

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   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

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 R -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 A und m	51
B.4 Geometriefunktion y	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:

- | | | |
|-----------------------|---|-----------------------|
| — A1 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) A1 | — 6.2.1 (11) | — L.4 (4) |
| — 2.3.2 (6) | — A1 gestrichener Text A1 | — L.4 (5) |
| — 2.4 (1) | — E (5) | — L.5.1 (1) A1 |
| — 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) | — A1 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;
- schadentolerante 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

Detaillkategorie

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 Detaillkategorie 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 Spannungsschwingspiele eines Konstruktionsdetails bei einer gegebenen Spannungsschwingbreite zur Lebensdauer unter der gleichen Beanspruchungsschwingbreite

1.5.2.37

Miner-Regel

Schadensakkumulation infolge aller Spannungsschwingspiele 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 Rissentstellungsstellen, 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:

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

Dabei ist

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

oder

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

Dabei ist

$D_L = \sum n_i / N_{fi}$, 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.

$$F_{Ed} = \gamma_{Ff} F_{Ek} \quad (2.2)$$

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 Schwingspiele 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. 

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.

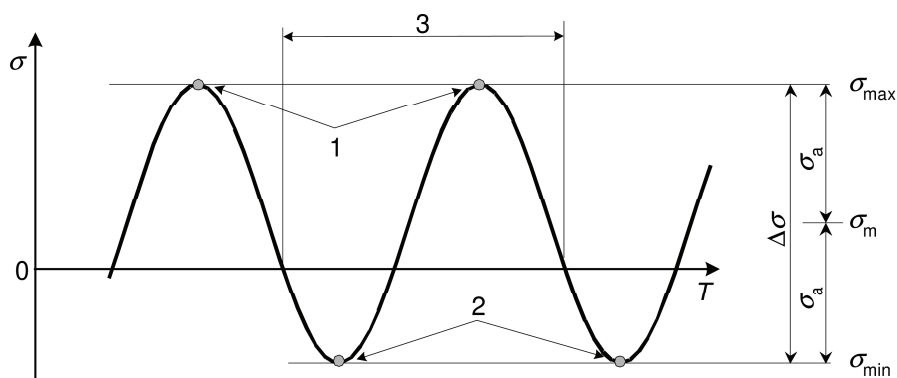
ANMERKUNG Siehe Anhang C.

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

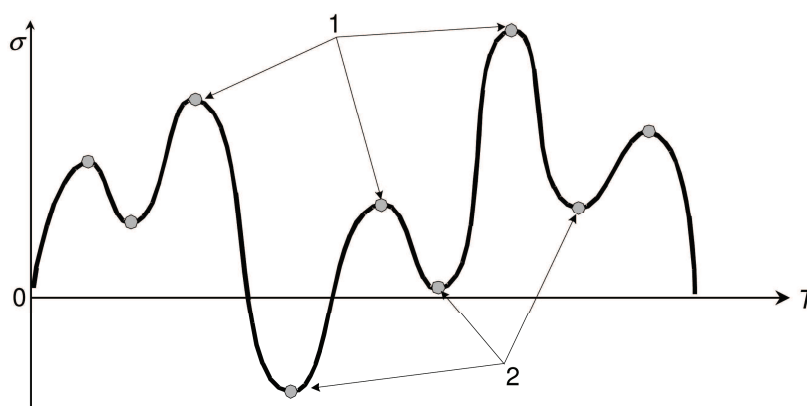
(5) Der Aussteifungseffekt anderer Werkstoffe, die dauerhaft an der Aluminiumkonstruktion angebracht werden, sollte in der elastischen Analyse berücksichtigt werden.

(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

- $\sigma_{\max}$ Maximalspannung
- $\sigma_{\min}$ 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:

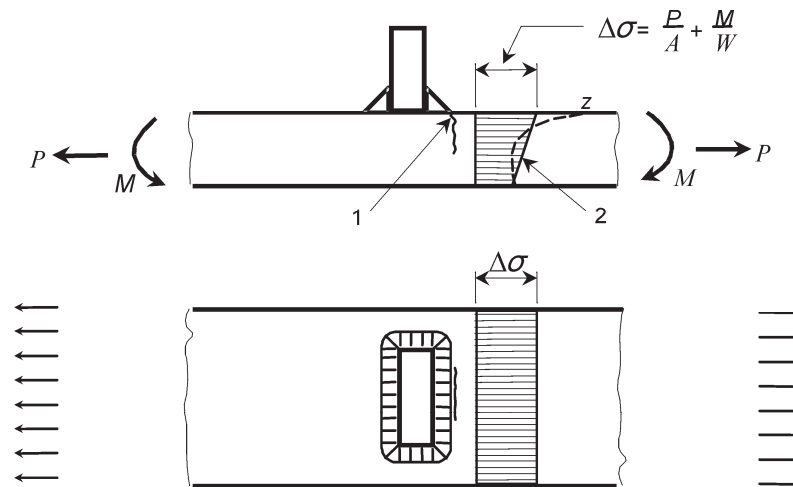
- a) Die Rissentstehungsstelle ist ein Schweißnahtübergang in einer Verbindung mit einer komplizierten Geometrie, wo die Nennspannungen nicht klar definiert sind;

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.

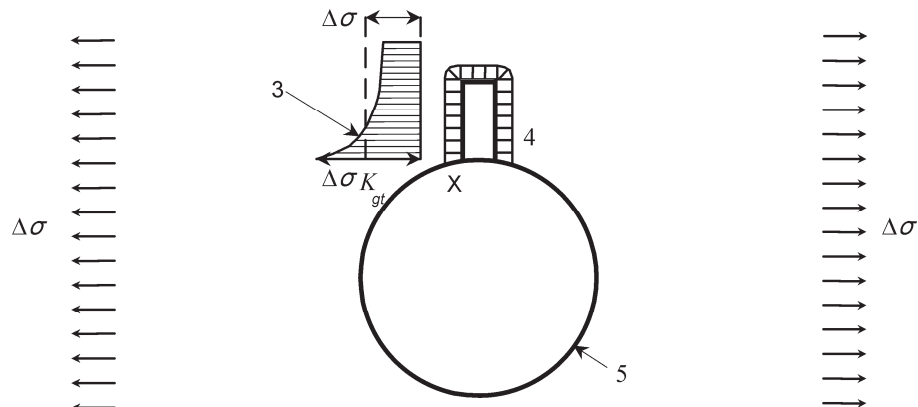
- d) für die Herleitung von Hot-Spot-Spannungen siehe 5.3.3 und 6.2.4.



Legende

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

a) Lokale Spannungskonzentration beim Schweißnahtübergang

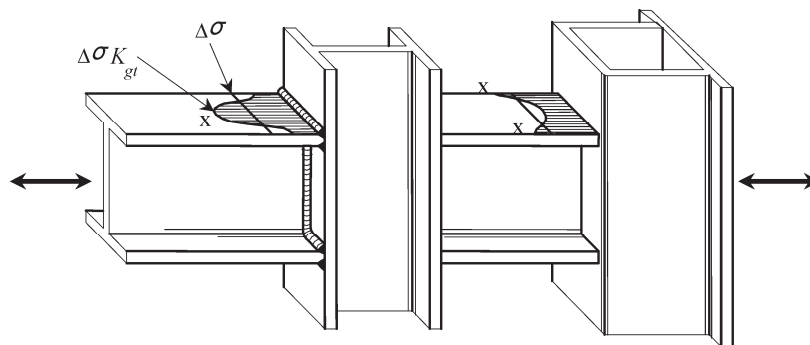


Legende

- 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

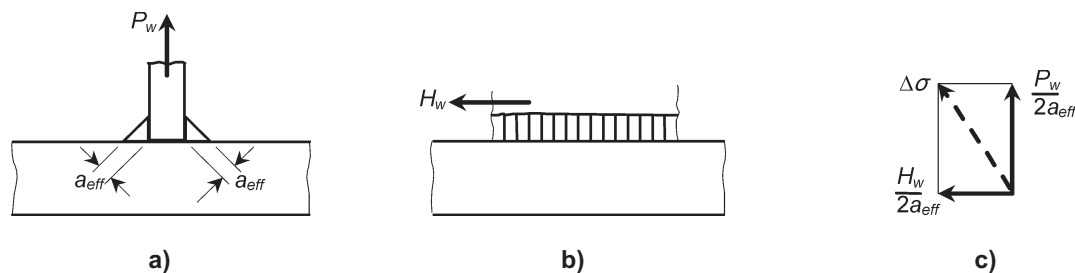
(1) Risse die an Nahtübergangsstellen, Nahtüberhöhungen, Löchern von Verbindungsmitteln, Reibkontaktflächen, usw. entstehen und durch den Grundwerkstoff oder voll durchgeschweißten Nahtwerkstoff fortschreiten, sollten auf der Grundlage der Nenn-Hauptspannungsschwingbreite im Bauteil an dieser Stelle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

(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.

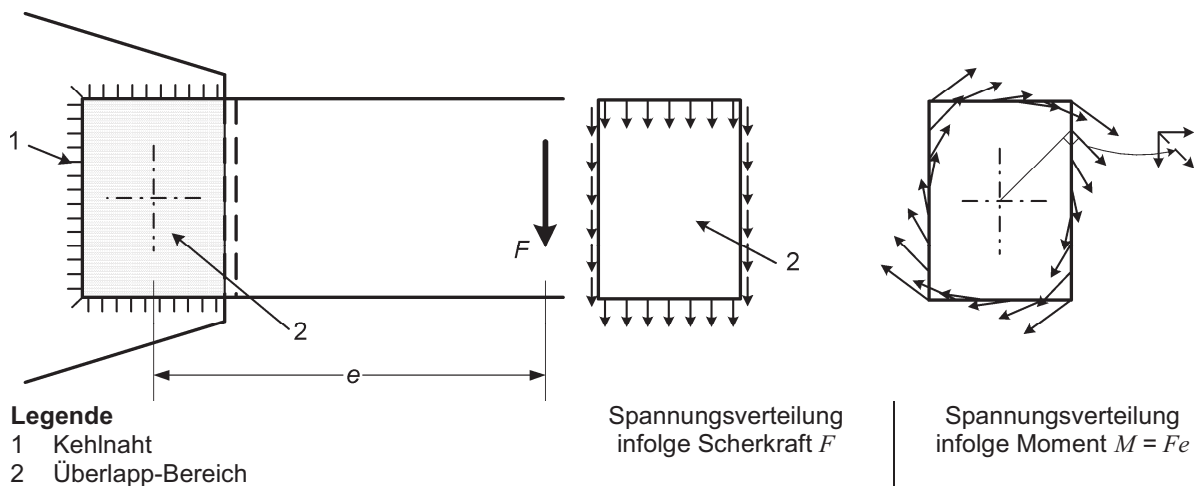


Bild 5.4 — Spannungen in Überlappverbindungen

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:

- a) Nenn-Spannungsschwingbreiten für Konstruktionsdetails aus der Beschreibung in den Detailkategorien;
- b) modifizierte Nenn-Spannungsschwingbreiten bei plötzlichen Querschnitts-Änderungen in der Nähe der Rissentstehungsstelle, die nicht in den Angaben der Konstruktionsdetails beschrieben sind;
- c) 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- $\Delta \sigma$ - 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:
 - a) die Richtung der veränderlichen Spannung relativ zum Konstruktionsdetail;
 - b) die Position des entstehenden Risses im Konstruktionsdetail;
 - c) die geometrische Anordnung und relative Proportionen des Konstruktionsdetails.
- (2) Die Ermüdungsfestigkeit hängt von den folgenden Punkten ab:
 - a) der Produktform;
 - b) dem Werkstoff (außer im geschweißten Zustand);
 - c) der Methode der Ausführung;
 - d) der Qualitätsstufe (bei Schweißungen und Gussstücken);
 - e) 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; $\Delta\sigma_i$
- m_1 die Neigung der $\log\Delta\sigma$ - $\log N$ -Ermüdungsfestigkeitskurve, abhängig von der Detailkategorie, m_1
- 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.

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. γ_{Mf}

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