheitsbeiwerts γ_{Mf} auf die charakteristische Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_{ff}$ abgeleitet wird, oder auf der Festlegung eines Grenzwerts D_{lim} für den Bemessungswert des Ermüdungsschadens D_L unter Berücksichtigung der Schadensfolgeklasse und der angewendeten Bemessungsmethode.

(3)P Das Sicherheitskonzept sollte auf der Anwendung von γ_{Ff} , γ_{Mf} und D_{lim} sowie der Anforderungen an die in L.3 aufgeführten Inspektionsprogramme basieren.

ANMERKUNG 1 Werte für γ_{Mf} dürfen im Nationalen Anhang festgelegt werden. Empfohlene Werte, die auf $\gamma_{Ff} = 1,0$ basieren, sind in Tabelle L.2 angegeben.

ANMERKUNG 2 Als Kriterium für die Wahl des in Tabelle L.2 angegebenen Wertes für γ_{Mf} darf im Nationalen Anhang die Ausführungsklasse anstelle der Schadensfolgeklasse festgelegt werden.

(4) Die Werte für das Sicherheitselement D_{lim} sollten festgelegt werden.

ANMERKUNG 1 Werte für D_{lim} dürfen im Nationalen Anhang festgelegt werden. Es wird empfohlen, Werte im nachstehenden Bereich festzulegen:

$$\left(\frac{1}{\gamma_{Ff} \cdot \gamma_{Mf}}\right)^{m2} \leq D_{lim} \leq \left(\frac{1}{\gamma_{Ff} \cdot \gamma_{Mf}}\right)^{m1} \quad (L.5)$$

(5) Für DTD-II ist der Wert für D_{lim} größer als 1, sollte jedoch begrenzt werden.

ANMERKUNG Werte für D_{lim} dürfen im Nationalen Anhang festgelegt werden, siehe L.2.3(8). Die empfohlenen Werte sind 2,0 für geschweißte, geschraubte oder genietete Details und 4,0 für nicht geschweißte Bauteile.

Tabelle L.2 — Empfohlene Werte für γ_{Mf} bezogen auf die Schadensfolgeklasse

Bemessungsansatz	Bemessungsverfahren	Schadensfolgeklasse		
		CC1	CC2	CC3
		$\gamma_{Mf}^{a b c d}$	$\gamma_{Mf}^{a b c d}$	$\gamma_{Mf}^{a b c d}$
SLD-I	Schadensakkumulation	1,1	1,2	1,3
	Dauerfestigkeit (d.h. max. $\Delta\sigma_{E,d} < \Delta\sigma_{D,d}$)	1,1	1,2	1,3
SLD-II	Schadensakkumulation	1,0	1,1	1,2
	Dauerfestigkeit (d.h. max. $\Delta\sigma_{E,d} < \Delta\sigma_{D,d}$)	1,0	1,1	1,2
DTD-I	Schadensakkumulation	1,0	1,0	1,1
DTD-II	Schadensakkumulation	1,0	1,0	1,1

^a Die Tabellenwerte dürfen in Übereinstimmung mit den Fußnoten ^a bis ^d verringert werden; dabei darf der sich daraus ergebende Wert für γ_{Mf} den Wert 1,0 nicht unterschreiten.

^b Die oben angegebenen Tabellenwerte für γ_{Mf} dürfen um 0,1 verringert werden, wenn eine der folgenden Bedingungen vorliegt:

- nicht geschweißte Bereiche von geschweißten Bauteilen;
 - Detailkategorien, bei denen $\Delta\sigma_c < 25 \text{ N/mm}^2$;
 - geschweißte Bauteile, bei denen die größte Spannungsschwingbreite für alle Schwingspiele angesetzt wird;
 - der Umfang der zusätzlichen zerstörungsfreien Prüfung liegt bei mindestens 50 %.
- Für Klebeverbindungen, siehe Anhang E (5).

^c Die oben angegebenen Tabellenwerte für γ_{Mf} dürfen um 0,2 verringert werden, wenn eine der folgenden Bedingungen vorliegt:

- nicht geschweißte Bereiche von geschweißten Bauteilen, bei denen die größte Spannungsschwingbreite für alle Schwingspiele angesetzt wird;
- Detailkategorien, bei denen $\Delta\sigma_c < 25 \text{ N/mm}^2$ und die größte Spannungsschwingbreite wird für alle Schwingspiele angesetzt;
- nicht geschweißte Bauteile und Tragwerke;
- der Umfang der zusätzlichen zerstörungsfreien Prüfung liegt bei mindestens 50 % und die größte Spannungsschwingbreite wird für alle Schwingspiele angesetzt;
- der Umfang der zusätzlichen zerstörungsfreien Prüfung liegt bei 100 %.

^d Die oben angegebenen Tabellenwerte für γ_{Mf} dürfen um 0,3 verringert werden, wenn eine der folgenden Bedingungen vorliegt

- nicht geschweißte Bauteile und Tragwerke, bei denen die größte Spannungsschwingbreite für alle Schwingspiele angesetzt wird;
- der Umfang der zusätzlichen zerstörungsfreien Prüfung liegt bei 100 % und die größte Spannungsschwingbreite wird für alle Schwingspiele angesetzt.

L.5 Kenngrößen für die Ausführung

L.5.1 Beanspruchungskategorie

(1) Sofern die in Anhang J angegebenen Daten für den Ermüdungswiderstand angenommen werden, sollte eine der nachstehend aufgeführten Kriterien a), b) oder c) verwendet werden, um Bauteile der Beanspruchungskategorie SC1 zuzuordnen:

a) In Fällen, in denen die größte Schwingbreite der Nennspannung $\Delta\sigma_{E,k}$ die folgende Bedingung erfüllt:

$$\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_{E,k} \leq \frac{13,7}{\gamma_{Mf}} \frac{N}{\text{mm}^2} \quad \text{für den Grundwerkstoff (einschließlich Wärmeeinflusszonen und Stumpfnähten);} \quad (\text{L.6})$$

$$\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_{E,k} \leq \frac{9,2}{\gamma_{Mf}} \frac{N}{\text{mm}^2} \quad \text{für Kehlnähte} \quad (\text{L.7})$$

Dabei werden die Werte für γ_{Mf} in L.4(3)P angegeben. Die für SLD-I angegebenen Werte sollten verwendet werden.

$\Delta\sigma_{E,k}$ ist der charakteristische Wert für die Schnittgröße (Spannungsschwingbreite);

b) im Fall von Ermüdungslastkollektiven ($\Delta\sigma_{E,k,i}$), sofern L.5.2 zur Berechnung des Ermüdungs-Ausnutzungsgrades U angewendet wird und U den Wert 1,0 nicht übersteigt, wobei für den Ermüdungswiderstand folgende Detailkategorien angesetzt werden:

- für den Grundwerkstoff (einschließlich Wärmeeinflusszonen und Stumpfnähten): Detailkategorie 18-3,4;
- für Kehlnähte: Detailkategorie 12-3,4.

Werte für γ_{Mf} zur Berechnung von U sind in L.4(3)P angegeben. Die für SLD-I angegebenen Werte sollten angewendet werden. In Fällen, in denen die größte Spannungs-Amplitude für alle Schwingspiele angesetzt wird, dürfen die Werte um 0,1 verringert werden.

c) in Fällen, in denen die Grenzwerte nach den unter a) oder b) aufgeführten Kriterien überschritten werden, und sofern der Ermüdungs-Ausnutzungsgrad U nach L.5.2 den Wert 0,5 nicht übersteigt und sofern der Ermüdungswiderstand auf den niedrigsten Werten für die folgenden Fälle beruht, d. h.:

- für den Grundwerkstoff (vom Schweißen nicht beeinflusst): Detailkategorie 71-7;
- für durchlaufende Längsschweißnähte (Spannungsrichtung parallel zur Achse der Schweißnaht): Detailkategorie 40-4,3;
- für Stumpfnähte: Detailkategorie 36-3,4.

Werte für γ_{Mf} zur Berechnung von U sind in L.4(3)P angegeben. Die für SLD-I angegebenen Werte sollten angewendet werden. In Fällen, in denen die größte Spannungs-Amplitude für alle Schwingspiele angesetzt wird, dürfen die Werte um 0,1 verringert werden. In diesem Fall darf der sich daraus ergebende Wert für γ_{Mf} den Wert 1,0 nicht unterschreiten.

ANMERKUNG Andere oder zusätzliche Kriterien zur Festlegung der Beanspruchungskategorie dürfen im Nationalen Anhang festgelegt werden.

L.5.2 Berechnung des Ausnutzungsgrads

(1) Dieser Unterabschnitt enthält Festlegungen zur Berechnung des Ausnutzungsgrads U für ermüdungsbeanspruchte Bauteile, sofern die Ermüdungsfestigkeitsdaten nach Anhang J für die Bemessung verwendet werden und die Anhänge L und M aus EN 1090-3:2008 in Bezug auf Qualität und Inspektionsanforderungen festgelegt wurden. Die berechneten Werte werden verwendet, um zwischen den Beanspruchungskategorien SC1 und SC2 unterscheiden zu können.

ANMERKUNG 1 Die Definitionen der Beanspruchungskategorien werden in EN 1999-1-1 definiert.

ANMERKUNG 2 EN 1090-3 definiert Kriterien für die Festlegung des Umfangs der Kontrollen und die Anforderungen hinsichtlich der schweißtechnischen Bewertungsgruppen der beiden Beanspruchungskategorien sowie quantitative Kriterien für die Inspektion von Schweißnähten in Abhängigkeit von Ausführungsklasse und Ausnutzungsgrad.

(2) Der Ermüdungs-Ausnutzungsgrad für eine konstante Spannungsschwingbreite für eine begrenzte Anzahl von Schwingspielen n wird wie folgt definiert:

$$U = \frac{\Delta\sigma_{E,k} \cdot \gamma_{Ff}}{\frac{\Delta\sigma_{R,k}}{\gamma_M}} \quad (\text{L.8})$$

Dabei ist

$\Delta\sigma_{E,k}$ die charakteristische Spannungsschwingbreite (für kombinierte Spannungen: die Hauptspannung) im betrachteten Querschnitt für eine angegebene Anzahl von Schwingspielen n ;

$\Delta\sigma_{R,k}$ der entsprechende Wert des Festigkeitsbereiches der maßgeblichen Ermüdungsfestigkeitskurve $\Delta\sigma-N$ für die angegebene Anzahl von Schwingspielen n .

(3) Im Falle von Ermüdung, bei der alle Spannungsschwingbreiten kleiner sind als $\Delta\sigma_D$, und bei einer unbegrenzten Anzahl von Schwingspielen wird der Ausnutzungsgrad wie folgt definiert:

$$U = \frac{\Delta\sigma_{E,k} \cdot \gamma_{Ff}}{\frac{\Delta\sigma_D}{\gamma_M}} \quad (\text{L.9})$$

Dabei ist

$\Delta\sigma_{E,k}$ die größte Spannungsschwingbreite;

$\Delta\sigma_D$ die Dauerfestigkeit.

(4) Beruht die Berechnung auf der äquivalenten Spannungsschwingbreite konstanter Amplitude $\Delta\sigma_{E,2e}$ wird der Ausnutzungsgrad wie folgt definiert:

$$U = \frac{\gamma_{Ff} \Delta\sigma_{E,2e}}{\frac{\Delta\sigma_C}{\gamma_M}} \quad (\text{L.10})$$


Dabei ist

$\Delta\sigma_C$ die Ermüdungsfestigkeit für 2×10^6 Schwingspiele.

(5) Beruht der Ausnutzungsgrad U auf der Berechnung der Ermüdungsschadenswerte nach der linearen Schadensakkumulation, darf er für die Anwendungszwecke dieses Anhangs wie folgt berechnet werden:

$$U = \sqrt[m_1]{D_{L,d}} \quad (\text{L.11})$$

Dabei wird

$D_{L,d}$ nach 2.2.1 und 6.2.1 berechnet. 

Literaturhinweise

Literaturangaben zum Anhang B: Bruchmechanik

- B.1** Standard test method for measurement of fatigue crack growth rates, ASTM E647-93.
- B.2** Simulations of short crack and other low closure action conditions utilising constant $K_{max} / \Delta K$ -decreasing fatigue crack growth procedures. ASTM STP 1149-1992, S.197-220.
- B.3** Graf, U.: Fracture mechanics parameters and procedures for the fatigue behaviour estimation of welded aluminium components. Reports from Structural Engineering, Technische Universität München, Bericht Nr. 3/92 (TUM-LME Forschungsber. D. Kosteas), München, 1992.
- B.4** Ondra, R.: Statistical Evaluation of Fracture Mechanic Data and Formulation of Design Lines for welded Components in Aluminium Alloys. Reports from Structural Engineering, Technische Universität München, Bericht Nr. 4/98 (TUM-LME Forschungsber. D. Kosteas), München, 1998.
- B.5** Stress intensity factor equations for cracks in three-dimensional finite bodies. ASTM STP 791, 1983, S. I-238 bis I-265.

Literaturangaben zum Anhang C: Versuche für die Ermüdungsbemessung

- C.1** Kosteas, D.: On the Fatigue Behaviour of Aluminium. In: Kosteas, D.(Ed.), Aluminium in Practice, Stahlbau Spezial, Ausgabe Nr. 67(1998) Ernst & Sohn, Berlin.
- C.2** Jaccard, R., D. Kosteas, R. Ondra: Background Document to Fatigue Design Curves for welded Aluminium Components. IIW Dok. Nr. XIII-1588-95.

Literaturangaben zum Anhang D: Spannungsanalyse

- D.1** Pilkey, W. D.: Peterson`s stress concentration factors, John Wiley and Sons Inc., 1997.
- D.2** Young, W. C., Budynas R. G.: Roark`s formulas for stress and strain, McGraw Hill, 2001.
- D.3** Hobbacher, A: Recommendations on fatigue of welded components, IIW Dok. XIII-1965-03/XV-1127-03; Juli 2004.