

DIN EN 1999-1-3



ICS 91.010.30; 91.080.17

EntwurfEinsprüche bis 2021-04-26
Vorgesehen als Ersatz für
DIN EN 1999-1-3:2011-11**Eurocode 9: Bemessung und Konstruktion von Aluminiumtragwerken –
Teil 1-3: Ermüdungsbeanspruchte Tragwerke;
Deutsche und Englische Fassung prEN 1999-1-3:2021**Eurocode 9: Design of aluminium structures –
Part 1-3: Structures susceptible to fatigue;
German and English version prEN 1999-1-3:2021Eurocode 9: Calcul des structures en aluminium –
Partie 1-3: Structures sensibles à la fatigue;
Version allemande et anglaise prEN 1999-1-3:2021**Anwendungswarnvermerk**

Dieser Norm-Entwurf mit Erscheinungsdatum 2021-02-26 wird der Öffentlichkeit zur Prüfung und
Stellungnahme vorgelegt.

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

Stellungnahmen werden erbeten

- vorzugsweise online im Norm-Entwurfs-Portal von DIN unter www.din.de/go/entwuerfe bzw. für Norm-Entwürfe der DKE auch im Norm-Entwurfs-Portal der DKE unter www.entwuerfe.normenbibliothek.de, sofern dort wiedergegeben;
- oder als Datei per E-Mail an nabau@din.de möglichst in Form einer Tabelle. Die Vorlage dieser Tabelle kann im Internet unter www.din.de/go/stellungnahmen-norm-entwuerfe oder für Stellungnahmen zu Norm-Entwürfen der DKE unter www.dke.de/stellungnahme abgerufen werden;
- oder in Papierform an den DIN-Normenausschuss Bauwesen (NABau), 10772 Berlin oder Saatwinkler Damm 42/43, 13627 Berlin.

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

Gesamtumfang 255 Seiten

DIN-Normenausschuss Bauwesen (NABau)

Nationales Vorwort

Dieses Dokument (prEN 1999-1-3:2021) wurde vom Technischen Komitee CEN/TC 250 „Eurocodes für den konstruktiven Ingenieurbau“ erarbeitet, dessen Sekretariat von BSI (Vereinigtes Königreich) gehalten wird.

CEN/TC 250 ist für alle Eurocodes des konstruktiven Ingenieurbaus zuständig. Die Verantwortung für alle Angelegenheiten der Tragwerks- und geotechnischen Planung wurde dem CEN/TC 250 von CEN übertragen.

Das zuständige nationale Normungsgremium ist der Unterausschuss NA 005-08-07 AA „Aluminiumkonstruktionen (SpA zu CEN/TC 250/SC 9 und CEN/TC 135)“ im DIN-Normenausschuss Bauwesen (NABau).

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

Aktuelle Informationen zu diesem Dokument können über die Internetseiten von DIN (www.din.de) durch eine Suche nach der Dokumentennummer aufgerufen werden.

Änderungen

Gegenüber DIN EN 1999-1-3:2011-11 wurden folgende Änderungen vorgenommen:

- a) das Dokument wurde vollständig überarbeitet.

<i>Titel de:</i>	Eurocode 9: Bemessung und Konstruktion von Aluminiumtragwerken — Teil 1-3: Ermüdungsbeanspruchte Tragwerke
<i>Titel en:</i>	Eurocode 9: Design of aluminium structures — Part 1-3: Structures susceptible to fatigue
<i>Titel fr:</i>	Eurocode 9: Calcul des structures en aluminium — Partie 1-3: Structures sensibles à la fatigue

Inhalt

	Seite
Europäisches Vorwort	6
Einleitung	7
1 Anwendungsbereich	11
1.1 Anwendungsbereich von EN 1999-1-3	11
1.2 Annahmen	11
2 Normative Verweisungen	11
3 Begriffe und Symbole	11
3.1 Begriffe	11
3.2 Symbole	15
4 Grundlagen der Bemessung	18
4.1 Grundregeln	18
4.2 Methoden der Ermüdungsbemessung	19
4.2.1 Schwingbruchsichere Bemessung (SLD)	19
4.2.2 Schadenstolerante Bemessung (DTD)	19
4.2.3 Versuchsunterstützte Bemessung	19
4.3 Ermüdungsbelastung	19
4.3.1 Herkunft der Ermüdungsbelastung	19
4.3.2 Herleitung der Ermüdungsbelastung	20
4.3.3 Äquivalente Ermüdungsbelastung	20
4.4 Teilsicherheitsbeiwerte für Ermüdungslasten	21
4.5 Anforderungen an die Ausführung	21
4.5.1 Allgemeines	21
4.5.2 Ausführungsklassen	21
4.5.3 Ausführungsspezifikation	22
4.5.4 Betriebsbuch	22
4.5.5 Prüf- und Wartungsbuch	22
5 Werkstoffe, Produktbestandteile und Verbindungsmittel	22
6 Dauerhaftigkeit	23
7 Strukturanalyse	23
7.1 Globale Analyse	23
7.1.1 Allgemeines	23
7.1.2 Anwendung von Balkenelementen	25
7.1.3 Anwendung von Membran-, Schalen- und Kontinuumselementen	25
7.2 Spannungsarten	26
7.2.1 Allgemeines	26
7.2.2 Nennspannungen	26
7.2.3 Modifizierte Nennspannungen	26
7.2.4 Hot-Spot-Spannungen	27
7.3 Herleitung von Spannungen	28
7.3.1 Herleitung von Nennspannungen	28
7.3.2 Herleitung von modifizierten Nennspannungen	29
7.3.3 Herleitung von Hot-Spot-Spannungen	29
7.3.4 Spannungsrichtung	30
7.4 Spannungsschwingbreiten für bestimmte Rissentstellungsstellen	30

7.4.1	Grundmaterial, Schweißnähte und Verbindungen mit mechanischen Befestigungselementen	30
7.4.2	Kehlnähte und partiell durchgeschweißte Stumpfnähte	30
7.5	Klebeverbindungen	31
7.6	Gussstücke	31
7.7	Spannungskollektive	31
7.8	Berechnung von äquivalenten Spannungsschwingbreiten für standardisierte Ermüdungsbelastungs-Modelle	31
7.8.1	Allgemeines	31
7.8.2	Bemessungswert der Spannungsschwingbreite	32
8	Ermüdungswiderstand und Detailkategorien	32
8.1	Detailkategorien	32
8.1.1	Allgemeines	32
8.1.2	Einflussfaktoren für die Detailkategorien	32
8.1.3	Konstruktionsdetails	33
8.2	Ermüdungsfestigkeitsdaten	33
8.2.1	Klassifizierte Konstruktionsdetails	33
8.2.2	Nicht klassifizierte Details	36
8.2.3	Klebeverbindungen	36
8.2.4	Bestimmung der Referenzwerte für die Hot-Spot-Ermüdungsfestigkeit	36
8.3	Einfluss der Mittelspannung	36
8.3.1	Allgemeines	36
8.3.2	Grundwerkstoff und Verbindungen mit mechanischen Verbindungsmitteln	36
8.3.3	Schweißverbindungen	37
8.3.4	Klebeverbindungen	37
8.3.5	Bereich der Kurzzeitfestigkeit	37
8.3.6	Schwingspielzählung für die Berechnung des R -Verhältnisses	37
8.4	Einfluss der Umgebung	37
8.5	Techniken für die Erhöhung der Ermüdungsfestigkeit	38
Anhang A (normativ)	Grundlagen der Berechnung der Ermüdungsfestigkeit	39
A.1	Anwendung dieses Anhangs	39
A.2	Anwendungsbereich und Anwendungsfeld	39
A.3	Allgemeines	39
A.3.1	Einfluss der Ermüdung auf die Bemessung	39
A.3.2	Versagensmechanismus	39
A.3.3	Mögliche Stellen für Ermüdungsrisse	40
A.3.4	Bedingungen für die Ermüdungsanfälligkeit	40
A.4	Schwingbruchsichere Bemessung	41
A.4.1	Allgemeines	41
A.4.2	Voraussetzungen für die schwingbruchsichere Bemessung	42
A.4.3	Bemessungsansatz	42
A.4.4	Schwingspielzählung	44
A.4.5	Herleitung des Spannungs-Kollektivs	46
A.5	Schadenstolerante Bemessung	46
A.5.1	Voraussetzungen für schadenstolerante Bemessung	46
A.5.2	Wahl der Tragwerksart und deren bauliche Durchbildung	47
A.5.3	Festlegung der Inspektionsstrategie bei schadenstoleranter Bemessung	47
Anhang B (informativ)	Hinweise für die Bewertung des Rissfortschritts durch Bruchmechanik	50
B.1	Anwendung dieses informativen Anhangs	50
B.2	Anwendungsbereich und Anwendungsfeld	50
B.3	Grundlagen	50
B.3.1	Fehlerabmessungen	50
B.3.2	Rissfortschrittsabhängigkeit	51
B.4	Rissfortschrittsdaten A und m	52

B.5	Geometriefunktion y	53
B.6	Integration des Rissfortschritts	53
B.7	Ermittlung der maximalen Risslänge a_2	54
Anhang C (informativ) Versuche für die Ermüdungsbemessung.....		62
C.1	Anwendung dieses informativen Anhangs.....	62
C.2	Anwendungsbereich und Anwendungsfeld	62
C.3	Ermittlung von Belastungsdaten	62
C.3.1	Feste Tragwerke unter mechanischen Belastungen	62
C.3.2	Feste Tragwerke unter Umweltbelastungen	63
C.3.3	Bewegliche Konstruktionen	63
C.4	Ermittlung der Spannungsdaten.....	64
C.4.1	Versuchsergebnisse aus Bauteilen.....	64
C.4.2	Versuchsergebnisse aus Tragwerken	64
C.4.3	Bestätigung des Spannungs-Zeit-Verlaufs.....	64
C.5	Ermittlung von Lebensdauerdaten	65
C.5.1	Bauteilprüfung.....	65
C.5.2	Großbauteilprüfung	65
C.5.3	Akzeptanzkriterien.....	66
C.6	Rissfortschrittsdaten.....	69
C.7	Berichterstellung.....	69
Anhang D (informativ) Spannungsanalyse		71
D.1	Anwendung dieses informativen Anhangs.....	71
D.2	Anwendungsbereich und Anwendungsfeld	71
D.3	Anwendung von Finiten-Elementen für die Ermüdungsanalyse	71
D.3.1	Elementtypen.....	71
D.3.2	Weitere Hinweise für die Anwendung finiter Elemente	72
D.4	Spannungskonzentrationsbeiwerte	72
D.5	Ermüdungsbegrenzung bei wiederholtem lokalem Beulen	74
Anhang E (informativ) Klebeverbindungen		75
E.1	Anwendung dieses informativen Anhangs.....	75
E.2	Anwendungsbereich und Anwendungsfeld	75
Anhang F (informativ) Bereich der Kurzzeitfestigkeit.....		78
F.1	Anwendung dieses informativen Anhangs.....	78
F.2	Anwendungsbereich und Anwendungsfeld	78
F.3	Änderung an Ermüdungsfestigkeitskurven.....	78
F.4	Versuchsergebnisse.....	79
Anhang G (informativ) Einfluss des herrschenden Spannungsverhältnisses R		80
G.1	Anwendung dieses informativen Anhangs.....	80
G.2	Anwendungsbereich und Anwendungsfeld	80
G.3	Erhöhung der Ermüdungsfestigkeit	80
G.4	Fälle für erhöhte Werte	80
G.4.1	Fall 1	80
G.4.2	Fall 2	81
G.4.3	Fall 3	82
Anhang H (informativ) Verbesserung der Ermüdungsfestigkeit von Schweißnähten		83
H.1	Anwendung dieses informativen Anhangs.....	83
H.2	Anwendungsbereich und Anwendungsfeld	83
H.3	Maschinelle Bearbeitung oder Schleifen	84
H.4	Nachbearbeitung durch WIG oder Plasma	85
H.5	Strahlen	85
Anhang I (informativ) Gussstücke.....		86
I.1	Anwendung dieses informativen Anhangs.....	86

I.2	Anwendungsbereich und Anwendungsfeld	86
I.3	Ermüdungsfestigkeitsdaten	86
I.3.1	Einfach geformte Gussstücke	86
I.3.2	Geschweißter Werkstoff	86
I.3.3	Mechanisch verbundene Gussstücke	87
I.3.4	Geklebte Gussstücke	87
I.4	Qualitätsanforderungen	87
Anhang J (informativ) Tabellen der Detailkategorien.....		89
J.1	Anwendung dieses informativen Anhangs.....	89
J.2	Anwendungsbereich und Anwendungsfeld	89
Anhang K (informativ) Hot-Spot-Referenz-Detail-Methode.....		119
K.1	Anwendung dieses informativen Anhangs.....	119
K.2	Anwendungsbereich und Anwendungsfeld	119
K.3	Hot-Spot-Referenz-Detail-Methode	119
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.....		120
L.1	Anwendung dieses informativen Anhangs.....	120
L.2	Anwendungsbereich und Anwendungsfeld	120
L.3	Konzept der schwingbruchsicheren Bemessung.....	120
L.3.1	Allgemeines	120
L.3.2	SLD-I	121
L.3.3	SLD-II.....	121
L.4	Konzept der schadenstoleranten Bemessung.....	121
L.4.1	Allgemeines	121
L.4.2	DTD-I	121
L.4.3	DTD-II	122
L.5	Beginn der Inspektion und Inspektionsintervalle.....	123
L.6	Teilsicherheitsbeiwerte γ_{Mf} und Werte für D_{Lim}	124
L.7	Kenngrößen für die Ausführung.....	125
L.7.1	Beanspruchungskategorie	125
L.7.2	Berechnung des Ausnutzungsgrads.....	126
Literaturhinweise.....		128

Europäisches Vorwort

Dieses Dokument (prEN 1999-1-3:2021) wurde vom Technischen Komitee CEN/TC 250 „Eurocodes für den konstruktiven Ingenieurbau“ erarbeitet, dessen Sekretariat von BSI gehalten wird. CEN/TC 250 ist für alle Eurocodes des konstruktiven Ingenieurbaus zuständig. Die Verantwortung für alle Angelegenheiten der Tragwerks- und geotechnischen Planung wurde dem CEN/TC 250 von CEN übertragen.

Dieses Dokument ist derzeit zur CEN-Umfrage vorgelegt.

Dieses Dokument wird EN 1999-1-3:2007 ersetzen.

Die erste Generation der EN-Eurocodes wurde zwischen den Jahren 2002 und 2007 veröffentlicht. Dieses Dokument wurde als Teil der zweiten Generation der Eurocodes im Rahmen des Mandats M/515 erarbeitet, das die Europäische Kommission und die Europäische Freihandelsassoziation CEN erteilt haben.

Die Eurocodes wurden erarbeitet, um in Verbindung mit einschlägigen Ausführungs-, Werkstoff-, Produkt- und Prüfnormen angewendet zu werden und um Anforderungen an Ausführung, Werkstoffe, Produkte und Prüfung zu identifizieren, auf denen die Eurocodes beruhen.

Die Eurocodes erkennen die Verantwortlichkeit aller Mitgliedstaaten an und wahren deren Recht, sicherheitsbezogene Werte auf nationaler Ebene in Nationalen Anhängen festzulegen.

Einleitung

0.1 Einleitung zu den Eurocodes

Die Eurocodes des konstruktiven Ingenieurbaus umfassen die folgenden Normen, die in der Regel aus mehreren Teilen bestehen:

- EN 1990, *Eurocode: 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 Holzbauten*
- 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*
- <Neue Teile>

Die Eurocodes sind für die Anwendung durch Tragwerksplaner, Bauherren, Hersteller, Ausführende, zuständige Behörden (bei der Wahrnehmung ihrer Aufgaben in Übereinstimmung mit nationalen oder internationalen Vorschriften), Lehrkräfte, Softwareentwickler und Normenausschüsse, in denen verwandte Produktnormen, Prüfnormen und Ausführungsnormen erarbeitet werden, gedacht.

ANMERKUNG Einige Entwurfs- und Bemessungsaspekte werden am zutreffendsten von den zuständigen Behörden festgelegt oder können, sofern keine Festlegungen getroffen wurden, für ein bestimmtes Bauvorhaben zwischen den beteiligten Parteien wie Tragwerksplanern und Bauherren vereinbart werden. In den Eurocodes werden solche Aspekte durch ausdrückliche Bezugnahme auf die zuständigen Behörden und die beteiligten Parteien gekennzeichnet.

0.2 Einleitung zu EN 1999 Eurocode 9

EN 1999 (alle Teile) 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.

EN 1999 (alle Teile) 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.

EN 1999 (alle Teile) behandelt nicht die besonderen Anforderungen an die Erdbebenauslegung. Festlegungen bezüglich dieser Anforderungen sind in EN 1998 enthalten, in Ergänzung zu und im Einklang mit EN 1999.

EN 1999 ist in fünf Teile gegliedert:

- EN 1999-1-1, *Eurocode 9: Bemessung und Konstruktion von Aluminiumtragwerken — Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln.*
- EN 1999-1-2, *Eurocode 9: Bemessung und Konstruktion von Aluminiumtragwerken — Teil 1-2: Tragwerksbemessung für den Brandfall.*
- EN 1999-1-3, *Eurocode 9: Bemessung und Konstruktion von Aluminiumtragwerken — Teil 1-3: Ermüdungsbeanspruchte Tragwerke.*
- EN 1999-1-4, *Eurocode 9: Bemessung und Konstruktion von Aluminiumtragwerken — Teil 1-4: Kaltgeformte Profiltafeln.*
- EN 1999-1-5, *Eurocode 9: Bemessung und Konstruktion von Aluminiumtragwerken — Teil 1-5: Schalentragwerke.*

0.3 Einleitung zu EN 1999-1-3

Dieses Dokument enthält die Grundlage für die Bemessung und Konstruktion von ermüdungsbeanspruchten Tragwerken aus Aluminiumlegierungen im Grenzzustand der Tragfähigkeit.

0.4 In den Eurocodes verwendete Verbformen

Das Verb „muss“ beschreibt eine Anforderung die zwingend zu befolgen ist und von der bei Anwendung der Eurocodes keine Abweichung zulässig ist.

Das Verb „sollte“ beschreibt eine streng empfohlene Auswahl oder Vorgehensweise. In Abhängigkeit von nationalen Regeln und/oder relevanten Vertragsbestimmungen können alternative Lösungen verwendet / angenommen werden, wenn sie technisch verifiziert sind.

Das Verb „darf“ beschreibt eine erlaubte Vorgehensweise innerhalb der Anwendungsgrenzen der Eurocodes.

Das Verb „kann“ beschreibt Möglichkeiten und Fähigkeiten; es wird für Tatsachenfeststellungen und Erklärungen verwendet.

0.5 Nationaler Anhang für prEN 1999-1-3

Nationale Festlegungen sind in diesem Dokument zulässig, wo diese Möglichkeit ausdrücklich in Anmerkungen angegeben wird. Nationale Festlegungen umfassen die Auswahl der Werte für national festgelegte Parameter (NDP, en: nationally determined parameters).

Die nationale Ausgabe von EN 1999-1-3 kann einen Nationalen Anhang mit allen national festgelegten Parametern enthalten, die für den Entwurf und die Bemessung von Hoch- und Ingenieurbauten im jeweiligen Land Verwendung finden.

Wird keine nationale Festlegung angeführt, ist der in diesem Dokument angegebene Standardwert anzuwenden.

Wenn keine nationale Festlegung angeführt wird und kein Standardwert in diesem Dokument angegeben ist, kann die Festlegung durch eine zuständige Behörde getroffen werden, oder sofern keine Festlegungen getroffen wurden, können die beteiligten Parteien im Einzelfall eine Vereinbarung treffen.

Nationale Festlegungen sind in EN 1999-1-3 zu den folgenden Abschnitten gestattet:

4.1(2) ANMERKUNG
4.3.1(2) ANMERKUNG
4.3.2(6) ANMERKUNG
4.4(1) ANMERKUNG 1
4.4(1) ANMERKUNG 2
5(1) ANMERKUNG
6(2) ANMERKUNG
7.8.1(1) ANMERKUNG
7.8.2(1) ANMERKUNG 1
8.1.3(1) ANMERKUNG 1
8.1.3(1) ANMERKUNG 2
8.2.1(2) ANMERKUNG 2
8.2.1(6) ANMERKUNG
8.2.1(9) ANMERKUNG
A.4.1(4) ANMERKUNG
A.4.1(5) ANMERKUNG
E.2(6) ANMERKUNG
E.2(8) ANMERKUNG
I.3.2(1) ANMERKUNG
I.3.3.2(1) ANMERKUNG 2
I.3.4(1) ANMERKUNG
L.4.2 (5) ANMERKUNG
L.5 (2) ANMERKUNG
L.6 (3) ANMERKUNG 1
L.6 (3) ANMERKUNG 2
L.6 (4) ANMERKUNG
L.6 (5) ANMERKUNG
L.7.1 (1) ANMERKUNG

Nationale Festlegungen sind in EN 1999-1-3 zu den folgenden informativen Anhängen gestattet:

Anhang B (informativ) Hinweise für die Bewertung des Rissfortschritts durch Bruchmechanik

Anhang C (informativ) Versuche für die Ermüdungsbemessung

Anhang D (informativ) Spannungsanalyse

Anhang E (informativ) Klebeverbindungen

Anhang F (informativ) Bereich der Kurzzeitfestigkeit

Anhang G (informativ) Einfluss des angewandten Spannungsverhältnisses R

Anhang H (informativ) Verbesserung der Ermüdungsfestigkeit von Schweißnähten

Anhang I (informativ) Gussstücke

Anhang J (informativ) Tabellen der Detailkategorien

Anhang K (informativ) Hot-Spot-Referenz-Detail-Methode

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

Der Nationale Anhang kann, direkt oder durch Verweisungen, nicht widersprüchliche ergänzende Informationen zur Erleichterung der Umsetzung enthalten, sofern dadurch keine Bestimmungen der Eurocodes geändert werden.

1 Anwendungsbereich

1.1 Anwendungsbereich von EN 1999-1-3

(1) Dieses Dokument enthält die Grundlage für die Bemessung von ermüdungsbeanspruchten Tragwerken aus Aluminiumlegierungen für den Grenzzustand der Tragfähigkeit.

(2) Dieses Dokument enthält Regeln für:

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

(3) Druckbehälter oder -rohrleitungen sind nicht Gegenstand dieses Dokuments.

1.2 Annahmen

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

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

(3) EN 1999-1-3 ist dazu vorgesehen, in Verbindung mit EN 1990, EN 1991 (alle Teile), relevanten Teilen in EN 1992 bis EN 1999, EN 1090-1 und EN 1090-3 zu Anforderungen an die Ausführung und EN, EAD und ETA zu Bauprodukten, die maßgebend für Aluminiumtragwerke sind, angewendet zu werden.

2 Normative Verweisungen

Die folgenden Dokumente werden im Text in solcher Weise in Bezug genommen, dass einige Teile davon oder ihr gesamter Inhalt Anforderungen des vorliegenden Dokuments darstellen. Bei datierten Verweisungen gilt nur die in Bezug genommene Ausgabe. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe des in Bezug genommenen Dokuments (einschließlich aller Änderungen).

EN 1090-3:2019, *Ausführung von Stahltragwerken und Aluminiumtragwerken — Teil 3: Technische Regeln für die Ausführung von Aluminiumtragwerken*

EN 1990, *Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung*

EN 1991 (alle Teile), *Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke*

prEN 1999-1-1:2021, *Eurocode 9: Bemessung und Konstruktion von Aluminiumtragwerken — Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln*

3 Begriffe und Symbole

3.1 Begriffe

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die Begriffe nach EN 1990 und EN 1999-1-1 und die folgenden Begriffe.

3.1.1

Ermüdung

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

3.1.2

Ermüdungsbelastung

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

3.1.3

Belastungsereignis

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

3.1.4

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

3.1.5

modifizierte Nennspannung

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

3.1.6

Strukturspannung

geometrische Spannung

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, rissähnliche Merkmale, normale maschinelle Bearbeitungsspuren usw. und es handelt sich im Prinzip um den gleichen Spannungsparameter wie bei der modifizierten Nennspannung, die aber im Allgemeinen anders berechnet wird

3.1.7

geometrischer Spannungskonzentrations-Beiwert

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

3.1.8

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 die Ermüdungsfestigkeit, ausgedrückt als Hot-Spot-Spannungsschwingbreite, meistens bekannt ist

3.1.9

Spannungs-Zeit-Verlauf

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

3.1.10

Spannungs-Umkehr-Punkt

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

3.1.11

Spannungsspitze

Umkehrpunkt, an dem die Spannungsänderungsrate von positiv auf negativ umschaltet

3.1.12

Spannungstiefpunkt

Umkehrpunkt, an dem die Spannungsänderungsrate von negativ auf positiv umschaltet

3.1.13

konstante Amplitude

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

3.1.14

variable Amplitude

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

3.1.15

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 und Element eines mit einer Zählmethode ermittelten Schwingbeanspruchungskollektivs

3.1.16

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 Rainflow-Methode und die Reservoir-Methode

3.1.17

Rainflow-Methode

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

3.1.18

Reservoir-Methode

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

3.1.19

Spannungs-Amplitude

Hälfte des Wertes der Spannungsschwingbreite

3.1.20

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

3.1.21

Spannungsintensitäts-Verhältnis

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

3.1.22

Mittelspannung

arithmetisches Mittel der algebraischen Summe vom höchsten und niedrigsten Spannungswert

3.1.23

Spannungsschwingbreite

algebraische Differenz zwischen der Spannungsspitze und dem Spannungstiefpunkt in einem Spannungsschwingspiel

3.1.24

Spannungsintensitäts-Schwingbreite

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

3.1.25

Spannungsschwingbreiten-Kollektiv

Spannungs-Kollektiv

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

3.1.26

Bemessungs-Kollektiv

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

3.1.27

Detaillkategorie

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

3.1.28

Lebensdauer

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

3.1.29

Ermüdungsfestigkeitskurve

Wöhlerkurve

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

Anmerkung 1 zum Begriff: Die Ermüdungsfestigkeitskurven werden auch als $\log\Delta\sigma$ - $\log N$ -Kurven, S-N-Kurven, oder Wöhlerkurven bezeichnet.

3.1.30

charakteristische Ermüdungsfestigkeit

Spannungsschwingbreite bei konstanter Amplitude $\Delta\sigma_c$ für eine bestimmte Detaillkategorie bei der Lebensdauer von $N_c = 2 \times 10^6$ Schwingspiele

3.1.31

Dauerfestigkeit

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

3.1.32

Schwellenwert der Ermüdungsfestigkeit

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

3.1.33

geplante Nutzungsdauer

angenommener Zeitraum, über den eine Konstruktion oder ein Teil davon entsprechend dem vorgesehenen Verwendungszweck verwendet werden soll, in dem erwartete Instandhaltungsarbeiten durchgeführt werden, jedoch keine wesentlichen Reparaturen notwendig sind

3.1.34

sichere Lebensdauer

Zeitraum, in dem sich mit ausreichender Wahrscheinlichkeit bei der Anwendung des Konzepts der schwingbruchsicheren Bemessung kein Versagen infolge Ermüdung ergibt

3.1.35

Schadenstoleranz

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

3.1.36

Ermüdungsschaden

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

3.1.37

Miner-Regel

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

3.1.38

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

3.1.39

schadensäquivalente Spannungsschwingbreite

durch die Einwirkung einer schadensäquivalenten Ermüdungsbelastung an einem Konstruktionsdetail hervorgerufene Spannungsschwingbreite

3.1.40

schadensäquivalente Ermüdungsbelastung konstanter Amplitude

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

3.2 Symbole

Lateinische Großbuchstaben

A	Werkstoff-Konstante bei Berechnung der Rissfortschrittgeschwindigkeit
D	Ermüdungsschaden-Wert, berechnet für eine bestimmte Betriebsdauer
D_L	Ermüdungsschaden-Wert, berechnet für die gesamte geplante Nutzungsdauer
$D_{L,d}$	Bemessungswert für Ermüdungsschaden, berechnet für die gesamte geplante Nutzungsdauer
D_{lim}	vorgeschriebener Bemessungs-Grenzwert für den Ermüdungsschaden-Wert

K	Spannungsintensität
K_{gt}	geometrischer Spannungskonzentrations-Beiwert
L_{adh}	wirksame Länge von überlappten Klebeverbindungen
N	Anzahl (oder gesamte Anzahl) der Schwingspiele
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_i	vorgesehene Anzahl von Schwingspielen bis zum Versagen bei der Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma_i$
N_L	Anzahl der Schwingspiele (10^8), bei der der Schwellenwert der Ermüdungsfestigkeit definiert ist
P	Wahrscheinlichkeit
R	Spannungsverhältnis
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_f	Zeit für das Wachstum eines wahrnehmbaren Risses bis zu einer versagenskritischen Größe
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.
T_i	Inspektionsintervall
T_L	geplante Nutzungsdauer
T_S	schwingbruchsichere Lebensdauer

Lateinische Kleinbuchstaben

a	Kehlnahtdicke
a_c	Rissbreite an der Oberfläche
da/dN	Rissfortschrittsgeschwindigkeit (m/Schwingspiel)
$f_{v,adh}$	charakteristische Schubfestigkeit eines Klebstoffes
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_d	minimale wahrnehmbare Risslänge
l_f	bruchkritische Risslänge
$\log$	Logarithmus zur Basis 10
m	inverse Neigung einer $\log\Delta\sigma$ - $\log N$ Ermüdungsfestigkeitskurve bzw. Exponent im mathematischen Ausdruck der Rissfortschrittsgeschwindigkeit
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_i	Anzahl der Schwingspiele bei der Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma_i$
t	Dicke
y	von der Rissgeometrie abhängiger Faktor in der Berechnungsformel der Rissfortschrittsgeschwindigkeit

Griechische Großbuchstaben

ΔK	Spannungsintensitäts-Schwingbreite
$\Delta \tau$	effektive Schwingbreite der Schubspannung
$\Delta \sigma$	Schwingbreite der Nennspannung (Normalspannung)

ANMERKUNG Abhängig vom Kontext bezieht sich $\Delta\sigma$ entweder auf die Einwirkungen oder auf die Ermüdungsfestigkeit.

ΔT_F	empfohlenes maximales Zeitintervall für die Inspektion auf Ermüdung
ΔT_G	empfohlenes maximales Zeitintervall für die allgemeine Inspektion
$\Delta\sigma_C$	Referenzwert der Ermüdungsfestigkeit bei 2×10^6 Schwingspielen (Normalspannung)
$\Delta\sigma_D$	Dauerfestigkeit
$\Delta\sigma_E$	Schwingbreite der Nennspannung aus Ermüdungsbeanspruchungen
$\Delta\sigma_{E,2e}$	schadensäquivalente Spannungsschwingbreite konstanter Amplitude bei 2×10^6 Schwingspielen
$\Delta\sigma_{E,Ne}$	schadensäquivalente Spannungsschwingbreite konstanter Amplitude bei $N_{\max}$
$\Delta\sigma_i$	konstante Spannungsschwingbreite für die Hauptspannungen im Konstruktionsdetail für n_i Schwingspiele
$\Delta\sigma_L$	Schwellenwert der Ermüdungsfestigkeit
$\Delta\sigma_R$	Ermüdungsfestigkeit (Normalspannung)

Griechische Kleinbuchstaben

γ_{FF}	Teilsicherheitsbeiwert für die Ermüdungsbelastung
---------------	---

λ_i	schadensäquivalenter Beiwert, abhängig von der Lastsituation und den konstruktiven Merkmalen, siehe 7.8.2
γ_{Mf}	Teilsicherheitsbeiwert für die Ermüdungsfestigkeit
σ_m	Mittelspannung
$\sigma_{\max}, \sigma_{\min}$	Maximal- bzw. Minimalwert der Spannungen in einem Schwingenspiel

4 Grundlagen der Bemessung

4.1 Grundregeln

(1)P Wird ein Tragwerk im Hinblick auf Ermüdung bemessen, muss, mit einem akzeptablen Wahrscheinlichkeitsniveau, ein zufriedenstellendes Verhalten des Tragwerks während seiner gesamten geplanten Nutzungsdauer sichergestellt werden, d. h. während der geplanten Nutzungsdauer versagt das Tragwerk nicht infolge Ermüdung bzw. ist es nicht wahrscheinlich, dass vorzeitige reparaturbedürftige Schäden durch Ermüdung entstehen.

(2) Die Bemessung von Aluminiumtragwerken in der Ermüdungsbemessungssituation darf auf einer der folgenden Methoden beruhen:

- a) Bemessung nach dem Konzept der sicheren Lebensdauer [SLD, en: safe life design (de: schwingbruch-sichere Bemessung)] (siehe 4.2.1);
- b) Bemessung nach dem Konzept der Schadenstoleranz [DTD, en: damage tolerant design (de: schadens-tolerante Bemessung)] (siehe 4.2.2).

Jede der Methoden a) und b) darf durch versuchsunterstützte Bemessung ergänzt oder ersetzt werden (siehe 4.3.3).

ANMERKUNG Bedingungen für die Anwendung der vorstehend genannten Bemessungsmethoden können im Nationalen Anhang angegeben werden.

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

(4) Ein Ermüdungsnachweis der Bauteile und Tragwerke sollte in den Fällen in Erwägung gezogen werden, in denen sich die Lasten häufig ändern, insbesondere bei Lastumkehr.

ANMERKUNG 1 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 2 Die in diesem Dokument angegebenen Festlegungen 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.

(5) Die Berechnungsgrundlage der Ermüdungsfestigkeit nach Anhang A sollte beachtet werden.

4.2 Methoden der Ermüdungsbemessung

4.2.1 Schwingbruchsichere Bemessung (SLD)

(1) Das Konzept der schwingbruchsicheren Bemessung sollte angewendet werden, wenn keine betriebliche Inspektion auf Ermüdungsschäden vorgesehen ist.

(2) Bei Anwendung des Konzepts der schwingbruchsicheren Bemessung sollte die Bemessungsgrundlage der Ermüdungsfestigkeit nach A.4 eingehalten werden.

4.2.2 Schadenstolerante Bemessung (DTD)

(1)P Das Konzept der schadenstoleranten Bemessung sollte angewendet werden, wenn ein vorgeschriebenes Inspektions- und Wartungsprogramm zur Feststellung und zur Behebung von Ermüdungsschäden erstellt und während der geplanten Nutzungsdauer des Tragwerks befolgt wird. Die Bemessung sollte zu einer Ausführungsqualität führen, bei der davon ausgegangen werden kann, dass das Verhalten eines Tragwerks während der geplanten Nutzungsdauer einwandfrei ist.

ANMERKUNG 1 Die Anwendung des Konzepts der schadenstoleranten Bemessung kann in solchen Anwendungen als geeignet angesehen werden, bei denen die Bewertung nach dem Konzept der schwingbruchsicheren Bemessung zeigt, dass die Ermüdung einen signifikanten Einfluss auf die Kosten der konstruktiven Ausführung hat und dass ein höheres Ermüdungsrissrisiko während der geplanten Nutzungsdauer hingenommen werden kann als bei Anwendung des Konzepts der schwingbruchsicheren Bemessung. Dieser Ansatz wurde entwickelt mit dem Ziel, das gleiche Zuverlässigkeitsniveau zu erreichen wie bei der Anwendung des Konzepts der schwingbruchsicheren Bemessung.

ANMERKUNG 2 Das Konzept der schadenstoleranten Bemessung kann mit zwei verschiedenen Ansatzvarianten, DTD-I und DTD-II, angewendet werden, siehe Anhang L.

(2) Bei Anwendung des Konzepts der schadenstoleranten Bemessung sollten die Voraussetzungen für ihre Anwendung und die Regeln für die Inspektionsstrategie nach A.5 eingehalten werden.

4.2.3 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 eingesetzt werden, wenn sie unter kontrollierten Bedingungen ermittelt und angewendet wurden.

ANMERKUNG Hinweise zum Nachweis der versuchsgestützten Bemessung sind in Anhang C enthalten.

4.3 Ermüdungsbelastung

4.3.1 Herkunft der Ermüdungsbelastung

(1) Spannungsveränderungen im Tragwerk jeglicher Herkunft sollten identifiziert werden.

ANMERKUNG 1 Gewöhnliche Situationen, in denen eine Ermüdungsbelastung auftritt, sind in 4.1(4) angegeben.

ANMERKUNG 2 Für die Begrenzung der Ermüdung bei wiederholtem lokalen Beulen siehe D.5.

(2) Die Ermüdungsbelastung sollte EN 1991 (alle Teile) oder anderen maßgebenden Europäischen Normen entnommen werden. Zusätzlich dazu sollte 4.3.2 berücksichtigt werden.

ANMERKUNG Die Bestimmung der Ermüdungsbelastung für Fälle, die nicht durch eine Europäische Norm behandelt werden, können durch den Nationalen Anhang angegeben werden.

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

4.3.2 Herleitung der Ermüdungsbelastung

(1) Die Ermüdungsbelastung sollte durch ein Bemessungslastkollektiv beschrieben werden, welches einen Bereich von Intensitäten eines spezifischen Nutzlastereignisses und die Anzahl der Wiederholungen jeder Lastintensität während der geplanten Nutzungsdauer des Tragwerks definiert. Wenn das Auftreten von zwei oder mehr unabhängigen Nutzlastereignissen wahrscheinlich ist, sollte die jeweilige Phasenverschiebung angegeben werden.

(2) 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 sollten die dynamischen Vergrößerungseinflüsse besonders beachtet werden.

ANMERKUNG Weitere Hinweise werden in Anhang C gegeben.

(5) Das Bemessungslastkollektiv sollte als ein geschätzter oberer Grenzwert der akkumulierten Betriebsbedingungen während der gesamten geplanten Nutzungsdauer des Tragwerks gewählt werden. 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 Der Wert von k_F beträgt 2,0 und der Wert von k_N beträgt 2,0, es sei denn, der Nationale Anhang gibt andere Werte an. Siehe auch 4.4(1), Anmerkung 2.

4.3.3 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 8.1 – entsprechen den für das nachzuweisende Detail geltenden Werten;

ANMERKUNG In manchen Fällen können äquivalente Ermüdungslasten unter Annahme einer einfachen einheitlichen Neigung mit $m_2 = m_1$ und $\Delta\sigma_L = 0$ ermittelt worden sein. 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 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.

4.4 Teilsicherheitsbeiwerte für Ermüdungslasten

(1) In Fällen, in denen die Ermüdungslasten F_{Ek} entsprechend den Anforderungen in 4.3.1(2) und 4.3.2 ermittelt wurden, sollte für Ermüdungslasten γ_{ff} ein Teilsicherheitsbeiwert auf diese Lasten zur Ermittlung der Bemessungslast F_{Ed} nach Gleichung (4.4) angewendet werden.

$$F_{Ed} = \gamma_{ff} F_{Ek} \quad (4.4)$$

ANMERKUNG 1 Der Wert von γ_{ff} beträgt 1,0, es sei denn im Nationalen Anhang wird ein anderer Wert angegeben.

ANMERKUNG 2 In Fällen, in denen Ermüdungslasten auf der Grundlage anderer Konfidenzgrenzwerte als in 4.3.2(6) angegeben definiert wurden, sind Teilsicherheitsbeiwerte für Lasten in Tabelle 4.1 (NDP) gegeben, es sei denn im Nationalen Anhang sind andere Werte angegeben.

Tabelle 4.1 (NDP) — 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

4.5 Anforderungen an die Ausführung

4.5.1 Allgemeines

- (1) Eine Ausführungsspezifikation muss vorliegen (siehe 4.5.3).
- (2) Ein Betriebsbuch sollte vorliegen (siehe 4.5.4).
- (3) Ein Prüf- und Wartungsbuch sollte vorliegen (siehe 4.5.5).

4.5.2 Ausführungsklassen

- (1) Die zutreffende Ausführungsklasse sollte in Übereinstimmung mit EN 1999-1-1 ausgewählt werden.

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

ANMERKUNG 2 Hinweise zum Ausnutzungsgrad sind L.7 zu entnehmen; sie gelten nur bei Übernahme der in Anhang J enthaltenen Ermüdungswiderstandsdaten. Die Definition des Ausnutzungsgrads ist in prEN 1999-1-1:2021, Anhang A, angegeben.

4.5.3 Ausführungsspezifikation

(1) Die Ausführungsspezifikation sollte alle Anforderungen an die Materialvorbereitung, Montage, Verbindung, Nachbehandlung sowie Inspektion beinhalten, damit die gewünschten Ermüdungsfestigkeiten erreicht werden.

(2) Die Ausführungsspezifikation muss festlegen, dass die Ausführung in Übereinstimmung mit EN 1090-3 auszuführen ist.

4.5.4 Betriebsbuch

(1) Das Betriebsbuch sollte enthalten:

- Einzelheiten für die Ermüdungsbelastung und die in der Bemessung angenommene geplante Nutzungsdauer;
- 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 möglicher Auswirkungen auf das Tragwerksverhalten;
- Instruktionen für den Aus- und Wiedereinbau von Bauteilen, z. B. das Festmachen von Befestigungsmitteln;
- akzeptable Reparaturmethoden im Falle von zufälligen Beschädigungen während des Betriebs (z. B. Kerben, Beulen, Risse, usw.).

4.5.5 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.

5 Werkstoffe, Produktbestandteile und Verbindungsmittel

(1) Die Bemessungsregeln dieses Dokuments müssen auf die in EN 1999-1-1 aufgeführten Konstruktionsmaterialien angewendet werden, die Bestandteile von Bauteilen und Tragwerken sind, mit 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. Ermüdungsdaten für derartige Legierungen bzw. Zustände können im Nationalen Anhang angegeben werden.

ANMERKUNG 2 Hinweise zur Ermittlung von Daten aus Prüfungen werden in Anhang C gegeben.

ANMERKUNG 3 Hinweise zu Gussstücken werden in Anhang I gegeben.

(2) Dieses Dokument deckt Bauteile mit offenen und geschlossenen Querschnitten, einschließlich solcher Teile, die aus Kombinationen solcher Bauteile aufgebaut sind, ab.

(3) Dieses Dokument deckt Bauteile und Tragwerke mit folgenden Verbindungsmitteln ab:

- Lichtbogen-Schweißen (Metall-Schutzgas-Schweißen und Wolfram-Inert-Gasschweißen);
- Rührreibschweißen;
- Stahlschrauben, die in prEN 1999-1-1:2021, Tabelle 5.9, aufgelistet sind.

ANMERKUNG 1 Hinweise zu Klebeverbindungen werden in Anhang E gegeben.

ANMERKUNG 2 Für die Ermüdungsbemessung und den Nachweis für Stahlschrauben bei Zug und Schub siehe EN 1993-1-9.

6 Dauerhaftigkeit

(1) Die Ermüdungsfestigkeitsdaten nach diesem Dokument gelten unter normalen atmosphärischen Bedingungen bis zu Temperaturen von 100 °C. Im Fall der Legierung EN AW-5083 gelten bei Temperaturen über 65 °C die Ermüdungsfestigkeitsdaten nach diesem Dokument nicht, es sei denn es gibt eine effiziente Korrosionsschutzbeschichtung.

(2) Ermüdungsfestigkeitsdaten sind bei manchen Typen aggressiver Umweltbedingungen nicht anwendbar. Die Festlegungen nach 8.2 und 8.4 zu Materialien und Umweltbedingungen sollten eingehalten werden.

ANMERKUNG Weiterführende Informationen zur Dauerhaftigkeit auf Grundlage lokaler Umweltbedingungen können im Nationalen Anhang angegeben werden.

(3) Bei Klebeverbindungen sollten besondere Umweltbedingungen und -effekte berücksichtigt werden.

ANMERKUNG Für Hinweise siehe Anhang E.

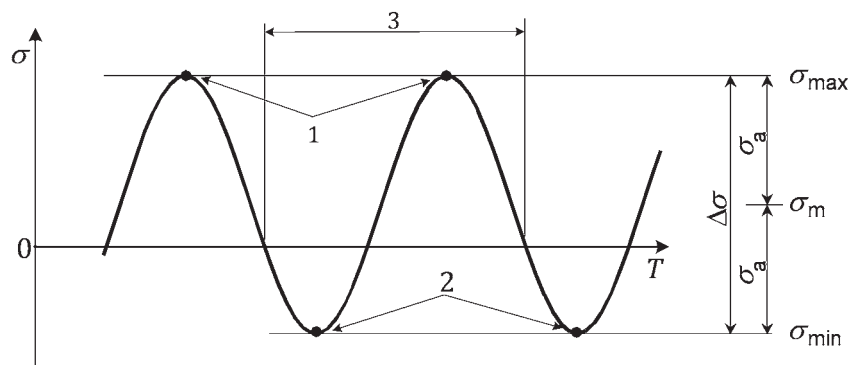
7 Strukturanalyse

7.1 Globale Analyse

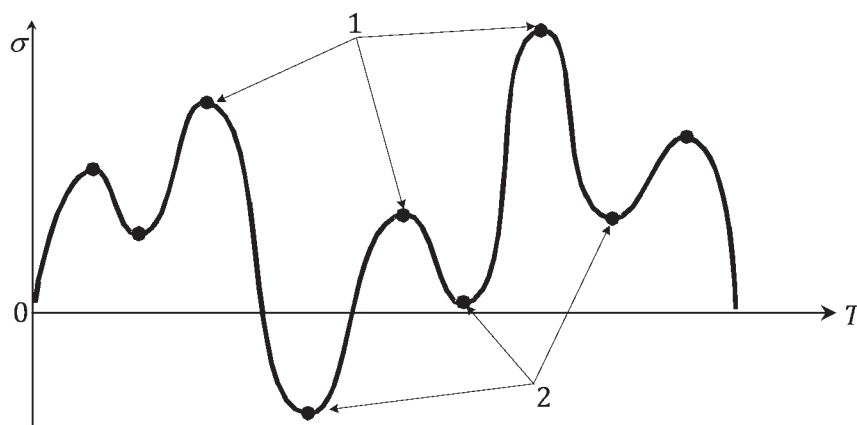
7.1.1 Allgemeines

(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 7.1.

ANMERKUNG Ein elastisches Modell für die statische Berechnung (für den Grenzzustand der Tragfähigkeit oder der Gebrauchstauglichkeit) in Übereinstimmung mit EN 1999-1-1 ist nicht unbedingt für die Ermüdungsberechnung ausreichend.



a) Konstante Amplitude



b) Variable Amplitude

Legende

- 1 Spannungsspitze
- 2 Spannungstiefpunkt
- 3 Spannungsschwingenspiel
- 0 Spannungs-Umkehr-Punkt
- $\sigma_{\max}$ Maximalspannung
- $\sigma_{\min}$ Minimalspannung
- σ_m Mittelspannung
- $\Delta\sigma$ Spannungsschwingbreite
- σ_a Spannungsamplitude

Bild 7.1 — Terminologie von Spannungs-Zeit-Verläufen und Spannungsschwingspielen

(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 sein Wert durch Versuche festgestellt werden.

ANMERKUNG Hinweise zur Prüfung sind in Anhang C enthalten.

(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 einem elastischen Werkstoffverhalten basieren, außer wenn Beanspruchungsdaten an Prototypen oder maßstabgetreu nachgebildeten Modellen ermittelt worden sind.

7.1.2 Anwendung von Balkenelementen

(1) Balkenelemente sollten bei der Globalanalyse von Balken, Rahmen oder Fachwerken eingesetzt werden, die den 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 usw.) 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 Rohrknöten), oder bei halbsteifer 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 statische Gleichgewicht beizubehalten. Ähnliche Federn wie in (6) sollten nach Bedarf verwendet werden.

7.1.3 Anwendung von Membran-, Schalen- und Kontinuumselementen

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

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

(3) Wo Membran- oder Schalenelemente bei der Globalanalyse zur Berücksichtigung von größeren Spannungs-Konzentrationseinflüssen, wie unter 7.2.3 beschrieben, eingesetzt werden, sollte die Netzweite im Bauteilbereich der Rissentstehungsstelle zur vollständigen Erfassung des Einflusses ausreichend klein sein.

ANMERKUNG Ein Leitfaden zur Spannungsanalyse ist in Anhang D enthalten.

7.2 Spannungsarten

7.2.1 Allgemeines

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

- a) Nennspannungen, siehe 7.2.2 und 7.3.1;
- b) modifizierte Nennspannungen, siehe 7.2.3 und 7.3.2;
- c) Hot-Spot-Spannungen, siehe 7.2.4 und 7.3.3.

7.2.2 Nennspannungen

(1) Nennspannungen, siehe Bild 7.2, sollten direkt für die Bewertung von Rissentstellungsstellen in einfachen Bauteilen und Verbindungen verwendet werden, wo die folgenden Bedingungen gelten:

- a) die Konstruktionsdetails in Verbindung mit der Rissentstellungsstelle entsprechen den Detailkategorien; und

ANMERKUNG Zu Detailkategorien siehe 8.1.

- b) die Detailkategorie wurde durch Versuche bestimmt, wobei die Versuchsergebnisse auf der Grundlage von Nennspannungen definiert wurden; und

ANMERKUNG Hinweise zur Prüfung sind in Anhang C enthalten.

- c) große geometrische Einflüsse, wie die in 7.2.3 aufgelisteten, liegen nicht in der Nähe der Rissentstellungs-Stelle.

7.2.3 Modifizierte Nennspannungen

(1) Modifizierte Nennspannungen sollten anstelle von Nennspannungen verwendet werden, wenn die Rissentstellungsstelle sich in der Nähe einer oder mehrerer der nachfolgenden großen geometrischen Spannungskonzentrationseinflüsse (siehe Bild 7.2) befindet, unter der Voraussetzung, dass die Bedingungen 7.2.2(a) oder (b) weiter gelten:

- a) große Änderungen der Querschnittsform, z. B. Ausschnitte oder Übergangsecken;
- b) große Änderungen der Steifigkeit in der Umgebung des Bauteilquerschnitts an unausgesteiften, 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 prEN 1999-1-1:2021, Anhang J.

- 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 Hinweise zur Spannungsanalyse sind in Anhang D enthalten.

(2) Die oben genannten geometrischen Spannungskonzentrationseinflüsse sollten berücksichtigt werden durch den Beiwert K_{gt} , siehe Bild 7.2, 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.

7.2.4 Hot-Spot-Spannungen

(1) Hot-Spot-Spannungen können nur verwendet werden, wenn eine der folgenden Bedingungen gilt:

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

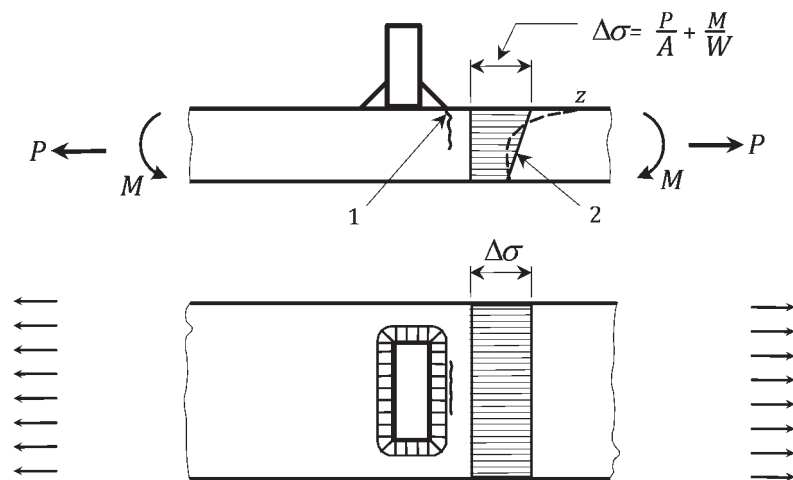
ANMERKUNG Wegen der großen Auswirkung der Wärmeeinflusszone auf die Festigkeit von geschweißten Aluminiumbauteilen sind Erfahrungen mit Details von Stahlkonstruktionen auf Aluminium meistens nicht übertragbar.

- 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;

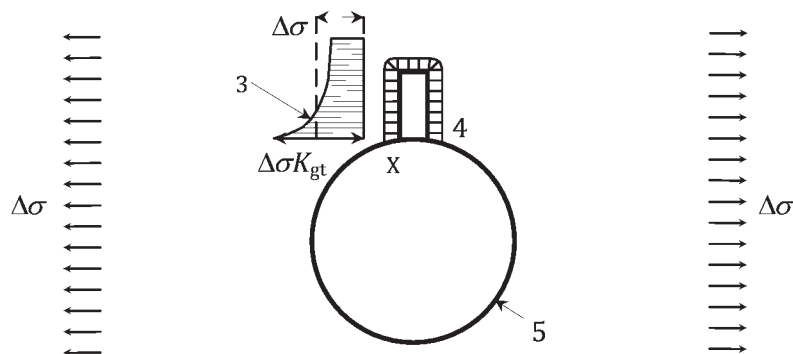
- c) Schalen-Biegespannungen treten in verformungsfähigen Verbindungen entsprechend 7.1.2(6) auf;

ANMERKUNG 1 Für Hinweise siehe Anhang C, Anhang D und Anhang K.

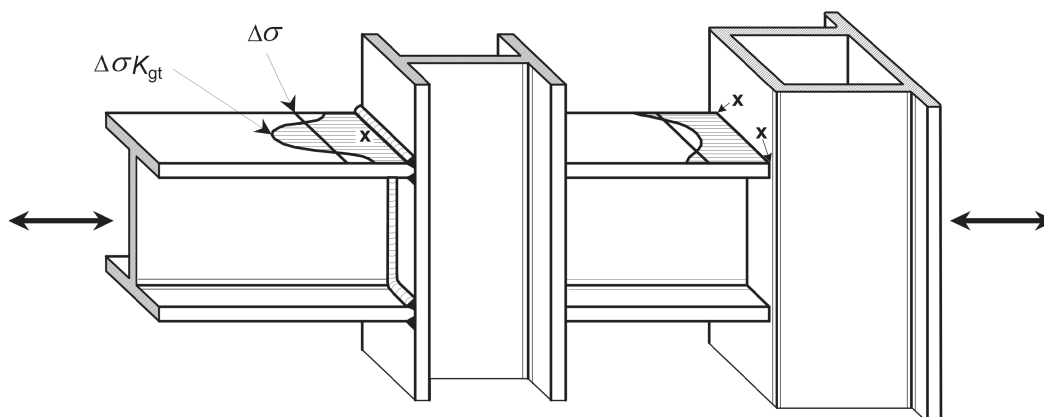
ANMERKUNG 2 Für die Herleitung von Hot-Spot-Spannungen siehe 7.3.3 und 8.2.4.



a) Lokale Spannungskonzentration beim Schweißnahtübergang



b) Brutto Spannungskonzentration bei großer Öffnung



c) Verbindungsbereich hoher Steifigkeit

Legende

- 1 Rissentstehungsstelle
- 2 lineare Spannungsverteilung, der Spannungserhöhungsbeiwert am Nahtübergang bei z nicht berechnet
- 3 nichtlineare Spannungsverteilung
- 4 Schweißnaht
- 5 große Öffnung
- $\Delta\sigma$ Schwingbreite der Nennspannung
- $\Delta\sigma K_{gt}$ Schwingbreite der modifizierten Nennspannung an Rissentstehungsstelle x infolge der Öffnung
- Schwingbreite der modifizierten Nennspannung an Rissentstehungsstelle x infolge der geometrischen Spannungskonzentrationseffekte

Bild 7.2 — Beispiele für Nennspannungen und modifizierte Nennspannungen

7.3 Herleitung von Spannungen

7.3.1 Herleitung von Nennspannungen

7.3.1.1 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.

7.3.1.2 Konstruktionsmodelle mit Membran-, Schalen- oder Kontinuums-elementen

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

7.3.2 Herleitung von modifizierten Nennspannungen

7.3.2.1 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) Die elastischen Spannungskonzentrationsbeiwerte K_{gt} sollten sämtliche geometrische Fehlstellen berücksichtigen, außer denjenigen die bereits in der Detailkategorie enthalten sind.

(3) Die elastischen Spannungskonzentrationsbeiwerte K_{gt} sollten nach einer der folgenden Methoden bestimmt werden:

a) Standardlösungen für Spannungskonzentrationsbeiwerte;

ANMERKUNG Hinweise zu Spannungskonzentrationsbeiwerten sind in D.4 enthalten.

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 sind (siehe (2)).

7.3.2.2 Konstruktionsmodelle mit Membran-, Schalen- oder Kontinuumselementen

(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 vorausszusagen, jedoch ohne Berücksichtigung der Merkmale unter (a).

ANMERKUNG Hinweise zur Anwendung von Finiten-Elementen für die Ermüdungsanalyse sind in D.3 enthalten.

7.3.3 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 Für Hinweise siehe D.3.

(2) In einfachen Fällen, wie in Bild 7.2 (c), darf die Hot-Spot-Spannung der modifizierten Nennspannung gleich gesetzt und nach 7.2.3 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.

7.3.4 Spannungsrichtung

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

(2) Falls die Haupt-Zugspannungs-Richtung weniger als 45° zur Nahtachse liegt, sollte ein Konstruktionsdetail als parallel zu dieser Achse angesehen werden.

7.4 Spannungsschwingbreiten für bestimmte Rissentstehungsstellen

7.4.1 Grundmaterial, Schweißnähte und Verbindungen mit mechanischen Befestigungselementen

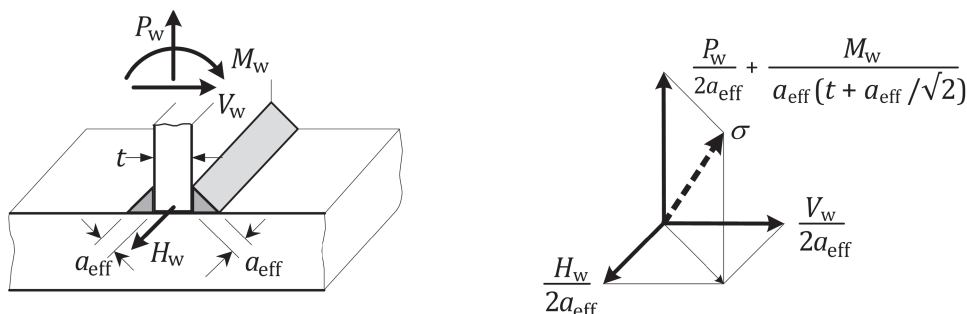
(1) Risse, die an Nahtübergangsstellen, Nahtüberhöhungen, Löchern von Verbindungsmitteln, Reibkontaktflächen, usw. entstehen und durch den Grundwerkstoff oder voll durchgeschweißten Nahtwerkstoff fortschreiten, sollten auf der Grundlage der Nenn-Hauptspannungsschwingbreite im Bauteil an dieser Stelle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

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

7.4.2 Kehlnähte und partiell durchgeschweißte Stumpfnähte

(1) Risse, die an Schweißnahtwurzeln entstehen und durch die Naht fortschreiten, sollten auf der Grundlage der Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma$ berechnet werden, wobei σ die vektorielle Summe der Spannungen im Schweißwerkstoff ist, bezogen auf die effektive Nahtdicke, siehe Bild 7.3.

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



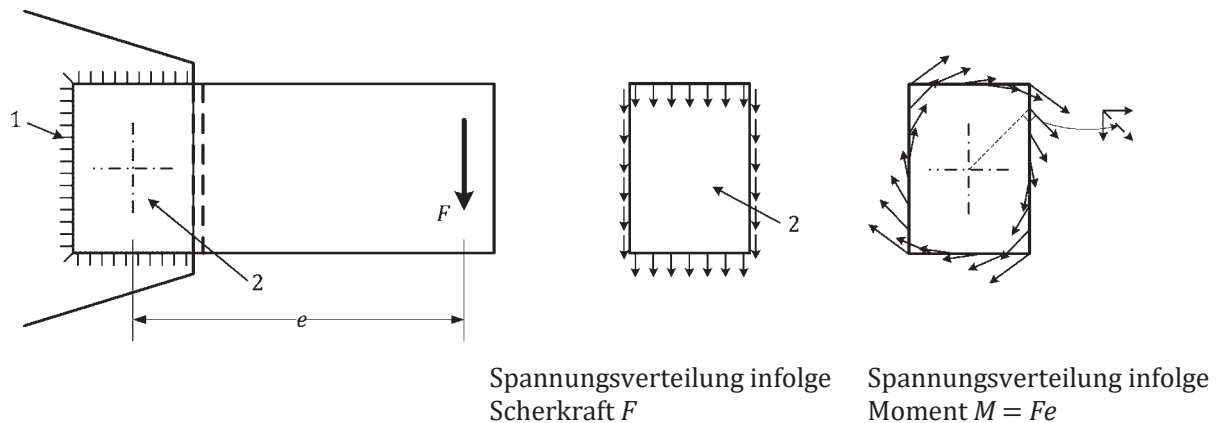
Legende

P_w , H_w und M_w sind Kräfte (Moment) je Längeneinheit

Bild 7.3 — Spannungen im Nahtthals

(2) In einseitigen Überlappverbindungen darf die auf die 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 7.4).

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



Legende

- 1 Kehlnaht
- 2 Überlapp-Bereich

Bild 7.4 — Spannungen in Überlappverbindungen

7.5 Klebeverbindungen

(1) Der Ermüdungsnachweis sollte auf einer, einen Fehler enthaltenden Oberfläche in der Kleberschicht beruhen.

ANMERKUNG Hinweise sind in Anhang E enthalten.

7.6 Gussstücke

(1) Die Haupt-Strukturspannung sollte verwendet werden.

(2) Finite-Elemente-Spannungs-Analyse oder Dehnungsmessung im Fall komplizierter Formen, für die keine Standardberechnungen vorhanden sind, könnte erforderlich sein.

7.7 Spannungskollektive

(1) Die Verfahren nach Anhang A zur Schwingspielzählung von Spannungsschwingbreiten sollten angewendet werden, um die Spannungskollektive zu ermitteln.

7.8 Berechnung von äquivalenten Spannungsschwingbreiten für standardisierte Ermüdungsbelastungs-Modelle

7.8.1 Allgemeines

(1) Der Ermüdungsnachweis für standardisierte Ermüdungslasten, wie in EN 1991 (alle Teile) 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 kann Information über die Anwendung von Nenn-Spannungsschwingbreiten oder modifizierten Nenn-Spannungsschwingbreiten geben.

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

7.8.2 Bemessungswert der Spannungsschwingbreite

(1) Der Bemessungswert der Schwingbreiten der Nennspannung $\gamma_{Ff}\Delta\sigma_{E,2e}$ sollte nach Gleichung (7.1) und Gleichung (7.2) bestimmt werden:

$$\gamma_{Ff}\Delta\sigma_{E,2e} = \lambda_1 \times \lambda_2 \times \dots \lambda_i \times \dots \lambda_n \times \Delta\sigma(\gamma_{Ff}Q_k) \text{ für die Nennspannung} \quad (7.1)$$

$$\gamma_{Ff}\Delta\sigma_{E,2e}^* = K_{gt} \gamma_{Ff}\Delta\sigma_{E,2e} \text{ für die modifizierte Nennspannung} \quad (7.2)$$

Dabei ist

- $\Delta\sigma(\gamma_{Ff}Q_k)$ die Spannungsschwingbreite aus den in EN 1991 (alle Teile) festgelegten Ermüdungslasten
- λ_i die schadensäquivalenten Beiwerte, abhängig von der Lastsituation, den konstruktiven Merkmalen sowie von anderen relevanten Faktoren;
- K_{gt} der Spannungskonzentrations-Beiwert, der die lokale Spannungserhöhung in Abhängigkeit von der Detailgeometrie berücksichtigt, die nicht in der charakteristischen Ermüdungsfestigkeitskurve enthalten ist, siehe 7.3.2.1.

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

ANMERKUNG 2 Die λ_i -Werte für Stahlbauteile könnten nicht ohne weiteres auf Aluminiumbauteile übertragbar sein.

8 Ermüdungswiderstand und Detailkategorien

8.1 Detailkategorien

8.1.1 Allgemeines

(1) Der Nachweis der Ermüdungsfestigkeit sollte auf Festigkeitswerten einer Anzahl von standardisierten Detailkategorien basieren.

(2) 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 8.2 gerecht werden.

8.1.2 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 Proportion des Konstruktionsdetails.

ANMERKUNG 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.

8.1.3 Konstruktionsdetails

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

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

ANMERKUNG 1 Anhang J enthält Leitlinien für die Detailkategorien und Konstruktionsdetails mit $\Delta\sigma$ - N -Beziehungen für die Ermüdungsfestigkeit von Bauteilen der Gruppe a) unter Umgebungstemperatur, die keinen Oberflächenschutz benötigen (siehe Tabelle 8.2 (NDP)).

ANMERKUNG 2 Der Nationale Anhang kann eine Reihe von Detailkategorien und Konstruktionsdetails in Verbindung mit einer Reihe von Übereinstimmungskriterien unter Berücksichtigung der Regeln in 8.1.2 und 8.3 für solche Bauteile festlegen.

ANMERKUNG 3 Zusätzlich zu den Konstruktionsdetails nach Anhang J können andere Konstruktionsdetails durch den Nationalen Anhang bereitgestellt werden.

ANMERKUNG 4 Für Hinweise über Gussstücke siehe Anhang I.

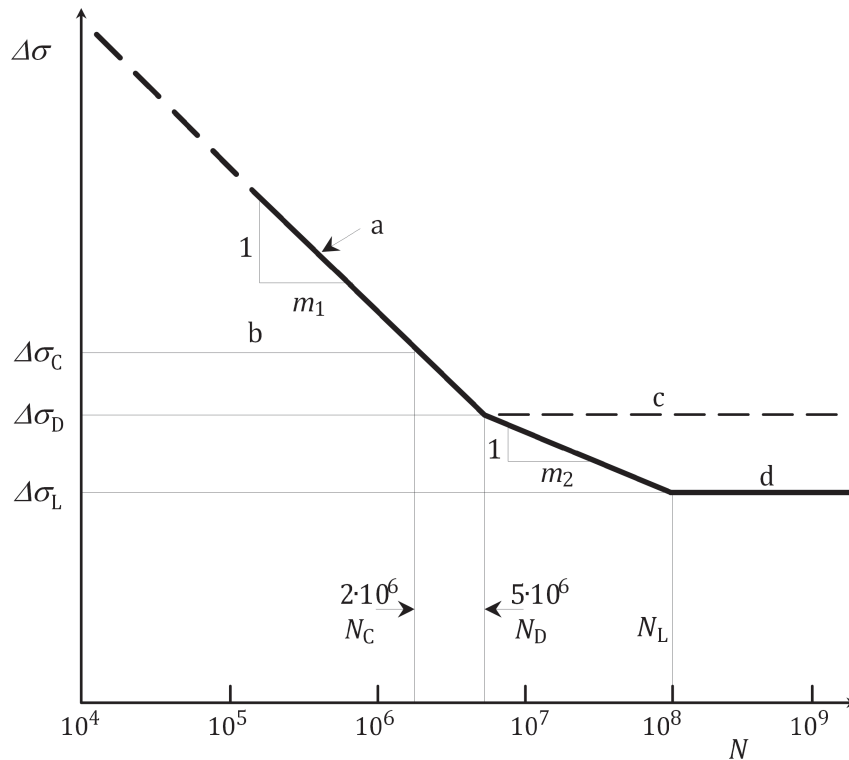
ANMERKUNG 5 Für Hinweise über Klebeverbindungen siehe Anhang E.

8.2 Ermüdungsfestigkeitsdaten

8.2.1 Klassifizierte Konstruktionsdetails

(1) Die verallgemeinerte Form der $\Delta\sigma$ - N -Beziehung sollte der in Bild 8.1 festgelegten entsprechen.

ANMERKUNG Bild 8.1 wird in logarithmischen Koordinaten aufgetragen, wobei die Ermüdungsfestigkeitskurve einem unteren Grenzwert im Abstand der zweifachen Standardabweichung vom Mittelwert aus entspricht.



Legende

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

Bild 8.1 — Ermüdungsfestigkeitskurve $\log\Delta\sigma$ - $\log N$

(2) Die Grundbeziehung für die Ermüdungsbemessung für eine Lebensdauer im Bereich zwischen 10^5 und 5×10^6 Schwingspielen sollte durch die Gleichung (8.1) definiert werden:

$$N_i = 2 \times 10^6 \left(\frac{\Delta\sigma_c}{\Delta\sigma_i} \frac{1}{\gamma_{Ff} \gamma_{Mf}} \right)^{m_1} \quad (8.1)$$

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, wobei Tabelle 8.1 standardisierte Werte zur Information angibt;
- $\Delta\sigma_i$ die konstante Spannungsschwingbreite für die Hauptspannungen im Konstruktionsdetail für n_i Schwingspiele;
- m_1 die Neigung der Ermüdungsfestigkeitskurve und ist abhängig von der Detailkategorie;
- γ_{Ff} der Teilsicherheitsbeiwert für Unsicherheiten im Belastungskollektiv und in der Verhaltensanalyse;
- γ_{Mf} der Teilsicherheitsbeiwert für Werkstoffe und Ausführung.

ANMERKUNG 1 Für Werte von γ_{Ff} siehe 4.4.

ANMERKUNG 2 Der Teilsicherheitsbeiwert γ_{Mf} nimmt die Werte nach L.6 für einen bestimmten Konstruktionsdetail-Typ und nach Anhang E für Klebeverbindungen an; sie gelten bei Übernahme der in Anhang J enthaltenen Ermüdungswiderstandsdaten, es sei denn im Nationalen Anhang sind andere Werte angegeben.

Tabelle 8.1 — 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
--

(3) Für N_D sollte unter bestimmten Umweltbedingungen 8.4 eingehalten werden.

(4) Die Grundbeziehung für die Ermüdungsbemessung für eine Lebensdauer im Bereich zwischen 5×10^6 und 10^8 Schwingspielen sollte durch die Gleichung (8.2) definiert werden:

$$N_i = 5 \times 10^6 \left(\frac{\Delta\sigma_c}{\Delta\sigma_i} \frac{1}{\gamma_{Ff}\gamma_{Mf}} \right)^{m_2} \left(\frac{2}{5} \right)^{\frac{m_2}{m_1}} \quad (8.2)$$

(5) Schwingspiele konstanter Spannungsamplitude, die unterhalb der Dauerfestigkeit bei konstanten Schwingbreiten, $\Delta\sigma_D$, bei 5×10^6 Schwingspielen auftreten (für nicht geschweißten Werkstoff wird diese bei 2×10^6 Schwingspielen angenommen), dürfen als nicht schädigend angenommen werden.

(6) Da gelegentliche Schwingspiele über der Dauerfestigkeit einen Rissfortschritt verursachen können, der zu Schwingspielen mit niedrigerer Amplitude führen kann, die schädigend werden, sollte im Fall von Spannungsschwingspielen mit variabler Amplitude die logarithmische Neigung der grundlegenden Ermüdungsfestigkeitskurve zwischen 5×10^6 und 10^8 Schwingspielen zu m_2 für die allgemeinen Einwirkbedingungen des Kollektivs 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 Spannungsschwingspiel unterhalb des Schwellenwertes der Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_L$, der bei 10^8 Schwingspielen angenommen wird, darf als nicht schädigend angenommen werden.

ANMERKUNG Für Spannungsschwingbreiten unterhalb von 10^5 Schwingspielen können Festigkeitswerte gemäß Bild 8.1 zu konservativ sein für bestimmte Konstruktionsdetails. Festlegungen der Ermüdungsbemessung für Lebensdauern unter 10^5 Schwingspielen können im Nationalen Anhang festgelegt werden. Hinweise werden in Anhang F gegeben.

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

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

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

(9) Für flache Bauteile unter Biegespannungen, wo $\Delta\sigma_1$ und $\Delta\sigma_2$ (siehe Bild 8.2) vom entgegengesetzten Vorzeichen sind, können die entsprechenden Ermüdungsspannungswerte für bestimmte Konstruktionsdetails um eine oder zwei Detailkategoriestufen nach Tabelle 8.1 für $t \leq 15$ mm erhöht werden.

ANMERKUNG 1 Der Nationale Anhang kann den Detail-Typ und den Dickenbereich, für welchen eine Erhöhung der Ermüdungsspannungswerte zulässig sein kann, sowie die Anzahl von Kategorien bestimmen.

ANMERKUNG 2 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 8.1 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.

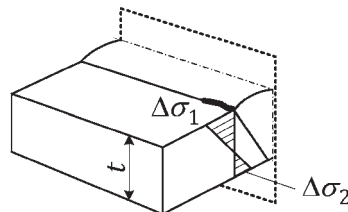


Bild 8.2 — Flaches Bauteil unter Biegespannungen

8.2.2 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 Hinweise zu Ermüdungsversuchen werden in Anhang C gegeben.

8.2.3 Klebeverbindungen

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

ANMERKUNG Hinweise zur Bemessung von Klebeverbindungen werden in Anhang E gegeben.

8.2.4 Bestimmung der Referenzwerte für die Hot-Spot-Ermüdungsfestigkeit

(1) Die Bemessungswerte für die Referenzwerte der Hot-Spot Spannung sollten mit der angewendeten Hot-Spot-Bemessungsmethode korreliert werden, da dies die berechneten Hot-Spot-Spannungen beeinflusst.

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

8.3 Einfluss der Mittelspannung

8.3.1 Allgemeines

(1) Da die in den Detailkategorie-Tabellen angegebenen Ermüdungsfestigkeitswerte hohen Zug-Mittelspannungs-Verhältnissen entsprechen, darf die Ermüdungslebensdauer unter bestimmten Bedingungen verlängert werden, wenn die Mittelspannung im Druckbereich oder im niedrigen Zugbereich ist.

ANMERKUNG Weitere Hinweise werden in Anhang G gegeben.

8.3.2 Grundwerkstoff und Verbindungen mit mechanischen Verbindungsmitteln

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

ANMERKUNG Für Hinweise siehe Anhang G.

8.3.3 Schweißverbindungen

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

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

ANMERKUNG Für Hinweise siehe Anhang G.

8.3.4 Klebeverbindungen

(1) Der Einfluss der Mittelspannung darf ohne versuchstechnische Bestätigung vernachlässigt werden.

8.3.5 Bereich der Kurzzeitfestigkeit

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

ANMERKUNG Für Hinweise siehe Anhang G.

8.3.6 Schwingspielzählung für die Berechnung des R -Verhältnisses

(1) Um maximale, minimale und Mittelspannungs-Werte für einzelne Schwingspiele eines Kollektivs zu ermitteln, sollte die Reservoir-Methode nach Anhang A, Bild A.2, angewendet werden.

8.4 Einfluss der Umgebung

(1) Für Kombinationen bestimmter Legierungen und Umweltbedingungen sollte die Stufe der einem Konstruktionsdetail zugeordneten Detailkategorie reduziert werden.

ANMERKUNG Für die in Anhang J behandelten Detailkategorien, gibt Tabelle 8.2 (NDP) die Anzahl von Detailkategorien (siehe auch Tabelle 8.1) an, um die sie herabgestuft werden können, entsprechend der Umweltbedingungen und Legierung.

(2) Die in diesem Dokument angegebenen Ermüdungsfestigkeits-Daten sollten im Falle von Außentemperaturen größer 65 °C oder größer 30 °C in Meeresumgebung nicht gelten, ohne dass ein effektiver Korrosionsschutz vorliegt.

Tabelle 8.2 (NDP) — Anzahl der Detailkategoriestufen, um die $\Delta\sigma_c$ entsprechend den Umweltbedingungen und der Legierung abgemindert werden sollte

Werkstoff			Umweltbedingungen				
Legierungstyp	Grund-zusammen-setzung	Schutzbewertungen (siehe EN 1999-1-1)	Atmosphärisch			Eingetaucht	
			C1-C4	C5	CX ^b	Im1	Im2 ^b
3xxx	AlMn	A	0	(P) ^a	0	0	0
5xxx	AlMg	A	0	(P) ^a	0	0	0
5xxx	AlMgMn	A	0	(P) ^a	0	0	1
6xxx	AlMgSi	B	0	(P) ^a	1	0	2
7xxx	AlZnMg	C	0	(P) ^a	2	1	3
ANMERKUNG Eine Herabstufung für Detailkategorien < 25 N/mm ² ist nicht erforderlich.							
^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 Schwingspiele erhöht werden.							

8.5 Techniken für die Erhöhung der Ermüdungsfestigkeit

(1) Techniken zur Erhöhung der Ermüdungsfestigkeit bestimmter geschweißter konstruktiver Details dürfen angewendet werden.

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

Anhang A (normativ)

Grundlagen der Berechnung der Ermüdungsfestigkeit

A.1 Anwendung dieses Anhangs

(1) Dieser normative Anhang enthält zusätzliche Festlegungen zu 4.1, 7.7 und 8.3.6 auf den Grundlagen der Berechnung der Ermüdungsfestigkeit.

A.2 Anwendungsbereich und Anwendungsfeld

(1) Dieser normative Anhang gibt Festlegungen zum Einfluss der Ermüdung auf die Bemessung, Versagensmechanismen, mögliche Stellen für Ermüdungsrisse, Bedingungen für die Ermüdungsanfälligkeit, schwingbruchsichere Bemessung und schadenstolerante Bemessung an.

A.3 Allgemeines

A.3.1 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.3.3).

(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:

- a) sollte eine realistische Voraussage der vollständigen Folge der Betriebslasten für die gesamte geplante Nutzungsdauer getroffen werden;
- b) sollte das elastische Verhalten des Tragwerks unter den vorausgesagten Lasten mit hoher Genauigkeit ermittelt werden;
- c) sollten die Bemessung konstruktiver Details und die Festlegung der Verfahren zur Herstellung und Qualitätslenkung mit erhöhter Aufmerksamkeit und Sorgfalt im Vergleich mit der Bemessung nach anderen Grenzzuständen durchgeführt werden, weil diese Themen einen wesentlichen Einfluss auf die Ermüdungsfestigkeit haben können und strenge Kontrolle erfordern.

ANMERKUNG Für Informationen über die Ausführungsanforderungen siehe EN 1090-3.

A.3.2 Versagensmechanismus

(1) Es sollte davon ausgegangen werden, dass Ermüdungsversagen üblicherweise an einem Punkt unter hoher Spannung (als Folge abrupter Änderungen der geometrischen Form, Zugeigenspannungen oder scharfer, rissähnlicher Fehlstellen) entsteht und dass Ermüdungsrisse stufenweise wachsen werden, wenn sich die Belastungen und Spannungen ändern, obwohl sie üblicherweise unter konstanter Last stabil bleiben; das führt zum Versagen, 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 und dass die Rissfortschrittsgeschwindigkeit exponentiell zunimmt, obwohl das Risswachstum oft anfangs langsam ist und Ermüdungsrisse für den größten Teil ihrer Lebensdauer meistens schwer als signifikant zu erkennen sind. Die damit verbundenen Probleme bei deren Entdeckung im Betrieb sollten zur Kenntnis genommen werden.

A.3.3 Mögliche Stellen für Ermüdungsrisse

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

- a) Schweißnahtübergänge und -wurzeln von Schmelz-Schweißnähten;
- b) maschinell bearbeitete Ecken;
- c) gestanzte oder gebohrte Löcher;
- d) mit Schere oder Säge hergestellte Kanten;
- e) Flächen unter hohem Kontaktdruck (Reibkorrosion);
- f) Wurzelpunkten bei Gewinden.

(2) Die folgenden Punkte sollten, soweit zutreffend, ebenfalls hinsichtlich der möglichen Entstehung von Ermüdungsrisen berücksichtigt werden:

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

A.3.4 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, Krane, 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, die zu einer großen Zahl von Spannungsschwingspielen während der geplanten Nutzungsdauer führt. Schlanke Tragwerke oder Bauteile mit niedrigen natürlichen Frequenzen neigen besonders zu Resonanz und zu einer Vergrößerung der dynamischen Spannung, auch wenn die statischen Spannungen bei der Bemessung niedrig sind. Tragwerke, die hauptsächlich Einwirkungen von Wind oder Wellen ausgesetzt sind und Tragwerke, die Maschinen stützen, sollten sorgfältig auf Resonanzeffekte überprüft werden;
- c) Schweißungen, weil einige häufig verwendete Schweißdetails niedrige Ermüdungsfestigkeit aufweisen. 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, weil komplizierte Verbindungen oft hohe Spannungskonzentrationen, als Folge der lokalen Steifigkeitsänderungen längs des Lastübertragungsweges aufweisen. 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 mit Konfidenz berechnet und entsprechende Anforderungen für die Herstellung und Inspektion sichergestellt werden können;

- e) bestimmte thermisch und chemisch geprägte Umgebungen, bei denen die Ermüdungsfestigkeit reduziert werden kann, wenn die Metalloberfläche nicht geschützt wird.

A.4 Schwingbruchsichere Bemessung

A.4.1 Allgemeines

(1) Das Konzept der schwingbruchsicheren Bemessung basiert auf der Berechnung des während der geplanten Nutzungsdauer 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.

ANMERKUNG 1 Dieser Ansatz bietet eine konservative Abschätzung der Ermüdungsfestigkeit und hängt in der Regel nicht von einer betrieblichen Inspektion auf Ermüdungsschäden ab.

ANMERKUNG 2 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 Rissentstehungsstellen, 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 geplante Nutzungsdauer abgeschätzt. Dieses Verfahren ist in A.4 beschrieben.

(3) Um einen ausreichenden Widerstand des Bauteils oder Tragwerks sicherzustellen, darf bei der Anwendung des Konzepts der schwingbruchsicheren Bemessung eine von zwei verschiedenen Methoden zugrunde gelegt werden. Diese Verfahren beruhen auf:

- a) der Berechnung der linearen Schadensakkumulation, siehe (4); bzw.
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.3.1(3) angegeben.

(4) Bei der schwingbruchsicheren Bemessung auf der Grundlage der Annahme der linearen Schadensakkumulation (Miner-Regel) sollte der Ermüdungsschaden D_L aller Spannungsschwingspiele die Bedingung in Gleichung (4.1) und Gleichung (4.2) erfüllen:

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

Dabei ist

$D_{L,d} = \sum n_i / N_i$, nach dem in A.4 angegebenen Verfahren berechnet;

oder

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

Dabei ist

$D_L = \sum n_i / N_i$, nach der in A.4 angegebenen Methode mit $\gamma_{Mf} = \gamma_{Ff} = 1,0$ berechnet.

ANMERKUNG Die Werte von D_{lim} sind die in L.6 angegebenen; dies gilt nur bei Übernahme der Ermüdungswiderstandsdaten aus Anhang J, es sei denn im Nationalen Anhang werden andere Werte angegeben.

(5) Falls die Bemessung auf dem Ansatz mit äquivalenten Spannungsschwingbreiten ($\Delta\sigma_{E,2e}$) beruht, sollte die Bedingung in Gleichung (4.3) nachgewiesen werden:

$$\frac{\gamma_{Ff} \Delta\sigma_{E,2e}}{\Delta\sigma_C / \gamma_{Mf}} \leq 1 \quad (A.3)$$

ANMERKUNG Die Werte von γ_{Mf} sind die in L.6 angegebenen, es sei denn im Nationalen Anhang werden andere Werte angegeben. Für γ_{Ff} siehe 4.4.

A.4.2 Voraussetzungen für die schwingbruchsichere Bemessung

(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 potentiellen 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.4.3 Bemessungsansatz

(1) Der grundsätzliche Ablauf sollte wie folgt sein (siehe Bild A.1):

- Ermittlung eines oberen Grenzwertes des Schätzwertes der Betriebslastenfolge für die geplante Nutzungsdauer des Tragwerks (siehe 4.3);
- Schätzung des resultierenden Spannung-Zeit-Verlaufes an der nachzuweisenden potentiellen Rissentstehungsstelle ab (siehe A.4.5);
- wo Nennspannungen vorkommen, Modifizierung des Spannung-Zeit-Verlaufes in jedem Bereich der geometrischen Spannungskonzentration, die noch nicht in der Detailkategorie enthalten ist, durch Anwendung eines geeigneten Spannungskonzentrationsbeiwerts (siehe 7.3.2);
- Reduzierung des Spannung-Zeit-Verlaufes auf eine äquivalente Anzahl von Schwingspielen (n_i) verschiedener Spannungsschwingbreiten $\Delta\sigma_i$ durch Anwendung eines Schwingspielzählverfahrens (siehe A.4.5);
- 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.4.5);
- Klassifizierung des Konstruktionsdetails in Übereinstimmung mit der festgelegten Reihe von Detailkategorien. Für die geeignete Detailkategorie und die entsprechende $\Delta\sigma$ - N Beziehung wird die zulässige Lebensdauer (N_i) für die Bemessungs-Spannungsschwingbreite ($\Delta\sigma_i$) bestimmt;

- g) Berechnung des Gesamtschadens $D_{L,d}$ aller Schwingspiele auf Basis linearer Schadensakkumulation nach Gleichung (A.4):

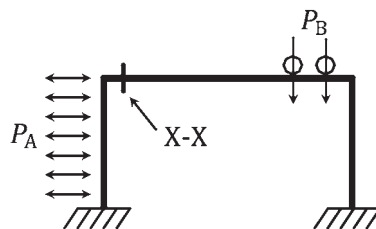
$$D_{L,d} = \sum \frac{n_i}{N_i} \quad (A.4)$$

- h) Berechnung der sicheren Lebensdauer T_s nach Gleichung (A.5):

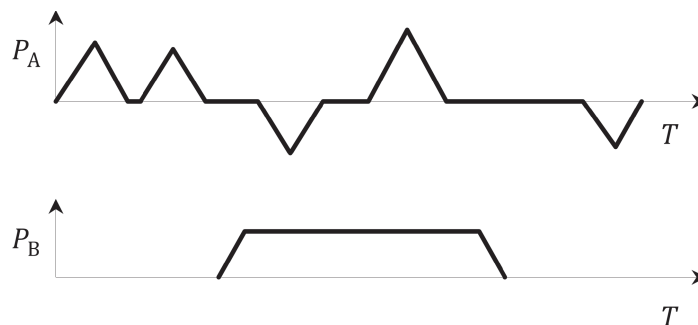
$$T_s = \frac{T_L}{D_{L,d}} \quad (A.5)$$

- 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; Anwendung des Konzepts der schadenstoleranten Bemessung, sofern geeignet, (siehe A.5).



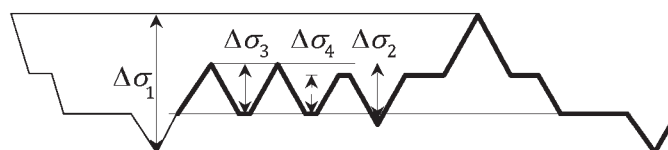
a) System, Konstruktionsdetail X-X und Belastung



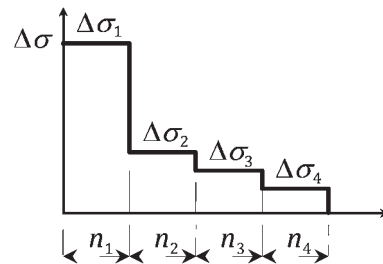
b) Typischer Belastungszyklus (n -mal wiederholt für die Bemessung). T = Zeit



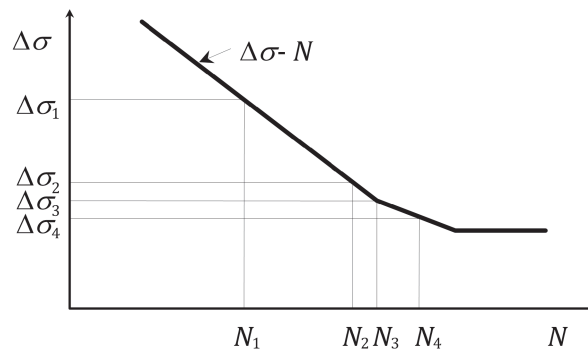
c) Spannungs-Zeit-Verlauf bei Detail X-X



d) Schwingspielzählung, Reservoir Methode



e) Spannungsschwingbreiten-Kollektiv



- f) N_i = Schwingspiele bis zum Versagen bei einem Spannungsschwingbreitenniveau einer Ermüdungsfestigkeitskurve für das Konstruktionsdetail X-X

$$\sum \left(\frac{n_i}{N_i} \right) = \frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \dots + \frac{n_n}{N_n} = D$$

- g) Schadensakkumulation, Miner-Regel

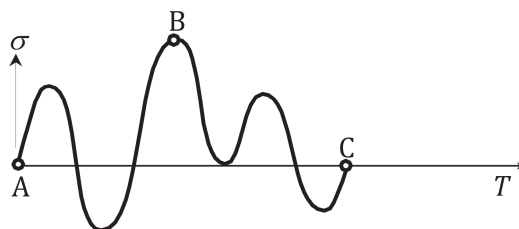
Bild A.1 — Ermüdungs-Bewertungs-Verfahren

A.4.4 Schwingspielzählung

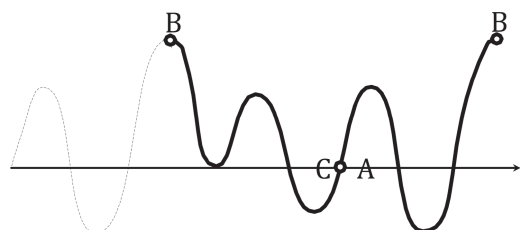
(1) Die Schwingspielzähl-Verfahren sollten zur Aufschlüsselung eines komplizierten Spannungs-Zeit-Verlaufs in ein einfacher handhabbares Schwingspielkollektiv mit Angabe der Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma$, Anzahl der Schwingspiele n und, falls notwendig, des R -Spannungsverhältnisses angewendet werden.

(2) Für kurze Spannungs-Zeit-Verläufe, wo sich einfache Einwirkungsereignisse mehrmals wiederholen, sollte die Reservoir-Methode angewendet werden. Sie ist leicht zu veranschaulichen und einfach zu benutzen (siehe Bild A.2). Wo lange Spannungs-Zeit-Verläufe benutzt werden, wie solche, die aus in realen Bauwerken gemessenen Beanspruchungen ermittelt wurden (siehe Anhang C), wird die Rainflow-Methode empfohlen.

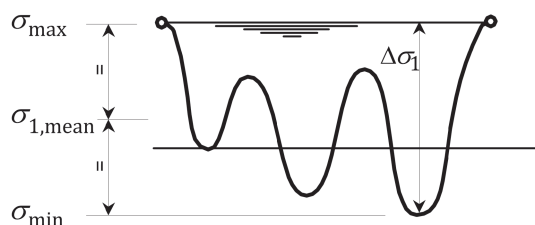
ANMERKUNG Beide Methoden sind zur Computeranalyse geeignet.



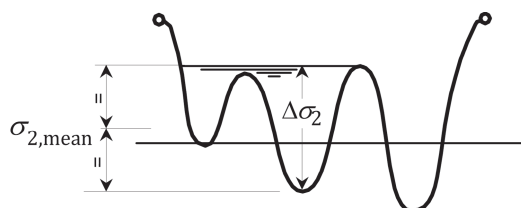
1. Schritt: Bestimmung des Spannungs-Zeit-Verlaufs des Belastungsereignisses. Ermittlung der Spitze B.



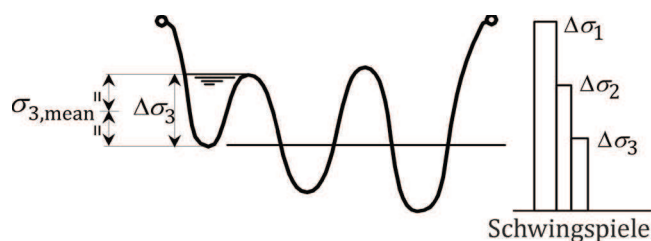
2. Schritt: Verschiebung des Abschnitts links von B nach rechts im Spannungs-Zeit-Verlauf.



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



4. Schritt: Ablassen des Wassers 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

- c) die Vorgehensweise in A.5.3 wird angewendet, 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.4 und L.5 zu entnehmen; es gilt nur bei Übernahme der in Anhang J enthaltenen Ermüdungswiderstandsdaten.

(2) Das Wartungsbuch sollte für jede potentielle Rissstelle die in 4.5.5 aufgelisteten Informationen spezifizieren.

A.5.2 Wahl der Tragwerksart und deren bauliche Durchbildung

(1) 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 übernommen 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.

A.5.3 Festlegung der Inspektionsstrategie bei schadenstoleranter Bemessung

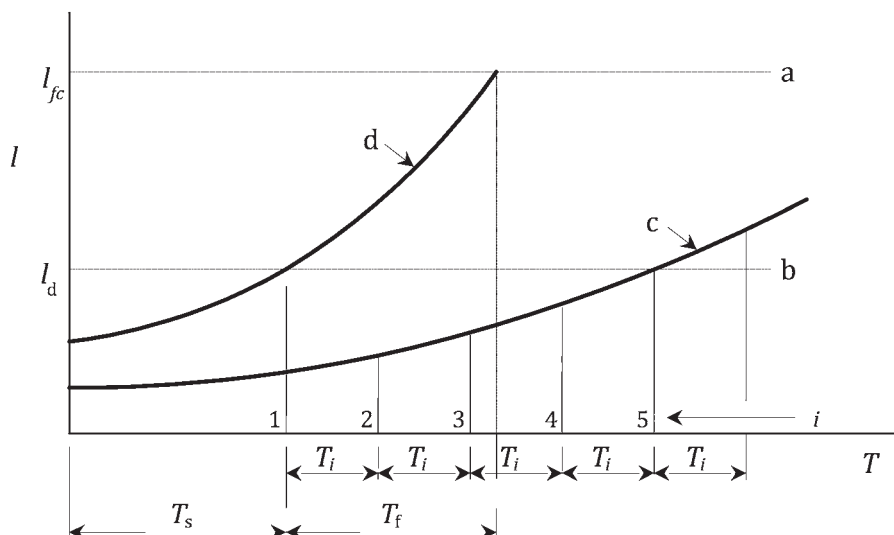
(1) An jeder potentiellen Rissentstehungsstelle, wo die nach Gleichung (A.5) berechnete sichere Lebensdauer T_s kleiner ist als die Bemessungslebensdauer T_L , sollte das Inspektionsintervall T_i berechnet werden.

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

(3) Das Wartungsbuch sollte festlegen, dass nachfolgende Inspektionen in regelmäßigen Intervallen T_i nach Gleichung (A.6) stattfinden:

$$T_i \leq 0,5 T_f \quad (\text{A.6})$$

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.



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

(4) 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.

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

Inspektionsmethode	Rissstelle		
	Ebene glatte Oberfläche	Raue 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.

(5) 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.